

# სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა

თენგიზ სამსონიძე

2019





## სარჩევი

1. შესავალი.....	6
2. უმაღლესი მათემატიკის საფუძვლები. ....	7
2.1. ფუნქცია.....	7
2.2. ზღვარი .....	7
2.3. ფუნქციის წარმოებული .....	8
2.4. ფუნქციის დიფერენციალი .....	10
2.5. ორი ცვლადის ფუნქციის დიფერენცირება. ....	11
2.6. განუსაზღვრავი ინტეგრალი. ....	11
2.7. განსაზღვრული ინტეგრალი. ....	13
2.8. დიფერენციალური განტოლებები. ....	14
2.9. ფურიეს რიგი. რთული ფუნქციის ჰარმონიული ანალიზი. ....	14
2.10. ვექტორული ალგებრის ელემენტები.....	14
<b>სამედიცინო ფიზიკის ელემენტები</b> .....	17
3. ფიზიკის საბაზისო ცნებები .....	17
3.1. სივრცე და მატერია. ....	17
3.2. დრო.....	24
3.3. ენერჯია. ....	26
4. ჰიდროდინამიკის ელემენტები.....	29
4.1. სითხის ძირითადი პარამეტრები. ....	29
4.2. არტერიული წნევის გაზომვა .....	30
4.3. ჰიდროდინამიკის ძირითადი ცნებები.....	30
4.4. ბერნულის განტოლება. ....	31
4.5. რეალური სითხეები.....	34
4.6. სისხლის დინება. ....	36
5. მექანიკური რხევები და ტალღები. ....	38
5.1. რხევითი პროცესები. ....	38
5.2. მარტივი რხევები. ....	38
5.3. რთული რხევების ჰარმონიული სპექტრი.....	42
5.4. ტალღები .....	43
5.5. აკუსტიკის ელემენტები. ....	44
5.6. თანაბრად ტემპერირებული მუსიკალური მწკრივი. ....	45
5.7. ვებერ – ფეხნერის კანონი. ....	47
5.8. ხმამაღლობა. ....	48
5.9. დოპლერის ეფექტი. ....	50
5.10. ინფრაბგერები.....	51
6. ბიომექანიკის ელემენტები.....	52
6.1. კუთხური სიჩქარე. ....	52
6.2. წრიული მოძრაობის დამახასიათებელი სიდიდეები. ....	53
6.3. ბერკეტი და ადამიანის საყრდენ მამოძრავებელი სისტემა .....	57
6.4. ცოცხალი ქსოვილების აგებულება. ....	59
7. ელექტრობა და მაგნეტიზმი. ....	61
7.1. საგნის ისტორია ზონური თეორია.....	61
7.2. ელექტრული ველი. პოლარიზება.....	63
7.3. მაგნიტური ველი.....	66
მაგნიტური მომენტი .....	69

7.4.	ელექტრული დენი.....	75
7.5.	ცვლადი დენი.....	76
7.6.	ელექტრული რხევები.....	77
7.7.	ელექტრომაგნიტური ველი. ელექტრომაგნიტური ტალღები.....	80
7.8.	ელექტრომაგნიტური ტალღების კლასიფიცირება.....	82
8.	ელექტრული მოვლენები უჯრედებსა და ქსოვილებში.....	84
8.1.	უჯრედებისა და ქსოვილების ელექტროგამტარობა.....	84
8.2.	ქსოვილების და უჯრედების გამტარობა ცვლადი დენის მიმართ.....	86
8.3.	გულის ელექტრული ველის რეგისტრაცია.....	89
8.4.	რენტგენოლოგია.....	92
8.5.	მაგნიტობიოლოგია და ბიომაგნეტიზმი.....	96
9.	ოპტიკის ელემენტები.....	103
9.1.	სინათლის ბუნება.....	103
9.2.	ოპტიკის ძირითადი ცნებები.....	104
9.3.	სინათლის დიფრაქცია.....	105
9.4.	პოლარიზებული სინათლე.....	106
9.5.	ჰოლოგრაფია.....	108
9.6.	ბოჭკოვანი ოპტიკა.....	109
9.7.	გეომეტრიული ოპტიკის ელემენტები.....	109
9.8.	მხედველობა.....	112
	ადამიანის თვალი. 2D პროექციის მირება.....	113
	ტომოგრაფია.....	116
	ინფორმაციის დამუშავება თავის ტვინში.....	119
9.9.	ოპტიკური ხელსაწყოები.....	121
	დიფრაქტომეტრი.....	121
	ოპტიკური მიკროსკოპი.....	123
	ელექტრონული მიკროსკოპი.....	127
	პოლარიმეტრი.....	133
10.	ატომური და კვანტური ფიზიკის ელემენტები.....	134
10.1.	ატომის აგებულება. ბორის თეორია.....	134
10.2.	კვანტური რიცხვები.....	136
10.3.	რადიაქტივობა.....	138
	ალფა-დაშლა.....	140
	ბეტა-დაშლა.....	141
	გამა-დაშლა.....	142
	რადიაქტიური დაშლის კანონი.....	143
	რადიაციის რეგისტრირების მოწყობილობები.....	145
	ძირითადი ცნებები.....	148
10.4.	ბირთვული-მაგნიტური რეზონანსი.....	149
10.5.	კვანტური თეორიის ძირითადი დებულებები.....	157
10.6.	ატომის კვანტურმექანიკური მოდელი.....	158
10.7.	ინდუცირებული გამოსხივება. ლაზერები.....	161
<b>ბიოფიზიკის ელემენტები</b> .....		163
11.	თერმოდინამიკა და ბიოლოგია.....	163
11.1.	ალბათობის თეორიის ელემენტები.....	163
11.2.	ზოგადი პრინციპები და ტერმინები.....	166

11.3.	თერმოდინამიკის პირველი კანონი.....	168
11.4.	თერმოდინამიკის მეორე კანონი.....	173
11.5.	თერმოდინამიკის მესამე კანონი.....	174
11.6.	სასარგებლო მუშაობა და თავისუფალი ენერჯია.....	176
11.7.	ღია სისტემების შინაგანი ენერჯია.....	182
11.8.	ღია სისტემების თერმოდინამიკა.....	187
11.9.	დისიპატიური თეორია.....	188
11.10.	დინამიური მოდელები და მდგომარეობის ალბათობა.....	195
12.	ცოცხალი სტრუქტურების ფორმირების საწყისები.....	196
12.1.	სიმეტრიის ოპერაციები.....	196
12.2.	შიდა სიმეტრიის ელემენტები.....	198
12.3.	სიმეტრიის პრინციპების განზოგადება.....	199
12.4.	მოლეკულური სტრუქტურების ფორმირების პრინციპები.....	202
	$\sigma$ და $\pi$ -მოლეკულური ორბიტალების წარმოქმნა.....	205
	შემაკავშირებელი და გამაფხვიერებელი ორბიტალები.....	207
	ტორსიონული კუთხეები და რამაჩანდრანის რუკები.....	209
	ატომური ორბიტალების ჰიბრიდიზაცია.....	212
12.5.	წყლის სტრუქტურა.....	217
12.6.	ბიომაკრომოლეკულების მონომერები.....	229
12.7.	დიფრაქციის თეორიის საფუძვლები.....	235
12.8.	სპირალური სტრუქტურების დიფრაქციული ანალიზი.....	244
12.9.	ელექტრონული მიკროფოტოსურათების ანალიზი.....	247
12.10.	სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია.....	252
13.	მაკრომოლეკულების სტრუქტურა.....	256
13.1.	სიცოცხლის მატარებელი სტრუქტურები.....	256
13.2.	სტრუქტურული ორგანიზების საფუძვლები.....	257
13.3.	მაკრომოლეკულების სტრუქტურული ორგანიზება.....	267
13.4.	ფერმენტები – ცილოვანი კატალიზატორები და რეგულატორები.....	276
13.5.	ფერმენტული კატალიზის თერმოდინამიკის ელემენტები.....	277
13.6.	მაკრომოლეკულის კვანტური ბიოფიზიკის ელემენტები.....	278
13.7.	მაკრომოლეკულის კონფორმაცია და ენერჯიის ტრანსპორტი.....	280
14.	რთული მაკრომოლეკულების ორგანიზება.....	282
14.1.	მეოთხეული და დომენური სტრუქტურა.....	282
14.2.	გლობულარული ცილები.....	283
	დიმერები.....	283
	ტრიმერები.....	284
	ტეტრამერები.....	284
	ჰექსამერები.....	289
	ოკტამერები.....	294
	12 სუბერთეულიანი ცილა.....	301
	პოლიფუნქციონალური ფერმენტული კომპლექსები.....	302
	14 სუბერთეულიანი ცილა.....	303
14.3.	სფერული და ჩხირისებრივი ვირუსების გარსი.....	304
14.4.	მიკრომილაკები.....	307
14.5.	მეოთხეული სტრუქტურის ფუნქციონალური დანიშნულება.....	318
15.	უჯრედების სტრუქტურის ბიოფიზიკური ასპექტი.....	320

15.1.	ზოგადი აღწერა. ....	320
15.2.	მიტოქონდრიების სტრუქტურა და ფუნქცია. ....	320
15.3.	მემბრანა და მისი სტრუქტურა. ....	322
15.4.	აქტიური ტრანსპორტი. ....	327
15.5.	უჯრედის ორგანიზება. ....	330
15.6.	ენერჯის მომარაგება უჯრედში. ....	331
15.7.	მიტჩელის თეორია. ....	335
15.8.	ბიოპოტენციალების წარმოშობა და გავრცელება. ....	340
15.9.	მემბრანული გამტარობის ფიზიკა. ....	348
15.10.	უჯრედის დიფერენციაცია და მორფოგენები. ....	360
15.11.	ნერვული იმპულსის გადაცემის ალტერნატიული მექანიზმები. ....	361
16.	კუნთის ბიოფიზიკა. ....	372
16.1.	კუნთის მუშაობის პრინციპები. ....	372
16.2.	F-აქტინის ძაფების სტრუქტურა. ....	375
16.3.	აქტინის და წვრილი ძაფების სტრუქტურა (ნორმა). ....	376
16.4.	აქტინის და წვრილი ძაფების სტრუქტურა (პათოლოგია 1) ....	379
16.5.	აქტინის და წვრილი ძაფების სტრუქტურა (პათოლოგია 2) ....	382
16.6.	დეკორირებული წვრილი ძაფის სტრუქტურა. ....	383
16.7.	წვრილი ძაფების პარაკრისტალების სტრუქტურა. ....	385
16.8.	სტრუქტურული განსხვავება ნორმასა და გნ-ის დროს. ....	388
16.9.	წვრილი ძაფები ერთგვაროვან ელექტრულ ველში. ....	392
16.10.	იუნგის მოდული და ელექტრული ველი. ....	395
16.11.	პრეპარატის ხსნარის დიელექტრიკული შეღწევადობა. ....	397
16.12.	წმ დინამიკა და მისი იუნგის მოდული ნორმაში და გნ-ის დროს. ....	399
16.13.	აქტინის პროტომერების კონფორმაციული მოქნილობა. ....	403
17.	ცოცხალი ორგანიზმი და მართვის სისტემები. ....	408
17.1.	მართვის სისტემები. ....	408
17.2.	ინფორმაცია. ....	409
17.3.	ინტელექტი. ....	416
17.4.	შინაგანი მართვა, ლე-შატილიეს პრინციპი. ....	420
17.5.	ეკზოგენური მართვა. ....	423
17.6.	მართვის ფიზიოლოგიური სისტემები. ....	424
17.7.	ორგანიზმის სითბური რეგულაცია. ....	426
17.8.	ადამიანის მიერ გენერირებული ფიზიკური ველები და ჰომეოსტაზი. ....	429
17.9.	კირლიანის ეფექტი და ბიოველი. ....	431
18.	კითხვები სამედიცინო ფიზიკაში და ბიოფიზიკაში. ....	435
18.1.	სამედიცინო ფიზიკა. ....	435
18.2.	ბიოფიზიკა. ....	436
19.	დანართი. ....	438
19.1.	ბერძნული ანბანის ასოები. ....	438
19.2.	ფიზიკური სიდიდეების საზომი ერთეულები. ....	438
19.3.	ზოგიერთი მუდმივი ფიზიკური სიდიდე. ....	441
19.4.	ათწილადი წინასართები. ....	441

# 1. შესავალი

ფიზიკა (ძვ.ბერძ. φυσική – ბუნება) — ცოდნის საბუნებამეტყველო დარგი: მეცნიერება, რომელიც შეისწავლის ბუნების უმარტივეს და ამავედროულად გამძავერთიიანებელ კანონებს მატერიისა მის სტრუქტურის და მოძრაობის შესახებ. თავდაპირველად ტერმინები „ფიზიკა“ და „ფილოსოფია“ სინონიმები იყვნენ, ვინაიდან ორივე საგანს საფუძვლად უდევს სამყაროს ფუნქციონირების კანონების ახსნის სწრაფვა. მაგრამ მე XVI საუკუნიდან, სამეცნიერო რევოლუციის<sup>1</sup> შედეგად, ფიზიკა ჩამოყალიბდა მეცნიერების დამოუკიდებელ დარგად. სამეცნიერო რევოლუციის პერიოდი ხასიათდება კვლევების მეცნიერული მეთოდის ჩამოყალიბებით, ფიზიკის გამოყოფას ნატურფილოსოფიური კონგლომერატიდან ცალკე მიმართულებაში და მის ცალკეულ ნაწილების განვითარებას: მექანიკის, ოპტიკის, თერმოდინამიკის და ა.შ.

ფიზიკის კანონები საფუძვლად უდევს ყველა ჩვენს გარშემო მიმდინარე მოვლენას როგორც მაკრო, აგრეთვე მიკრო სამყაროში, როგორც არაცოცხალ ასევე ცოცხალ მატერიაში მათ შორის ადამიანის სხეულში, რაც სწორედაც შეადგენს სამედიცინო ფიზიკის საგანს. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, სამედიცინო ფიზიკა შეისწავლის ჩვენი სხეულის ფიზიკას, რათა გამოავლინოს კანონები რომელთა მიხედვით მასში ვითარდება ყველა სასიცოცხლო პროცესი.

წინამდებარე კურსი შეიცავს სამედიცინო ფიზიკის ყველა ძირითად მიმართულებას: ჰიდროდინამიკის ელემენტებს, რხევებს და ტალღებს (აკუსტიკის ელემენტებით), ბიომექანიკას, ელექტრულ მოვლენებს და ელექტრომაგნიტურ ტალღებს, ოპტიკას, ატომურ ფიზიკას კვანტური მექანიკის ელემენტებით. ბიოფიზიკის კურსი იწყება თერმოდინამიკის ელემენტების განხილვით, როგორც ორგანიზმში მიმავალი ყველა ენერგეტიკული გარდაქმნების საფუძვლისა. შემდეგ, რათა გავერკვეთ სასიცოცხლო პროცესების განვითარებაში მოლეკულურ დონეზე, განხილულია მაკრომოლეკულების ბიოფიზიკა, ხოლო უჯრედულ დონეზე – უჯრედის ბიოფიზიკა. ორგანიზმში მიმავალი კონფორმაციული ცვლილებების და ასევე პათოლოგიური პროცესების წარმოშობის და განვითარების მაგალითისათვის განიხილება კუნთის შეკუმშვის ბიოფიზიკა სტრუქტურული ანალიზის ელემენტების ჩართვით. და ბოლოს, ინფორმაცია და ორგანიზმის მიერ მის მიღებასთან და დამუშავებასთან დაკავშირებული პრობლემები განიხილება თავში, რომელიც მიემდგნა მართვის სისტემებს. ამავე თავში ჩვენ ვეცდებით გავერკვიოთ თუ რას წარმოადგენს სასიცოცხლო პროცესების საფუძველი.

მაგრამ ამ ყველაფრის შესწავლისათვის საჭიროა მათემატიკური ანალიზის ელემენტების ცოდნა – ვინაიდან როგორც თქვა XIX საუკუნის ცნობილმა ფრანგმა ფიზიოლოგმა კლოდ ბერნარმა მათემატიკა წარმოადგენს უნივერსალურ ენას სხვადასხვა დარგის სპეციალისტების ურთიერთობისათვის. ამიტომაც, პირველ თავში მოყვანილია მათემატიკური ანალიზის ელემენტები გამარტივებულ, ადვილად გასაგებ ფორმატში.

---

<sup>1</sup> ისტორიკოსების უმეტესობა სამეცნიერო რევოლუციის დასაწყისად აღიარებს 1543წ. როდესაც ნ.კოპერნიკს ნიურბერგიდან ჩამოუტანეს მისი წიგნის „ციური სფეროების ბრუნვის შესახებ“ პირველი ეკზემპლარი.

## 2. უმაღლესი მათემატიკის საფუძვლები.

### 2.1. ფუნქცია

ცვლად სიდიდე  $y$ -ს ეწოდება ცვლადი სიდიდე  $x$ -ის (ანუ  $x$  არგუმენტის) ფუნქცია, თუ ნებისმიერ მის დასაშვებ მნიშვნელობას შეესაბამება განსაზღვრული და ერთადერთი  $y$ -ის მნიშვნელობა. არგუმენტის მნიშვნელობა დასაშვებია, თუ მისი ჩასმისას ფუნქცია იღებს ნამდვილ მნიშვნელობას. არგუმენტის დასაშვებ მნიშვნელობას ეწოდება ფუნქციის განსაზღვრის (ან არსებობის) არე.

ერთი არგუმენტის ფუნქციის მაგალითები:

$$y = f(x); y = F(x); y = \Psi(x)$$

ორი, სამი და ა.შ. არგუმენტის ფუნქციის მაგალითები:

$$z = f(x, y); u = \Psi(x, y, z)$$

ელემენტარული ფუნქციებია:

ალგებრაიული (ხარისხობრივი ( $y = x^a$ )).

ტრანსცედენტული: მაჩვენებრივი ( $y = a^x$ ) მათ შორის ექსპონენციური ( $y = e^x$ ), ლოგარითმიული ( $y = \log_a x$ ),

ტრიგონომეტრიული ( $y = \sin x, y = \cos x, \dots$ )

ელემენტარული ფუნქციებიდან იქმნება რთული ფუნქციები ( $y = f(u)$ , სადაც  $u = \varphi(x)$ )

### 2.2. ზღვარი

რიცხვის აბსოლუტურ მნიშვნელობას ან მოდულს უწოდებენ თვითონ სიდიდეს ნიშნის გარეშე. მაგ:  $|b| = b; |-b| = b$ ;

ცვლად სიდიდე  $\alpha$ -ს ეწოდება უსასრულო მცირე სიდიდე, თუ რომელიმე ცვლილებების შემდეგ ის თავისი აბსოლუტური მნიშვნელობით გახდა და შემდგომში დარჩა ნებისმიერი წინასწარ განსაზღვრული დადებითი რიცხვ  $\varepsilon$ -ზე ნაკლები  $|\alpha| < \varepsilon$ .

ცვლად სიდიდე  $\beta$ -ს ეწოდება უსასრულო დიდი სიდიდე, თუ რომელიმე ცვლილებების შემდეგ ის თავისი აბსოლუტური მნიშვნელობით გახდა და შემდგომში დარჩა ნებისმიერი წინასწარ განსაზღვრული დადებითი რიცხვ  $N$ -ზე დიდი  $|\beta| > N$ .

მუდმივი სიდიდე  $a$  წარმოადგენს ცვლადი სიდიდე  $x$ -ის ზვარს, თუ  $x$  თავის ცვლილებებისას მას ისე უახლოვდება, რომ მათ შორის სხვაობა  $\alpha = (x - a)$  თავისი აბსოლუტური მნიშვნელობით წარმოადგენს უსასრულო მცირე სიდიდეს  $|x - a| < \varepsilon$ .

ზღვარის აღნიშვნა:  $x \rightarrow a$  ან  $\lim x = a$

**ფუნქციის უწყვეტობის პირობები:**

ფუნქციის არგუმენტის ახლომდებარე მნიშვნელობათა სხვაობას  $\Delta x = x_2 - x_1$  არგუმენტის მატება ეწოდება.

ფუნქციის მატება ეწოდება მოყვანილი არგუმენტების სათანადოთ ფუნქციის მნიშვნელობების სხვაობას.

$$\Delta y = y_2 - y_1 \text{ სადაც } y_2 = f(x_2) = f(x_1 + \Delta x) \text{ ხოლო } y_1 = f(x_1)$$

ფუნქციის და არგუმენტის მატებას შეიძლება ჰქონდეს ( $\pm$ ) მნიშვნელობა.

ფუნქცია  $y = f(x)$  უწყვეტია არგუმენტის მოცემული მნიშვნელობისათვის, თუ არგუმენტის ( $x$ ) უსასრულო მცირე მატებას ( $\Delta x$ ) შეესაბამება ფუნქციის უსასრულოდ მცირე მატება ( $\Delta y$ ). ესე იგი თუ სრულდება პირობა:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta y = 0$$



ფუნქცია  $y = f(x)$  ზღვარს  $x = a$  წერტილში უწოდებენ იმ  $A$  რიცხვს, რომლისკენაც ის მიისწრაფის  $x$  არგუმენტის  $a$  მნიშვნელობამდე უსასრულო მიახლოებებისას.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow a} f(x) = A$$

სიდიდე  $A$  წარმოადგენს ფუნქცია  $y = f(x)$  ზღვარს  $a$  წერტილში თუ ნებისმიერი მცირე დადებითი  $\varepsilon$  რიცხვისათვის არსებობს ისეთი დადებითი რიცხვი  $\delta$  რომლისათვის სხვაობის  $(f(x) - A)$  აბსოლუტური მნიშვნელობა იქნება ნაკლები  $\varepsilon$ -ზე, თუ სხვაობის  $(x - a)$  აბსოლუტური მნიშვნელობა  $\delta$ -ზე ნაკლებია.

### 2.3. ფუნქციის წარმოებული

განვიხილოთ წრფივი მოძრაობის სიჩქარის გამოთვლა, რომლის მოძრაობის განტოლება გამოისახება ფუნქციით:  $s = f(t)$ , სადაც  $s$  განვლილი მანძილია, ხოლო  $t$  – დრო. თუ მოძრაობა თანაბარია:  $v = \Delta s / \Delta t$ , სადაც  $\Delta t$  ნებისმიერი დროის მონაკვეთია, ხოლო  $\Delta s$  ამ დროში გავლილი მანძილი.

თუ მოძრაობა არათანაბარია, მაშინ  $v$  სიდიდე ცვლადია. ამ შემთხვევაში  $\Delta t$  დროის მონაკვეთის შემცირება მოგვცემს სიჩქარის უფრო ზუსტ მნიშვნელობას. მყისიერი სიჩქარის დასადგენად საჭიროა განვიხილოთ ზღვარი

$$v_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s / \Delta t$$

წესი:

ფუნქციის და არგუმენტის მატების შეფარდების  $(\Delta y / \Delta x)$  ზღვარს მოცემულ წერტილში არგუმენტის მნიშვნელობის ნულისკენ სწრაფისას  $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta y / \Delta x$  ეწოდება ფუნქციის  $y=f(x)$  წარმოებული მოცემულ წერტილში. წარმოებულის აღნიშვნა:

$$y'; f'(x); \frac{dy}{dx}; \frac{df(x)}{dx}$$

ფუნქციის წარმოებული წარმოადგენს იმავე არგუმენტის რაღაც სხვა ფუნქციაც

$$y' = f'(x) = \Psi(x)^2$$

ფიზიკაში ფუნქცია და არგუმენტი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც სხვა და სხვა სიდიდეები: დრო, მანძილი, მოცულობა, წნევა, ტემპერატურა, პოტენციალი და ა.შ. უფრო ხშირად არგუმენტით მოგვევლინება დრო  $t$  ან მანძილი  $x$ , ესე იგი  $\frac{df(t)}{dt}$  ან  $\frac{df(x)}{dx}$ . პირველ შემთხვევაში წარმოებული განსაზღვრავს ფუნქციის ცვლილების სიჩქარეს პირდაპირი გაგებით, ხოლო მეორეში – ფუნქციის ცვლილების ხარისხს ერთი წერტილიდან მეორეში გარკვეულ მიმართულებით გადასვლისას (ჩვენ შემთხვევაში  $Ox$  ღერძის მიმართულებით). მეორე შემთხვევაში წარმოებულს ეწოდება გრადიენტი  $grad f(x) = \frac{df(x)}{dx}$ .

მოცემული ფუნქციის  $y=f(x)$  წარმოებულის გამოსათვლელათ საჭიროა:

1. მოიძებნოს  $\Delta y$  ფუნქციის ნამატი, როგორც სხვაობა მისი არგუმენტების სხვა და სხვა  $(x+\Delta x)$  და  $x$  მნიშვნელობებისას:  $\Delta y = f(x+\Delta x) - f(x)$ .
2. მოიძებნოს და გამარტივდეს შეფარდება  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$ .
3. მოიძებნოს მიღებული გამოსახულების ზღვარი  $\Delta x$  -ის ნულისკენ სწრაფისას:

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

<sup>2</sup> გამონაკლისს წარმოადგენს ექსპონენციური ფუნქცია, რომლის წარმოებულიც თვითონაა.

მაგალითი:

$$y = x^2 \text{ ვიპოვოდ } y'$$

$$\Delta y = f(x+\Delta x) - f(x) = (x+\Delta x)^2 - x^2 = x^2 + 2x\Delta x + \Delta x^2 - x^2 = 2x\Delta x + \Delta x^2$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{2x\Delta x + \Delta x^2}{\Delta x} = 2x + \Delta x$$

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (2x + \Delta x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} 2x + \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta x = 2x$$

მოცემული ფუნქციის წარმოებულის მოძებნას ეწოდება მისი დიფერენცირება.

ქვემოთ ჩამოთვლილია ფუნქციის დიფერენცირების წესები:

1.  $u$ ,  $v$  და  $w$  ფუნქციების ალგებრაული ჯამის წარმოებულ მათი წარმოებულების ჯამის ტოლია:  $(u + v + w)' = u' + v' + w'$
2. მუდმივი ნამრავლი შეიძლება გავიტანოთ წარმოების ნიშნის გარეთ:  $(kx)' = kx'$
3. ორი  $u$  და  $v$  ფუნქციების ნამრავლის წარმოებულ იქნება პირველი ფუნქციის მეორის წარმოებულზე და მეორე ფუნქციის პირველის წარმოებულზე ნამრავლების ჯამის ტოლი:  $(uv)' = vu' + uv'$
4. ორი ფუნქციის  $u$  და  $v$ -ს შეფარდების წარმოებულ ტოლია მეორე ფუნქციის ნამრავლის პირველი ფუნქციის წარმოებულზე მინუს პირველი ფუნქციის ნამრავლის მეორე ფუნქციის წარმოებულზე გაყოფილი მნიშვნელის კვადრატზე:

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{vu' - uv'}{v^2}$$

5. რთული ფუნქციის წარმოებულ  $y = f(\psi(x))$ , რომელიც შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს როგორც  $y = f(u)$ , სადაც  $u = \psi(x)$ , ტოლია ორი ფუნქციის ნამრავლისა:  $y = f(u)$ -ს წარმოებულის შუალედური ცვლადის მიმართ და ფუნქცია  $\psi(x)$  წარმოებულის ცვლადი  $x$ -ს მიმართ:  $y' = y'_u \cdot u'_x$  ანუ  $\frac{dy}{dx} = \left(\frac{dy}{du}\right)_{u=\psi(x)} \cdot \frac{du}{dx}$

ფუნქცია  $y = f(x)$  წარმოებულ მოცემულ წერტილში  $x = x_0$  რიცხობრივად ტოლია აღნიშნული ფუნქციის გრაფიკზე მოცემულ წერტილზე გამავალი წრფის დახრის კუთხის ტანგენსისა

დიფერენცირების ფორმულების ცხრილი

$C' = 0$	
$x' = 1$	$(kx)' = k$
$(x^n)' = n \cdot x^{n-1}$	
$(a^x)' = a^x \ln a$	$(a^{kx})' = ka^{kx} \ln a$
$(e^x)' = e^x$	$(e^{kx})' = ke^{kx}$
$(\ln x)' = \frac{1}{x}$	$(\lg x)' = \frac{1}{x \ln 10}$
$(\sin x)' = \cos x$	$(\sin kx)' = k \cdot \cos kx$
$(\cos x)' = -\sin x$	$(\cos kx)' = -k \cdot \sin kx$
$(u + v + w)' = u' + v' + w'$	
$(uv)' = vu' + uv'$	
$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{vu' - uv'}{v^2}$	
თუ $y = f(u)$ , სადაც $u = \psi(x)$	
$y' = y'_u \cdot u'_x$ ანუ $\frac{dy}{dx} = \left(\frac{dy}{du}\right)_{u=\psi(x)} \cdot \frac{du}{dx}$	

მოყვანილ ცხრილში გვხვდება აღნიშვნები:  $e \approx 2,718...$  – ნეპერის რიცხვი;  $\lg$  – ლოგარითმი 10-ის ფუძით;  $\ln$  – ნატურალური ლოგარითმი ( $e$ -ს ფუძით).

ვინაიდან  $y=f(x)$  ფუნქციის წარმოებული  $y'=f'(x)$  თვითონ ფუნქციაა შეიძლება გამოითვალოს მისი წარმოებული, რომელსაწ ეწოდება მოცემული ფუნქციის მეორე წარმოებული არგუმენტ  $x$ -ს მიმართ. მისი აღნიშვნაა

$$y''; \frac{d^2 y}{dx^2}; \frac{d^2 f(x)}{dx^2}$$

უფრო მაღალი რიგის წარმოებულები:

$$y'''; \frac{d^3 y}{dx^3} \text{ და ა.შ.}$$

მეორე წარმოებულის ფიზიკური არსი – წრფიული არათანაბარი მოძრაობის დროს აჩქარების მყისიერი მნიშვნელობა.

## 2.4. ფუნქციის დიფერენციალი

ფუნქციის წარმოებულის განმარტებიდან შეიძლება დავადგინოთ, რომ  $\Delta y/\Delta x$  შეფარდებიდან  $y'$  განსხვავდება უსასრულო მცირე სიდიდით  $\varepsilon$ :

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = y' + \varepsilon, \text{ საიდანაც } \Delta y = y' \Delta x + \varepsilon \Delta x$$

$y' \Delta x = f'(x) \Delta x$  – წარმოადგენს ფუნქცია  $\Delta y$  -ის მატების მთავარ ნაწილს და მას ეწოდება ფუნქციის დიფერენციალი. აღინიშნებ:  $dy$  ან  $df(x)$ . არგუმენტის  $\Delta x$  -ის მატებას ეწოდება არგუმენტის დიფერენციალი და აღინიშნება  $dx$ .

ფუნქციის წარმოებულის და არგუმენტის მატების ნამრავლს ეწოდება ფუნქციის დიფერენციალი.  $dy = y' \Delta x = y' dx$  აქედან  $y' = dy/dx$ . ესე იგი ფუნქციის წარმოებული  $x$  წერტილში წარმოადგენს ფუნქციის და არგუმენტის დიფერენციალების შეფარდებას.

განვიხილოთ ფუნქციის დიფერენციალის გამოყენება ექსპერიმენტის ცდომილების გამოსათვლელად. ხშირად ჩვენ გვინტერესებს გარკვეული ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული მონაცემების საფუძველზე, და არსებული ფორმულის საშუალებით (ფორმულაში წარმოდგენილია გარკვეული სიდიდეების ფუნქციონალური დამოკიდებულება ერთმანეთზე, ანუ პარამეტრებზე) მივიღოთ საბოლოო მონაცემები. ამრიგად, რადგან მონაცემების მიღებისას, სხვა და სხვა გაზომვების შედეგად გროვდება გაზომვის ცდომილება, საჭიროა მისი განსაზღვრა.

ვთქვათ საჭიროა გამოითვალოს ფუნქცი  $N = f(x)$  იმ პირობით, რომ  $x$  გაზომილია საშუალო  $\Delta x$  ცდომილებით.  $N$  ფუნქციის აბსოლუტური ცდომილების  $\Delta N_{abs}$  გამოსათვლელად გამოვიყენოთ დიფერენციალის ცნება:

$$\Delta N_{abs} \approx dN = N' dx = N' \Delta x$$

ფუნქციის განსაზღვრის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია არგუმენტის განსაზღვრის აბსოლუტური ცდომილების ნამრავლს მოცემული ფუნქციის წარმოებულზე.

ფუნქციის განსაზღვრის ფარდობით ცდომილებას  $\Delta N_{ფარ}$  ეწოდება აბსოლუტური ცდომილების  $\Delta N_{abs}$  შეფარდების მოდულს თვით ფუნქციის მნიშვნელობაზე  $N$ :

$$\Delta N_{ფარ} = \left| \frac{\Delta N_{abs}}{N} \right| \approx \left| \frac{dN}{N} \right| = \left| \frac{N'}{N} dx \right| = \left| \frac{N'}{N} \Delta x \right|$$

ანუ ფარდობითი ცდომილება ტოლია არგუმენტის აბსოლუტურ ცდომილების ნამრავლს ფუნქციის წარმოებულის და თვით ფუნქციის შეფარდებაზე.

მაგალითი:

კუბის წახნაგის ( $a = 2$  მ) გაზომვის ცდომილება შეადგენს  $\Delta a = 0,5$  სმ. ვიპოვოთ აბსოლუტური და ფარდობითი ცდომილებები კუბის მოცულობის გამოთვლისას ( $V$ ).

$$V = a^3 = 8; V' = 3a^2 = 12; \Delta a = 0,005;$$

$$\Delta V_{\text{abs}} = V' \Delta a = 12 \cdot 0,005 = 0,006 \text{ მ}^2;$$

$$\Delta V_{\text{გარ}} = \left| \frac{\Delta V_{\text{abs}}}{V} \right| = \left| \frac{V'}{V} \Delta a \right| = \frac{12}{8} 0,005 = 0,0075 \text{ ან } 0,75\%.$$

## 2.5. ორი ცვლადის ფუნქციის დიფერენცირება.

ცვლად  $z$ -ს ეწოდება ორი დამოუკიდებელი ცვლადის  $x$ -ის და  $y$ -ის ფუნქცია, თუ მათ ყოველ მნიშვნელობას შეესაბამება  $z$ -ის ერთი განსაზღვრული მნიშვნელობა. აღნიშვნა:  $z = f(x, y)$ . დასაშვებია  $x$  და  $y$  ისეთი მნიშვნელობები, რომლებსათვისაც  $z = f(x, y)$  წარმოადგენს ნამდვილ რიცხვს.

თუ ერთი, მაგალითად  $x$ , დამოუკიდებელი ცვლადი მიიღებს  $\Delta x$  ნამატს, მაშინ ფუნქცია მიიღებს ამ არგუმენტის მიხედვით კერძო ნამატს:

$$\Delta xz = f(x + \Delta x, y) - f(x, y)$$

ანალოგიურად  $y$  არგუმენტის მიმართ:  $\Delta yz = f(x, y + \Delta y) - f(x, y)$

ორი დამოუკიდებელი ცვლადის ფუნქციის ერთ-ერთი არგუმენტის მიმართ კერძო ნამატის შეფარდების ზღვარი არგუმენტის ნამატთან მისი ნულისკენ სწრაფვისას ეწოდება მოცემული ფუნქციის კერძო წარმოებულს ამ არგუმენტით.

არინიშნება:  $z'_x$  ან  $\frac{\partial z}{\partial x}$  და  $z'_y$  ან  $\frac{\partial z}{\partial y}$  ასე რომ

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta_x z}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} = z'_x = \frac{\partial z}{\partial x}$$

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta_y z}{\Delta y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y} = z'_y = \frac{\partial z}{\partial y}$$

მეორე რიგის კერძო წარმოებულს აღინიშნება ასე:

$$z''_{xx} \text{ ან } \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \text{ და } z''_{yy} \text{ ან } \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

მეორე რიგის კერძო წარმოებულის წარმოქმნა შეიძლება მეორე არგუმენტითაც. ამ შემთხვევაში მიიღება ე.წ. შერეული მეორე რიგის კერძო წარმოებულები:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right) \text{ და } \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right) \text{ უნდა აღინიშნოს, რომ } \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}$$

ფუნქცია  $z = f(x, y)$  ერთ ერთ არგუმენტით კერძო წარმოებულის ნამრავლი ამ არგუმენტის დიფერენციალზე წარმოადგენს მოცემული ფუნქციის დიფერენციალს ამ არგუმენტით. აღინიშნება:

$$dxz; z'_x dx; \text{ ან } \frac{\partial z}{\partial x} dx; \text{ და } dyz; z'_y dy; \text{ ან } \frac{\partial z}{\partial y} dy$$

ფუნქცია  $z = f(x, y)$  სრული დიფერენციალი მოიპოვება როგორც კერძო დიფერენციალების ჯამი ყოველი არგუმენტის მიმართ:

$$dz = d_x z + d_y z = z'_x dx + z'_y dy = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy$$

სრული დიფერენციალის მცნება გამოიყენება ცდომილების გამოთვლისას.

## 2.6. განუსაზღვრავი ინტეგრალი.

ფუნქციის დიფერენცირების დროს იხსნებოდა ამოცანა: მოცემული ფუნქციიდან  $y = F(x)$  ვიპოვოთ მისი წარმოებულს  $y' = F'(x) = f(x)$

ან დიფერენციალი:  $dy = F'(x)dx = f(x)dx$ .

უკუ ამოწანის ამოხსნას, ანუ ფუნქცია  $F(x)$ -ის პოვნა მისი წარმოებულიდან  $F'(x) = f(x)$  ან დიფერენციალიდან  $F'(x)dx = f(x)dx$ , ეწოდება ამ ფუნქციის ინტეგრირება:

$$\int f(x)dx = F(x) + C$$

სადაც  $C$  – ინტეგრირების მუდმივაა.

ქვემოთ მოყვანილია ინტეგრირების წესები:

- განუსაზღვრავი ინტეგრალის წარმოებული მასში შემავალი ფუნქციის ტოლია:

$$\left[ \int f(x)dx \right]' = f(x)$$

- განუსაზღვრავი ინტეგრალის დიფერენციალი მასში შემავალი გამოსახულებაა:

$$d \left[ \int f(x)dx \right] = f(x)dx$$

- ალგებრული ჯამის ინტეგრალი სათითაო წევრის ინტეგრალების ალგებრალური ჯამის ტოლია.
- მუდმივი ნამრავლი შეიძლება გატანილ იქნას ინტეგრირების ნიშნის გარეთ.
- რთული ფუნქციის ინტეგრირება ხდება ცვლადის ჩასმის ან შეცვლის მეთოდით

დაუშვათ მოცემულია რთული ფუნქცია  $y = f(\varphi(x))$  და საჭიროა მისი ინტეგრალის პოვნა:  $\int F(x)dx$ . შემოგვყავს შუალედური ცვლადი  $u = \varphi(x)$ , ჩავსვათ მას ფუნქციაში  $y = f(u)$ , ვცვლით ინტეგრირების ცვლადს  $x$ -იდან  $u$ -ზე და  $dx$ -იდან  $du$ -ზე რისთვისაც ვაწარმოებთ  $u$ -ს დიფერენცირებას  $x$ -ით:  $du = u' dx$  საიდანაც  $dx = du/u'$  შემდეგ

$$\int \frac{f(u)}{u'} du = F(u) + C \text{ ესვათ } u = \varphi(x), \text{ და საბოლოოდ } \int f(\varphi(x))dx = F(\varphi(x)) + C$$

მაგალითი:  $\int (3x - 1)^2 dx$

შემოგვყავს შუალედური ცვლადი  $u = 3x - 1$ ;  $du = 3dx$ ;  $dx = du/3$  ჩასმების შემდეგ:

$$\int (3x - 1)^2 dx = \int \frac{u^2}{3} du = \frac{1}{3} \int u^2 du = \frac{1}{3} \frac{u^3}{3} + C$$

$u$  –ს მნიშვნელობის ჩასმის შემდეგ:

$$\int (3x - 1)^2 dx = \frac{1}{9} (3x - 1)^2 + C$$

იმ შემთხვევაში თუ ინტეგრალის ქვეშ მყოფი გამოსახულება შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ნამრავლი  $u dv$ , სადაც  $u$  და  $v$  –  $x$ -ის ფუნქციებია და თუ ფუნქცია  $v$  მარტივად ინტეგრირდება შეიძლება გამოვიყენოთ ინტეგრირება ნაწილებად:  $\int u dv = uv - \int v du$

მაგალითი:

$$\int x \sin x dx$$

ვთქვათ  $u = x$ ,  $dv = \sin x dx$ , მაშინ  $du = dx$  და  $v = \int \sin x dx = -x \cos x$  (მუდმივა  $C$  ჩაიწერება საბოლოო პასუხში) ჩასმების შემდეგ მივიღებთ:

$$\int x \sin x dx = -x \cos x - \int (-\cos x) dx = -x \cos x + \sin x + C$$

პასუხი:  $y = \sin x - x \cos x + C$

ცხრილური ინტეგრალები

$$\int dx = x + C$$

$$\int y' dx = y + C$$

$$d \int y dx = y dx$$

$$\int A y dx = A \int y dx$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C \quad n \neq -1$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$$

$$\int a^{kx} dx = \frac{1}{k} \frac{a^{kx}}{\ln a} + C$$

$$\int e^x dx = e^x + C$$

$$\int e^{kx} dx = \frac{1}{k} e^{kx} + C$$

$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int \sin kx dx = -\frac{1}{k} \cos kx + C$$

$$\int \cos x dx = \sin x + C$$

$$\int \cos kx dx = \frac{1}{k} \sin kx + C$$

$$\int (u + v + w) dx = \int u dx + \int v dx + \int w dx$$

თუ  $y = f(u)$ , სადაც  $u = \varphi(x)$ , მაშინ

$$\int y dx = \int f(u) \frac{du}{u_x} = F(u) + C$$

ამონახსენში ჩაისმევა

ცვლადის

ჩასმის

$$u = \varphi(x)$$

მეთოდი (5)

$$\left. \begin{aligned} \int d(uv) &= \int v du + \int u dv \\ \int v du &= uv - \int u dv \end{aligned} \right\}$$

ინტეგრირება ნაწილებად (6)

## 2.7. განსაზღვრული ინტეგრალი.

ზევრ შემთხვევაში საჭირო ხდება მოცემული ფუნქციის  $y = f(x)$  არა მარტო პირველყოფადის  $F(x)$  პოვნა, არამეტ მისი ნამატის განსაზღვრაც არგუმენტის ცვლილებისას  $x = a$  დან  $x = b$  მდე. ამასთან იგულისხმებე, რომ  $y = f(x)$  უწყვეტია არგუმენტის ცვლილების ფარგლებში:  $a \leq x \leq b$ . ამ ამოცანის ამოხსნა შეიძლება განსაზღვრული ინტეგრალის მეშვეობით.

ამისთვის პირველ ყოვლისა საჭიროა მოცემული ფუნქციის  $y = f(x)$  პირველყოფადის  $F(x)$  მონახვა, შემდეგ კი მასში  $x$ -ის მნიშვნელობების ჩასმა  $x = a$  და  $x = b$ .

$\int_{x=a} f(x) dx = F(a) + C$  და  $\int_{x=b} f(x) dx = F(b) + C$  გამოვაკლოთ პირველი ტოლობა მეორეს (ამ დროს ინტეგრირების მუდმივა იკვეცება) და მივიღებთ

$$\int_{x=b} f(x) dx - \int_{x=a} f(x) dx = F(b) - F(a)$$

მოცემულ გამოსახულებას ჰქვია  $y = f(x)$  ფუნქციის განსაზღვრული ინტეგრალი. აღნიშვნა:

$$\int_a^b f(x) dx = \left. F(x) \right|_a^b = F(b) - F(a)$$

ამ გამოსახულებას ლეიბნიც – ნიუტონის ფორმულა ეწოდება.

განსაზღვრული ინტეგრალის გეომეტრიული არსი:

ფუნქცია  $y = f(x)$  -ის განსაზღვრული ინტეგრალი  $x = a$  და  $x = b$  საზღვრებში რიცხობრივად ტოლია არასწორხაზოვანი ტრაპეციის ფართისა, რომელიც შემოფარგლულია თვით ფუნქციის მრუდით, აბსცისის ღერძით და ორი ორდინატის პარალელური წრფით, რომლებიც კვეთენ აბსცისის ღერძს წერტილებში:  $x = a$  და  $x = b$ .

## 2.8. დიფერენციალური განტოლებები.

განტოლებას, რომელიც შეიცავს დამოუკიდებელ ცვლადს ( $x$ ), მოსაძებნ ფუნქციას  $y = f(x)$  და მის წარმოებულებს ( $y', y'', y''', \dots$ ) ეწოდება დიფერენციალური განტოლება ამ ფუნქციის მიმართ. თუ უცნობია ერთი ცვლადის ფუნქცია, დიფერენციალურ განტოლებას ჩვეულებრივი ეწოდება. დიფერენციალური განტოლებები განირჩევიან რიგებით. მაგალითად:

$y' + xy + 5 = 0$  – პირველი რიგის განტოლებაა

$y'' + 6y' + x = 0$  – მეორე რიგის განტოლება და ა.შ

განტოლება რომელშიც შედის ორი ან მეტი ცვლადის ფუნქცია ეწოდება დიფერენციალური განტოლება კერძო წარმოებულებში. განტოლების ამოხსნა მდგომარეობს მასში შემავალი უცნობი ფუნქციების პოვნაში.

## 2.9. ფურიეს რიგი. რთული ფუნქციის ჰარმონიული ანალიზი.

რიცხვების თანმიმდევრობას  $a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n + \dots$ , რომლის ყოველი წევრი დამოკიდებულია თავის რიგით ნომერზე ( $n$ ) რიცხობრივი რიგი ეწოდება.

ფუნქციების თანმიმდევრობა  $f_1(x) + f_2(x) + f_3(x) + \dots + f_n(x) + \dots$ , რომლის ყოველი წევრი დამოკიდებულია თავის რიგით ნომერზე ( $n$ ) ფუნქციონალური რიგი ეწოდება.

რიგები შეიძლება სხვა და სხვა ტიპის იყოს:

$1 + x + x^2 + x^3 + \dots + x^n + \dots$  – ხარისხობრივი რიგი

$a_1 \sin \omega_1 t + a_2 \sin \omega_2 t + \dots + a_n \sin \omega_n t + \dots$  – ტრიგონომეტრიული რიგი

ექსპონენციური ფუნქცია  $e^x$  შეიძლება დაიშალოს შემდეგ რიგში:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{1 \cdot 2} + \frac{x^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots + \frac{x^n}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n} + \dots$$

აქ  $1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n = n!$  ( $n$  – ფაქტორიალი)

თუ  $x = 1$ , მაშინ

$$e = 1 + 1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \frac{1}{n!} + \dots$$

პერიოდული ფუნქცია  $y = f(x)$ ,  $T = 2\pi\omega$  პერიოდით შეიძლება წარმოდგენილ იქნას ტრიგონომეტრიული რიგის სახით:

$$y = f(t) = a_0 + (a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t) + (a_2 \sin 2\omega t + b_2 \cos 2\omega t) + \dots + (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) + \dots$$

ან, სხვანაირად რომ წარმოვადგინოთ:

$$y = f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t)$$

სადაც  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ , და  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  – მუდმივი კოეფიციენტებია. ამ კოეფიციენტების გამოთვლის წესი შემოიღო მათემატიკოსმა ფურიემ. ამიტომაც ეს რიგი მის სახელს ატარებს.

რთული პერიოდული ფუნქციის დაშლა ფურიე რიგად ამ ფუნქციის ჰარმონიული ანალიზი ეწოდება.

## 2.10. ვექტორული ალგებრის ელემენტები.

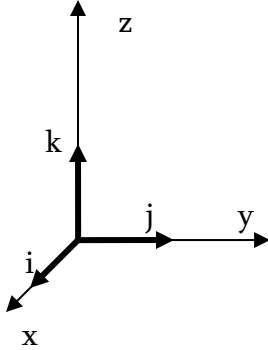
არსებობს სკალარული და ვექტორული სიდიდეები. სკალარს გააჩნია მხოლოდ რიცხვითი მნიშვნელობა, ხოლო ვექტორულ სიდიდეს გააჩნია როგორც რიცხვითი მნიშვნელობა ასევე მიმართულებაც. ვექტორების შეკრეფისას ხელმძღვანელობენ პარალელოგრამის წესით. ვექტორების გამრავლება შეიძლება ორი გზით: ვექტორული და

სკალარული ნამრავლის სახით. პირველ შემთხვევაში მიიღება ვექტორი, ხოლო მეორეში – სკალარი.

$$[\vec{a} \times \vec{b}] = ab \sin \alpha \quad \text{ვექტორული ნამრავლი}$$

$$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = ab \cos \alpha \quad \text{სკალარული ნამრავლი}$$

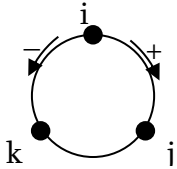
აქ  $\alpha$  – ვექტორებს შორის კუთხეა



შემოღებულია ერთიანი ვექტორები ( $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ ), რომელთა სიგრძე ერთის ტოლია, ხოლო მიმართულება ემთხვევა სათანადოდ  $x, y, z$  ღერძებს.

ვექტორული გამრავლების შედეგად მიიღება ვექტორი, რომელიც პერპენდიკულარულია იმ სიბრტყისა, რომელშიც იმყოფებიან გასამრავლი ვექტორები, მიმართულებას კი გამსაზღვრავს მარჯვენა ბურღის წესი. სკალარული გამრავლების შედეგად მიიღება სიდიდე, რომელიც რიცხობრივად გასამრავლი ვექტორებზე აგებული პარალელოგრამის ფართობის ტოლია. ცნობილია, რომ

$$[\vec{i} \times \vec{j}] = \vec{k}, \quad [\vec{j} \times \vec{k}] = \vec{i}, \quad [\vec{i} \times \vec{k}] = -\vec{j}, \quad [\vec{k} \times \vec{j}] = -\vec{i} \quad (1)$$



ანუ თუ ერთოვანი ვექტორების გამრავლებისას გადავდივართ საათის ისრის მიმართულებით (იხ. მარცხენა სურათი), ნამრავლის შედეგად მიიღება რიგით შემდეგი ერთოვანი ვექტორი (+) ნიშნით, თუ მიმართულება საპირისპიროა – მიიღება ვექტორი (-)

ნიშნით.

ამრიგად ვექტორული ფუნქციის ჩაწერა შეიძლება შემდეგნაირად:

$$\vec{f} = \vec{i}f_x + \vec{j}f_y + \vec{k}f_z$$

შემოვიღოთ  $\vec{\nabla}$  (ნაბლა) ოპერატორი:

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

მაშინ

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{f} &= [\vec{\nabla} \times \vec{f}] = \left( \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \right) \times (\vec{i}f_x + \vec{j}f_y + \vec{k}f_z) = \\ &= [\vec{i} \times \vec{i}] \frac{\partial f_x}{\partial x} + [\vec{i} \times \vec{j}] \frac{\partial f_y}{\partial y} + [\vec{i} \times \vec{k}] \frac{\partial f_z}{\partial z} + [\vec{j} \times \vec{i}] \frac{\partial f_x}{\partial y} + [\vec{j} \times \vec{j}] \frac{\partial f_y}{\partial y} + [\vec{j} \times \vec{k}] \frac{\partial f_z}{\partial y} + \\ &\quad + [\vec{k} \times \vec{i}] \frac{\partial f_x}{\partial z} + [\vec{k} \times \vec{j}] \frac{\partial f_y}{\partial z} + [\vec{k} \times \vec{k}] \frac{\partial f_z}{\partial z} \end{aligned}$$

აქ  $[\vec{i} \times \vec{i}] = 0$ ,  $[\vec{j} \times \vec{j}] = 0$ ,  $[\vec{k} \times \vec{k}] = 0$  ამიტომაც

$\text{rot} \vec{f} = [\vec{i} \times \vec{j}] \frac{\partial f_y}{\partial y} + [\vec{i} \times \vec{k}] \frac{\partial f_z}{\partial z} + [\vec{j} \times \vec{i}] \frac{\partial f_x}{\partial y} + [\vec{j} \times \vec{k}] \frac{\partial f_z}{\partial y} + [\vec{k} \times \vec{i}] \frac{\partial f_x}{\partial z} + [\vec{k} \times \vec{j}] \frac{\partial f_y}{\partial z}$  დავაჯგუფოთ და გამოვიყენოთ (1) პირობა ერთიანი მვექტორების გამრავლებისას, მაშინ მივიღებთ

$$\text{rot} \vec{f} = \vec{i} \left( \frac{\partial f_z}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \left( \frac{\partial f_x}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \left( \frac{\partial f_y}{\partial x} - \frac{\partial f_x}{\partial y} \right) = \vec{i}\varphi_x + \vec{j}\varphi_y + \vec{k}\varphi_z = \vec{\varphi}$$

აბ

$$\text{rot} \vec{f} = [\vec{\nabla} \times \vec{f}] = \vec{\varphi} = \vec{i}\varphi_x + \vec{j}\varphi_y + \vec{k}\varphi_z$$



სადაც  $\varphi_x = \left(\frac{\partial f_z}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial z}\right)_x$ ,  $\varphi_y = \left(\frac{\partial f_x}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial x}\right)_y$ ,  $\varphi_z = \left(\frac{\partial f_y}{\partial x} - \frac{\partial f_x}{\partial y}\right)_z$

საერთო შემთხვევისათვის შეიძლება ჩავწეროთ, რომ

$$\begin{cases} [\vec{a} \times \vec{b}] = \vec{c} \\ c_x = (a_y b_z - a_z b_y) \\ c_y = (a_z b_x - a_x b_z) \\ c_z = (a_x b_y - a_y b_x) \end{cases}$$

ამრიგათ შეიძლება ითქვას, რომ  $rot \vec{f}$  არის რაღაც  $\vec{\varphi}$  ვექტორი, რომელიც მდებარეობს  $\vec{f}$  ვექტორისადმი ორტოგონალურ<sup>3</sup> სიბრტყეში პერპენდიკულარულად მისი ფუძიდან გამომავალი რადიუსისა.  $\vec{\varphi}$  ვექტორის მიმართულება განისაზღვრება მარჯვენა ბურღის წესით. უნდა ითქვას, რომ კოორდინატთა ღერძები შეიძლება განლაგდეს ისეთნაირად, რომ  $\vec{f}$  ვექტორის მიმართულება ემთხვეოდეს ერთ ერთ საკოორდინატო ღერძს (მაგალითად z).

მაშინ,  $\varphi_x = \frac{\partial f_z}{\partial y}$ ,  $\varphi_y = \frac{\partial f_z}{\partial x}$  და  $rot \vec{f}$  განთავსებული იქნება (x, y) სიბრტყეში.

ერთოვანი ვექტორების სკალარული ნამრავლი

$$(\vec{i} \cdot \vec{i}) = 1 \text{ და } (\vec{i} \cdot \vec{j}) = (\vec{i} \cdot \vec{k}) = 0$$

განვიხილოთ სკალარული ნამრავლი ვექტორებისა  $\vec{\nabla}$  და  $\vec{f}$ .

$$\phi = div \vec{f} = (\vec{\nabla} \cdot \vec{f}) = \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}\right) \cdot (\vec{i} f_x + \vec{j} f_y + \vec{k} f_z) = \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z}$$

ამრიგათ შეიძლება ითქვას, რომ  $div \vec{f}$  არის რაღაც სკალარული ფუნქცია  $\phi$ , რომელიც გვიჩვენებს თუ როგორ იცვლება განხილული ვექტორი მთელ ნაკადში.

უნდა აღინიშნოს, რომ მართებულია ჩანაწერი

$$\vec{\nabla} f = grad f$$

ეს არის ვექტორი. ანუ ოპერატორ  $\vec{\nabla}$  მოქმედებით სკალარულ ფუნქციაზე  $f$  მივიღებთ ვექტორულ სიდიდეს  $grad f$ , მაგრამ ეს არ ნისნავს, რომ  $\vec{\nabla} = grad$ .

განვიხილოთ მაგალითი:

გვაქვს ფუნქცია  $f = e^{-r(x,y,z)} = e^{-\sqrt{x^2+y^2+z^2}}$  და გვინდა მისი  $rot$ -ის პოვნა.

$r$  – რაღაც წრის რადიუსია, ამიტომაც მისი წარმოდგენა კოორდინატებით შეიძლება მაჩვენებელში მოყვანილი ფესვის სახით. ჩვენ შეგვიწლია განვალაგოთ საკოორდინატო ღერძები ისეთ ნაირად, რომ ფუნქციის  $z$  მიმართულება ემთხვეოდეს  $z$  ღერძს. მაშინ ამ ფუნქციის ჩაწერა შეგვიძლია შემდეგნაირად  $f_z = e^{-\sqrt{x^2+y^2}}$  და შეიძლება ჩავწეროთ, რომ  $\varphi = rot f = \sqrt{\varphi_x^2 + \varphi_y^2}$

$$\varphi_x = \frac{\partial f_z}{\partial y} = -\frac{2ye^{-\sqrt{x^2+y^2}}}{2\sqrt{x^2+y^2}} = -y \frac{e^{-r}}{r}$$

$$\varphi_y = \frac{\partial f_z}{\partial x} = -\frac{2xe^{-\sqrt{x^2+y^2}}}{2\sqrt{x^2+y^2}} = -x \frac{e^{-r}}{r}$$

$$\varphi = \left(y^2 \frac{e^{-2r}}{r^2} + x^2 \frac{e^{-2r}}{r^2}\right)^{1/2} = \sqrt{\frac{r^2}{r^2} e^{-2r}} = e^{-r} \text{ ან } rot f = f$$

<sup>3</sup> ორტოგონალური სიბრტე – ეს არის ვექტორისადმი პერპენდიკულარული სიბრტყე.

# სამედიცინო ფიზიკის ელემენტები

## 3. ფიზიკის საბაზისო ცნებები

### 3.1. სივრცე და მატერია.

რა არის სამყაროს საწყისი? საიდან დაიწყო ყველაფერი, და საერთოდ ჰქონდა თუ არა ყველაფერს „დასაწყისი“ და თუ ჰქონდა, რა იყო თავიდან – ინფორმაცია, თუ სივრცე და მატერია? რას წარმოადგენენ სივრცე, მატერია, დრო? როგორ წარიმართება ურთიერთობა სამყაროს ცალკეულ ელემენტებს შორის?

ამ კითხვებზე პასუხის გაცემა არც თუ ისე ადვილია. აგრეთვე ძნელად გასაგებია თუ რა იყო საწყისი სივრცე თუ მატერია. მითუმეტეს რომ ერთი მეორეს გარეშე საერთოდ ყველანაირ აზრს არის მოკლებული. ამიტომაც, ათვლის წერტილი რომ გვექონდეს, დავიწყოთ მატერიის განმარტებიდან. ლენინის ცნობილ სიტყვებს თუ მივმართავთ: მატერია – ეს არის ობიექტური რეალობა, მოცემული ჩვენი შეგრძნებების სახით... (ვ.ი.ლენინი მატერიალიზმი და ემპირიოკრიტიციზმი – 1909). სხვათა შორის უფრო მართებული იქნებოდა შემდეგი განმარტება: მატერია – ეს არის ობიექტური რეალობა, რომელიც არსებობს ადამიანისაგან და მისი გრძნობებისაგან დამოუკიდებლად. საჭიროა დაისვას კიდევ რამდენიმე კითხვა თუმცა რიტორიკული. რამდენადაა აღნიშნული რეალობა ობიექტური და საკმარისია თუ არა ჩვენში არსებული გრძნობათა ორგანოები მისი სრული აღქმისათვის. რაც შეეხება ჩვენი რეალობის ობიექტურობას, აქ შეიძლება ბევრი ვიმსჯელოთ და ამ მსჯელობის საგნათ ვაქციოთ თუნდაც ეგრედ წოდებული პარალელური რეალობები, მაგრამ ეს ყველაფერი ცდება ჩვენი თემის ძირითად მიმართულებას და შეიძლება იქცეს ცალკე მსჯელობის საგანი. ეხლა რაც შეეხება ჩვენ გრძნობათა ორგანოებს – ადამიანს ის სულ ხუთი გააჩნია და ისიც არასრულყოფილი. ეს კი ნიშნავს, რომ ჩვენს მიერ მიღებული ინფორმაცია არასრულია და ზოგჯერ წინააღმდეგობრივიც კი (ამაზე ჩვენ ვისაუბრებთ კურსის ბოლოს). ასე მაგალითად, მხედველობის მეშვეობით ადამიანი აღიქვამს ელექტრომაგნიტურ ტალღებს საკმაოდ ვიწრო დიაპაზონში –  $3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$  ჰც (ეს იმ დროს, როდესაც მხოლოდ ოპტიკური დიაპაზონიც კი გაცილებით უფრო ფართოა –  $10^{12} - 10^{17}$  ჰც). ელექტრომაგნიტური რხევების დანარჩენი სიხშირეები, და მათგანაც არსებული მათში ინფორმაცია ჩვენი მხედველობისათვის მიუღწეველია (ანუ დაკარგულია). იგივე ითქმის ადამიანის დარჩენილ გრძნობების შესახებ (ადამიანის ინფორმაციის წყაროებზე). საინტერესოა, რომ ჩვენში შემოსული ვიზუალური ინფორმაცია სხვადასხვა მონაცემებით შეადგენს საერთოდ შემოსული ინფორმაციის 80-დან 90%-მდე.

ეხლა კი ვისაუბროთ იმაზე, თუ რა გზით ადამიანი აღიქვამს ინფორმაციას, როგორ აღწევს ის ჩვენს ტვინში სხვა და სხვა დეტექტორებიდან, სათავეში მყოფი გამლიზიანებლებისაგან დამოუკიდებლად. ეს იქნებიან ელექტრომაგნიტური ტალღები (ხილვა), ბგერების ტალღები, გაცილებით დაბალი სიხშირის დიაპაზონში  $2 \cdot 10 - 2 \cdot 10^4$  ჰც (სმენა), ქიმიური გამმლიზიანებლები – გემოს ორგანო (ენა); სუნი ყნოსვის ორგანო (ცხვირი), და ბოლოს ძალის უშუალო ზეგავლენა (შეხება) ადამიანის სხეულზე – შეხების გრძნობა (კანი). ნათელია, რომ აქ საჭიროა დეტექტორებთან (ანუ რეცეპტორებთან) ურთიერთობა. ამიტომაც უპრიანი იქნება ჯერ ჩვენს „რეალობაში“ მყოფ ძალებში გავერკვიოთ. ძალთა ქმედება ბუნებაში ვლინდება სისტემაში მყოფი ელემენტების ურთიერთობით.

სადღეისოდ ცნობილია ურთიერთობის 4 ტიპი:

1. გრავიტაციული ურთიერთობა;
2. ელექტრომაგნიტური ურთიერთობა;

3. ძლიერი ურთიერთობა;
4. სუსტი ურთიერთობა.

პირველი ორი პუნქტი ჩვენს მიერ განიხილება ცოტა მოგვიანებით. მაგრამ საჭიროა აღინიშნოს, რომ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების დასახასიათებლად საჭიროა სპეციალური ფუნდამენტალური ფიზიკური სიდიდის განმარტება, რომელიც ახასიათებს ამ ურთიერთობის სიძლიერეს და რომელსაც ჰქვია თხელი სტრუქტურის მუდმივა (თსმ). ეს მუდმივა (ჩვეულებრივ აღინიშნება როგორც  $\alpha$ ) იყო შემოღებული 1916 წ. გერმანელი ფიზიკოსის არნოლდ ზომერფელდის მიერ, როგორც რელატივისტური შესწორებების საზომი ატომური სპექტრალური ხაზების აღწერისას ბორის ატომის მოდელის ფარგლებში, ანუ ახასიათებს სპექტრალური ხაზების ე.წ. თხელ სტრუქტურას. ამიტომაც მას აგრეთვე ზომერფელდის მუდმივას ეძახიან.

თხელი სტრუქტურის მუდმივა წარმოადგენს ორი ენერჯის შეფარდებას:

1. ენერჯია რომელიც საჭიროა ორ ელექტრონს შორის არსებული ელექტროსტატიკური განზიდვის ძალის გადასალახად, მათი მიახლოვებისას უსასრულობიდან რაღაც  $s$  მანძილზე, და
2.  $2\pi s$  ტალღის სიგრძის მქონე ფოტონის ენერჯია.

თავის ცნობილ წიგნში „ატომის აგებულება და სპექტრები“, ზომერფელდმა შემოიღო  $\alpha$  როგორც ატომის ბორისებრივ მოდელში პირველ წრიულ ორბიტაზე მყოფი ელექტრონის სიჩქარის შეფარდება სინათლის სიჩქარესთან ვაკუუმში. ეს სიდიდე შემდგომში გამოიყენებოდა წყალბადისმაგვარი ატომების სპექტრალური ხაზების თხელი გახლეჩის გამოსათვლელათ.

ის განსაზღვრავს ატომის ენერგეტიკული დონეების ძალზე მცირე ცვლილების (გახლეჩის) ზომას, და, მამასადამე, თხელი სტრუქტურის, ანუ მის სპექტრალურ ხაზებში ვიწრო და ახლომდებარე სიხშირეების კრებულის წარმოქმნას, რომელიც  $\alpha^2$ -ის პროპორციულია. დონეების გახლეჩა მიმდინარეობს კვანტური ეფექტის გამო – ატომის ორი ელექტრონის ურთიერთობისას მათ შორის ვირტუალური (წარმოსახვადი) ფოტონების მიმოცვლის შედეგად, რომელიც მიმდინარეობს ენერჯის ცვლილებით.

თხელი სტრუქტურის მუდმივა – ესაა ფუნდამენტური კონსტანტების კომბინაციით წარმოქმნილი უგანზომილო სიდიდე. მისი რიცხობრივი მნიშვნელობა არაა დამოკიდებული ერთეულთა სისტემის არჩევაზე, და 2014 წლიდან რეკომენდირებულია შემდეგი მნიშვნელობის გამოყენება:

$$\alpha = 7,297\ 352\ 566\ 4(17) \cdot 10^{-3} = \frac{1}{137,035\ 999\ 139(31)}$$

ერთეულების საერთაშორისო SI სისტემაში ის შემდეგნაირად განისაზღვრება:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h c} = \left(\frac{e}{q_p}\right)^2 \quad (2)$$

სადაც,  $e$  – ელემენტალური ელექტრული მუხტი;  $\hbar = h/2\pi$  – დირაკის მუდმივა (ანუ, პლანკის მოყვანილი მუდმივა);  $c$  – სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში;  $\epsilon_0$  – ელექტრული მუდმივა;  $q_p$  – პლანკის მუხტი.

ერთეულების რაციონალურ სისტემაში<sup>4</sup> წარმოადგენს ელექტრული მუხტის ზომის ერთეულს.

<sup>4</sup> ერთეულების რაციონალური სისტემა – ფიზიკური ერთეულების სისტემა, რომელშიც ზომის ფიზიკური ერთეულებად გამოიყენება ფარდობითობის თეორიის და კვანტური მექანიკის ძირითადი კონსტანტები.

**პლანკის მუხტი** – ელექტრული მუხტის ზომის ერთეული პლანკის ერთეულების სისტემაში. პლანკის მუხტი განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$q_p = \sqrt{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \sqrt{2ch\epsilon_0} = \frac{e}{\sqrt{\alpha}} \quad (3)$$

რომ შევადაროთ ბოლო გარდაქმნები (2) და (3) გამოსახულებებში შეიძლება შევამჩნიოთ, რომ ისინი მსგავსები არიან. ეს იმიტომაც, რომ **თსმ** და **პლანკის მუხტი** შემოღებულია ერთი და იგივე ფუნდამენტური სიდიდეების გამოყენებით, რომლებიც ერთნაირად შეეფარდებიან ერთმანეთს.

ერთეულთა ზოგიერთ სისტემაში (მაგალითად, გაუსის ერთეულთა სისტემაში (CGS)), სადაც  $4\pi\epsilon_0 = 1$ , პლანკის მუხტი მარტივ სახეს იძენს:  $q_p = \sqrt{\hbar c}$ .

ერთეულთა SI სისტემაში:  $q_p = 1,87554 \cdot 10^{-18} \text{ C}$  (კულონი).

შედარებისათვის, ელემენტარული მუხტი:  $e = 1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

პლანკის მუხტი მოდულით დაახლოვებით 11,706 ჯერ აღემატება ელემენტალურ ელექტრონულ მუხტს (ელექტრონის მუხტს).

თხელი სტრუქტურის მუდმივა, წარმოადგენს რა უგანზომილო სიდიდეს, რომელიც არანაირად არ უკავშირდება ცნობილ მათემატიკურ კონსტანტებს, ყოველთვის წარმოადგენდა ფიზიკოსების აღტაცების ობიექტს. კვანტური ელექტროდინამიკის ერთ-ერთმა ფუძემდებელმა რიჩარდ ფეიმანმა დაარქვა მას „*ფიზიკის ერთ-ერთი უდიდესი დაწყველილი საიდუმლო: მაგიური რიცხვი, რომელიც გვევლინება ადამიანის მიერ რამე ნაირი გაგების გარეშე*“. იყო უამრავი მცდელობა რათა გამოესახათ **თსმ** სუფთა მათემატიკური სიდიდეების მეშვეობით ან და გამოეთვალათ რაიმე ფიზიკური მოსაზრებების საფუძველზე.

გერბერტ სტენლი ალენმა (*H. Stanley Allen*) თავის ნაშრომში შეასრულა ამ უგანზომილო სიდიდის კონსტრუირება ცხად ფორმატში და ეცადა დაეკავშირებინა იგი ელექტრონის მუხტის და მასის მნიშვნელობებთან; მან აგრეთვე მიუთითა მიახლოვებით შეფარდებაზე ელექტრონისა და პროტონის მასებს შორის –  $m/M \approx 10\alpha^2$ . 1922 წ. ჩაკაგოელმა ფიზიკოსმა არტურ ლუნმა (*Arthur C. Lunn*) ვარაუდის დონეზე გამოთქვა მოსაზრება, რომ **თსმ** რაღაცა სახით უკავსირდება ბირთვის მასის დეფექტს და ასევე განიხილა შესაძლო კავშირი გრავიტაციასთან შემდეგი შეფარდების მიხედვით:

$$\frac{Gm^2}{e^2} = \frac{\alpha^{17}}{2048\pi^6}$$

გარდა ამისა, მან შემოთავაზა  $\alpha$ -ს რამდენიმე სუფთა ალგებრული გამოსახულება:

$$\frac{\pi}{2^4 \cdot 3^3}, \quad \frac{7}{\pi^6}, \quad \frac{32}{45\pi^4}, \quad \frac{3^2}{5^3\pi^2}$$

სამყაროს პარამეტრებთან **თსმ**-ის დაკავშირების პირველი მცდელობა იყო გაკეთებული 1925 წელს ლივერპულელი ფიზიკოსის ჯეიმს რაისის (*James Rice*) მიერ, რომელიც იმყოფებოდა ასტროფიზიკოსი არტურ ედინგტონის ნაშრომების (ფარდობითი საერთო თეორიის ელექტრომაგნეტიზმთან გაერთიანების შესახებ) შთაბეჭდილების ქვეშ.

თავის პირველ ნაშრომში რეიმსი მივიდა გარკვეულ გამოსახულებასთან, რომელიც აკავშირებდა  $\alpha$ -ს სამყაროს სიმრუდის რადიუსთან ( $R$ ). მაგრამ მალე მან თავის გამოთვლებში აღმოაჩინა შეცდომა და შემდეგ ნაშრომში წარმოაჩინა შეფარდების გასწორებული ვარიანტი, სახელდობრ:

$$\frac{2\pi}{\alpha} = \frac{r^2}{6R\rho}$$

სადაც,  $r = \frac{e^2}{mc^2} \approx 2,4 \cdot 10^{-15} \text{მ}$  – ელექტრონის ელექტრომაგნიტური (კლასიკური) რადიუსი,  $\rho = \frac{2Gm}{c^2} \approx 1,35 \cdot 10^{-57} \text{მ}$  – ელექტრონის გრავიტაციული რადიუსი. გრავიტაციული რადიუსი (შვარცშილდის რადიუსი) წარმოადგენს სახასიათო რადიუსს, რომელიც მასის მქონე ნებისმიერი ფიზიკური სხეულისთვისაა განსაზღვრული. ესაა იმ სფეროს რადიუსი რომელზეც იქნებოდა ამ მასის მიერ შექმნილი მოვლენათა ჰორიზონტი<sup>5</sup> (ფარდობითობის საერთო თეორიის მიხედვით), თუ კი ეს მასა განაწილებულია სფერული სიმეტრიით, უძრავია (კერძოდ, არა ბრუნავს, თუმცა რადიალური მოძრაობები დასაშვებია), და მთლიანად იმყოფება ამ სფეროს ფარგლებში.

სამყაროს რადიუსისათვის  $R = 1,06 \times 10^{24} \text{მ}$  მნიშვნელობის მინიჭებისას რაისმა მიიღო  $\alpha^{-1} = 133$ .

რაც შეეხება მესამე პუნქტს – ძლიერ ურთიერთობას (ის ცნობილია ასევე ფერადი, ბირთვული ურთიერთობის სახელით), მასში მონაწილეობენ **კვარკები** (გააჩნიათ  $e/3$ -ის ჯერადი მუხტი, და არ შეინიშნება თავისუფალ მდგომარეობაში) და **გლუონები** (ძლიერი ურთიერთობის გადამტანი ელემენტალური უმასო ნაწილაკები). მეოთხე პუნქტი – სუსტი ურთიერთობა (აგრეთვე ბირთვული ურთიერთობა) – ეს ურთიერთობა, კერძოდ, ბირთვების  $\beta$ -დაშლაზეა პასუხისმგებელი (გამოსხივდება ელექტრონი და ანტინეიტრინო ( $\beta^-$ ), ან და პოზიტრონი და ნეიტრინო ( $\beta^+$ )), იმავდროული ერთ-ერთი ნეიტრონის პროტონად გადაქცევით. ეს პროცესი, რომელიც აღმოაჩინეს XX საუკუნის დასაწყისში თეორიულად განიმარტა მხოლოდ 1934 წ. ენრიკო ფერმიმ პირველმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ  $\beta$ -დაშლის დროს გამოსხივებული ბირთვიდან ელექტრონი და ანტინეიტრინო თავიდან მასში არ იმყოფებიან, ისინი იბადებიან დაშლის მომენტში. ურთიერთობის ამ ტიპს სუსტი ეწოდება იმის გამო, რომ ბირთვულ ურთიერთობაში მონაწილე სხვა ორი ურთიერთობა (ძლიერი და ელექტრომაგნიტური) ხასიათდება გაცილებით უფრო დიდი ინტენსივობით. მაგრამ ის გაცილებით ძლიერია მეოთხე ფუნდამენტალურ ურთიერთობაზე – გრავიტაციულზე.

თხელი სტრუქტურის მუდმივის ანალოგიური კონსტანტები გამოიყენება

ძლიერი  $\frac{g_s^2}{\hbar c} \approx 15$

სუსტი  $\lambda = \frac{g_F^2}{\hbar c} \left( \frac{\hbar}{m_p c} \right)^{-4} \approx 1,0 \times 10^{-10}$

და გრავიტაციული  $\frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-39}$  ძალების შეფასებისას.

აქ,  $g_s$  – ძლიერი ურთიერთობის „მუხტია“ (ყოველ კვარკს მიეწერება ელექტრული მუხტის ანალოგიური შეფერადებული მუხტი, და ძლიერ ურთიერთობას კვარკებს შორის ხშირად შეფერადებულ ურთიერთობას უწოდებენ);  $g_F$  – სუსტი ურთიერთობის ფერმის მუდმივა (პარამეტრი კვანტური ველის თეორიაში, რომელიც განსაზღვრავს ნაწილაკების ან ველების ურთიერთობის სიმძლიერეს (ინტენსივობას));  $m_p$  – პროტონის მასა;  $G$  – გრავიტაციული მუდმივა.

<sup>5</sup> მოვლენათა ჰორიზონტი – შეიძლება იყოს ორი: წარსულის მოვლენათა ჰორიზონტი და მომავლის მოვლენათა ჰორიზონტი. გამარტივებულად რომ ითქვას წარსულის მოვლენათა ჰორიზონტი ჰყოფს მოვლენებს უსასრულოდ დან ცვლადებზე და უცვლელზე, ხოლო მომავლის მოვლენათა ჰორიზონტი ჰყოფს მოვლენებს, რომლებზეც შეიძლება რაიმეს გაგება თუნდაც უსასრულოდ მომორებულ პერსპექტივაში და მოვლენებზე, რომელზეც ვერაფერს ვერ შევიცნობთ.

მოდით კვლავ დაუბრუნდეთ ჩვენს მიერ რეალობის აღქმას, ანუ ადამიანის მგრძობიანობის ორგანოებს. ნათელია, რომ ხილვაზე პასუხისმგებელია ელექტრო-მაგნიტური ურთიერთობა; მგრძობიანობის დანარჩენი ორგანოები კი – უკვე გრავიტაციული და ნაწილობრივ ელექტრომაგნიტური (ქიმიური) ურთიერთობების დარჩენილი ორი ტიპი ჩვენს მიერ აღქმულ რეალობასთან კავშირი არ გააჩნია, რაც არ უშლის ფუნდამენტალურები დარჩენენ.

რაც ეხება თვით მატერიას, ცნობილია მისი ორი სახე – ნივთიერება და ველი. ველები ფორმირდება ურთიერთობის ოთხივე სახით. ნივთიერების შესახებ შეიძლება ითქვას, რომ ცნობილია მისი არსებობის სამი ფორმა (სამი ფაზა): მყარი, თხევადი და აირისებრი. მყარი სხეული ინარჩუნებს ფორმას და ზომას საკმაოდ დიდი ძალების ზეგავლენის პირობებშიც კი. სითხე იღებს იმ ჭურჭლის ფორმას, რომელშიც ის იმყოფება. ამავე დროს სითხის მოცულობა ისევე როგორც მყარი სხეულის მოცულობა ძნელად თუ შეიცვლება. რაც შეეხება აირს, მას არც ფიქსირებული ფორმა გააჩნია და არც ფიქსირებული მოცულობა. მის მოცულობას განაპირობებს ჭურჭლის მოცულობა რომელშიც ის იმყოფება. იმის გამო, რომ სითხე და აირი არ ინარჩუნებენ ფორმას, მათ გააჩნია დინების უნარი. ცნობილია მატერიას კიდევ ერთი ფორმა, რომელსაც პლაზმა ეწოდება. პლაზმა – ეს იონიზირებული აირია, რომელიც შეიცავს თავისუფალ ელექტრონებსა და იონებს (დადებითსა და უარყოფითს). უფრო ფართო გაგებით, პლაზმა შეიძლება შედგებოდეს ნებისმიერ დამუხტულ ნაწილაკებისაგან (მაგალითად კვარც-გლონური პლაზმა). პლაზმის მდგომარეობის დახასიათება შეიძლება როგორც კვაზინეიტრალურის, ანუ ჯამური მუხტი ნებისმიერ თავად სისტემასთან შედარებით მცირე მოცულობაში, ნულის ტოლია. სწორედ ეს განასხვავებს პლაზმას სხვა დამუხტული ნაწილაკების შემცავი სისტემებისაგან (მაგალითად ელექტრონული ან იონური კონებისაგან). ვინაიდან აირის გაცხელებისას ძალზე მაღალ ტემპერატურამდე ის გადადის პლაზმაში, პლაზმას დაარქვენ ნივთიერების მეოთხე აგრეგატული მდგომარეობა.

მატერიის ან ნივთიერების რაოდენობას განსაზღვრავს ფიზიკური პარამეტრი სახელად მასა ( $m$ ). მაგრამ, მკაცრი გაგებით მასა არ შეიძლება გაუტოლოთ ნივთიერების რაოდენობას. მასა ეს ფიზიკური სიდიდეა რომელიც განსაზღვრავს სხეულის ინერციულ (სხეულის ინერტულობის საზომი) და გრავიტაციულ თვისებებს ისეთ პირობებში, როდესაც მისი მოძრაობის სიჩქარე გაცილებით მცირეა სინათლის სიჩქარესთან შედარებით.

უკავშირდება რა მექანიკის ისეთ ცნებებს როგორცაა „ენერჯია“ ( $E = mc^2$ ) და „იმპულსი“ ( $p = mv$ ) მასა ბუნებაში ვლინდება ორი თვისობრივად განსხვავებული სახით, რაც საშუალებას იძლევა გავყოთ ის ორ განსხვავებულ ცნებად:

- **ინერტული მასა** – ახასიათებს სხეულების ინერტულობას და ფიგურირებს ნიუტონის მეორე კანონის გამოსახულებაში: თუ მოცემული ძალა ინერციულ ათვლის სისტემაში<sup>6</sup> ერთნაირად აჩქარებს სხვადასხვა სხეულებს, მათ მიაწერენ ერთსა და იგივე მასას ( $F = ma$ );
- **გრავიტაციული მასა** (პასიური და აქტიური) – გვიჩვენებს თუ რა ძალით სხეული ურთიერთობს გარე მიზიდულობის ველებთან, და რა გრავიტაციულ ველს ჰქმნის

<sup>6</sup> ინერციული ათვლის სისტემა — ათვლის სისტემა, რომელშიც ყველა თავისუფალი სხეული მოძრაობს წრფიულად და თანაბრად, ან იმყოფება მოსვენებულ მდგომარეობაში. ეკვივალენტური იქნება შემდეგი ფორმულირება, რომელსაც იყენებენ თეორიულ მექანიკაში: „ინერციულს უწოდებენ ათვლის სისტემას რომლის მიმართაც სივრცე ერთგვაროვანი და იზოტროპულია, ხოლო დრო – ერთგვაროვანი“. ნიუტონის კანონები და აგრეთვე ყველა დანარჩენი დინამიკის აქსიომა კლასიკურ მექანიკაში, ფორმულირდება ინერციულ ათვლის სისტემებთან მიმართებაში.

თვითონ. ეს მასა შედის მსოფლიო მიზიდულობის კანონში ( $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ ) და საფუძვლად უდევს მასის გაზომვას აწონით ( $P = mg$ ). ვინაიდან სხეულის წონა გარკვეულ მიახლოებაში (თუ მხედველობაში არ მივიღებთ დედამიწის თავის ღერძის გარშემო ბრუნვის შედეგად აღძრულ ცენტრისკენულ აჩქარებას) შეიძლება განვიხილოთ როგორც ძალა რომლითაც  $M$  მასის დედამიწა იზიდავს  $m$  მასის სხეულს და ჩავწეროთ შემდეგი შეფარდება:

$$mg = G \frac{Mm}{R^2}$$

საიდანაც

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

აქ  $R$  – დედამიწის რადიუსია (6371 კმ),  $G$  – გრავიტაციული მუდმივა რომელიც ტოლია  $6,67408(31) \cdot 10^{-11} \text{ მ}^3 \cdot \text{წმ}^{-2} \cdot \text{კგ}^{-1}$ .

მაგრამ ექსპერიმენტალურად, მაღალი სიზუსტით დადგინდა გრავიტაციული და ინერტიული მასების პროპორციულობა და ერთეულების შერჩევით თეორიაში ისინი გაუტოლეს ერთმანეთს. ამიტომაც, თუ საქმე არ ეხება განსაკუთრებულ „ახალ ფიზიკას“<sup>7</sup>, მიღებულია ოპელირება ტერმინით „მასა“,  $m$  აღნიშვნის გამოვიყენოთ სპეციალური დაზუსტების გარეშე.

ორი მასის პროპორციულობის პირველი შემოწმება ჩაატარა გალილეემ, რომელიც სწავლობდა სხეულების თავისუფალ ვარდნას. მისი ცდების თანახმად ყველა სხეული მათი მასის და მასალის მიუხედავად ვარდება ერთი და იგივე აჩქარებით. ეხლა ამ ცდების ახსნა შეიძლება იქიდან გამომდინარე, რომ უფრო მასიურ სხეულზე მოქმედი გაზრდილი გრავიტაციული ძალის კომპენსირება ხდება სხეულის ინერციული თვისებების ზრდის ხარჯზე. მოგვიანებით, ინერციული და გრავიტაციული მასების პროპორციულობას მიაქცია ყურადღება ნიუტონმა. მან დაამტკიცა, რომ პროპორციულობა ვლინდება 0,1% ფარგლებში.

საერთაშორისო ერთეულების სისტემაში (SI) მასა იზომება კილოგრამებში. ატომურ ფიზიკასა და ქიმიაში მიღებულია მასის მიყვანა ფარდობით ატომურ მასასთან – მასის ატომურ ერთეულთან (მ.ა.ე.), მყარი სხეულის ფიზიკაში – ელექტრონის მასასთან (ერთეულების ატომური სისტემა), ელემენტალური ნაწილაკების ფიზიკაში მასა იზომება ელექტრონვოლტებში (ეე). ერთი ეე იმ ენერჯის ტოლია, რომელიც საჭიროა ელემენტარული მუხტის გადასატანათ ელექტროსტატიკურ ველში ერთი წერტილიდან მეორეში, თუ პოტენციალთა სხვაობა მათ შორის 1 ვ შეადგენს. ვინაიდან მუხტის გადატანისას სრულდება მუშაობა  $A = qU$  (სადაც  $U$  – პოტენციალთა სხვაობაა), ხოლო ელემენტარული მუხტი შეადგენს  $1,602 \cdot 10^{-19}$  კულ, მაშინ 1 ეე =  $1,602 \cdot 10^{-19}$ ჯ. მეცნიერებაში გამოყენებული ამ ერთეულების გარდა, ისტორიულად არსებობს მასის საზომი სხვა და სხვა ერთეული რომლებითაც ეხლაც ფართოდ სარგებლობენ: ფუნტი, უნცია, კარატი, ტონა და ასე შემდეგ. ასტრონომიაში მასების შედარებისას სარგებლობენ მზის მასას.

მასა გააჩნია ყველა მაკროსკოპულ ობიექტს, საყოფაცხოვრებო საგნებს და ასევე ელემენტარული ნაწილაკების უმრავლესობას (ელექტრონები, ნეიტრონები და სხვა)

<sup>7</sup> სტანდარტული მოდელის ფარგლებს გარეთ მყოფი ფიზიკა (სხვანაირად მას უწოდებენ ახალ ფიზიკას) მიეკუთვნება თეორიულ განხილვებს, რომლებიც აუცილებელია რათა აიხსნას სტანდარტული მოდელის ხარვეზები, ასეთი როგორცაა მასის წარმოქმნა, ნეიტრონული ოსცილაციები, მატერიის და ანტიმატერიის ასიმეტრია, შავი მატერიის და ბნელი ენერჯის წარმოშობა.

თუმცა უკანასკნელთა შორის არიან უმასო ნაწილაკებიც (მაგალითად ფოტონები). მასის არსებობა ელემენტარულ ნაწილაკებში აიხსნება მათი ურთიერთობით ჰიქსის ველთან<sup>8</sup>.

განვიხილოთ თუ რა სურათი წარმოგვიდგება ათვლის სისტემის მოძრაობისას სინათლის სიჩქარესთან მიახლოვებული სიჩქარით (რელატივისტური შემთხვევა).

თუ ინერციული ათვლის სისტემა (იას)  $K'$  მოძრაობს იას  $K$ -ს მიმართ მუდმივი სიჩქარით  $x$  ღერძის გასწვრივ, ხოლო სივრცული კოორდინატების სათავეები ორივე სისტემაში დროის საწყის მომენტში ემთხვევა ერთმანეთს, მაშინ ლორენცის გარდაქმნები (პირდაპირი) გამოიყურება ასეთნაირად:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\end{aligned}$$

სადაც  $c$  – სინათლის სიჩქარეა, შტრიხიანი სიდიდეები აღებულია  $K'$  სისტემაში, ხოლო უშტრიხო –  $K$  სისტემაში.

ლორენცის გარდაქმნებიდან გამომდინარე შეიძლება წარმოვიდგინოთ თუ რისი ტოლი იქნება მასა რელატივისტურ შემთხვევაში (სინათლის სიჩქარესთან მიახლოვებული სიჩქარით მოძრაობისას):

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

ამ ფორმულაში მოყვანილი სიჩქარე შეიძლება იყოს გაზომილი ნებისმიერ ინერციულ სისტემაში. სხვადასხვა ინერციულ სისტემაში სხეულს ექნება სხვა და სხვა სიჩქარე და ასევე მას ექნება განსხვავებული მასა. მასა ისეთივე ფარდობითი სიდიდეა როგორც სიჩქარე, დრო, მანძილი. არ შეიძლება საუბარი მასის სიდიდეზე მანამ, სანამ არ გვექნება ფიქსირებული ათვლის სისტემა, რომელშიც ჩვენ შევისწავთ სხულს. მაგრამ კლასიკური მექანიკის თვალსაზრისით სხეულის მასა არაა დამოკიდებული მის მოძრაობაზე და თუ უძრავი სხეულის მასა  $m_0$  შეადგენს, მაშინ მოძრავი სხეულისათვის ის იგივე დარჩება.

ლორენცის გარდაქმნებიდან გამომდინარე შეიძლება წარმოვიდგინოთ თუ როგორ შეიცვლება ობიექტის სიგრძე სუბსინათლის (სინათლის სიჩქარესთან მიახლოვებული) სიჩქარით მოძრაობისას. ყველა ეს გარდაქმნა განიხილება აინშტაინის ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში (ფსტ)<sup>9</sup>.

$$l' = \frac{l}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

მასის ყველაზე მკაცრი განმარტება მოცემულია ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში: მასა – ეს არის აბსოლუტური მნიშვნელობა 4-ხ განზომილოვანი ენერგია-იმპულსის ვექტორისა:

<sup>8</sup> ჰიგსის ბოზონი (*Higgs boson*) — ელემენტარული ნაწილაკი (ბოზონი), ჰიგსის ველის კვანტი, რომელიც გამომდინარეობს ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის სტანდარტული მოდელიდან.

<sup>9</sup> ფაქტიურად ფსტ აღწერს ოთხგანზომილოვანი სივრცე-დროის გეომეტრიას და ბაზირდება მინკოვსკის ბრტყელ (ანუ არაგამრუდებულ) სივრცეზე (ოთხგანზომილოვანი ჰსევდოვეკლიდის სივრცე შემოთავაზებული სივრცე-დროის გეომეტრიული ინტერპრეტირებისათვის ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში). ფარდობითობის სპეციალური თეორიის განზოგადოებას გრავიტაციული ველებისათვის ეწოდება ფარდობითობის საერთო თეორია.



$$m^2 = \frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2}$$

საგაც  $E$  – თავისუფალი სხეულის სრული ენერგია,  $p$  – მისი იმპულსი,  $c$  – სინათლის სიჩქარე. ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში მასა წარმოადგენს არაადიტიურ<sup>10</sup>, მაგრამ როგორც კლასიკურ მექანიკაშიც ინვარიანტულ<sup>11</sup> სიდიდეს.

ზემოთგანხილული მასა წარმოადგენს რელატივისტურ ინვარიანტს, ანუ ის ერთი და იგივეა ყველა ათვლის სისტემაში. თუ გადავალთ ათვლის სისტემაში რომელშიც სხეული მოსვენებულ მდგომარეობაშია, მაშინ

$$m = \frac{E_0}{c^2}$$

მასა განისაზღვრება მოსვენების ენერგიით (მასისა და ენერგიის ეკვივალენტობა).

თუ გავიხსენით ენერგიის განმარტება როგორც სხეულის მიერ მუშაობის შესრულების შესაძლებლობა, მაშინ მასის ცნება უფრო აბსტრაგირდება. მაგრამ საჭიროა ყურადღების მიქცევა იმაზე რომ მასის და ენერგიის არათანხვლებადობა ვლინდება მხოლოდ სამ განზომილოვან სივრცეში. განზომილებების ამალლებისას და განსაკუთრებით ფარდობითობის საერთო თეორიაში გადასვლისას არაეთვაროვანი სივრცულ-დროითი კოორდინატებით მდგომარეობა მეტ ნაკლებად განიმარტება. მაგრამ ასეთი თემების განხილვა სცილდება ჩვენი კურსის მიზნებს.

### 3.2. დრო.

როგორც აღინიშნა, დრო შეიძლება განვიხილოთ როგორც ოთხგანზომილოვანი სივრცე-დრო სისტემის მე 4-ე კოორდინატი. ამიტომაც არ შეიძლება ლაპარაკი თანაბარ და წრფიულ დროის დინებაზე. მითუმეტეს რომ, როგორც იქნება ნაჩვენები მომდევნო თავებში, დრო თავისი ბუნებით სუბიექტური ცნებაა, ეს კი იმაზე მიუთითებს, რომ ის არის დამოკიდებული მრავალ ფაქტორზე. მაგრამ საგანთან ასეთი მიდგომისას ბუნებრივად იბადება კითხვა: შეიძლება თუ არა დროში თვითნებური გადაადგილება?

ყოველთვის დროში მოგზაურობა იტაცებდა ადამიანთა გონებას. სამეცნიერო სამყაროში ამტკიცებდნენ, რომ დროში მოგზაურობა წარმოადგენს ადამიანის ფანტაზიას, მაგრამ, როგორც არც თუ ისე დიდი ხნის წინ განაცხადა იზრაელელმა პროფესორმა ამოს ორიმ<sup>12</sup>, მსოფლიო მეცნიერებას გააჩნია აუცილებელი თეორიული ცოდნა რათა სრული პასუხისგებით განაცხადოს – დროში მოგზაურობა შესაძლებელია!

ორის განაცხადს საფუძვლად უდევს 1949 წელს აინშტაინის ერთ-ერთი კოლეგის კურტ ჰედელის მიერ გაკეთებული დასკვნა იმის თაობაზე, რომ ფარდობითობის თეორია საფუძველს გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ არსებობს დროის და სივრცის სხვადასხვა მოდელები. თვით აინშტაინი აღნიშნავდა, რომ მძლავრი გრავიტაციული ველები ანელებენ დროის სვლას და ამრუდებენ სივრცეს.

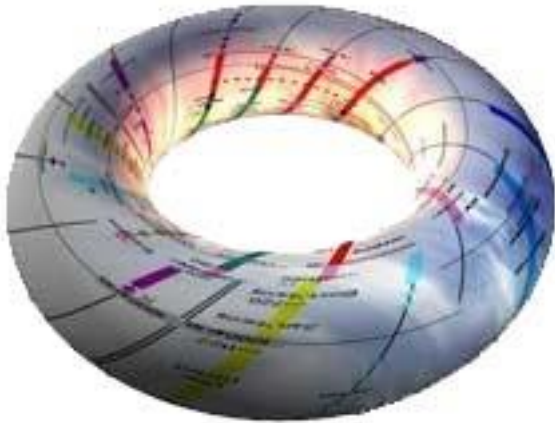
ორის თვალსაზრისით, იმ შემთხვევაში თუ გამრუდებულ სივრცულ-დროით სტრუქტურას მივანიჭებთ კალიცოს ან ძაბრის ფორმას (იხ. სურ. 1) წარმოიქმნება

<sup>10</sup> ადიტიურობა (ლათ. *Additivus* – დამატებული) – სიდიდეების თვისება, რომელიც იმაში მდგომარობს, რომ სიდიდის მნიშვნელობა, რომელიც შეესაბამება მთელ ობიექტს შედგენილია მასში შემავალი ნაწილების ჯამისაგან ობიექტის რაიმე შესაძლო დაყოფის კლასისათვის. მაგალითად მოცულობის ადიტიურობა ნიშნავს რომ მთელი სხეულის მოცულობა უდრის მასში შემავალი ნაწილების მოცულობების ჯანს.

<sup>11</sup> ინვარიანტი – ფიზიკური სიდიდე რომლის მნიშვნელობაც რაიმე ფიზიკურ პროცესში არ იცვლება დროის განმავლობაში.

<sup>12</sup> Amos Ori, A Class of Time-Machine Solutions with a Compact Vacuum Core, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 021101 – Published 7 July 2005.

წარსულში გადასვლის შესაძლებლობა. ამასთან, ყოველ ახალ ხვდას ამ კონცენტრიულ სტრუქტურაში მივყევართ სულ უფრო შორს დროის სიღრმეში.



სურ. 1. სივრცულ-დროითი სტრუქტურის გამრუდების ილუსტრაცია გიგანტური გრავიტაციული ველის მიდამოებში.

ამ დროის მანქანის შესაქმნელად აუცილებელია გიგანტური გრავიტაციული ძალები, რომლებიც არსებობენ შავი ხვრელების მიდამოებში. შავი ხვრელების სიღრმეში ტრადიციული ფიზიკის კანონები აღარ მოქმედებენ, ხოლო დროითი და სივრცული კოორდინატი ცვლიან ერთმანეთს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ სივრცეში მოგზაურობა გადაიქცევა დროში მოგზაურობად.

სხვათა შორის, რომანებში დროში მოგზაურნი ხშირად ვარდებიან ისეთ სიტუაციაში, როდესაც შემთხვევითი ცვლილებები წარსულში ნიშნობრივად ცვლიან მომავალს. მაგრამ მეცნიერები არ ეთანხმებიან ფანტასტი მწერლების ასეთ აპოკალიპტიკურ დასკვნებს. კერძოდ, ამერიკელი პროფესორი რონალდ მელეტი უარყოფს რომ წარსულში გადასვლამ შეიძლება შეცვალოს მომავალი. მისი სიტყვებით დროში მოგზაური ადამიანი ამავდროულად გადაინაცვლება სხვა დროში და სხვა პარალელულ სამყაროში. მასაჩუსეტის ტექნოლოგიური ინსტიტუტის კვანტური ფიზიკოსები მიუდგნენ ამ პრობლემას სხვა მხრიდან და განაცხადეს, ისეთი დროის მანქანის შექმნის შესაძლებლობა, რომელიც არ არღვევს მიზეზ-შედეგობრივ კავშირებს.

მეცნიერებმა უკვე კაი ხანია ისწავლეს კვანტური მდგომარეობების „ტელეპორტირება“ ერთი ადგილიდან მეორეში. სეტ ლლოიდი, რომელიც სათავეში უდგა მასაჩუსეტის ტექნოლოგიური ინსტიტუტის მკვლევარების ჯგუფს ამბობს, რომ ამ პრინციპის და კიდევ სხვა კვანტური ე.წ. „პოსტ ამორჩევის“ ეფექტის გამოყენებით შესაძლებელია კვანტური მდგომარეობების ტელეპორტირება წარსულში.

პოსტამორჩევა – კვანტური გამოთვლების სახელით ცნობილი ახალი მეცნიერების მნიშვნელოვანი ნაწილია. თუ ჩვენ გვესაჭიროება განვსაზღვროთ თუ ცვლადების რა კომბინაცია წარმოადგენს განტოლების ამონახსნს, ჩვეულებრივი კომპიუტერი გადაარჩევს ყველა კომბინაციას სანამ არ მიიღებს სასურველ პასუხს. ლლოიდის თვალსაზრისით ტელეპორტირების და პოსტამორჩევის კომბინირებით შესაძლებელია ჩატარდეს კვანტური ტელეპორტირება უკუ მიმართულებით, ანუ ტელეპორტირების შემდეგ განვსაზღვროთ კვანტური მდგომარეობა, რომელშიც იმყოფებოდა სისტემა ტელეპორტირების ჩატარებამდე.

ტელეპორტირების ადრინდელი თეორიებისაგან განსხვავებით ეს თეორია არ ექვემდებარება ეგრე წოდებულ „ბაბუას პარადოქსს“. ამ პარადოქსის არსი შემდეგშია: თუ თქვენ დაბრუნდებით დროში და შემთხვევით მოკლავთ თქვენს ბაბუას, ამითი თქვენ შექმნით პარადოქსს. ვინაიდან თქვენ ვერ დაიბადებით და მაშასადამე ვერ მოკლავთ თქვენს წინაპარს. სუბატომური ნაწილაების დონეზე ეს პრობლემა ასევე გამოიყურება

ვინაიდან დროში მოგზაურობისას ნაწილაკს შეუძლია თავისი თავის მოსპობა, ან გადაადგილება და ამითი დროში მოგზაურობის შეშლა. მაგრამ კვანტური მექანიკის ალბათური ბუნების გამო პროფესორ ლლოიდის მეთოდი საშუალებას იძლევა თავი ავარიდოთ ასეთ კოლიზიებს. დროში მოგზაურობისას შესაძლო იქნება მხოლოდ გარკვეული კვანტური მდგომარეობები, ანუ მოვლენების გარკვეული ვარიანტები. ამასთან მოვლენები რომლებიც არღვევენ მიზეზ-შედეგობრივ კავშირებს იქნებიან ნულლოვანი ალბათობის მატარებლები.

### **3.3. ენერგია.**

მასის ცნების განხილვისას ჩვენ ვსაუბრობდით მისი და ენერგიის ეკვივალენტურობის თაობაზე. ეხლა კი განვიხილოთ თვით ენერგიის ცნება და შევეცადოთ დაახლოებით მაინც გავცეთ პასუხი კითხვაზე თუ რა არის ენერგია. სასკოლო ფიზიკის კურსიდან ჩვენ ვიცით, რომ ენერგიას უწოდებენ სხეულის შესაძლებლობას შეასრულოს მუშაობა. მაგრამ რატომ ენიჭებათ სხეულებს ეს „შესაძლებლობა“ ჩვენ არ დავფიქრებულვართ. შემდგომ თავებში (პირველ ყოვლისა თერმოდინამიკის ნაწილში) ჩვენ ვეცდებით გავცეთ პასუხი ამ კითხვას, მაგრამ ეხლა ჩვენ ვეცდებით მოვიყვანოთ ამ ცნების საწყისი ახსნა.

**ენერგია** — სკალარული ფიზიკური სიდიდე, რომელიც წარმოადგენს მატერიის მოძრაობის განსხვავებული ფორმების და ურთიერთობის ერთიან საზომს, მატერიის მოძრაობის გადასვლის საზომს ერთი ფორმიდან მეორეში. ყველასათვის ცნობილია ენერგიის შენახვის კანონი, რომელიც ამტკიცებს, რომ ენერგია არ შეიძლება შეიქმნას არაფრისაგან და არ შეიძლება მისი განადგურება. ის შეიძლება მხოლოდ გადაიყვანო ერთი ფორმიდან მეორეში. ეს მტკიცებულება ტოლფასია იმისა, რომ სამყაროს სრული ენერგია მასში მუდამ არსებობდა და იარსებებს. მაგრამ თუ ეს ასეა, მაშინ სამყაროს განვითარება შეუძლებელია, ვინაიდან არ არსებებს მისი დროში ცვლილების, განვითარების მიმართულება, არ არსებობს წონასწორული მდგომარეობა ენერგიის მინიმუმით. მიღებული წინააღმდეგობებიდან გამოსასვლელათ უნდა ვივარაუდოთ, რომ საუბრისას ენერგიის შექმნის ან განადგურების თაობაზე, უნდა გვახსოვდეს რომ ეს გარდაქმნები ატარებენ ლოკალურ ხასიათს და მათზე მოქმედებს სივრცე-დრო, რომელიც მრუდდება დიდი მასების მახლობლად. ამიტომაც ჩვენთვის ჩვეული მეტრიკის ფარგლებში, ამ ყველაფრის ახსნა შეუძლებელია და საჭიროა დამატებითი პარამეტრების შემოღება (მაგალითად, უფრო მაღალი რიგის მეტრიკა, ან „შავი მატერია“ და „ბნელი ენერგია“).

მე XIX საუკუნის შუა წლებში დამტკიცდა რომ მექანიკურ ენერგიასთან ერთად მიკრონაწილაკებს გააჩნია მათში ჩაქსოვილი **შინაგანი ენერგია** რომელიც შედის ბუნების ენერგეტიკული გარდაქმნების ბალანსში. ზუსტად შინაგანი ენერგიის აღმოჩენის შემდეგ იყო ფორმულირებული ენერგიის შენახვის და გარდაქმნის კანონი.

#### **განვიხილოთ თუ რას წარმოადგენს შინაგანი ენერგია?**

როდესაც ყინულზე მოსრიალე შაიბა ხახუნის ძალის გამო ჩერდება, მისი მექანიკური (კინეტიკური) ენერგია კი არა ქრება, არამედ გადაეცემა უწესრიგოდ მოძრავ შაიბის და ყინულის მოლეკულებს. მოხახუნე სხეულების ზედაპირული უსწორმასწოროები მოძრაობისას დეფორმირდებიან და მოლეკულების უწესრიგო მოძრაობის ხარისხი მატულობს. ორივე სხეული ცხელდება, რაც სწორედაც რომ ნიშნავს მათი შინაგანი ენერგიის გაზრდას.

ასევე შეიძლება განვიხილოთ შინაგანი ენერგიის უკუ გადასვლა მექანიკურში. თუ შეუდგებით საცობიან სინჯარაში წყლის გაცხელებას, დაიწყება მისი და ორთქლის შინაგანი ენერგიის მატება. ორთქლის წნევა იმდენად გაიზრდება, რომ ამოაგდებს საცობს.

საცობის კინეტიკური ენერგია გაიზრდება ორთქლის შინაგანი ენერგიის ხარჯზე. გაფართოვებისას წყლის ორთქლი ასრულებს მუშაობას და გრილდება. ამ დროს მისი შინაგანი ენერგია მცირდება.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით მაკროსკოპული სხეულის შინაგანი ენერგია მისი ყველა უწესრიგოდ მოძრავი მოლეკულის (ან ატომის) კინეტიკური ენერგიების და ყველა მოლეკულის ურთიერთობის (მაგრამ არა სხვა სხეულების მოლეკულებთან) პოტენციალური ენერგიების ჯამის ტოლია.

შინაგანი ენერგიის (ან მისი ცვლილების) გამოთვლა ცალკეული მოლეკულების მოძრაობის და ერთმანეთთან ურთიერთობის გათვალისწინებით პრაქტიკულად შეუძლებელია მაკროსხეულებში მოლეკულების ძალზე დიდი რაოდენობის გამო. ამიტომაც, საჭიროა შეგვეძლოს შინაგანი ენერგიის (ან მისი ცვლილების) გამოთვლა იმ მაკროსკოპული პარამეტრების გათვალისწინებით, რომელთა უშუალო გაზომვა შესაძლებელია.

თავისი თვისებებით ყველაზე მარტივია ერთატომიანი აირი, რომელიც შედგენილია ცალკეული ატომებისაგან და არა მოლეკულებისაგან. ერთატომიანები არიან ინერტული აირები – ჰელიუმი, ნეონი, არგონი და სხვა. ამიტომაც გამოვთვალოთ შინაგანი ენერგია იდეალური ერთატომიანი აირის შემთხვევაში.

ვინაიდან იდეალური აირის მოლეკულები არ ურთიერთობენ ერთმანეთთან, მათი პოტენციალური ენერგია ნულის ტოლია. იდეალური აირის სრული შინაგანი ენერგია განისაზღვრება მისი უწესრიგოდ მოძრავი მოლეკულების კინეტიკური ენერგიით.

$m$  მასის იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგიის გამოსათვლელად საჭიროა ერთი ატომის საშუალო კინეტიკური ენერგიის გამრავლება ატომების რაოდენობაზე. თუ გავითვალისწინებთ რომ  $kN_A = R$ , მივიღებთ იდეალური აირის შინაგანი ენერგიის ფორმულას:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

**იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია.** ის არაა დამოკიდებული მოცულობაზე და სისტემის სხვა მაკროსკოპულ პარამეტრებზე. იდეალური აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება უდრის

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

ანუ განისაზღვრება აირის საწყისი და საბოლოო მდგომარეობის ტემპერატურებით, და არაა დამოკიდებული პროცესზე.

თუ იდეალური აირი შედგება უფრო რთულ მოლეკულებისაგან ვიდრე ერთატომიანი, მაშინაც მისი შინაგანი ენერგია აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია, ოღონდ პროპორციულობის კოეფიციენტი  $U$ -ს და  $T$ -ს შორის განსხვავებულია. ეს აიხსნება იმით, რომ რთული მოლეკულები ხასიათდებიან არა მხოლოდ წინსვლითი არამედ ბრუნვითი მოძრაობითაც. ასეთი აირების შინაგანი ენერგია მოლეკულების წინსვლითი და ბრუნვითი ენერგიების ჯამს ტოლია.

როგორღაა დამოკიდებული შინაგანი ენერგია მაკროსკოპულ პარამეტრებზე?

ჩვენ დავადგინეთ, რომ იდეალური აირის შინაგანი ენერგია ერთ პარამეტრზე – ტემპერატურაზეა დამოკიდებული. იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მოცულობაზე არაა დამოკიდებული, ვინაიდან მოლეკულებს შორის ურთიერთობის პოტენციალური ენერგია ნულის ტოლია. რაც შეეხება რეალურ აირებს, სითხეებს და მყარ სხეულებს, მათში ურთიერთობის პოტენციალური ენერგია არ უდრის ნულს. მართლა აირებისათვის ის ბევრად მცირეა მოლეკულების კინეტიკურ ენერგიაზე, მაგრამ მყარ სხეულებში და სითხეებში მასთან შედარებადია.

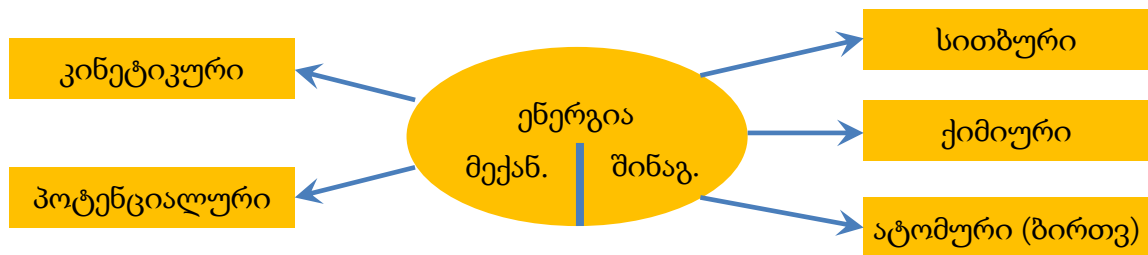
აირის მოლეკულების ურთიერთობის საშუალო პოტენციალური ენერგია დამოკიდებულია ნივთიერების მოცულობაზე, ვინაიდან მოცულობის ცვლილებისას იცვლება მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილიც. მაშასადამე, რეალური აირის შინაგანი ენერგია თერმოდინამიკაში  $T$  ტემპერატურასთან ერთად  $V$  მოცულობაზეა დამოკიდებული.

მაკროსკოპული პარამეტრების მნიშვნელობა (ტემპერატურა  $T$ , მოცულობა  $V$  და ა.შ.) ცალსახად განსაზღვრავენ სხეულების მდგომარეობას. ამიტომაც ისინი განსაზღვრავენ მათ შინაგან ენერგიას.

მაკროსკოპული სხეულების შინაგანი ენერგია  $U$  ცალსახად განისაზღვრება მაკროსკოპული პარამეტრებით, რომლებიც ასახავენ მათ მდგომარეობას: ტემპერატურით და მოცულობით. უკვე ითქვა რომ შინაგანი ენერგიის ცნება წარმოადგენს თერმოდინამიკის საწყისებს. შინაგანი ენერგია ახასიათებს ყველა სხეულს: დიდსა თუ პატარას, ცხელს თუ ცივს, განურჩევლად მყარია ეს სხეული თხევადი თუ აირისებრი. შეიძლება ითქვას, რომ ყველაფერი რაც კი ჩვენს გარშემო იმყოფება – ცოცხალი და არაცოცხალი მატერია – წარმოადგენს ენერგიას.

ეხლა კი, იმისათვის რომ უფრო კარგად გავერკვეთ ენერგიის ცნებაში, განვიხილოთ თუ რას გულისხმობენ მედიკოსები ადამიანის შინაგან ენერგიაზე საუბრისას.

როგორც უკვე ვიცით შინაგანი ენერგია შეიძლება იყოს დამოკიდებული შემდეგ პარამეტრზე: მასაზე, სხეულის ტემპერატურაზე, ნივთიერების მდგომარეობაზე, ამ სხეულის განლაგებით სხვებთან მიმართ და ა.შ.



შეიძლება გადავიდეთ ჩვენთვის ჩვეულ ანალოგიებზე და ხატოვანად გამოითქვას მოსაზრება, რომ ზუსტად ისევე როგორც ბუნებაში ხორციელდება წყლის ბრუნვა, ხორციელდება ენერგიის ბრუნვაც. და თუ ამ თვალსაზრისით განვიხილავთ ადამიანის სხეულს, მისი შინაგანი ენერგია იქნება დამოკიდებული ბევრ ფაქტორზე. გვახსოვდეს რომ ყოველი ადამიანი გამუდმებით ხარჯავს ენერგიას და ამიტომაც საჭირო ხდება მისი მარაგის შევსება.

თუ განვიხილავთ ადამიანს ფიზიკის კუთხით, ის წარმოგვიდგება როგორც ცოცხალი ელექტროსადგური გენერატორების დიდი რაოდენობით, რომლებიც მოქმედებენ მისი სხეულის ყოველ უჯრედში, და განუწყვეტლივ ამარაგებენ მას ენერგიით. მაგრამ ძალზე მნიშვნელოვანია რომ ენერგიის გამომუშავებასა და ხარჯვას შორის არსებობდეს ბალანსი. თუ კი ეს ბალანსი დაირღვევა ჩვენ ორგანიზმში მივიღებთ ან არასაკმარის ან და ჭარბ ენერგიას, რაც უარყოფით შედეგებამდე მიგვიყვანს.

## 4. ჰიდროდინამიკის ელემენტები

### 4.1. სითხის ძირითადი პარამეტრები.

ჰიდროდინამიკა — უწყვეტი გარემოს ფიზიკის ნაწილია<sup>13</sup>, რომელიც შეისწავლის იდეალური და რეალური სითხეებისა და აირების მოძრაობას. როგორც უწყვეტი გარემოს ფიზიკის სხვა განხრებში აქაც უპირველესყოვლისა განიხილება მრავალი ცალკეული ატომიდან შემდგარი რეალური გარემოდან გადასვლა აბსტრაქტულ უწყვეტ გარემოში, რომლისთვისაც იწერება მოძრაობის განტოლებები<sup>14</sup>.

ერთ ერთ სითხის პარამეტრს წარმოადგენს მისი სიმკვრივე:

$$\rho = m/V \quad (4)$$

სადაც  $m$  არის მასა, ხოლო  $V$  – მოცულობა.

სიმკვრივის ერთეული SI სისტენაში არის  $1\text{კგ/მ}^3$ .

წნევა სითხეში ზედაპირიდან ერთსა და იმავე მანძილზე ერთნაირია.

$$P = \frac{F}{S} \quad (5)$$

მაგრამ  $F = mg$  (ნიუტონის II კანონი) მაშინ (4) გათვალისწინებით

$$m = \rho V = \rho Sh$$

და გამოსახულება (5) ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$P = \frac{\rho Sgh}{S} = \rho gh \quad (6)$$

სადაც  $F$  – ძალაა, რომელიც მიდებულა  $S$  ფართობზე, და  $h$  მანძილზე ზედაპირიდან,  $g$  – თავისუფალი ვარდნის აჩქარება.

მოყვანილი ფორმულიდან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ წნევათა სხვაობა სითხის ორ წერტილს შორის ტოლია:

$$\Delta P = \rho g \Delta h.$$

ყოველივე ზემოთ თქმული სამართლიანია აირებისათვისაც (მაგალითად ატმოსფეროს წნევა). ზღვის დონეზე საშუალო ატმოსფერული წნევა არის  $1,013 \cdot 10^5$  ნ/მ<sup>2</sup>. ამ სიდიდეს ეწოდება ატმოსფერო (ატმ). ატმოსფერულ წნევას განიცდის ჰაერის უზარმაზარ ოკეანეში ჩაძირული ნებისმიერი ობიექტი მათ შორის ადამიანის სხეულიც. ადამიანზე ატმოსფეროს მხრიდან წარმოებული ეს უზარმაზარი წნევა წონასწორდება მისი შინაგანი წნევით.

სითხეებისათვის სამართლიანია პასკალის კანონი, რომლის თანახმად სითხის ზედაპირზე წარმოებული წნევა თანაბრად გადაიცემა ყველა მიმართულებით. წნევა იზომება სპეციალური ხელსაწყოთი, რომელსაც მანომეტრი ეწოდება. წნევის ერთეული SI სისტენაში არის  $1\text{პა} = 1\text{ნ/მ}^2$ . გამოიყენება სხვა ერთეულებიც  $1\text{მმ.ვწყ.სვ} = 133\text{ნ/მ}^2 = 1\text{ტორი}$ .  $1\text{ატმ} = 760\text{მმ.ვწყ.სვ}$ .

<sup>13</sup> უწყვეტი გარემოს ფიზიკა — ფიზიკის ნაწილი, რომელიც სწავლობს ძალზე დიდი რაოდენობის ნაწილაკებისაგან შემდგარი სისტემის მაკროსკოპულ თვისებებს. სტატისტიკური ფიზიკისა და თერმოდინამიკისაგან განსხვავებით, რომლებიც სწავლობენ სხეულების შინაგან აგებულებას, უწყვეტი გარემოს ფიზიკას, როგორც წესი, აინტერესებს მხოლოდ გარემოს საერთო თვისებები.

<sup>14</sup> მოძრაობის განტოლება — განტოლება ან განტოლებათა სისტემა, რომელიც აყალიბებს მექანიკური ან დინამიური სისტემის ევოლუციას დროში და სივრცეში.

## **4.2. არტერიული წნევის გაზომვა**

სისხლი, როგორც თხევადი სუბსტანცია ემორჩილება ჰიდროდინამიკის კანონებს. სისხლის წნევაც ასევე იზომება მანომეტრით რომლის დანაყოფები კალიბრებულია მმ.ვწყ.სვ. –ში.

სადღეისოთ ცნობილია არტერიული წნევის გაზომვის ორი ძირითადი მეთოდი: რივა-როჩის (Riva-Rocci 1896r) პალპატორული მეთოდი და კოროტკოვის (1905) ხმოვანი (აუსკულტაციური) მეთოდი, რომელიც საერთაშორისო ჯანდაცვის ორგანიზაციის რეკომენდირებით (1935) იყო დასახელებული არტერიული წნევის გაზომვის ძირითად მეთოდად.

რივა-როჩის მეთოდის მიხედვით მხრის ზემო მესამედის გარშემო შემორტყმულ ველოსიპედის კამერაში, რომელიც სფინგომანომეტრზე იყო მიერთებული, რეზინის გრუშით იტუმბებოდა ჰაერი. ამის შემდეგ ფიქსირდებოდა წნევა, რომელზეც ქრებოდა პალპატორულად გამოვლენილი პულსაცია, რაც შეესაბამებოდა სისტოლურ წნევას. შემდეგ კამერიდან ნელ ნელა უშვებდენ ჰაერს, და აფიქსირებდენ წნევას, რომელზეც მივიღებდით პირველ პულსირების ნიშნებს, რაც შეესაბამებოდა დიასტოლურ წნევას. ამ მეთოდში გამოყენებული ვიწრო კამერა ჰქმნიდა ბევრ უხერხულობას და თანაც ამახინჯებდა კვლევის შედეგებს.

არტერიული წნევის აუსკულტაციური მეთოდით გაზომვისას წინამხარს შემოახვევენ 10–12 სმ სიგანის სპეციალურ მანჟეტს, რომელშიც ჩატუმბავენ ჰაერს ისე, რომ მასში წნევამ გადააჭარბოს სისხლის მოსალოდნელ წნევას, და სისხლის მოძრაობა არტერიაში შეწყდეს. ამის შემდეგ მანჟეტში ჰაერის წნევას ამცირებენ, სანამ სისხლი ისევ არ ამოდრავდება. რასაც მოყვება სპეციფიკური ფეთქვის ხმა (ეს ხმა გამოწვეულია სისხლის პორციული დინებით გადაჭერილ სისხლძარღვში, ვინაიდან ამ მონაკვეთზე არტერია ვერ იცვლის თავის კვეთს), რომლის ფიქსირება შესაძლებელია ფონედოსკოპით. ამ წნევას ეწოდება მაქსიმალური, ანუ სისტოლური წნევა, რომელიც შეესაბამება გულის შეკუმშვისას განვითარებულ წნევას. გარკვეულ დროის გავლის შემდეგ ფეთქვის ხმას ემატება სპეციფიური შრიალი, რომელიც გამოწვეულია გადაჭერილი არტერიიდან გამოსვლისას სისხლის ტურბულენტული დინებით (ვინაიდან არტერიის გადაჭერისას მისი კვეთი მკვეთრად მცირდება და სისხლის ლამინარული დინება გადაჭერილი უბნიდან თავისუფალში გამოსვლისას გადაიქცევა ტურბულენტულად). შემდეგ ტურბულენტობით გამოწვეული ხმაური მცირდება და ისევ მკაფიოდ ისმის ფეთქვის ხმა. მანჟეტში წნევის შემდგომი შემცირება გამოიწვევს ფეთქვის ხმის სრულ გაქრობას. ეს მოხდება როდესაც მანჟეტში წნევა გაუტოლდება არტერიულ, დიასტოლურ წნევას, და არტერია კვლავ გახდება ელასტიური (შესძლებს თავის კვეთის ცვლილებას).

## **4.3. ჰიდროდინამიკის ძირითადი ცნებები.**

**დინება ლამინარულია**, თუ სითხის ფენები ერთმანეთის მიმართ პარალელურად გადაადგილდებიან. წინააღმდეგ შემთხვევაში დინება არის **ტურბულენტული**.

როგორც ცნობილია ნებისმიერი რეალური სითხის გადაადგილება სადინარში (მილში) განპირობებულია წნევათა სხვაობით. ამ სხვაობას ადამიანის ორგანიზმში უზრუნველყოფს გულის მუშაობა. ამიტომ გული შეიძლება განხილული იქნეს როგორც ტუმბო. გულის მუშაობის გარდა სისხლძარღვებში სისხლის მოძრაობას ხელს უწყობს გლუვი კუნთების ფუნქციონირება, რომლებიც შედიან სისხლძარღვების გარსის შემადგენლობაში, და პლევრალური არის უარყოფითი წნევა (0-ად მიღებულია ატმოსფერული წნევა). გლუვი კუნთების მუშაობა საშუალებას აძლევს არტერიას გულის მარცხენა პარკუჭის შეკუმშვის შემდეგ გადაიყვანოს სისხლისთვის მინიჭებული

კინეტიკური ენერგია არტერიების და არტერიორების კედლების გაწელვის პოტენციალურ ენერგიაში. ეს გაბერვის და ნორმარულ მდგომარეობაში გადასვლის ციკლები ხელს უწყობს სისხლის დინების უწყვეტი ნაკადის შექმნას.

სისხლძარღვთა სისტემის მუშაობაში გარკვევისათვის განვიხილოთ ჯერ იდეალური სითხის მოძრაობა. სითხეს ეწოდება **იდეალური**, თუ მას არ გააჩნია შიდა ხახუნი და თუ ის არაკუმშვადია. სითხის დინება **სტაციონალურია**, თუ სითხის ნაწილაკების სიჩქარე დინების ნებისმიერ წერტილში უცვლელია. გამოვყოთ მოძრავ სითხეში ისეთი წვრილი **დინების მილი**, რომ მასში ნაწილაკების სიჩქარე  $v$  მის ღერძის პერპენდიკულარულ ნებისმიერ  $S$  კვეთში შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივად. მაშინ ამ კვეთებში გავლილი სითხის მოცულობა  $\Delta V$  დროის ერთეულში იქნება მუდმივი. და შეიძლება ჩავწეროთ

$$\Delta V = vS = const \quad (7)$$

პირობა (7) ეწოდება დინების **უწყვეტობის პირობა**.

აქედან გამომდინარეობს, რომ რეალურ სითხისათვისაც ცვლადი კვეთის მილში გადაადგილებისას  $Q$  სითხის რაოდენობა რომელიც დროის ერთეულში გაივლის მილის ნებისმიერ კვეთს რჩება უცვლელი ( $Q = const$ ) და დინების საშუალო სიჩქარეები მილის სხვა და სხვა კვეთებში უკუპროპორციულია ამ კვეთების ფართობებისა:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_1}{S_2} = \dots$$

#### 4.4. ბერნულის განტოლება.

გამოვყოთ იდეალური სითხის ნაკადში დინების მილი და მასში სითხის მცირე მოცულობა  $\Delta V$  მასით  $\Delta m$ , რომელიც სითხის დინებისას გადაადგილდება A დან B მდგომარეობაში. რათგან მოცულობა მცირეა შეიძლება ითქვას, რომ სითხის ყველა ნაწილაკები იმყოფებიან ერთნაირ მდგომარეობაში. მოცულობის სიმცირის გამო შეიძლება ჩაითვალოს, რომ ყველა ნაწილაკი იმყოფება ერთნაირ პირობებში: A მდგომარეობაში მას ახასიათებს  $P_1$  წნევა,  $v_1$  სიჩქარე და ის იმყოფება 0-ან დონიდან  $h_1$  სიმაღლეზე; B მდგომარეობაში კი  $P_2, v_2, h_2$ . სათანადო მილების კვეთებია  $S_1$  და  $S_2$ .

სითხეს, რომელიც წნევის ქვეშ იმყოფება, გააჩნია შიდა პოტენციალური ენერგია, რომლის მეშვეობითაც მას შეუძლია მუშაობა აწარმოოს. ეს ენერგია ტოლია:

$$W_{pot} = PV$$

სადაც,  $V$  - მოცულობა რომელზეც მიდებულია  $P$  წნევა. ამ შემთხვევაში  $\Delta m$  სითხის რაოდენობის გადაადგილება ხდება იმ ძალების სხვაობის მეშვეობით, რომელიც მიდებულია  $S_1$  და  $S_2$  კვეთებზე. შესრულებული ამ შემთხვევაში მუშაობა  $A_{pot}$  ტოლია პოტენციალური ენერგიების სხვაობისა A და B წერტილებში:

$$A_{pot} = P_1\Delta V - P_2\Delta V$$

ეს მუშაობა სრულდება სიმძიმის ძალის გადასალახავათ:

$$A_h = \Delta mgh_2 - \Delta mgh_1$$

და  $\Delta m$  მასის სითხის კინეტიკური ენერგიის შეცვლისათვის:

$$A_v = \frac{\Delta mv_2^2}{2} - \frac{\Delta mv_1^2}{2}$$

ესე იგი,  $A_{pot} = A_h + A_v$ , ანუ



$$P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = (\Delta m g h_2 - \Delta m g h_1) + \left( \frac{\Delta m v_2^2}{2} - \frac{\Delta m v_1^2}{2} \right)$$

$$P_1 \Delta V + \Delta m g h_1 + \frac{\Delta m v_1^2}{2} = P_2 \Delta V + \Delta m g h_2 + \frac{\Delta m v_2^2}{2}$$

A და B –ს მდგომარეობა თვითნებურია ამიტომაც შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ მილის ნებისმიერ ადგილას სრულდება პირობა:

$$P \Delta V + \Delta m g h + \frac{\Delta m v^2}{2} = const$$

ეს განტოლება გავყოთ  $\Delta V$  –ზე და გავითვალისწინოთ (4), რომ  $\rho = m/V = \Delta m/\Delta V$  მივიღებთ:

$$P + \rho g h + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad (8)$$

სადაც  $\rho$  –სითხის სიმკვრივეა.

ეს **ბერნულის განტოლებაა**. ამ განტოლების ყველა წევრს წნევის განზომილება გააჩნია და მათ ეწოდება:

- $P = P_{st}$  – **სტატიკური**,
- $\rho g h = P_{gst}$  – **ჰიდროსტატიკური**,
- $\frac{\rho v^2}{2} = P_{din}$  – **დინამიური**.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე ბერნულის განტოლების (8) ფორმულირება შეიძლება შემდეგი სახით:

**იდეალური სითხის სტაციონარულ დინების დროს მუდმივი წნევა, რომელიც სტატიკური, ჰიდროსტატიკური და დინამიური წნევების ჯამის ტოლია რჩება მუდმივ სიდიდით სითხის ნაკადის ნებისმიერ კვეთში.**

ჰორიზონტალური მილის შემთხვევაში ჰიდროსტატიკური წნევა არ იცვლება და ბერნულის განტოლება (8) შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი, გამარტივებული სახით:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad \text{ან} \quad P_{st} + P_{din} = const$$

სტატუკური წნევა განაპირობებს სითხის პოტენციალურ ენერგიას, ხოლო დინამიური –კინეტიკურს. ამ განტოლებიდან შეიძლება **ბერნულის წესის** გამოყვანა:

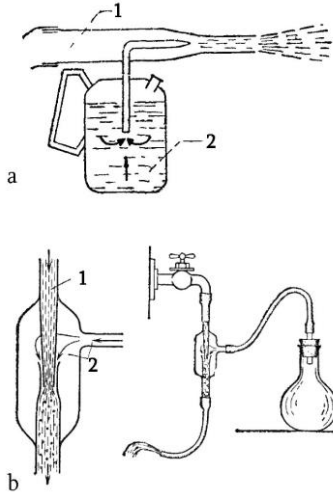
**არაბლანტი სითხის სტატიკური წნევა ჰორიზონტალურ მილში დინების დროს იზრდება იქ, სადაც მისი სიჩქარე კლებულობს და პირიქით.**

შეიძლება ისეთი პირობები შეირჩეს რომ მილის ვიწრო ნაწილში მივიღოთ უარყოფითი წნევა, ამ შემთხვევაში, თუ მილის ვიწრო ნაწილი იქნება გარემოსთან დაკავშირებული, ადგილი ექნება შეწოვის ეფექტს. ეს ეფექტი ფართოდ გამოიყენება პულვერიზატორწებში, წყლის ჭავლურ ტუმბოებში და ა.შ. (იხ. სურ. 2). პულვერიზატორით შეიძლება სითხეების და მათში სხვადასხვა შეწონილი ნაწილაკების გაფრქვევა, რაც ფართოდ გამოიყენება მედიცინაში. წყლის ჭავლური ტუმბოთი შეიძლება როგორც მცირე ვაკუმის შემნა, ასევე სითხეების ამოტუმბვა ქირურგიული ოპერაციების ჩატარებისას. ორივე შემთხვევაში მუშა ნაწილში იქმნება უარყოფითი წნევა გამტარი მილის შემცირებული კვეთის უბანში.

სითხის სტატიკური წნევა  $P_{st}$  ჰორიზონტალურ მილში შეიძლება გაიზომოს სწორი მანომეტრული მილით რომლის ნახვრეტი სითხის დინების პარალელურია. (სურ. 3a (2)). დინამიური წნევა  $P_{din}$  გამოითვლება როგორც სრული  $P$  და სტატიკური წნევების

სხვაობა. სრული წნევის გასაზომად საჭიროა მართი კუთხით მოღუნული მანომეტრული მილი, რომელიც მიმართულია სითხის დინების საპირისპიროდ (სურ. 3a (1)). მოღუნულ მილში მოხვედრილი წყლის ნაწილაკები მუხრუჭდებიან მილის კედელთან მისვლისას სრულ გაჩერებამდე. ამ ნაწილაკების კინეტიკური ენერგია გადადის პოტენციალურში და ბერნულის განტოლების თანახმად წნევა მილში აიწევა სრული წნევის მნიშვნელობამდე:

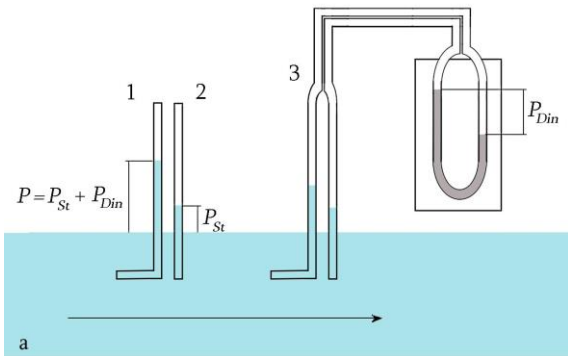
$$P = P_{st} + P_{din}$$



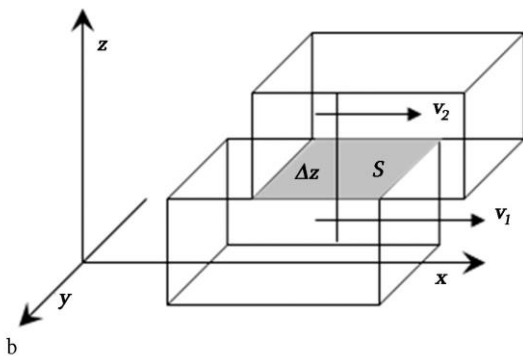
სურ. 2. პულვერიზატორის (a) და წყლის ჭავლური ტუმბოს (b) სქემატური ნახაზი. ციფრი 1-ით მონიშნულია მუშაობის შემსრულებელი გარემო: მაგალითად ჰაერის ნაკადი პულვერიზატორში (a), ან წყლის ჭავლის ნაკადი წყლის ჭავლურ ტუმბოში (b), ხოლო ციფრი 2-ით მონიშნულია გარემო, რომელშიც მოქმედებს მოწყობილობა: მაგალითად გასაფქვრევი სითხე პულვერიზატორში (a), ან ჰაერი (ან და ამოსატუმბი სითხე) წყლის ჭავლურ ტუმბოში (b).

თუ გამოსაკვლევ სითხის ან აირის ნაკადში გვერდი გვერდ მოვათავსებთ ორ მილს: სწორს და მოღუნულს (ასეთ მოწყობილობას ეწოდება პიტოს მილი) და მიუერთებთ მათ U-ს მაგვარ მანომეტრს (სურ. 3a (3)), მაშინ ეს მანომეტრი გვიჩვენებს დინამიურ წნევას, საიდანაც შეიძლება გამოითვლოს სითხის ან აირის მოძრაობის სიჩქარე:

$$P_{din} = \frac{\rho v^2}{2} \quad \text{საიდანაც } v = \sqrt{\frac{2P_{din}}{\rho}}$$



სურ. 3. (a) სტატიკური და დინამიური წნევის გაზომვის სქემა. (b) შიდა ხაუნის ილუსტრირება სითხეში.



#### 4.5. რეალური სითხეები.

რეალურ სითხეში მოლეკულებს შორის მოქმედებს მიზიდულობის ძალები, რომლებიც განაპირობებენ შიდა ხახუნს. ნიუტონმა დაადგინა, რომ სითხის სხვა და სხვა სიჩქარით მოძრავ ფენათა შორის შიდა ხახუნის ძალა  $F_{in}$  პირდაპირ პროპორციულია ურთიერთობაში მყოფი ფენების ფართისა  $S$  და სიჩქარის გრადიენტისა  $dv/dz$  (სურ. 3b).

$$F_{in} = \eta S \frac{dv}{dz} = \eta S \cdot grad v \quad (9)$$

$\eta$  – პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელსაც სიბლანტე ჰქვია.

**სიბლანტე (შინაგანი ხახუნი)** – ნივთიერების გადატანის ერთ-ერთი მოვლენა. დენადი სხეულების (სითხეების და აირების) თვისება გაუწიონ წინაღობა მათი ერთი ნაწილის გადატანისას მეორის მიმართ. შედეგად, ამ გადაადგილებისას შესრულებული მუშაობა, განიბნევა სითხოს სახით. შიდა ხახუნის მექანიზმი სითხეებსა და აირებში იმაში მდგომარეობს, რომ ქაოტიურად მოძრავ მოლეკულებს გადააქვთ იმპულსი ერთი ფენიდან მეორეში, რასაც მოყვება ფენათა სიჩქარეების გათანაბრება – ეს კი აღიწერება ხახუნის ძალის შემოღებით. მყარი სხეულების სიბლანტეს გააჩნია რიგი სპეციფიური თვისება და ჩვეულებრივ ის ცალკე განიხილება. ყურადსაღებია, რომ სიბლანტის კოეფიციენტი ვლინდება როგორც რეალური სითხეების ამსახავი დამატებითი პარამეტრი. ის ავლენს მოლეკულების ერთმანეთთან „შებმულობის“ ხარისხს, და ნიუტონისებრივი სითხეების ერთგვაროვნობის გამო ახასიათებს ამ სითხეებს მთლიანობაში.

ძალა  $F_{in}$  მოქმედებს ურთიერთშემხები ზედაპირების მხების მიმართულებით ისე, რომ აჩქარებს ნელა მოძრავ და ანელებს სწრაფად მოძრავ ფენებს. სიჩქარის გრადიენტი მოყვანილ შემთხვევაში ახასიათებს სიჩქარის ცვლილების ხარისხს სითხის დინების პერპენდიკულარულ მიმართულებით. სიჩქარეების საბოლოო მნიშვნელობებისათვის

$$grad v = \Delta v / \Delta z = (v_2 - v_1) / \Delta z$$

განვსაზღვროთ სიბლანტის კოეფიციენტის ერთეული

$$\eta = \frac{F_{in}}{S \frac{dv}{dz}} = \frac{\frac{[N]}{[m^2]}}{\frac{[N \cdot m]}{[m^2]}} = \frac{[N \cdot m]}{[m^2]}$$

განასხვავებენ **დინამიურ სიბლანტეს** (საერთაშორისო SI სისტემაში — ნ·წმ/მ<sup>2</sup> = პა·წმ; CGS სისტემაში — დინ·წმ/მ<sup>2</sup> = პ (პუაზი); 1პ = 0,1 ნ·წმ/მ<sup>2</sup>) და **კინემატიკურ სიბლანტეს** (საერთაშორისო SI სისტემაში — მ<sup>2</sup>/წმ; CGS სისტემაში — სტოქსი; არასისტემური ერთეული — ენგლერის გრადუსი). კინემატიკური სიბლანტე შეიძლება იყოს მიღებული როგორც დინამიური სიბლანტის შეფარდება ნივთიერების სიმკვრივესთან, და თავის წარმოშობით უკავშირდება სიბლანტის გაზომვის კლასიკურ მეთოდებს, ისეთი როგორც კალიბრებულ ნახვრეტში სიმძიმის ძალის ზეგავლენით მოცემული მოცულობის სითხის გამოდინების დროის გაზომვა. სიბლანტის გასაზომ ხელსაწყოს ვისკოზიმეტრი ეწოდება. საინტერესოა, რომ ნივთიერების გადასვლას თხევადიდან მინისებრივ მდგომარეობაში ჩვეულებრივ უკავშირებენ 10<sup>11</sup>–10<sup>12</sup> პა·წმ სიბლანტის მიღწევას.

პრაქტიკაში გამოიყენება ფარდობითი სიბლანტე, რომელიც მოცემული სითხისა და წყლის სიბლანტეების შეფარდების ტოლია ერთსა და იგივე ტემპერატურის პირობებში:

$$\eta_{rel} = \eta / \eta_{H_2O} \quad (\text{როდესაც } t = 20^\circ C \quad \eta_{H_2O} = 0,01 \text{ პა} \cdot \text{წმ}).$$

სითხეების უმეტესობისათვის (წყალი, დაბალმოლეკულარული ორგანული ნივთიერები, დამდნარი მეტალები და ა.შ.) სიბლანტე დამოკიდებულია მხოლოდ სითხის ბუნებაზე და ტემპერატურაზე (ტემპერატურის გაზრდისას სიბლანტე მცირდება). ასეთ

სითხეებს ეწოდება *ნიუტონისეული სითხეები*. არსებობს სითხეების სხვა ჯგუფი (მაღალმოლეკულური ორგანული ნაერთები) რომელთა სიბლანტე დამოკიდებულია დინების რეჟიმზე (წნევა, სიჩქარის გრადიენტი). ამ პარამეტრების გაზრდისას სიბლანტე მცირდება იმის გამო რომ ირღვევა სითხის ნაკადის შიდა სტრუქტურა. ასეთ სითხეებს ეწოდება *არანიუტონისეული სითხეები*.

სისხლი წარმოადგენს ფორმულული ელემენტების სუსპენზიას ცილოვან ხსნარში (პლაზმაში). ამიტომაც ის უნდა მივაკუთნოთ არანიუტონისეულ სითხეებს. სისხლის ფარდობითი სიბლანტე ნორმაში 4,2 – 6, ანემიის დროს მცირდება 2 – 3, ხოლო პოლიციტემიის დროს იზრდება 15 – 20 მდე. ნორმალური სისხლის შრატის ფარდობითი სიბლანტე 1,64 – 1,69, ხოლო პათოლოგიურის 1,7 – 2,0.

ეხლა ისევ გადავიდეთ სითხის დინების კანონზომიერებებზე. გლუვ კედლიან მილში თუ მათი კვეთი და მიმართულება მკვეთრად არ იცვლება და თუ მას არ ახასიათებს მაღალი დონის განტოტება, სითხის დინება ლამინალურია. ამ პირობების დარღვევისას, განსაკუთრებით მაღალი სიჩქარეების შემთხვევაში, დინება გადადის ტურბულენტულში. ტურბულენტულ დინებისათვის დამახასიათებელია ლოკალური წნევის ცვლილება, რომელიც იწვევს სითხის ნაწილაკების რხევას, რასაც თან ერთვის სპეციფიური ბგერების გამოცემა (შრიალი, შუილები და ა.შ.). ამ ბგერების მეშვეობით ძალიან ადვილია ტურბულენტული დინების დადგენა.

ლამინალურიდან ტურბულენტულში გადასვლისათვის საჭირო კრიტიკული სიჩქარის  $v_{kr}$  პოვნა შეიძლება ემპირიულად მიღებული უგაზომილო სიდიდის მეშვეობით, რომელსაც *რეინოლდის რიცხვი* ჰქვია. ეს რიცხვი აკავშირებს ერთმანეთთან სითხის სიმკვრივეს  $\rho$ , სიბლანტეს  $\eta$  და მილის დიამეტრს  $D$ :

$$Re = \frac{v_{kr} \rho D}{\eta} \quad (10)$$

სწორ და გლუვ მილისათვის  $Re_{kr} = 2300$ . თუ  $Re \geq Re_{kr}$  დინება გადადის ტურბულენტულში.

რეალური სითხის დინებისას ჰორიზონტალურ მილში მისი ნაწილაკების პოტენციალური ენერგია იხარჯება შიდა ხახუნის ძალების გადასალახავად. ამიტომაც სტატიკური წნევა მილში გავლისას თანდათან მცირდება.

პუაზეილმა ემპირიულად დაადგინა, რომ სითხის ლამინალური დინების საშუალო სიჩქარე  $v_{mid}$  მუდმივი დიამეტრის მრგვალ ჰორიზონტალურ მილში, პირდაპირ პროპორციულია შემავალი და გამავალი წნევების სხვაობისა ( $P_1 - P_2$ ), მილის რადიუსის კვადრატისა  $R^2$ , და უკუპროპორციულია მილის სიგრძისა  $\lambda$  და სითხის სიბლანტისა  $\eta$  (*პუაზეილის კანონი*).

$$v_{mid} = \frac{R^2}{8\eta} \cdot \frac{P_1 - P_2}{\lambda} \quad (11)$$

სისხლის დინების საშუალო სიჩქარე  $v_{mid}$  განსაზღვრავს მილის  $S$  კვეთში გამავალი სითხის  $Q$  რაოდენობას დროის ერთეულში:

$$Q = v_{mid} S \text{ სადაც } S = \pi R^2$$

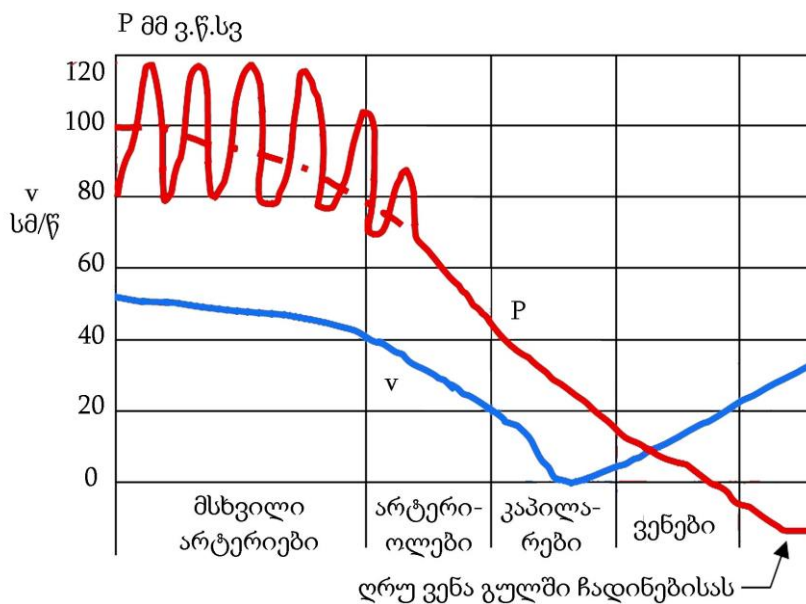
აქედან გამომდინარე შეიძლება ჩაიწეროს *გაგენ – პუაზეილის* ფორმულა:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{\lambda} \cdot \frac{\pi R^4}{8\eta}$$

#### 4.6. სისხლის დინება.

დავუბრუნდეთ სისხლის მოძრაობის კანონზომიერებებს და გულის მუშაობას. სისხლის  $Q$  რაოდენობას, რომელიც გაედინება დროის ერთეულში სისხლძარღვის უბნის  $S$  განივ კვეთში, ეწოდება **სისხლის დინების მოცულობითი სიჩქარე**. ეს სიჩქარე დამოკიდებულია წნევათა სხვაობაზე განხილული უბნის თავსა და ბოლოში და აგრეთვე სისხლძარღვთა წინააღმდეგობაზე სისხლის დინებისადმი. ამ სიჩქარის გამოსათვლელად იყენებენ გაგენ – პუაზეილის ფორმულას. თუმცა სისხლის დინების წინააღმდეგობა სისხლძარღვთა სისტემაში აღემატება ფორმულიდან მიღებულ მნიშვნელობას. ასეთი უთანხმოება წარმოიქმნება სისხლის დინების ენერჯის კარგვისას სისხლძარღვთა ელასტიური კედლების დეფორმირებისას და ასევე სისხლის გრიგალისებური მოძრაობის გამო სისხლძარღვთა განტოტების უბნებში. ამ ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით სიჩქარის ზუსტი მნიშვნელობის გამოთვლა საკმაოდ რთულია.

წინააღმდეგობა სისხლის დინებისადმი, და ესე იგი წნევის ვარდნა სისხლძარღვების სხვა და სხვა მონაკვეთზე ძალზე განსხვავდება ერთმანეთისგან. ყველაზე დიდი ვარდნა (არა ნაკლები 50%) არტერიოლებში ხდება (სურ. 4). ვენების ქსელში, რომლის საერთო კვეთი არტერიულზე 2 ჯერ მეტია სისხლის დინების სიჩქარე არაა მაღალი. რაც შეეხება წნევას, მისი ვარდნაც უმნიშვნელოა. სისხლის დინების სიჩქარე ღრუ ვენაში წინა გულში ჩადინებისას საკმაოდ მატულობს გულში განვითარებული უარღოფითი წნევის გამო.



სურ. 4. წინააღმდეგობა სისხლის დინებისადმი, და წნევათა ვარდნა სისხლძარღვთა სისტემის ცალკეულ უბნებზე.

სისხლძარღვებში სისხლის დინება ნორმალურ პირობებში ლამინალურია. იგი გადადის ტურბულენტულში სხვა და სხვა პათოლოგიის დროს. მაგალითად გულის სარკმელების არასრული დაკეტვისას ან პირიქით არასრული გახსნისას. ამ შემთხვევაში გულის მოსმენის დროს ისმის სპეციფიური ხმა (გულის შუილები).

უნდა აღინიშნოს, რომ ზემოთ მოყვანილი მასალა როგორც მომდევნო თავებშიც, წარმოდგენილია მასში შემავალი პარამეტრების რაოდენობის ზრდის მიხედვით:

1. იდეალური სითხეები – არაკუმშვადი, შიდა ხახუნის არ არსებობის პირობებში.
2. რეალური სითხეები – ცვლადი მოცულობის შემთხვევაში, მის კომპონენტებს შორის არსებული ხახუნის ძალების არსებობის გათვალისწინებით;
  - a. ნიუტონისეული სითხეები – ერთგვაროვანი, პრაქტიკულად მასში შემავალი ერთნაირი სტრუქტურის მქონე ელემენტებით;

b. არანიუტონისეული სითხეები – შემადგენლობით არაერთგვაროვანი სითხეები, მასში შემავალი დიდი რაოდენობის სტრუქტურულად განსხვავებული ელემენტებით.

მაგრამ, საგნის წარმოდგენილი განხილვა არ შეიძლება იყოს საბოლოო და სრული. მომავალში შესაძლებელია დამატებითი პარამეტრების გამოვლენა, რომლებიც ამ ეტაპზე არ იყო განხილული, ვინაიდან ჯერ არა არიან ჩვენთვის ცნობილი. გარდა ამისა არსებული პარამეტრების ფარგლებშიც ამოცანის გამარტივების მიზნით შეიძლება ზოგიერთი პარამეტრის უგულებელყოფა. ჩვენ უკვე ავლნიშნეთ, რომ რაიმე საგნის განხილვისას საჭიროა ამოცანის ამოხსნასთან ეტაპობრივი მიდგომა, ანუ ამოხსნა ეგრე წოდებულ მიახლოებებში (პირველი მიახლოება, მეორე მიახლოება და ა.შ.).

## 5. მექანიკური რხევები და ტალღები.

### 5.1. რხევითი პროცესები.

რხევები ეწოდება პროცესებს, რომლებიც მეორდებიან დროის მეტ ნაკლებად ტოლ შუალედებში. რხევები შეიძლება სხვადასხვა ბუნების იყოს: მექანიკური, ელექტრული, ელექტრომაგნიტური და ა.შ. თუმცა ყველაწინააღმდეგობრივი რხევები ემორჩილებიან ერთსა და იგივე კანონებს, რომლებიც ანალოგიური მათემატიკური გამოსახულებებით აღიწერებიან. რხევითი მოძრაობები ფართოდაა გავრცელებული ცოცხალ ორგანიზმში. რთულ რხევით მოძრაობებს ასრულებენ გული, სისხლძარღვების კედლები, ფილტვები და ა.შ.

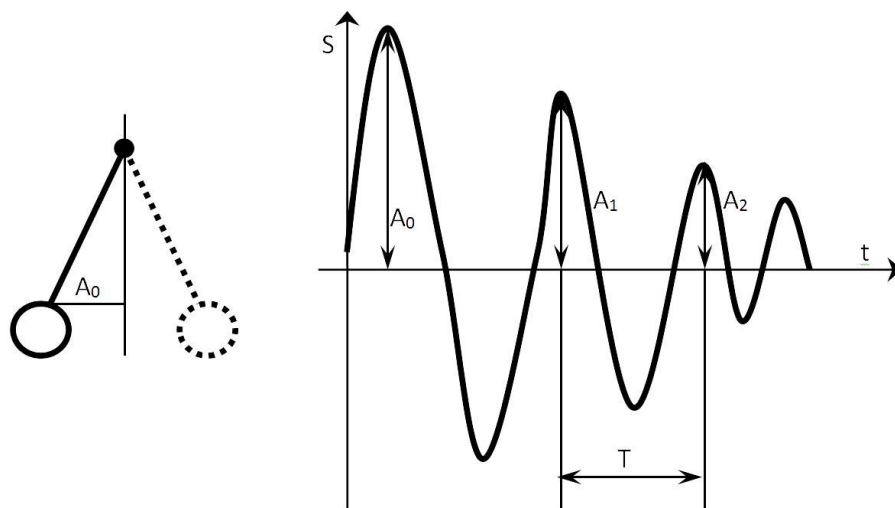
### 5.2. მარტივი რხევები.

განვიხილოთ რხევების ყველაზე მარტივი სახე – მექანიკური რხევები. დავუშვათ რაიმე სხეულს გააჩნია წონასწორობის მდგრადი მდგომარეობა, რომლისგან წანაცვლებით აღიძვრება დამაბრუნებელი ძალა  $F_{Bk}$  რომელიც პროპორციულია სხეულის წანაცვლებისა და მის საწინააღმდეგოა მიმართული:

$$F_{Bk} = -ks$$

სადაც  $k$  – პროპორციულობის კოეფიციენტი. მინუსი მიუთითებს ძალის უკუ მიმართულებას წანაცვლების მიმართ. მექანიკაში ასეთ ძალას ეწოდება დრეკადი ძალა ( $F_{Fx}$ ).

თუ ასეთი სხეული გადახრილია წონასწორობიდან რაიმე გარეშე ძალის გავლენით და შემდეგ აღარ განიცდის რაიმე ზემოქმედებას ანუ “მინდობილია თავის თავზე”, მაშინ შინაგანი დრეკადი ძალების გავლენით ის დაუბრუნდება წონასწორობის მდგომარეობას, ინერციით გაივლის მას, გადაიხრება საპირისპირო მიმართულებით, კვლავ დაბრუნდება წონასწორობის მდგომარეობაში გაივლის მას და ა.შ. რეალურ პირობებში დრეკად ძალების გავლენით რხევის ამპლიტუდა  $A_0$  – ნელ-ნელა მცირდება. ეს არის თავისუფალი მილევადი რხევა (იხ. სურ. 5). მას  $T$  პერიოდით ასრულებს ნებისმიერი ჩამოკიდული სხეული, კამერტონი, სიმი და ა.შ.



სურ. 5. თავისუფალი, მილევადი რხევები

იდეალურ შემთხვევაში, როცა არ არსებობს ხახუნის და წინააღმდეგობის ძალები, რხევები იქნება მიუღწევადი. ეს ეგრე წოდებული ჰარმონიული რხევებია და მათ ახასიათებთ დროში წანაცვლება სინუსის ან კოსინუსის კანონის მიხედვით. ასეთ რხევებს ასრულებს

მათემატიკური ქანქარა, რომელიც წარმოადგენს გაუწელავ თხელ ძაფზე ჩამოკიდებულ მატერიალურ წერტილს. ყველა დანარჩენი ტიპის ქანქარას ეწოდება ფიზიკური. ზოგადი სახით ასეთი რხევები აღიწერებიან მეორე რიგის წრფივი ერთგვაროვანი დიფერენციალური განტოლებით:  $(y'' + py' + qy = 0)$  ჩვენ შემთხვევაში  $F_{Bk} = F_{Fx} = -ks$  მაშინ ნიუტონის მეორე კანონის შესაბამისად  $\vec{F}_{Fx} = m\vec{a}$  რათგან  $a = \frac{d^2s}{dt^2}$  ამიტომ

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = -ks$$

ან

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{k}{m}s = 0$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (12)$$

მაშინ საბოლოოდ მივიღებთ

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega^2 s = 0 \quad (13)$$

ჩვენს მიერ მიღებული განტოლება (13) წარმოადგენს მეორე რიგის დიფერენციალურ განტოლებას რომლის ამონახსენი იქნება ფუნქცია:

$$s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (14)$$

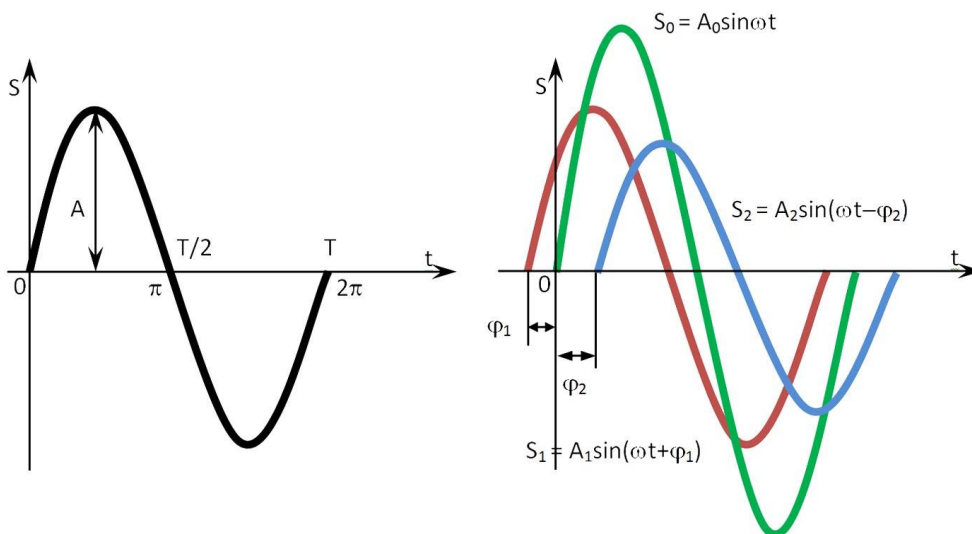
სადაც  $s$  – გადაადგილებაა  $A$  – რხევის ამპლიტიდა ანუ მაქსიმალური გადაადგილება.

ეს არის ჰარმონიული რხევის განტოლება. სიდიდეს  $(\omega_0 t + \varphi_0)$  ეწოდება რხევის ფაზა და იზომება კუთხურ ერთეულებში (გრადუსი, რადიანი)  $\varphi_0$ -ს ეწოდება საწყისი ფაზა,  $\omega_0$ -ს კი წრიული სიხშირე.

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu_0$$

$\nu_0$  – არის რხევის სიხშირე.

ჰარმონიული რხევების შემთხვევაში წრიული სიხშირე  $\omega_0$  და  $T$  (ან სიხშირე  $\nu_0$ ) მხოლოდ საკუთრივ რხევადი სისტემის თვისებებზეა დამოკიდებული და ეწოდება რხევის საკუთარი სიხშირე და რხევის საკუთარი პერიოდი.



სურ. 6. ფაზით გასწრების და ჩამორჩენის ილუსტრირება.



საზოგადოდ ისეთ რხევებს რომლებიც მხოლოდ სისტემის შინაგანი ძალებით არიან გამოწვეული ეწოდებათ თავისუფალი რხევები. როდესაც მერხვე სხეულზე მოქმედებენ შინაგანი ძალებთან ერთად გარეშე პერიოდული ძალებიც, მაშინ ასეთ პირობებში აღძრულ რხევებს იძულებითი რხევები ეწოდებათ. თავისუფალი რხევები ყოველთვის მიღევადა.

ჰარმონიული რხევების შემსრულებელი სხეულის სრული ენერგია  $W$  შედგება კინეტიკური  $W_{kin}$  და პოტენციალური  $W_{pot}$  ენერგიებისაგან, რომლებიც რხევის დროს პერიოდულად გადადიან ერთმანეთში:

$$W = W_{kin} + W_{pot} \quad (15)$$

წონასწორობის მდგომარეობის გავლისას სხეულის სიჩქარე მაქსიმალურია და პოტენციალური ენერგია სრულად გადადის კინეტიკურში. მეორეს მხრივ სხეულის მაქსიმალური გადახრისას მისი სიჩქარე 0-ის ტოლია და მთელი ენერგია გადადის პოტენციალურ ფორმაში. ასე რომ ჰარმონიულად მერხვეი სხეულის სრული ენერგია:

$$W_{Full} = W_{pot.max} = W_{kin.max} = const$$

განვსაზღვროთ ჰარმონიულად მერხვე სხეულის სიჩქარე და აჩქარება:

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{d(A \sin \omega t)}{dt} = A \frac{d \sin \omega t}{dt} = A \omega \cos \omega t = A \omega \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

ე.ი. რხევადი სხეულის სიჩქარე  $v$  იცვლება ჰარმონიული კანონით და  $s$  წანაცვლებას უსწრებს  $\pi/2$  ფაზით.

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{d(A \omega \cos \omega t)}{dt} = A \omega \frac{d \cos \omega t}{dt} = -A \omega^2 \sin \omega t = A \omega^2 \sin(\omega t + \pi)$$

ანუ აჩქარება  $a$  იცვლება ჰარმონიული კანონით და  $s$  წანაცვლებას უსწრებს  $\pi$  ფაზით (ანუ იმყოფება მის საწინააღმდეგო ფაზაში).

ჰარმონიულად მერხვეი სხეულის სრული ენერგია (15) ზემოთ მოყვანილი სიდიდეების გათვალისწინებით შემდეგნაირად გამოიყურება:

$$W_{kin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2 \cos^2 \omega t}{2} = W_{kin.max} \cos^2 \omega t$$

ეხლა გამოვთვალოთ პოტენციალური ენერგია რომელიც იქნება ქანქარის დამაბრუნებელი ძალის მიერ შესრულებული მუშაობის ტოლი. ქანქარაზე მოქმედებს დრეკადი ძალა, რომელიც გუკის კანონის თანახმად ტოლია:

$$F_{Fx} = kx$$

ამიტომაც, დამაბრუნებელი ძალის მიერ შესრულებული  $A_s$  მუშაობის დასადგენად  $s$  მანძილზე გადაადგილებისას, საჭიროა ქანქარაზე მოქმედი ძალის გაინტეგრირება  $dx$ -ით მის გადაადგილების ფარგლებში (0 დან  $s$ -მდე):

$$A_s = \int_0^s kx dx = \left. \frac{kx^2}{2} \right|_0^s = \frac{ks^2}{2}$$

როგორც უკვე აღინიშნა ეს მუშაობა იქნება პოტენციური ენერგიის ტოლი

$$W_{pot} = \frac{ks^2}{2} = \frac{kA^2 \sin^2 \omega t}{2}$$

მაგრამ ადრე შემოღებულ აღნიშვნის (12) თანახმად შეიძლება ჩავწეროთ:  $k = m\omega^2$ . მაშინ

$$W_{pot} = \frac{mA^2\omega^2 \sin^2 \omega t}{2} = W_{pot.max} \sin^2 \omega t$$

ესე იგი მერხვევი სხეულის სრული ენერგია (15) ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$W = W_{pot} + W_{kin} = \frac{mA^2\omega^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t)}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

ანუ საბოლოოდ:

$$W = \frac{mA^2\omega^2}{2} \quad (16)$$

**ჰარმონიულად რხევადი სხეულის სრული ენერგია პირდაპირ პროპორციულია სხეულის მასისა, და რხევის ამპლიტუდის და სიჩქარის კვადრატისა.**

რეალურ პირობებში მხედველობაში უნდა იყოს მიღებული რხევითი მოძრაობის საწინააღმდეგო მოქმედი ხახუნის ძალა  $F_{Fr}$ , რომელიც მოძრაობის დაბალი სიჩქარის შემთხვევაში შეიძლება სიჩქარის პროპორციულად ჩაითვალოს.

$$F_{Fr} = -rv = -r \frac{ds}{dt};$$

$r$  – არის პროპორციულობის კოეფიციენტი.

მაშინ მოძრაობის განტოლების ჩაწერა შეიძლება შემდეგნაირად:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{ds}{dt} + \frac{k}{m}s = 0 \quad (17)$$

რადგან

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = -ks - r \frac{ds}{dt}$$

განტოლება (17) წარმოადგენს მეორე რიგის ერთგვაროვან დიფერენციალურ განტოლებას და გააჩნია ამონახსენი:

$$s = A_0 \exp(-\beta t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (18)$$

აქ  $\beta = r/2m$  – მიღვეადობის კოეფიციენტი;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  – რხევების კუთხური სიჩქარეა, რომელიც  $\neq \omega_0$  რხევის საკუთარ სიხშირეს.

შესაძლოა არსებობდნენ სისტემები, რომლებშიც თავისუფალი რხევები მიუღვეადია სისტემის შიგნით არსებული ენერგიის წყაროს გამო. ასეთ სისტემებს ეწოდება ავტორხევითი სისტემები, ხოლო რხევებს ეწოდება **ავტორხევები**. ასეთ სისტემაში რხევადი მოდულისადმი ენერგიის მიწოდება მის მიერვე რეგულირდება ე.წ. უკუკავშირის მეშვეობით. ადამიანის ორგანიზმში ასეთი ავტორხევითი პროცესის მაგალითად შეიძლება დავასახელოთ გულის მუშაობა. გულის მუშაობის რიტმი დამოკიდებულია იმ სამუშაოს სიდიდესა და ხასიათზე, რომელსაც ადამიანი ასრულებს. რასაკვირველია უკუკავშირის მექანიზმების დარღვევა ან სრული მოშლა გამოიწვევს გულის მუშაობის ავტორხევითი ხასიათის შეცვლას და იგი მიღვეადი გახდება, რაც პათოლოგიის სხვადასხვაგვარ ფორმას შეესაბამება.

თუ სხეულის რხევა გამოწვეულია და შენარჩუნებულია გარეშე  $F_{out}$  ძალის მიერ, რომელიც პერიოდულად იცვლება, იგი განიცდის იძულებით რხევას, ხოლო ასეთი რხევების აღმრძვრელ ძალებს ეწოდება იძულებითი ან მაიძულებელი ძალები. რა თქმა უნდა ამ დროს სისტემის შიგნით არსებული ძალების ზემოქმედებას კვლავაც ექნება ადგილი. ასე რომ მოძრაობის განტოლებას ასეთი სახე ექნება:

$$ma = F_{Fx} + F_{Fr} + F_{out}$$

სადაც,  $F_{Bk}$  – დამაბრუნებელი ძალა;  $F_{Fx}$  – დრეკადი ძალა;  $F_{Fr}$  – ხახუნის ძალა;  $F_{out}$  – გარედან მიდებული ძალა.  $F_{Bk} = F_{Fx}$   
 აქედან

$$m \frac{d^2s}{dt^2} + r \frac{ds}{dt} + ks = F_{out}$$

თუ გარე ძალა იცვლება კანონით:  $F_{out} = F \sin(t\omega_{out})$  და თუ გავყოფთ განტოლებას  $m$  –ზე მივიღებთ:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{ds}{dt} + \frac{k}{m} s = \frac{F}{m} \sin(t\omega_{out})$$

ამ განტოლების ზოგადი ამონახსნი ასეთია:

$$s = A_{out} \sin(\omega t - \psi)$$

ესე იგი იძულებით რხევებს აქვთ ჰარმონიული ხასიათი გარეშე მაიძულებელი ძალის სიხშირით. გადაადგილება მცირედ არის წანაცვლებული სიხშირის მიმართ. ამასთან იძულებითი რხევის ამპლიტუდა  $A_{out}$  მაიძულებელი გარე ძალის ამპლიტუდის პროპორციულია და მით მეტია, რაც უფრო ახლოა  $\omega_{out}$  სიხშირე, რხევადი სხეულის საკუთარ სიხშირესთან  $\omega_0$ .

$$A_{out} = \frac{A}{\omega_0^2 - \omega_{out}^2}$$

იძულებითი რხევის ამპლიტუდის მკვეთრი ზრდა როდესაც  $\omega_0 \rightarrow \omega_{out}$  ცნობილია **რეზონანსის** სახელით. ასეთ რხევებს ეწოდება რეზონანსული რხევები, ხოლო  $\omega_{rez}$  –ს რეზონანსული სიხშირე. რეზონანსის მოვლენას ადგილი აქვს არა მარტო მექანიკური რხევების შემთხვევაში, არამედ ნებისმიერი სხვა რხევის პირობებშიც (ბგერები, ელექტრული რხევები და ა.შ.). ზოგ შემთხვევაში რეზონანსს სარგებლობა მოაქვს, რადგან უმნიშვნელო აღმგზნები ძალის გავლენით შეიძლება გაცილებით უფრო დიდი ამპლიტუდის რხევების გამოწვევა. ამიტომ რეზონანსის მოვლენას ფართოდ იყენებენ ელექტრული და ბგერითი რხევების რეგისტრაციის სისტემებში.

ცოცხალი ორგანიზმის ქსოვილების შემთხვევაში ჩვეულებრივ პირობებში რეზონანსის მოვლენას არ მივყევართ რაიმე სერიოზულ შედეგებამდე, რადგან ცოცხალი ორგანიზმის ქსოვილებისათვის დამახასიათებელია მილევის მაღალი კოეფიციენტი. მაგრამ განსაკუთრებულ შემთხვევებში, თუ მექანიკური ვიბრაცია საკმაოდ ძლიერია, ადამიანის ორგანიზმი, ან შინაგანი ორგანოები შეიძლება დაზიანდეს, რაც აუცილებლად უნდა იქნეს გათვალისწინებული ადამიანის სხვადასხვა სამუშაო გარემოს ფორმირებისას.

### 5.3. რთული რხევების ჰარმონიული სპექტრი.

ნებისმიერი რთული რხევა ანუ ისეთი რხევა რომელიც არ აღიწერება ჰარმონიული ფუნქციების (სინუსის ან კოსინუსის) მეშვეობით, შეიძლება წარმოვადგინოთ რიგის სახით (ფურიეს რიგი). ეს იქნება სხვადასხვა სიხშირის მარტივი ჰარმონიული რხევების (ე.წ. ჰარმონიკების) ჯამი. მათი სიხშირე რთული რხევის პერიოდისა და სიხშირის ჯერადია. ამასთან ყველაზე დაბალ სიხშირის მქონე ტალღას, რომლის სიხშირე ყველაზე ახლოა წამყვან სიხშირესთან, ეწოდება ძირითადი ჰარმონიკა, ხოლო დანარჩენებს უწოდებენ მეორე, მესამე და ა.შ. ჰარმონიკებს, რომელთა სიხშირეები შესაბამისად ორჯერ, სამჯერ და ა.შ. მეტია ძირითად სიხშირეზე.

აკუსტიკაში პირველ ჰარმონიკას ძირითადი ტონი ეწოდება, ხოლო დანარჩენებს – ობერტონები. მარტივი სიხშირეების ერთობლიობას რომლითაც რთული რხევების წარმოდგენა ხდება ეწოდება ჰარმონიული სპექტრი. ხოლო თვით ამ დაშლის პროცედურას – ჰარმონიული ანალიზი. რთული რხევის ანალიზის ეს მეთოდი ფართოდ არის გამოყენებული მედიცინაში.

## 5.4. ტალღები

დრეკადი გარემოს რომელიმე წერტილში აღძრული რხევების მთელ გარემოში გავრცელების პროცესს ეწოდება ტალღა. ტალღას რომელშიც გარემოს ნაწილაკები გადაადგილდებიან ტალღის გავრცელების მიმართულების პერპენდიკულარულად ეწოდება განივი ტალღა. განივი დრეკადი ტალღები აღიძრებიან მხოლოდ მყარ გარემოში, რომელშიც არსებობენ დეფორმაციის საწინააღმდეგო შინაგანი დრეკადი ძალები. განივი ტალღები ასევე აღიძვრებიან სითხის შიგნით, რადგან სიმძიმისა და ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები ეწინააღმდეგებიან სითხის ჰორიზონტალური ზედაპირის დარღვევას. გარემოს ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მიმართულებით არ გადაიტანებიან, გარდა იმ შემთხვევისა, როდესაც იქმნება ტალღური გრიგალი და წარიტაცებს ტალღის გავრცელების გარემოში არსებულ ნაწილაკებს.

ტალღის გავრცელების პროცესში გარემოს ყოველი მომდევნო ნაწილაკის რხევა წინა ნაწილაკის რხევას ჩამორჩება რაღაცა ფაზით. ამის გამო ხდება რომ ტალღის “ქოჩორი” გადაადგილდება ტალღის გავრცელების მიმართულებით გარკვეული სიჩქარით. დამკვირვებელი ამას აღიქვავს, როგორც ტალღის მოძრაობას. ტალღის გავრცელების სიჩქარეს უწოდებენ გარემოში ნებისმიერი “ფიქსირებული” ფაზის (მაგ.  $\pi/2$  ანუ ქოჩორის მწვერვალის შესაბამისი) გადაადგილების სიჩქარეს. ამას ეწოდება ტალღის ფაზური სიჩქარე, თუმცა სიტყვა ფაზური ხშირად არ წარმოითქმევა.

ტალღური მოძრაობის ძირითადი მახასიათებელია ტალღის სიგრძე  $\lambda$ . ტალღის სიგრძეს უწოდებენ უმცირეს მანძილს გარემოს ერთნაირ ფაზაში მერხევ ორ ნაწილაკს შორის (ანუ მანძილს გარემოს ორ ნაწილაკს შორის რომელთა ფაზათა სხვაობა შეადგენს  $2\pi$ -ს, რაც შეესაბამება რხევის პერიოდს ( $T$ )). სხვაგვარად ესაა ის მანძილი რომელზეც რხევა ვრცელდება ერთი პერიოდის განმავლობაში  $\lambda = \nu T = \nu / \nu$ .

როგორც ფაზური სიხშირე, ასევე ტალღის სიჩქარე დამოკიდებულია გარემოს თვისებებზე. ერთგვაროვან გარემოში ერთ ადგილას აღძრული რხევები მისგან ყოველი მიმართულებით თანაბრად გავრცელდებიან და წარმოქმნიან სფერულ ტალღას. თუ რხევის წყაროს მნიშვნელოვანი ბრტყელი ზედაპირი გააჩნია, მაშინ ტალღა მისგან გავრცელდება პარალელური ნაკადის სახით წყაროს ზედაპირის პერპენდიკულარულად. ასეთ ტალღას ბრტყელი ტალღა ეწოდება. უნდა აღინიშნოს, რომ საერთოდ ყველა ტალღა სფერულია, უბრალოდ ბრტყელი ტალღის სიმრუდის რადიუსი უსასრულობის ტოლია.

დამოკიდებულება წერტილის წანაცვლებასა ( $s$ ) მის კოორდინატისა ( $x$ ) და დროის ( $t$ ) შორის აისახება შემდეგნაირად:

$$A \text{ წერტილში — } s_A = A \sin \omega t,$$

$$\text{ხოლო მომდევნო B წერტილში — } s_B = A \sin(\omega t - \varphi_0)$$

ანუ მორხევე ნაწილაკის ფაზით ჩამორჩენა B წერტილში A წერტილის მიმართ შეადგენს  $\varphi_0 = \omega t_0$  და იმის გათვალისწინებით რომ  $t_0 = x/\nu$  მივიღებთ:

$$s_B = A \sin \omega(t - t_0) = A \sin \omega(t - x/\nu)$$

დიფერენციალურ ფორმაში ჩაწერილ გამოსახულებას, რომელიც ამყარებს კავშირს გარემოს მერხევ წერტილის წანაცვლებასა ( $s$ ) მის კოორდინატსა ( $x$ ) და დროს ( $t$ ) შორის ეწოდება ტალღური განტოლება. ბრტყელი ტალღის ტალღური განტოლების შესადგენად

საჭიროა წანაცვლების ფუნქციის ( $s$ ) მეორე კერძო წარმოებულის პოვნა ( $t$ ) დროისა და ( $x$ ) კოორდინატის მიმართ

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} &= A\omega \cos \omega(t - x/v) & \frac{\partial s}{\partial x} &= -\frac{A\omega}{v} \cos \omega(t - x/v) \\ \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} &= -A\omega^2 \sin \omega(t - x/v) = -\omega^2 s & \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} &= -\frac{A\omega^2}{v^2} \sin \omega(t - x/v) = -\frac{\omega^2}{v^2} s \end{aligned}$$

აქედან შეიძლება ითქვას, რომ ზოგადი სახით ბრტყელი ტალღის დიფერენციალურ განტოლებას როცა ტალღა  $v$  სიჩქარით ვრცელდება  $x$  ღერძის მიმართ, აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2}$$

ეს არის ბრტყელი ტალღის დიფერენციალური განტოლება.

თუ ტალღა ვრცელდება იმავე მიმართულებით საითაც ირხევინ გარემოს ნაწილაკები, მას ეწოდება გრძივი ტალღა. მაგ. დგუშის პერიოდული მოძრაობით ცილინდრულ ჭურჭელში აღძრული რხევები.

როგორც გრძივი, ასევე განივი ტალღის ძირითადი მახასიათებლებია: ამპლიტუდა, პერიოდი, სიხშირე, ტალღის სიგრძე. გრძივი ტალღა წარმოიქმნება გარემოში, რომელშიც აღიძვრება მოცულობითი შეკუმშვის დეფორმაციის საწინააღმდეგო ძალები. ასეთი ძალები ყველა სხეულს ახასიათებს, რაც იმის ნიშანია, რომ გრძივი ტალღები ნებისმიერ გარემოში აღიძვრებიან.

## 5.5. აკუსტიკის ელემენტები.

ბგერა ან ბგერადი რხევები ეწოდება დრეკადი გარემოს ნაწილაკების ისეთ რხევებს, რომლებიც ვრცელდებიან გრძივი ტალღების სახით და აღიქმებიან ადამიანის ყურის მიერ. ამ ბგერების სიხშირე 20 – 20000 ჰც<sup>15</sup>. უფრო მაღალი სიხშირის ბგერებს ეწოდება ულტრაბგერები, მათ ადამიანის ყური ვერ აღიქვამს (მაღალი აღიქვამს 50 კჰც-მდე, ღამურა – 100 კჰც-მდე, დელფინი – 250 კჰც-მდე).

20 ჰც-ზე დაბალი სიხშირის ბგერებს ეწოდება ინფრაბგერები. ასეთი ბგერები წარმოიქმნება, მაგალითად, მიწისძვრების დროს. ინფრაბგერებს ადამიანის ყური ისევე ვერ აღიქვამს და მათ შეუძლიათ ადამიანის ორგანიზმის დაზიანება გამოიწვიოს. ეს დაბალი სიხშირის ბგერები რეზონანსში შედიან ადამიანის შინაგანი ორგანოების რხევის საკუთარ სიხშირესთან (3–12 ჰც) და თუ ბგერების ტალღის ენერგია საკმაოდ მაღალია, მათ შეუძლიათ ადამიანის ორგანოების დაზიანება.

ბგერების დაყოფა შეიძლება ტონებზე და ხმაურებზე. ტონი არის ბგერა რომელიც წარმოადგენს რეგულარულ რხევას მუდმივი ან დროში კანონზომიერად ცვლადი ამპლიტუდითა და სიხშირით. გარემოს ნაწილაკების რხევის ფორმის მიხედვით ტონები იყოფა მარტივ (ჰარმონიულ) და რთულ ტონებათ. თუ რთული ბგერის აკუსტიკური სპექტრი<sup>16</sup> უწყვეტია, ანუ შეიცავს სიხშირეთა უწყვეტ თანმიმდევრობას, მას ხმაური ეწოდება. თუ რთული ბგერის აკუსტიკური სპექტრი წყვეტილია, ანუ მოიცავს სიხშირეთა გარკვეულ დისკრეტულ ერთობლიობას, მას მუსიკალურ ბგერას ან რთულ ტონს

<sup>15</sup> ადამიანის სმენის ქვედა ზღვარი იმყოფება 15-20 ჰც-ის ფარგლებში; ბავშვის (5 წლამდე) სმენის ზედა ზღვარი შეადგენს 20 კჰც, ხოლო მოზრდილი ადამიანის – 14,5-19,5 კჰც.

<sup>16</sup> რთული ტონის აკუსტიკური სპექტრი — ეს სიხშირეთა კრებულება მათი ფარდობითი ინტენსიობის (ამპლიტუდის) მინიშნებით. ჩვეულებრივ მაქსიმალური ამპლიტუდა გააჩნია ძირითად ტონს, ხოლო მისი სიხშირე აღიქმება ყურის მიერ როგორც ბგერის სიმაღლე.

უწოდებენ. იმ შემთხვევაში, როდესაც მუსიკალური ბგერა მხოლოდ ერთ სიხშირეს მოიცავს, მას მარტივ ტონს უწოდებენ.

მარტივი ტონის მიღება შეიძლება კამერტონის მეშვეობით. რთული ტონები მიიღება მუსიკალური საკრავებით ან ადამიანის ხმოვანი აპარატით. რთული ტონის აკუსტიკურ სპექტრში ყველაზე დაბალი სიხშირის მარტივ ტონს (პირველ ჰარმონიკას), **ძირითადი ტონი** ეწოდება, ხოლო დანარჩენებს – **ობერტონები**.

ბგერის დახასიათებისათვის იყენებენ ობიექტურ და სუბიექტურ მაჩვენებლებს.

**ობიექტური მაჩვენებლები:** ბგერის სიხშირე, ძალა და აკუსტიკური სპექტრი.

**სუბიექტური მაჩვენებლები:** ბგერის სიმაღლე, ხმამაღლობა და ტემბრი.

ბგერის სიმაღლე ეს ადამიანის სმენის მეშვეობით აღქმული ბგერის თვისებაა, რომელიც ბგერის ტალღის სიხშირეზეა დამოკიდებული (სიხშირის ზრდისას იწვევს ბგერის სიმაღლეს) და რომელიც მოქმედებს ადამიანის ყურის დაფის აპკზე. მაგრამ სუბიექტური აღქმისას ბგერის სიმაღლე აგრეთვე დამოკიდებულია მის ინტენსივობაზე. პირველ მიახლოებაში ბგერის სუბიექტური სიმაღლე ვებერ-ფიხნერის კანონის თანახმად სიხშირის ლოგარითმის პროპორციულია (დაწვრილებით იხილე ქვემოთ).

ბგერის სიმაღლე იზომება მელებში — ეს სიმაღლის ისეთი სკალაა რომელშიც მეზობელ ტონებს შორის სხვაობა სმენელის მიერ აღიქმება როგორც ტოლი. ტონს, რომლის სიხშირე 1 კჰც, ხოლო ხმის წნევა შეადგენს  $2 \cdot 10^{-3}$  პა (40 დბ), მიეწერება 1000 მელის სიმაღლე; 20-დან 9000 ჰც-დე დიაპაზონში თავსდება 3000 მელი. ნებისმიერი ბგერის სიმაღლის გაზომვა ეფუძნება ადამიანის ყურის თვისებას დაადგინოს ორი ბგერის სიმაღლის იგივობა ან და მათი შეფარდება (რამდენჯერ ერთი ბგერა მაღალია ან დაბალია მეორეზე).

ბგერის ძალა (ანუ ბგერის ტალღის ინტენსივობა) წარმოადგენს ბგერითი ტალღის ნაკადის სიმკვრივეს (ერთეული  $1 \text{ვტ/მ}^2$ ). ბგერის ინტენსივობა – ბგერითი ენერჯის ის რაოდენობაა, რომელიც გადადის ბგერის ტალღით მისი გავრცელების მიმართულებით ერთეულ კვეთაში დროის ერთეულში. ინტენსივობა დამოკიდებულია ტალღის ამპლიტუდაზე. უფრო ზუსტად კი ის ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია:  $J \sim A^2$ .

## **5.6. თანაბრად ტემპერირებული მუსიკალური მწკრივი.**

სუბიექტური მაჩვენებლები დამოკიდებულია ბგერითი ტალღის ობიექტურ მახასიათებლებზე – ტალღის ინტენსივობაზე და ჰარმონიულ სპექტრზე. ბგერითი რხევების სიხშირე ყურის მიერ ფასდება როგორც ტონის სიმაღლე. თუმცა ტონის სიმაღლე უმნიშვნელოდ არის დამოკიდებული აგრეთვე ტალღის ინტენსივობაზე, მაგრამ პირველ მიახლოებაში ბგერის სიხშირე შეიძლება ჩაითვალოს მუსიკალური ტონის სიმაღლეთ. ტონის სიმაღლის აღსაქმელად და შესაფასებლად ყურის მიერ აღქმული ტონების მთელი დიაპაზონი გაყოფილია ინტერვალებად (ანუ ოკტავებათ) ისეთ ნაირად, რომ ამ ინტერვალების ტონების განაპირა სიხშირეების შეფარდება უდრის ორს: რიგით პირველი ოქტავა (ანუ თანაბრად ტემპერირებული<sup>17</sup> მუსიკალური მწკრივის სუბკონტროკტავა) ~16,4– 32,7 ჰც; მეორე (კონტროკტავა) ~ 32 – 64 ჰც; მესამე ოქტავა (დიდი ოქტავა) ~64-128 ჰც და ა.შ. იხილე ქვემოთმოყვანილი ცხრილი 1.

<sup>17</sup> ტემპერირება (ლათ. *Temperatio* — თანაფარდობა, სწორი შეფარდება, შესატყვისი ორგანიზება) — მუსიკალური მწკრივის ზოგიერთი ინტერვალის უმნიშვნელო შეცვლა (შემცირება ან მატება), რომელიც აკუსტიკურად სუფთა ინტერვალისაგან არი გადახრილი. ტემპერირებას აწარმოებენ ფიქსირებული წყობის მუსიკალური საკრავების შესაძლებლობების გასაფართოვებლად.

თანაბრად ტემპორირებული მუსიკალური მწკრივის ძირითადი ტონების სიხშირეების ცხრილი (ჰც)

ცხრილი 1

№	ტონი	სუბკონტრ ოქტავა	კონტრ ოქტავა	დიდი ოქტავა	პატარა ოქტავა	I ოქტავა	II ოქტავა	III ოქტავა	IV ოქტავა
1	დო	16,352	32,703	65,406	130,81	261,63	523,25	1046,5	2093,0
2	#								
3	რე	18,354	36,708	73,416	146,83	293,67	587,33	1174,7	2349,3
4	#								
5	მი	20,602	41,203	82,406	164,81	329,23	659,26	1318,5	2637,0
6	ფა	21,827	43,654	87,307	174,61	349,23	698,46	1396,9	2793,8
7	#								
8	სოლ	24,500	48,999	97,999	196,00	392,00	783,99	1568,0	3136,0
9	#								
10	ლა	27,500	55,000	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,0	3520,0
11	#								
12	სი	30,868	61,735	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,5	3951,1
13	დო	32,703	65,406	130,81	261,63	523,25	1046,5	2093,0	4186,0

მწვანე ფერით მონიშნულ ცხრილის ბოლო მე-13 პუნქტში მოყვანილია ყოველი მომდევნო ოქტავის „დო“ ტონები. ამრიგად, ნახევარტონების რაოდენობა (ბგერებს შორისი შუალედები) ერთ ოქტავაში 12-ა. რუხი ფერით მონიშნულია ტონები (სიხშირეები), რომლებიც არ შედიან ფორტეპიანოს კლავიატურაში, ყვითელი ფერით – ვიოლინოს სიმების ტონები. წითელი შრიფტით გამოყოფილია კამერტონის სიხშირე (440 ჰც).

ტემპორირებულ მუსიკალურ მწკრივში ოქტავა იყოფა ზუსტად 12 ნახევარტონად ისე, რომ შეიძლება მათემატიკურად გამოითვალოს სრული მუსიკალური მწკრივის სიხშირეები შემდეგი ფორმულის მეშვეობით:

$$f(i) = f_0 \cdot 2^{i/12}$$

სადაც  $f_0$  – კამერტონის სიხშირეა (მაგალითად, ლა 440 ჰც), ხოლო  $i$  – ნახევარტონების რაოდენობა საძიებელ ტონსა ( $f(i)$ ) და ეტალონს ( $f_0$ ) შორის. მაგალითად, შეიძლება გამოითვალოს ბგერის სიხშირე კამერტონულ „ლა“-ზე ერთი ტონით (2 ნახევარტონით) დაბლა – პირველი მუსიკალური ოქტავის „სოლ“ ბგერის სიხშირე.

$$i = -2$$

$$f(-2) = 440 \text{ Hz} \cdot 2^{-2/12} \approx 391,995 \text{ Hz}$$

თუ გვჭირდება „სოლ“ ტონის გამოთვლა ოქტავით მაღლა (12 ნახევარტონი):

$$i = 12 - 2 = 10$$

$$f(10) = 440 \text{ Hz} \cdot 2^{10/12} \approx 783,991 \text{ Hz}$$

ორი მიღებული „სოლ“ ტონის სიხშირეები ორჯელ განსხვავდებიან, რაც გვაძლევს სუფთა ოქტავას. თანაბარი ტემპორირების უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ შესაძლებელია მუსიკალური ნაწარმოების ნებისმიერი ინტერვალით ტრანსპონირება ან ზემოთ, ან ქვემოთ.

რთული ტონები ერთნაირი სიხშირის შემთხვევაში შეიძლება განსხვავდებოდნენ რხევის ფორმით და შესაბამისად ჰარმონიული სპექტრით. ეს განსხვავება ყურის მიერ აღიქმება როგორც ბგერის ტემბრი. ამრიგად ბგერის თავისებურებას, რომელიც დამოკიდებულია მისი აკუსტიკური სპექტრის შემადგენლობაზე **ტემბრი** ეწოდება. ბგერის სუბიექტური მახასიათებელი ტემბრი დაკავშირებულია მის ობიექტურ მახასიათებელთან აკუსტიკურ სპექტრთან.

**ხმამალღობა** ბგერის სუბიექტური მახასიათებელია და სუბიექტურად აღთქმულ ბგერის ძალას წარმოადგენს. ორი ერთნაირი ძალის და სხვადასხვა სიხშირის ბგერას ადამიანი სხვადასხვაგვარად შეიგრძნობს. მას უფრო ხმამალა მოეჩვენება ბგერა, რომლის სიხშირე უფრო ახლოა სიხშირეთა იმ ინტერვალთან, რომლის მიმართაც ყური მაქსიმალური გრძნობიანობით ხასიათდება (დაახლოებით 4 კჰც-ის დიაპაზონი). ცნობილია ვებერ – ფეხნერის კანონი, რომელიც წარმოადგენს მნიშვნელოვან აღმოჩენას ფსიქოფიზიკის დარგში, და რომელიც საშუალებას იძლევა დავახასიათოთ ის, რაც თითქოს არ ექვემდებარება რაიმე დახასიათებას – ადამიანის შეგრძნება.

### 5.7. ვებერ – ფეხნერის კანონი.

ვებერ – ფეხნერის კანონის თანახმად ადამიანის შეგრძნების ინტენსივობა სტიმულის ინტენსივობის ლოგარითმის პროპორციულია. ერთი შეხედვით კანონის ასეთი ფორმულირება აფრთხილებს, მაგრამ სინამდვილეში ყველაფერი საკმაოდ მარტივია.

ჯერ კიდევ მე-IXX საუკუნეში გერმანელმა ფიზიოლოგმა ერნსტ ხენრიხ ვებერმა<sup>18</sup> რამდენიმე ექსპერიმენტის საფუძველზე აჩვენა რომ იმისათვის, რომ ადამიანს ჰქონდეს ყოველი ახალი გამაღიზიანებლის აღქმის უნარი ისინი უნდა განსხვავდებოდნენ თავის წინამორბედებისაგან სიდიდით, რომელიც საწყისი გამაღიზიანებლის პროპორციულია.

ამ მტკიცებულების დასასაბუთებისათვის შეიძლება მოვიყვანოთ შემდეგი ექსპერიმენტული ფაქტორები:

- თუ ავიღეთ ორი საგანი, რომელთაც განსხვავებული მასა გააჩნიათ, სხვაობის შეგრძნობისათვის მეორე საგანი უნდა განსხვავდებოდეს მისგან 1/30-ით.
- იმისათვის, რომ ადამიანმა შეიგრძნოს ორი გამმანათებლის სიკაშკაშის სხვაობა, მათი ნათება უნდა განსხვავდებოდეს 1/100-ით. ანუ, 12 ნათურიანი გამმანათებლის ნათება საგრძნობლად არ გაიზრდება ერთი ნათურის დამატებისას, მაგრამ ერთნათურიანი გამმანათებლის შემთხვევაში ერთი ნათურის დამატება საგრძნობლად მეტ სინათლეს მოგვცემს. იმის და მიუხედავად, რომ ორივე შემთხვევაში ემატება ერთი ნათურა განსხვავება განათებაში აღიქმება სხვადასხვაგვარად, ვინაიდან მნიშვნელოვანია ორ გამაღიზიანებელს შორის შეფარდებას და არა მარტივ მატებას.

ჩვენს მიერ განხილული ფორმულირება დასტურდება განსაკუთრებული ფორმულით, რომელიც გამოხატავს ვებერ – ფეხნერის ფსიქოფიზიკურ კანონს. 1860 წელს ფეხნერმა ჩამოაყალიბა კანონი, რომლის თანახმადაც შეგრძნების  $p$  ძალა გამაღიზიანებლის ინტენსივობის  $S$  პროპორციულია:

$$p = k \ln \frac{S}{S_0}$$

<sup>18</sup> ერნსტ ხენრიხ ვებერ (*Ernst Heinrich Weber*) — გერმანელი ფსიქოფიზიოლოგი და ანატომი, ფიზიკოს ვილხელ ვებერის ძმა. მისმა შრომებმა საფუძველი დაუდეს ფსიქოფიზიკას და ექსპერიმენტულ ფსიქოლოგიას.



სადაც  $S$  – გამაღიზიანებლის ინტენსივობის მნიშვნელობა;  $S_0$  – გამაღიზიანებლის ინტენსივობის ქვედა ზღვრული მნიშვნელობა; თუ  $S < S_0$  გამაღიზიანებელი საერთოდ არ აღიქმება;  $k$  – შეგრძნების სუბიექტზე დამოკიდებული კონსტანტა.

ამ კანონის გასაგებად განსაკუთრებულ მნიშვნელოვანია ეგრე წოდებული **ზღურბლის** ცნება, რომელიც დგინდება ფსიქოფიზიკური კვლევების შედეგად. შემდგომში გაირკვა, რომ არსებული ინტენსივობის გაღიზიანებას ესაჭიროება მისთვის რაღაც კონკრეტული დონის მიღწევა იმისათვის, რომ ადამიანს ჰქონდეს შესაძლებლობა ამ გაღიზიანების აღქმა. სუსტ ზემოქმედებას რომელიც იძლევა ოდნავ შესამჩნევ შეგრძნებას უწოდებენ შეგრძნების ქვედა ზღურბლს.

არსებობს ზეგავლენის ისეთი დონე, რომლის გადალახვისას შეგრძნება უკვე არ იცვლება. ამ შემთხვევაში საუბრობენ შეგრძნების ზედა ზღურბლზე. ნებისმიერ ზეგავლენას ადამიანი აღიქვამს მხოლოდ აღნიშნული მაჩვენებლების საზღვრებში, რომლებსაც ამის გამო მგრძობიარობის გარა ზღურბლებს უწოდებენ.

არ შეიძლება არ ითქვას, რომ პარალელიზმი, ამ სიტყვის სრული გაგებით, შეგრძნებისა და გაღიზიანების ინტენსივობებს შორის არ არის და ვერც იქნება ზღურბლთაშორის ინტერვალშიც კი. ამის შემოწმება შეიძლება მარტივ მაგალითზე. წარმოიდგინეთ, რომ თქვენ აიღეთ ხელში ჩანთა და მას, რა თქმა უნდა გარკვეული წონა გააჩნია. ამის შემდეგ ჩადეთ ჩანთაში ქალაქის ფურცელი. ფაქტიურად ჩანთის წონა გაიზარდა, მაგრამ ადამიანი ვერ იგრძნობს ვერავითარ სხვაობას, მიუხედავად იმისა, რომ ჩანთის წონა იმყოფება ზონაში ორ ზღურბლს შორის.

ამ შემთხვევაში საუბარი იმაზეა, რომ გაღიზიანების მატება ძალზე სუსტია. სიდიდე რომელზეც მატულობს გაღიზიანება ეწოდება **განსხვავების ზღურბლი**. აქედან კი გამომდინარეობს, რომ ძალზე მცირე განსხვავებითი ინტენსივობის მქონე გაღიზიანება არის ზღურბლამდელი, ხოლო ძალზე ძლიერი – ზღურბლისზედა. ამასთან ერთად ამ მაჩვენებლების დონე დამოკიდებულია მგრძობიარობაზე განსხვავების მიმართ – თუ განსხვავების მგრძობიარობა მაღალია, მაშინ განსხვავების ზღურბლი, შესაბამისად მცირეა.

### 5.8. ხმამაღლობა.

ფიზიკურად ხმამაღლობა ახასიათებს სმენის ორგანოს შეგრძნობის დონეს გაღიზიანების ზღურბლს ზემოთ და დამოკიდებულია ბგერის ინტენსიობაზე  $-J$  ( $J \sim A^2$ ). ექსპერიმენტებიდან ცნობილია (ვებერ – ფეხნერის კანონი), რომ  $\Delta J/J$  რჩება უცვლელი გაღიზიანების მთელი დიაპაზონისათვის. თუ ეს გამოსახულება გავაინტეგრირებთ ინტენსივობის მიმართ, მივიღებთ ვებერ-ფეხნერის კანონს ხმამაღლობისათვის:

$$V = \int_{J_0}^J k \frac{dJ}{J} = k \ln \frac{J}{J_0}$$

სადაც  $V$  (Volume) – ხმამაღლობის დონეა;  $k$  – მგრძობიარობის სუბიექტზე დამოკიდებული პროპორციულობის კოეფიციენტი;  $J$  – ბგერის ინტენსივობა;  $J_0$  – ბგერის ინტენსივობა სმენადობის ზღურბლზე. ესე იგი ვებერ-ფეხნერის კანონი ხმამაღლობისათვის ასე ჩამოყალიბდება:

**მოცემული ბგერის ხმამაღლობის დონე (სიხშირის ერთი და იგივე მნიშვნელობისათვის) მისი და სმენადობის ზღურბლზე მყოფი ინტენსივობების შეფარდების ლოგარითმის პირდაპირ პროპორციულია.**

ადამიანის ყურს უნარი შესწევს გაარჩიოს ბგერები რომელთა ინტენსიობა იცვლება  $10^{-12}$  ვტ/მ<sup>2</sup> (სმენადობის ზღურბლი) –  $10$  ვტ/მ<sup>2</sup> – მდე (ტკივილის ზღურბლი). ბგერის

ინტენსივობის გასაზომად გამოიყენებენ ლოგარითულ სკალას (ერთეული ბელი). **1 ბელი** არის ბგერის ინტენსივობის სკალის ერთეული, რომელიც შეესაბამება ინტენსივობის დონის 10 ჯერ ცვლილებას. უფრო ხშირად გამოიყენება ერთეული დეციბელი.

ინტენსივობის დონე  $\beta$  დეციბელებში (დბ) ვებერ-ფეხნერის კანონის თანახმად განისაზღვრება როგორც

$$\beta = 10 \cdot \lg \frac{J}{J_0}$$

აქ  $J_0$  – არის მრავალი ადამიანისათვის გასაშუალებული ინტენსივობის სმენადი მინიმუმი  $J_0 = 1 \cdot 10^{-12}$  ვტ/მ<sup>2</sup> (განტოლებაში კოეფიციენტი  $k = 10$  და ლოგარითმი აღებულია 10-ის ფუძით). მაგალითად თუ ბგერის ინტენსივობა არის  $J = 1 \cdot 10^{-10}$  ვტ/მ<sup>2</sup>, მისი ინტენსივობის დონე  $\beta = 10 \cdot \lg 100 = 20$ . ქვემოთ საილუსტრაციოთ მოყვანილია ბგერის ინტენსივობის და ხმამაღლობის კავშირის მაგალითები.

ცხრილი 2

ბგერის წყარო	ხმამაღლობა $\beta$ (დბ)	ინტენსივობა $I$ (ვტ/მ <sup>2</sup> )
რეაქტიული თვითმფრინავი	140	100
ტკივილის ზღვარი	120	1
ჩვეულებრივი საუბარი	60	$3 \cdot 10^{-6}$
ჩურჩული	20	$1 \cdot 10^{-10}$
სმენადობის ზღვარი	0	$1 \cdot 10^{-12}$

მედიცინაში სმენის გამოკვლევას ეწოდება აუდიომეტრია. როგორც წესი განსაზღვრავენ სმენადობის ზრურბლის მრუდის წერტილებს სხვადასხვა სიხშირეებისათვის. სმენის დაქვეითება განისაზღვრება როგორც სხვაობა მიღებულ მონაცემებისა და ნორმას შორის.

როგორც უკვე ითქვა ხმაური ეწოდება სხვადასხვაგვარი ტონების სიმრავლეს, რომელთა სიხშირე, ფორმა, ინტენსივობა და ხანგრძლივობა უწყვეტად იცვლება. ხმაური, ორგანიზმზე ხანგრძლივი ზემოქმედებისას, მავნე ზეგავლენას ახდენს. განსაკუთრებით ზიანდება სმენა და ნერვული სისტემა. მავნე ზემოქმედების ხასიათი დამოკიდებულია ხმაურის ხმამაღლობაზე და სპექტრალურ შემადგენლობაზე. თუ ხმაურის სპექტრი უწყვეტია მას **თეთრ ხმაურს** უწოდებენ.

როგორც ითქვა 20 კპც-ზე მაღალი სიხშირის რხევებს ულტრაბგერები ეწოდება. ულტრაბგერითი ტალღა, როგორც ყველა ბგერა, წარმოგვიდგება გარემოს ნაწილაკების თანმიმდევრული გაუხშობისა და შესქელებისაგან. ულტრაბგერები ადვილად ფოკუსირდებიან. ულტრაბგერას ნივთიერებაზე ზემოქმედებისას რთული კომპლექსური ხასიათი გააჩნია: მექანიკური ფიზიკო-ქიმიური და სითბური. საკმაოდ მაღალი ინტენსივობის შემთხვევაში ულტრაბგერა იწვევს ქსოვილების დაშლას. სითხეში ულტრაბგერა იწვევს **კავიტაციას** – სითხეში მიკროსკოპული ღრუების წარმოქმნას, რომლებიც ივსება ორთქლით და სითხეში გახსნილი აირებით. კავიტაციას თან ახლავს ონიზირება, მოლეკულების დისოციაცია და ა.შ. და სითბოს გამოყოფა.

სამედიცინო პრაქტიკაში ულტრაბგერას სხვადასხვა გამოყენება აქვს. მაგრამ ყველაზე ფართოდ ის დაინერგა ე.წ. ულტრაბგერითი ვიზუალიზირების მეთოდების განვითარების კვალობაზე. ულტრაბგერითი ვიზუალიზირების მეთოდებში გამოიყენებენ სხვადასხვა სიხშირის ტალღებს ბიოექოლოკაციიდან დაწყებული (300 კპც), აკუსტიკურ მიკროსკოპიამდე (12 მგპც). თერაპიაში გამოიყენება ულტრაბგერები 0,8-15 მგპც-ის

დიაპაზონში, რაც  $\nu = \lambda\nu$  დამოკიდებულებიდან გამომდინარე დაახლოებით 1 მმ დან 0,1 მმ-მდე სიგრძის აკუსტიკურ ტალღებს შეესაბამება.

ულტრაბგერით სადიაგნოსტიკო სისტემებში მუშა სიხშირეს შეარჩევენ იმის მიხედვით თუ რამდენად ოპტიმალურია შეფარდება სივრცული გარჩევის უნარსა და შეღწევის სიღრმის შორის. მაგალითად, ღვიძლის, გულის, მუცლის ღრუს, სხვა ორგანოების ვიზუალიზირებისას გამოიყენება 3 – 5 მგჰც-ის სიხშირის რხევები. სხეულის ზედაპირთან უფრო ახლოს განლაგებულ ორგანოებისათვის, მაგალითად, ფარისებრივი ჯირკვლის, საძილე არტერიისა და ა.შ. უფრო მაღალი სიხშირის ბგერები გამოიყენება (4 - 10 მგჰც). თვალის გამოსაკვლევად 7 - 15 მგჰც-ის სიხშირის რხევებს იყენებენ.

### 5.9. დოპლერის ეფექტი.

როგორც ცნობილია ფიზიკური სიდიდეები ხშირად ფარდობითია ანუ მათი მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე თუ რომელ ათვლით სისტემაში მოხდა მათი გამოთვლა. ასევე ტალღის რხევის სიხშირის მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე თუ გაზომვის პროცესში დამკვირვებელი და რხევის წყარო რა მდგომარეობაში არიან ერთმანეთის მიმართ (მოძრაობენ თუ უძრავნი არიან). ამ მოვლენას დოპლერის ეფექტს უწოდებენ. სხვაგვარად დოპლერის ეფექტი ეს არის დამკვირვებლის მიერ აღთქმული რხევების სიხშირის ცვლილება წყაროს სიხშირის მიმართ, მათი (წყაროსა და დამკვირვებლის) ერთმანეთის მიმართ მოძრაობის დროს.

როგორც ცნობილია მოძრაობის საშუალო სიჩქარე  $\nu = S/t$

მაგრამ ხმის ბგერის მიერ გავლილი მანძილი განისაზღვრება ტალღის სიგრძით ( $\lambda$ ), ხოლო ამაზე დახარჯული დრო პერიოდით ( $T$ ), მაგრამ ვინაიდან  $1/T = \nu$  ხმის ტალღის სიჩქარე იქნება

$$\nu = \lambda/T = \lambda\nu$$

აქედან სიხშირე იქნება:

$$\nu = \nu/\lambda$$

დავუშვათ გვაქვს რხევების წყარო სიხშირით

$$\nu_0 = \nu_0/\lambda_0$$

აქ  $\nu_0$  – ხმის ტალღის გავრცელების სიჩქარეა გარემოში,  $\lambda_0$  – ამ ტალღის სიგრძე. მაშინ დამკვირვებლამდა მოსული ბგერის სიჩქარე იქნება

$$\nu_{re} = \nu_0 \pm \nu_1$$

ე.ი. განსხვავდება იმის მიხედვით, უახლოვდება ბგერის წყარო დამკვირვებელს თუ შორდება. აქ  $\nu_0$  – ბგერის ტალღის სიჩქარეა გარემოში, ხოლო  $\nu_1$  – ბგერის წყაროს მოძრაობის სიჩქარე. მაშინ, რადგანაც ტალღის სიგრძე არ იცვლება  $\lambda_0 = const$  გამოდის, რომ:

$$\nu_{re} = \nu_{re}/\lambda_0 = (\nu_0 \pm \nu_1)/\lambda_0$$

ე.ი.  $\nu_{re} > \nu_0$  თუ ვუახლოვდებით წყაროს და  $\nu_{re} < \nu_0$ , თუ მას ვშორდებით. ამრიგად არეკვლილი და დაცემული ტალღის სიხშირის ცვლილების მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ ორგანიზმის მოძრავი სტრუქტურების გადაადგილების სიჩქარე, მაგ. სისხლის დინების სიჩქარე, გულის სარკმელებისა და კედლების მოძრაობის სიჩქარე. ქვემოთ წარმოდგენილ ცხრილში მოყვანილია ბგერის სიჩქარის მნიშვნელობები სხვადასხვა გარემოში.

ნივთიერება	მ/წმ	ნივთიერება	მ/წმ
ჟანგბადი 0°	316	ზღვის წყალი 0°C	1450
ჰაერი 0°C	330	ორგანიზმის ქსოვილები	1540
ჰაერი 20°C	340	სისხლი	1500-1600
აზოტი 0°C	334	მინა 0°C	4800
სუფთა წყალი 0°C	1400	რკინა 20°C	5000

### 5.10. ინფრაბგერები.

აკუსტიკაზე საუბრის დასასრულს რამდენიმე სიტყვა დავამატოთ ინფრაბგერების შესახებ. ეს დრეკად გარემოში გავრცელებული მექანიკური ტალღებია რომელთა სიხშირე 16 ჰც-ზე დაბალია და მათ ადამიანის ყური ვერ აღიქვამს. იმის გამო რომ ინფრაბგერები ხასიათდება ძალზე დაბალი სიხშირით და შესაბამისად გრძელი ტალღით, მათ მიმართ გარემოს შთანთქმის კოეფიციენტი საკმაოდ მცირეა, რაც იმას ნიშნავს, რომ ულტრაბგერისაგან განსხვავებით ინფრაბგერის შეღწევის უნარიანობა ძალზე დიდია.

ბუნებაში, გარდა ზემოთ აღნიშნული მექანიკური წარმოშობის ინფრაბგერებისა (წარმოიქმნებიან დიდი მასის სხეულების რხევისას) არსებობენ ჰიდროდინამიკური ბუნების ინფრაბგერებიც, რომლებიც წარმოიშვებიან სითხეებისა და აირების დიდი ნაკადების ტურბულენტული მოძრაობისას. ადამიანი ვერ აღწევს თავს ინფრაბგერის სხვადასხვაგვარ ზეგავლენას და ამის გამო რეზონანსული მოვლენების შედეგად ამ ბგერებმა შეიძლება გამოიწვიონ სისუსტე, შრომის უნარის დაქვეითება, უძილობა, შიშის გრძნობა და ა.შ. ინფრაბგერა, მიუხედავად იმისა, რომ ადამიანის ყური ამ სიხშირის რხევებს ვერ აღიქვამს, აქვეითებს სმენის ორგანოს გრძნობიარობას.

## 6. ბიომექანიკის ელემენტები.

### 6.1. კუთხური სიჩქარე.

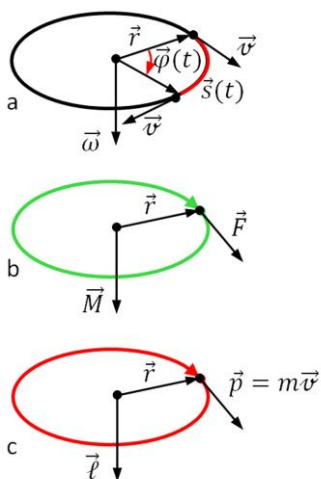
ნებისმიერი ცოცხალი ორგანიზმი, მათ შორის ადამიანიც, შეიძლება განიხილოს როგორც გარემოდან გამოყოფილი ქვესისტემა, რომელშიც მიმდინარეობენ მისთვის დამახასიათებელი პროცესები. ამასთან დაკავშირებით ყველა მექანიკური გადაადგილება მოცემული ქვესისტემის ფარგლებში მიზანშეწონილია განვიხილოთ როგორც მოძრაობა გარკვეული ცენტრის გარშემო, ან და სიმეტრიის ღერძის ირგვლივ, ანუ, სხვა სიტყვებით რომ ითქვას როგორც წრიული მოძრაობები.

სხეულის წრიული მოძრაობა ხასიათდება ბრუნვითი სიჩქარით  $\omega$  იგი მიდებულობს იმ წრეწილის ცენტრზე რომელსაც შემოსწერს მბრუნავი სხეულის რომელიმე წერტილი და მიმართულია მარჯვენა ბურღის წესის მიხედვით. ზოგადათ კუთხური სიჩქარის მყისიერი მნიშვნელობა ტოლია შემობრუნების კუთხის წარმოებულისა დროის მიმართ  $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ . თანაბარი მოძრაობისას  $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$ . აქ  $\Delta\varphi = 2\pi$  არის ერთი სრული ბრუნვის შესაბამისი კუთხე,  $\Delta t = T$  – სრული ბრუნვის დრო, ანუ ბრუნვის პერიოდი. არათანაბარი ბრუნვისას სხეულის აჩქარება ხასიათდება კუთხური აჩქარებით  $\varepsilon$ . კუთხური აჩქარების მყისიერი მნიშვნელობა წარმოადგენს კუთხური სიჩქარის წარმოებულს დროის მიმართ, ან შებრუნების კუთხის მეორე წარმოებულს დროის მიმართ:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

კუთხური სიჩქარის ერთეულია რად/წმ<sup>-1</sup>, ხოლო აჩქარებისა რად/წმ<sup>-2</sup>.

სხეულის ბრუნვითი მოძრაობა შეიძლება დავახასიათოთ მისი ცალკეული წერტილის წრფიული სიჩქარით და აჩქარებით. გამოვსახოთ წრფიული სიჩქარე მისი კუთხური ანალოგის მეშვეობით. ამისათვის საჭიროა წრეზე მოძრავი წერტილის გარბენის სიგრძის (წითელი ფერის რკალი სურ. 7a) და რადიუს ვექტორის ( $\vec{r}$ ) შებრუნების კუთხის დაკავშირება. ავღნიშნოთ, რომ წითელი ფერის რკალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ერთიანი კუთხის ( $\varphi_1$ ) ნამრავლი შებრუნების კუთხეზე ( $\varphi$ ).



სურ. 7. წრიული მოძრაობის ილუსტრირება. (a) წრიული სიჩქარის აღწერა. შებრუნების კუთხე ( $\varphi(t)$ ) როგორც შავი წერტილის მიერ გავლილი მანძილი (წითელი რკალი), დროის ვექტორული ფუნქციებია.  $\vec{r}$  – რადიუს-ვექტორი, რომელიც მიმართულია წრეწილის ცენტრიდან მასზე მოძრავ წერტილისკენ. კუთხური სიჩქარე  $\vec{\omega}$  – ეს წრეწილის ცენტრზე მიდებული ვექტორია რომლის მიმართულეებს განსაზღვრავს მარჯვენა ბურღის წესი.  $\vec{v}$  – წრფიული სიჩქარეა, რომელიც განისაზღვრება როგორც კუთხური სიჩქარის და რადიუს-ვექტორის ვექტორული ნამრავლი და მიმართულია გარშემოწერილობის მხის მიმართულებით. (b) ძალის მომენტი, როგორც რადიუს-ვექტორის და მიდებული ძალის ვექტორული ნამრავლი, რომლის მიმართულია წრიული ტრანსტორიის ნორმალურად მარჯვენა ბურღის წესით. (c) ნაჩვენებია იმპულსის მომენტი, როგორც რადიუს ვექტორის და წრეზე მოძრავი შავი წერტილის იმპულსის ვექტორული ნამრავლი.

$$\varphi_1 = \frac{2\pi r}{2\pi} = r$$

აქ მრიცხველში იმყოფება წრეწირის სიგრძე, ხოლო მნიშვნელში მასში რადიანების რაოდენობა. მაშინ შეიძლება ჩაიწეროს, რომ რიცხობრივად  $\vec{s}(t) = r\vec{\varphi}(t)$ . ავიღოთ ამ

გამოსახულების წარმოებული დროის მიმართ, თან გავითვალისწინოთ, რომ რადიუს – ვექტორის სიგრძე არაა დამოკიდებული დროზე, მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{d\vec{s}(t)}{dt} = r \frac{d\vec{\varphi}(t)}{dt}$$

ასე რომ, თუ გავითვალისწინებთ, რომ რადიუს-ვექტორი – ვექტორული სიდიდეა, ბოლო გამოსახულების ჩაწერა შეიძლება ვექტორული ნამრავლის სახით:

$$\vec{v} = [\vec{\omega}\vec{r}] \quad (19)$$

ანუ, წრეზე მოძრავი სხეულის ნებისმიერი წერტილის წრფიული სიჩქარე კუთხური სიჩქარის და რადიუს-ვექტორის ვექტორული ნამრავლის ტოლია. ვექტორული ნამრავლის განმარტებიდან და კუთხური სიჩქარის მიმართულებიდან გამომდინარე მამრავლების თანმიმდევრობა უნდა იყოს ისეთი, როგორც არის მოყვანილი (19) გამოსახულებაში.

## 6.2. წრიული მოძრაობის დამახასიათებელი სიდიდეები.

სხეულის ბრუნვას ღერძის გარშემო იწვევს ამ ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში განლაგებული ძალა, რომელიც მიდებულობს რადიუს-ვექტორის პერპენდიკულარულად (სურ. 7b). მოყვანილ სურათზე ძალა მიმართულია ნახაზის სიბრტყიდან მკითხველისაკენ. შედეგად წარმოიქმნება ძალის მომენტი, რომლის მიმართულებაც განისაზღვრება მარჯვენა ბურღის წესით, ანუ ქვემოთ.

ძალის მომენტს ( $\vec{M}$ ) ბრუნვის ცენტრის მიმართ უწოდებენ ბრუნვის ღერძიდან ძალის მოდების წერტილამდე გავლებულ რადიუს-ვექტორის ვექტორულ ნამრავლს ამ ძალის ვექტორზე. ახასიათებს მყარ სხეულზე მოქმედ ბრუნვით ძალას.

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{F}] \quad (20)$$

რადიუს ვექტორს ზოგჯერ ძალის მხარს უწოდებენ. სურ. 7b შემთხვევაში  $\vec{F}$  ძალის მხარეს წარმოადგენს ისი მოდების წერტილის რადიუს-ვექტორი ( $\vec{r}$ ). რიცხობრივად  $M = F \cdot r$  და იზომება ნ·მ.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული მასის განსაზღვრა შეიძლება სხვადასხვანაირად და ერთ ერთ თავის გამოვლენაში ის წარმოადგენს სხეულის ინერტულობის საზომს. რაც მეტია მასა, მით უფრო ინერტიულია სხეული ანუ მით უფრო ძნელია სხეულის მოძრაობის სიჩქარის და ტრაექტორიის შეცვლა (უძრავი სხეული ხასიათდება ნულოვანი სიჩქარით). სხეულის ბრუნვისას მისი ინერცია დამოკიდებულია მასის განლაგებაზე ბრუნვის ღერძის მიმართ. რაც უფრო შორსაა განლაგებული ღერძის ბრუნვიდან მასა, მით მეტია მისი ინერცია. ამ ყველაფერს ითვალისწინებს სიდიდე რომელსაც ინერციის მომენტი ეწოდება. მატერიალური წერტილის ინერციის მომენტი:

$$j = mr^2 \quad (21)$$

სადაც  $r$  – მანძილი ბრუნვის ღერძიდან.

ასე რომ, ინერციის მომენტი წარმოადგენს სკალარულ ფიზიკურ სიდიდეს, სხეულის ინერტულობის საზომს მის ბრუნვისას ღერძის გარშემო, ისევე როგორც მასა წარმოადგენს ინერტულობის საზომს წინსვლითი მოძრაობის დროს. ხასიათდება მასების განაწილებით სხეულში: ინერციის მომენტი ელემენტალური მასების და მათი ბრუნვის ცენტრამდე (წერტილი, წრფე) მანძილების კვადრატების ნამრავლების ჯამის ტოლია:

$$J = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 \quad \text{ან, ზღვარში} \quad J_m = \int_m r^2 dm$$

ასე რომ, რაიმე სხეულის ინერციის მომენტის გამოსათვლელად ის უნდა დაიყოს მცირე ელემენტების რაღაც ( $n$ ) რაოდენობაზე რომლებიც შეიძლება იყვნენ განხილული როგორც მატერიალური წერტილები. ყველა ამ ელემენტისათვის განიხილება სიდიდეები  $\Delta m r^2$ , რომლებიც შემდეგ იჯამება.

გაზომვის ერთეული საერთაშორისო SI სისტემაში: კგ·მ<sup>2</sup>.

მოყვანილი ფორმულით შეიძლება დაითვალოს ადამიანის ინერციის მომენტი მის ბრუნვისას. სხვადასხვა მდგომარეობებში ადამიანის სხეული ხასიათდება ინერციის მომენტის განსხვავებული მნიშვნელობებით. მაგალითად მდგომარეობა “სმენაზე” შეესაბამება დაახლოებით 8 კგ·მ<sup>2</sup> ჰორიზონტალურ მდგომარეობას 17 კგ·მ<sup>2</sup>.

მბრუნავი სხეულის კინეტიკური ენერჯია ინერციის მომენტის და კუთხური სიჩქარის კვადრატის ნახევარ ნამრავლის ტოლია.

$$W_{Kin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega^2 r^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2}$$

სხეულის ბრუნვითი მოძრაობის კუთხური აჩქარება  $\varepsilon = d\omega/dt$  სხეულზე მიდებული ძალების მომენტის პირდაპირპროპორციულია და ბრუნვის ღერძის მიმართ ინერციის მომენტის უკუპროპორციულია  $\varepsilon = \frac{M}{J}$  აქედან

$$M = J\varepsilon = J \frac{d\omega}{dt} \quad (22)$$

ამ განტოლებას ეწოდება დინამიური ბრუნვითი მოძრაობის ძირითადი განტოლება. იგი ბრუნვითი მოძრაობისათვის ნიუტონის მეორე კანონის ტოლფასია – სხეულზე მოქმედი ძალის მაგივრად განიხილება ძალის მომენტი, მასის მაგივრად – სხეულის ინერციის მომენტი, წრფივი აჩქარების მაგივრად – კუთხური აჩქარება.

$m$  მასის თანაბრად მოძრავი მატერიალური წერტილის იმპულსი  $p = mv$ . სხეულის წრიული თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში საუბარი გვექნება მის იმპულსის მომენტზე.

$$\ell = pr = mvr \quad (23)$$

სადაც  $r$  – წრეწირის რადიუსია.

ვექტორულ ფორმაში (23) ჩაიწერება როგორც რადიუს-ვექტორის  $\vec{r}$  და იმპულსის  $\vec{p} = m\vec{v}$  ვექტორული ნამრავლი:

$$\vec{\ell} = [\vec{r} \vec{p}] \quad (24)$$

იმპულსის მომენტი ვექტორია, რომელიც მიდებულია წრეწირის ცენტრზე მისი სიბრტყის პერპენდიკულარულად მარჯვენა ბურღის წესით განსაზღვრული მიმართულებით (იხ. სურ. 7c). სკალარული ჩანაწერიდან (23) იმის გათვალისწინებით, რომ სხეული შეიძლება დაიყოს  $n$  რაოდენობის მცირე ელემენტებად, რომლებიც განიხილებიან როგორც მატერიალური წერტილები, უძრავი ღერძის გარშემო მბრუნავი სხეულის იმპულსის მომენტი ანუ ბრუნვის საკუთარი მომენტი, უტოლდება სხეულის ინერციის მომენტის და მისი კუთხური სიჩქარის ნამრავლს.

$$L = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^n (mvr)_i = \omega \sum_{i=1}^n (mr^2)_i = \omega \sum_{i=1}^n J_i = \omega J \quad (25)$$

როგორც ეს ნახაზიდან ჩანს იმპულსის მომენტი – ვექტორია, რომლის მიმართულეა ემთხვევა ძალის მომენტის ვექტორის მიმართულეებას.

ეხლა დაუბრუნდეთ ბრუნვითი მოძრაობის ძირითად განტოლებას (22)

$$Mdt = Jd\omega$$

და შევიყვანოთ მუდმივი სიდიდე  $J$  დიფერენციალის ნიშნის ქვეშ, მივიღებთ:

$$Mdt = d(J\omega) = dL \quad (26)$$

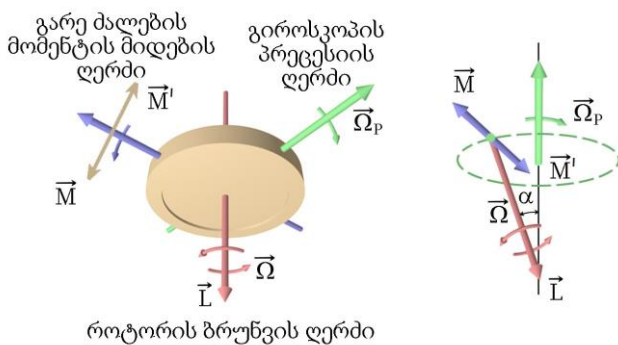
სადაც  $Mdt$  არის სხეულზე მიდებული ძალის მომენტის იმპულსი.

განტოლება (26) გვიჩვენებს, რომ მბრუნავი სხეულის იმპულსის მომენტის ცვლილება რიცხობრივად მიდებული ძალების იმპულსის მომენტის ტოლია. თუ მბრუნავ სხეულზე არ მოქმედებენ გარე ძალები, ანუ მიდებული ძალების მომენტი უდრის ნულს ( $M = 0$ ), მაშინ მისი იმპულსის მომენტის ცვლილებაც ნულის ტოლი რჩება ( $dL = 0$ ) ეს კი ნიშნავს, რომ იმპულსის მომენტი მუდმივი სიდიდეა

$$L = J\omega = const \quad (27)$$

გამოსახულება (27) ეწოდება იმპულსის მომენტების შენახვის კანონი. ასეთ პირობებში (ანუ, როდესაც იმპულსის მომენტი უცვლელია) სხეულის ინერციის მომენტის შეცვლა გამოიწვევს მისი კუთხური სიჩქარის ცვლილებას. ასეთ მოვლენას აქვს ადგილი, მაგალითად, როდესაც ფიგურული ციგურაობის დროს არეგულირებენ ბრუნვის სიჩქარეს. ხელების გაშლა ზრდის ადამიანის ინერციის მომენტს რაც გამოიწვევს მისი ბრუნვის კუთხური სიჩქარის შემცირებას და პირიქით.

იმპულსის მომენტის გამოვლენის ილუსტრირებისათვის განვიხილოთ გიროსკოპის მუშაობა. გიროსკოპი (ბერძ. „წრე“+„უყურებ“) – მოწყობილობა, რომელსაც შეუძლია ინერციული ათვლის სისტემაში მყოფი რაიმე სხეულში მოთავსებისას, მისი ორიენტაციის კუთხეების ცვლილებაზე რეაგირება. გიროსკოპის უმარტივესი მაგალითი – საბავშვო ბურიალა. ტერმინი შემოიღო ჟ.ფუკომ 1852 წელს თავის მოხსენებაში საფრანგეთის მეცნიერებათა აკადემიაში. მოხსენება მიეძღვნა ინერციულ სისტემაში დედამიწის ბრუნვის ექსპერიმენტულ დადგენის ხერხებს. სწორედ ამან განაპირობა სახელი „გიროსკოპი“.



სურ. 8. გიროსკოპის სქემატური წარდგენა. წითელი ისარი – გიროსკოპის ბრუნვის ღერძი  $\vec{\Omega}$  კუთხური სიჩქარით პატარა ისრებით ნაჩვენებია მიმართულეებით. იისფერი ისარი – გარე ძალების მომენტი, ამავე ფერის პატარა ისარი – მიდებული ძალა. ყავისფერი ისრით ნაჩვენებია გარე ძალების მომენტის ღერძზე გიროსკოპის სიბრტყეში მოქმედი  $\vec{M}$  ძალა (ყველაზე მარტივი შემთხვევა) და მისი საწინააღმდეგო ძალა  $\vec{M}'$ . მწვანე ისარი – გიროსკოპის პრეცესიის ღერძი  $\vec{\Omega}_p$  კუთხური სიჩქარით.  $\alpha$  – გიროსკოპის ღერძის დახრა

მექანიკურ გიროსკოპებში გამოყოფენ როტორულ გიროსკოპს (იხ. სურ. 8) – სწრაფად მბრუნავი მყარი სხეული (როტორი), რომლის ბრუნვის ღერძს თავისუფლად შეუძლია სივრცული ორიენტაციის შეცვლა. ამასთან გიროსკოპის ბრუნვის სიჩქარე ბევრად აღემატება მისი ღერძის მოტრიალების სიჩქარეს ( $\vec{\Omega} \gg \vec{\Omega}_p$ ). ასეთი ტიპის გიროსკოპების ძირითადი თვისებაა სივრცეში ბრუნვის ღერძის მიმართულეების უცვლელი შენარჩუნება გარედან მოქმედი ძალთა მომენტების არ არსებობისას, ხოლო ამ ძალების არსებობის



შემთხვევაში, მათთვის ეფექტური საწინააღმდეგო ქმედება. ამ თვისებას მნიშვნელოვნად განაპირობებს თვით გიროსკოპის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე.

გარე ძალის მომენტის მოქმედებისას როტორის ბრუნვის ღერძის პერპენდიკულარული ღერძის გარშემო (იისფერი ისარი სურ. 8-ის მარცხენა გამოსახულებაზე), გიროსკოპი იწყებს პრეცესიას გარე ძალების მომენტის პერპენდიკულარული ღერძის ირგვლივ (მწვანე ფერის ისარი, იქვე)  $\vec{M}_p$  პრეცესიის კუთხური სიჩქარით.

ძალის მომენტი და იმპულსის მომენტი უკავშირდებიან ერთმანეთს (26) შეფარდებით, რომელიც შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$M = \frac{dL}{dt} \quad (28)$$

სადაც ვექტორები  $\vec{M}$  და  $\vec{L}$  წარმოადგენენ, შესაბამისად, გიროსკოპზე მოქმედი ძალის და მის იმპულსის მომენტებს.

ძალის მომენტის  $\vec{M}$  ზეგავლენით იმპულსის მომენტის  $\vec{L}$  ვექტორის ცვლილება შესაძლებელია არა მხოლოდ მნიშვნელობით, არამედ მიმართულებითაც. კერძოდ კი გიროსკოპის ბრუნვის ღერძის, ესე იგი  $\vec{L}$ -ის პერპენდიკულარულად მიდებულები ძალის მომენტი იწვევს როგორც  $\vec{M}$ -ის ასევე  $\vec{L}$ -ის პერპენდიკულარულ მოძრაობას, ანუ პრეცესიის მოვლენას. გიროსკოპის პრეცესიის კუთხური სიჩქარე  $\vec{\Omega}_p$  განისაზღვრება მისი იმპულსის მომენტით და მიდებულები ძალის მომენტით:

$$\vec{M} = [\vec{\Omega}_p \vec{L}] \quad (29)$$

ანუ,  $\vec{\Omega}_p$  გიროსკოპის როტორის იმპულსის მომენტის უკუპროპორციულია, ანუ როტორის უცვლელი ინერციის მომენტის შემთხვევაში – მისი ბრუნვის სიჩქარისა.

პრეცესიასთან ერთად, ნიუტონის მესამე კანონის მოქმედების თანახმად, გიროსკოპი იწყებს მოქმედებას გარე მყოფ სხეულებზე  $\vec{M}'$  რეაქციის მომენტით, რომელსაც გიროსკოპზე მიდებულები  $\vec{M}$  მომენტის მნიშვნელობა და საწინააღმდეგო მიმართულება გააჩნია. ამ რეაქციის მომენტს **გიროსკოპული მომენტი** ეწოდება.

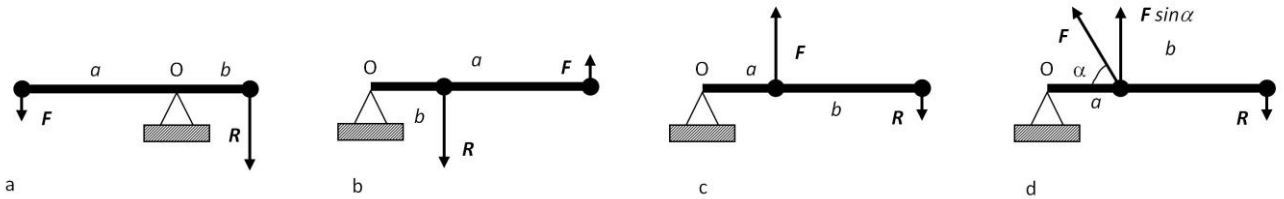
თვალსაჩინოებისათვის და მასალის უკეთესი აღქმისათვის იმავე ნახატზე მარჯვენა მხარეს მოყვანილია ყველაზე მარტივი შემთხვევის ნახაზი – განხილული ძალების მოქმედება საბავშო ბზრიალაზე. ეს ბზრიალა ბრუნავს წითელი ისრის ირგვლივ  $\vec{\Omega}$  კუთხური სიჩქარით, პატარა წითელი ისრებით ნაჩვენები მიმართულებით. ამასთან, დიდი ისარი გვიჩვენებს კუთხური სიჩქარის ვექტორის მიმართულებას (მარჯვენა ბურღის წესის თანახმად).  $\vec{M}$  ძალების მომენტის მოქმედების შედეგად (გადამწვევი ძალა) ბზრიალას ღერძი  $\alpha$  კუთხით გადაიხრება. ნათელია, რომ ამ კუთხის მნიშვნელობას განაპირობებს ძალების მომენტის სიდიდე. ბზრიალას ღერძის, ესე იგი იმპულსის მომენტის  $\vec{L}$  პერპენდიკულარულად მიდებულები ძალის მომენტი  $\vec{M}$ , იწვევს როგორც  $\vec{M}$ -ის, ასევე  $\vec{L}$ -ის პერპენდიკულარულ მოძრაობას – პრეცესიას პუნქტირული ხაზით მონიშნული ტრაექტორიით. პრეცესიის კუთხური სიჩქარე  $\vec{\Omega}_p$  (29) განტოლების თანახმად განისაზღვრება მისი იმპულსის მომენტით და მიდებულები ძალის მომენტით.

გიროსკოპის იგივე მოძრაობა შეიძლება სხვაგვარად განიმარტოს, თუ გამოვიყენებთ როტორის გარსაცმესთან დაკავშირებულ არაინერციულ ათვლის სისტემას და შემოვიღებთ ამ სისტემაში ინერციის ფიქტიურ ძალას – ე.წ. კორიოლისის ძალას. ასე რომ გარე ძალის მომენტის ზეგავლენით გიროსკოპი იწყებს ბრუნვას სწორედ გარე მომენტის

მოქმედების მიმართულებით (ნუტაციური<sup>19</sup> ნახტომი). ამგვარად, გიროსკოპის ყოველი ნაწილაკი ამ მომენტის ქმედების შედეგად იმოძრაავებს გადატანითი კუთხური სიჩქარით. მაგრამ გიროსკოპის როტორი, ამ მოძრაობების გარდა, თვითონაც ბრუნავს, ამიტომ ყოველ ნაწილაკს ექნება ფარდობითი სიჩქარე. შედეგად წარმოიქმნება კარიოლისის ძალა, რომელიც აიძულებს გიროსკოპს იმოძრაოს მიდებულ მომენტის პერპენდიკულარული მიმართულებით, ანუ პრეცესირებას.

### 6.3. ბერკეტი და ადამიანის საყრდენ მამოძრავებელი სისტემა

ადამიანის ორგანიზმის საყრდენ მამოძრავებელი სისტემა შედგება ჩონჩხის ძვლებისაგან, რომლებიც მოქმედებენ როგორც ბერკეტები, რომლებზეც მიდებულია კუნთების მიერ გენერირებული ძალა ( $\vec{F}$ ). სულ 3 ტიპის ბერკეტია:



სურ. 9. ბერკეტებს ტიპები. (a) მოქმედი ( $\vec{F}$ ) და დასაძლვეი წინააღმდეგობის ( $\vec{R}$ ) ძალები მიდებულია დაყრდნობის წერტილის სხვადასხვა მხარეზე. (b,c,d) მოქმედი ( $\vec{F}$ ) და დასაძლვეი წინააღმდეგობის ( $\vec{R}$ ) ძალები მიდებულია დაყრდნობის წერტილის ერთ მხარეს. უფო მეტიც (b) – ძალის ბერკეტია; (c) – გადაადგილების, ანუ სიჩქარის ბერკეტი, (d) – მოქმედი ძალა ( $\vec{F}$ ) მიდებულია  $\alpha$  კუთხით.

- როდესაც მოქმედი ( $\vec{F}$ ) და დასაძლვეი წინააღმდეგობის ძალები ( $\vec{R}$ ) მიდებულნი არიან საყრდენი წერტილის სხვადასხვა მხარეს. ასეთი ტიპის ბერკეტად შეგვიძლია განვიხილოთ თავის ქალა. ბრუნვის ღერძად წარმოგვიდგება პირველი ძალა. მის წინ ქვემოთ მიმართულია თავის ქალის სიმძიმის ცენტრის ძალა ( $\vec{R}$ ) და საპირისპირო მხრიდან კუნთების ძალა ( $\vec{F}$ ). ამ შემთხვევაში წონასწორობის პირობაა  $\vec{F}a = \vec{R}b$  (სურ. 9a).
- როდესაც მოქმედი ( $\vec{F}$ ) და დასაძლვეი წინააღმდეგობის ძალები ( $\vec{R}$ ) მიდებული არიან საყრდენი (O) წერტილის ერთსა და იმავე მხარეს, ისე რომ  $\vec{F}$  ძალა მიდებულია ბერკეტის ბოლოსთან ახლოს  $\vec{R}$  ძალა კი საყრდენ წერტილთან ახლო. ბერკეტის წონასწორობის პირობა  $\vec{F}a = \vec{R}b$  მაგრამ  $a > b, \vec{F} < \vec{R}$  (სურ. 9b). ასეთი ბერკეტი იძლევა მოგებას ძალაში მანძილის ხარჯზე. ამ ტიპის ბერკეტს ეწოდება ძალის ბერკეტი. ასეთი ტიპის ბერკეტთან გვაქვს საქმე როდესაც განვიხილავთ თითის ცერებზე დამდგარ ადამიანს. ამ შემთხვევაში ბერკეტის ღერძი გადის წინა ტერფის ძვლის თავზე. დასაძლვეი სიმძიმის ძალა ( $\vec{R}$ ) მიდებულია კოჭის ძვალებზე. მოქმედი ძალა ( $\vec{F}$ ), რომელსაც აწვითარებს კუნთი მიდებულია ქუსლის ძვალებზე.
- ბერკეტი, რომელშიც ძალა  $\vec{F}$  მიდებულია საყრდენ წერტილთან უფრო ახლო, ვიდრე  $\vec{R}$  ძალა. წონასწორობის პირობა აქაც  $\vec{F}a = \vec{R}b$  მაგრამ  $a < b$ , ე.ი.  $\vec{F} > \vec{R}$  (სურ. 9c). ამრიგად ასეთი ბერკეტით ვაგებთ ძალაში სამაგიეროდ ვიგებთ გადაადგილებაში და ამ ტიპის ბერკეტებს ეწოდება სიჩქარის ბერკეტი. მაგალითად, წინამხრის ძვლის საყრდენი წერტილი მდებარეობს იდაყვის სახსარში. მოქმედი  $\vec{F}$  ძალა – წინამხრის

<sup>19</sup> ნუტაცია (ლათ. *nutatio* „რხევა, რწევა“) – მბრუნავი მყარი სხეულის სუსტი არარეგულარული მოძრაობა პრეცესიის დროს. ემსგავსება ბრუნვის ღერძის „ტოკვას“ და მდგომარეობს საკუთარი და პრეცესიული ბრუნვის ღერძების შორის არსებული ე.წ. ნუტაციის კუთხის სუსტ ცვლილებაში.

მოხრის ძალა მიდებულობს სახსრიდან ოდნავ მოშორებით. წინააღმდეგობის ძალა  $\vec{R}$  არის ტვირთის სიმძიმის ძალა და როგორც წესი მიდებულობს ხელის მტევანზე (სახსრიდან საკმაოდ მოშორებულ მანძილზე).

4. ადამიანის საყრდენ მამოძრავებელ აპარატში კუნთის მიერ გენერირებული  $\vec{F}$  ძალა ხშირად ბერკეტის ღერძისადმი რაღაც  $\alpha$  კუთხითაა მიდებულობს. ბერკეტის წონასწორობის პირობა ამ შემთხვევაში იქნება  $a\vec{F} \sin \alpha = b\vec{R}$  საიდანაც  $F = bR/a \sin \alpha$  ე.ი. კუნთის მიერ განვითარებული  $\vec{F}$  ძალა, რომელიც საჭიროა წინააღმდეგობის  $\vec{R}$  ძალის დასაძლევად, მით უფრო მეტი უნდა იყოს, რაც უფრო მცირე კუთხითაა მიმართული იგი ბერკეტის ღერძისადმი (სურ. 9d). ამიტომაც, რომ ადამიანს გაცილებით მეტი ტვირთის დაჭერა შეუძლია მოხრილი წინა მხრით ვიდრე გაშლილით.

ჩონჩხის ძვლების უმეტესობა განიცდის ერთდროულად რამდენიმე კუნთის ზემოქმედებას, რომელთა მიერ განვითარებული ძალები სხვადასხვა მიმართულებისაა. მათი ტოლქმედის პოვნა შეიძლება პარალელოგრამის წესით. საყრდენ მამოძრავებელი სისტემის ძვლები ერთმანეთს სახსრებში უკავშირდებიან. სახსრების აგებულება ისეთია, რომ რაც შეიძლება მცირე იყოს ხახუნი (ეს მიიღწევა სახსრის ბუდეში ხრტილებისა და სპეციალური წებოვანი სითხის არსებობით). სახსრის ძირითადი მექანიკური მახასიათებელია მისი თავისუფლების ხარისხების რაოდენობა. საზოგადოთ მექანიკური სისტემის თავისუფლების ხარისხებს უწოდებენ დამოუკიდებელი კოორდინატების იმ რაოდენობას, რომელიც საკმარისია სისტემის ყველა შესაძლო მოძრაობის აღსაწერად. მაგალითად, მატერიალურ წერტილს გააჩნია სამი თავისუფლების ხარისხი, რაც შეესაბამება გადაადგილებას სამი ურთიერთპერპენდიკულარული ღერძის მიმართ. თავისუფალ მყარ სხეულს გააჩნია თავისუფლების 6 ხარისხი: სამი წინსვლითი (სამი ურთიერთ პერპენდიკულარული მიმართულებით) და სამი ბრუნვითი (სამი ურთიერთ-პერპენდიკულარული ღერძი). ერთ წერტილში დამაგრებული მყარი სხეული ხასიათდება მხოლოდ სამი ბრუნვითი თავისუფლების ხარისხით, ხოლო უძრავ ღერძზე დამაგრებული სხეული – თავისუფლების მხოლოდ ერთი ხარისხით (ბრუნვა ამ ღერძის გარშემო). ჩონჩხის ძვლების შემთხვევაში თავისუფლების ხარისხი შეესაბამება იმ ღერძების რაოდენობას, რომელთა ირგვლივ შეიძლება განხორციელდეს შემობრუნება. ეს ძირითადად სახსარში ძვლის ფორმითაა განპირობებული.

განასხვავებენ სახსრებს ერთი, ორი და სამი თავისუფლების ხარისხებით. ერთი თავისუფლების ხარისხის მქონე სახსარი – წინამხრის სახსარია. ამ სახსარში შეიძლება მარტო კლავის მოხრა და გაშლა. ორი თავისუფლების ხარისხის მქონე – სხივ მაჯის სახსარი. სამი თავისუფლების ხარისხი გააჩნია მენჯბარძაყის სახსარს.

საყრდენ მამოძრავებელი აპარატის აქტიურ ნაწილს შეადგენენ კუნთები. ნერვული იმპულსის გავლენით ისინი შეიკუმშებიან. მათ მიერ განვითარებული ძალა გადაეცემა ჩონჩხის ძვლებს მიმაგრების ადგილებში და იწვევს მათ გადაადგილებას (შემობრუნებას სახსრების მიმართ). ამ დროს შეიძლება შესრულდეს მუშაობა სხეულების გადაადგილებაზე. შეკუმშვას, როდესაც კუნთის სიგრძე იცვლება ეწოდება იზოტონური შეკუმშვა. იმ შემთხვევაში როდესაც კუნთი აწვითარებს ძალას სიგრძის შეუცვლელად ადგილი აქვს იზომეტრიულ შეკუმშვას. მეორე ტიპის შეკუმშვაზე საუბრობენ, როდესაც ადამიანს უძრავად უჭირავთ მძიმე ტვირთი. არსებობს შეკუმშვის კიდევ ერთი შუალედური ტიპი – აუსოტონური შეკუმშვა. ამ დროს კუნთი ნაწილობრივ იკუმშება (იზოტონური შეკუმშვა) და შემდეგ გადადის იზომეტრიულ მდგომარეობაში.

მაქსიმალური შეკუმშვისას განვითარებული ძალა კუნთოვანი ბოჭკოების რაოდენობის პირდაპირ პროპორციულია. კუნთის მიერ განვითარებულ ძალას რომელიც მოდის კუნთოვან ბოჭკოს  $1\text{სმ}^2$  განივკვეთზე აბსოლუტურ კუნთოვან ძალას უწოდებენ. მაგალითად, მხრის ორთავა კუნთისათვის იგი შეადგენს  $110\text{ ნ/სმ}^2$ , სამთავასათვის –  $170\text{ ნ/სმ}^2$ .

კუნთის დამახასიათებელ თავისებურებას წარმოადგენს მისი დადლილობა, რომელიც ვლინდება კუნთის მიერ განვითარებული ძალის მნიშვნელოვან შემცირებაში. დადლილობას ადგილი აქვს დიდი ხნის მუშაობის ან გადატვირთვის შემთხვევაში. კუნთების შრომისუნარიანობის აღდგენისათვის საჭიროა შესვენება მუშაობაში.

კუნთების შრომისუნარიანობის კვლევას ადამიანის მიერ შესრულებული მექანიკური მუშაობის გაზომვა და აგრეთვე ამ მუშაობის გავლენას ორგანიზმზე ეწოდება ერგომეტრია, შესაბამისი ხელსაწყოები – ერგომეტრები.

#### **6.4. ცოცხალი ქსოვილების აგებულება.**

მოკლედ შევხვდეთ ცოცხალი ქსოვილების აგებულების საკითხს.

ცოცხალი ქსოვილების აგებულების უკიდურესი განსხვავების მიუხედავად შეიძლება ზოგიერთი თავისებურებების გამოყოფა. ამისათვის აუცილებელია შევხვოთ ზოგიერთ ტერმინს მოლეკულური ფიზიკიდან.

როგორც ზემოთ უკვე ითქვა არსებობს მატერიის სამი აგრეგატული მდგომარეობა. ცოცხალი ქსოვილის აგებულების გაგებისათვის აუცილებელია თხევადი და მყარი მდგომარეობის შესახებ ვისაუბროთ. ნივთიერების ეს ორი აგრეგატული მდგომარეობა ერთმანეთისაგან განსხვავდება აგებულების მიხედვით. მყარი სხეულებისათვის დამახასიათებელია რეგულარული პერიოდული სტრუქტურების წარმოქმნა კრისტალური მესერების სახით. სითხეებს ასეთი რეგულარული სტრუქტურის წარმოქმნა არ ახასიათებთ. იმის მიხედვით, თუ რა ქმნის კრისტალურ მესერს: მოლეკულები, ატომები თუ იონები, არსებობს კრისტალების რამდენიმე სახეობა. თუ კრისტალური მესერის კვანძებში მოთავსებულია მოლეკულები, მაშინ გვექნება მოლეკულური კრისტალები, ხოლო ატომებისა და იონების შემთხვევაში კი შესაბამისად ატომური და იონური კრისტალები.

კრისტალურ მესერს წარმოქმნის მისი შემადგენელი ნაწილაკების ელექტრული მუხტების კულონური ურთიერთქმედება. ამ ტიპის ურთიერთობები სხვადასხვა სახით გამოვლინდება. მაგალითად, მოლეკულურ კრისტალში ვან-დერ ვაალსის ძალები, ატომურ კრისტალებში – კოვალენტური, იონურ კრისტალებში იონური ძალები. ყველა ეს ურთიერთქმედება ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა. თუ მყარი სხეულის ტემპერატურა გარკვეულ მნიშვნელობას აღემატება, კრისტალური მესერი იწყებს რღვევას. წარმოიქმნება ახალი აგრეგატული მდგომარეობა – სითხე. ძირითადი განსხვავება სითხისა და მყარი სხეულების აგებულებაში იმაში მდგომარეობს, რომ პირველ შემთხვევაში ნაწილაკების წანაცვლება გაცილებით უფრო დიდ მანძილებზეა შესაძლებელი ვიდრე მყარი სხეულის კრისტალური მესერის შემთხვევაში.

არსებობენ აგრეთვე სხეულები შუალედური თვისებებით – ამორფული სხეულები და თხევადი კრისტალები. ისინი თავისი აგებულებით სითხეებს წარმოადგენენ, ან გააჩნიათ კრისტალური სტრუქტურა, თუმცა დაბალ ტემპერატურაზე ისინი მყარი სხეულის თვისებებს იძენენ. რაც შეეხება თხევად კრისტალებს, მათი ფიზიკური თვისებები იცვლება გარემოს პირობების შესაბამისად.

ეხლა თუ დავუბრუნდებით ბიოლოგიური ქსოვილების აგებულებას, შეიძლება ვთქვათ, რომ მათში მყარი ფაზა აგებულია მაღალმოლეკულური ნივთიერებებისაგან, ესენია ცილები, ლიპიდები, ნუკლეინის მჟავები და ნახშირწყლები. მათ გააჩნიათ ე.წ.

პოლიმერული სტრუქტურა და წარმოადგენენ მონომერების მრავალჯერ განმეორებას. პოლიმერები შეიძლება იყვნენ როგორც წრფივი, ასევე ბრტყელი სტრუქტურის მქონე. ბიომოლეკულების პოლიმერული ჯაჭვები წარმოადგენენ იმ საშენ მასალას, რომლისგანაც იქმნება უფრო მაღალორგანიზებული მეორეული სტრუქტურები. ამ მეორეული სტრუქტურებისაგან შენდება უფრო მაღალორგანიზებული, რთული, რეგულარული სტრუქტურები ქსოვილების სახით, რომელთა აგებულების დიდი ნაირსახეობა განაპირობებს ქსოვილების მექანიკური თვისებების სიმრავლეს.

## 7. ელექტრობა და მაგნეტიზმი.

### 7.1. საგნის ისტორია ზონური თეორია.

ლორენცმა 1909 წელს თავის ელექტრონულ თეორიაში განაზოგადა იმ დროისათვის არსებული შეხედულებები ელექტრული მოვლენების შესახებ. ელექტრონული თეორია ამ მოვლენებს ხსნიდა, როგორც დადებითი და უარყოფითი მუხტებით დამუხტული ნაწილაკების ურთიერთქმედების შედეგს. ელექტრონი, როგორც დამუხტული ელემენტალური ნაწილაკი აღმოაჩინა კათოდურ სხივებში 1897 წელს ტომპსონმა. ამან მოითხოვა ატომის დაუშლელი სტრუქტურის შესახებ კლასიკური შეხედულებების გადასინჯვა. 1911 წელს რეზერფორდმა წამოაყენა ატომის პლანეტარული, ანუ ბირთვული მოდელი. ამ მოსაზრების თანახმად ატომის ცენტრში მოთავსებულია ბირთვი (დიამეტრი  $\sim 10^{-13}$  სმ), რომელშიც ლოკალიზებულია ატომის თითქმის მთელი მასა და აქვს დადებითი მუხტი. ეს მუხტი რაოდენობრივად ელექტრონების ჯამური მუხტის (აბსოლუტური მნიშვნელობით) ტოლია. ბირთვის ირგვლივ კულონური ძალების გავლენით მოძრაობენ ელექტრონები. მათი რიცხვი ემთხვევა პერიოდულ სისტემაში ელემენტის რიგის ნომერს. ატომის გარე დიამეტრი  $10^5$  ჯერ მეტია ბირთვის ზომებზე და  $\approx 10^{-8}$  სმ შეადგენს. სივრცე მათ შორის შევსებულია ელექტრული ველით.

ელექტრული ველის ბუნებას ჩვენ განვიხილავთ ოდნავ მოგვიანებით, აქ კი უპირაინი იქნება განვსაზღვროთ მუხტის ცნება.

ელექტრული მუხტი (ელექტრობის რაოდენობა) – წარმოადგენს ფიზიკურ სკალარულ სიდიდეს, რომელიც განსაზღვრავს სხეულების შესაძლებლობას იყენენ ელექტრომაგნიტური ველების წყაროები და მონაწილეობა მიიღონ ელექტრომაგნიტურ ურთიერთობაში. პირველად ელექტრული მუხტის ცნება იყო შემოღებული 1785 წელს კულონის კანონში. სხვაგვარად რომ ითქვას, მუხტი წარმოადგენს თავის მატარებლის ბინარული სახის თვისებას, რაც გულისხმობს ორ შესაძლო მდგომარეობას: (+) ან (-) ნიშნით. მუხტების მატარებლებად, თვით განმარტებიდან გამომდინარე წარმოგვიდგებიან ელექტრონები (-) და პროტონები (+). მაგრამ ელექტრონს შეუძლია იყოს დადებითი მუხტის მატარებელიც (პოზიტრონი), ხოლო პროტონს – უარყოფითის (ანტიპროტონი), ერთად კი ისინი ანტიმატერიას აყალიბებენ. მატერიის და ანტიმატერიის ურთიერთობის შემთხვევაში ხდება მათი ანიგილირება – სუფთა ენერგიაში გადასვლა.

ჯერ კიდევ შორეულ წარსულში ცნობილი იყო, რომ ქარვა (ძვ.ბერძ. ἤλεκτρον – ელექტრონი) შალზე ხახუნის შედეგად იზიდავს მსუბუქ საგნებს. და უკვე XVI საუკუნის დასასრულისკენ ინგლისელმა ექიმმა უილიამ ჰილბერტმა<sup>20</sup> დაარქვა სხეულებს, რომლებიც ხახუნის შედეგად იზიდავენ მსუბუქ საგნებს – დაელექტრიზებული.

1729 წელს შარლ დუფემ დაადგინა რომ არსებობს მუხტის ორი სახეობა. ერთი წარმოიქმნება აბრეშუმზე მინის ჩხირის ხახუნისას, მეორე კი – ფისის ხახუნით შალზე. ამიტომაც დუფემ დაარქვა მათ შესაბამისად „მინის“ და „ფისის“ მუხტები. დადებითი და უარყოფითი მუხტების ცნება შემოიღო ბენჯამინ ფრანკლინმა<sup>21</sup>.

<sup>20</sup> უილიამ ჰილბერტი (William Gilbert, 1544 – 1603წწ) – ინგლისელი ფიზიკოსი და ექიმი, ელისაბეტ I და იაკობ I სამეფო კარის ექიმი. იკვლევდა მაგნიტურ და ელექტრულ მოვლენებს, პირველმა შემოიღო ტერმინი „ელექტრული“.

<sup>21</sup> ბენჯამინ ფრანკლინი (Benjamin Franklin; 1706 – 1790 წლები) – ამერიკელი პოლიტიკური მოღვაწე, დიპლომატი, გამომგონებელი, მასონი. აშშ-ს დამოუკიდებლობის ომის ერთ-ერთი ლიდერი.

XX საუკუნის დასაწყისში ამერიკელმა ფიზიკოსმა რობერტ მილიკენმა<sup>22</sup> ცდების საფუძველზე დაადგინა, რომ ელექტრული მუხტი დისკრეტულია, ანუ რომ ნებისმიერი სხეულის მუხტი შეიცავს ელემენტარული ელექტრული მუხტის ჯერად მუხტების მთელ რიცხვს, რომელიც წარმოადგენს ფუნდამენტურ ფიზიკურ სიდიდეს და განისაზღვრება როგორც ელექტრული მუხტის მინიმალური პორცია, ანუ კვანტი. ბუნებაში ეს მუხტი ახასიათებს თავისუფალ გრძელვადიან ნაწილაკებს (ელექტრონი, პროტონი და ა.შ.). მუხტის სიდიდე საერთაშორისო SI სისტემაში დაახლოებით 1,602 176 6208(98)·10<sup>-19</sup> კლ. ტოლია. ელემენტარული ელექტრული მუხტი მჭიდროდ უკავშირდება თხელი სტრუქტურის მუდმივას<sup>23</sup>, რომელიც აღწერს ელექტრომაგნიტურ ურთიერთობას.

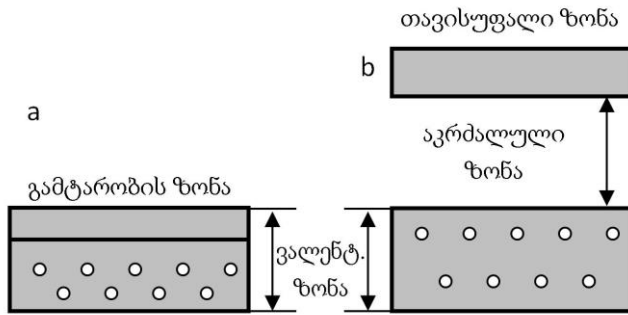
მუხტის საზომ ერთეულად საერთაშორისო SI სისტემაში მიჩნეულია კულონი (კლ) – ელექტრული მუხტი რომელიც გაედინება გამტარის განივკვეთში 1 ა დენის ძალის პირობებში 1 წამის განმავლობაში. ერთი კულონის ოდენობის მუხტი ძალზე დიდია. თუ კი მუხტის ორი მატარებელი ( $q_1 = q_2 = 1$ კლ) მოვათავსეთ ვაკუუმში 1 მეტრის მანძილზე მაშინ ისინი მოქმედებდნენ ერთმანეთზე ძალით 9·10<sup>9</sup> ნ, ანუ ძალით რომლითაც დედამიწა იზიდავს 10<sup>6</sup> ტონის მასის სხეულს.

რეზერვორდის ატომის მოდელმა შემდგომი განვითარება მიიღო ბორის თეორიაში, რომელიც ეფუძნებოდა მოსაზრებას ატომის შინაგანი ენერჯის დისკრეტულობის შესახებ. უფრო მოგვიანებით ეს მოდელი შეივსო მოსაზრებით ელექტრონის შიდა (საკუთარი) იმპულსის მომენტის, ანუ სპინის ცნებით. თავდაპირველად ითვლებოდა, რომ სპინი აღიძვრება მხოლოდ და მხოლოდ ელექტრონის საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის შედეგად, მაგრამ შემდგომში დადგინდა, რომ სპინი ელექტრონის შეძენილი თვისება კი არაა, არამედ მისი ისეთივე ძირითადი მახასიათებელი, როგორც მასა და მუხტი. მატერიის აგებულების უფრო თანამედროვე შეხედულებები ითვალისწინებენ ელექტრონის ტალღურ თვისებებსაც.

ნივთიერების ელექტრული თვისებები (დიელექტრული, მაგნიტური, გამტარობა) დაკავშირებულია ატომის აგებულებასთან. თანამედროვე ზონური თეორიის თანახმად განსხვავებანი სხვადასხვა ნივთიერებების ელექტრულ თვისებებში დაკავშირებულია მათ ატომებში ენერგეტიკული დონეების სტრუქტურულ განსხვავებასთან. როცა ატომები უახლოვდებიან ერთმანეთს რაღაც გარკვეულ მანძილზე, მათი ელექტრონული ენერგეტიკული დონეები იხლიჩებიან. ყველაზე სრულად ეს მოხდება ვალენტური ელექტრონებისათვის. პაულის პრინციპის თანახმად ერთ ქვედონეზე შეიძლება იმყოფებოდეს არაუმეტეს ორ ელექტრონისა, რომელთაც გააჩნიათ სპინის სხვადასხვა მნიშვნელობა. ვალენტური ზონის ზემოთ განლაგდებიან თავისუფალი დონეები, რომლებზეც ელექტრონები გადავლენ, თუ მათ მიანიჭებენ დამატებით ენერჯიას. ეს დონეები ქმნიან თავისუფალ ზონებს. სწორედ ამ ზონაში უნდა გადავიდნენ ელექტრონები, რომლებიც წარმოქმნიან ელექტრულ დენს. მათ ეწოდებათ გამტარობის ელექტრონები.

<sup>22</sup> რობერტ ენდრუს მილიკენი (Robert Andrews Millikan; 1868 – 1953 წლები) – ამერიკელი ფიზიკოსი. 1923 წ. მიიღო ნობელის პრემია ფიზიკაში შრომებისათვის ფოტოელექტრული ეფექტის შესახებ და ელექტრონის მუხტის გაზომვისათვის.

<sup>23</sup> თხელი სტრუქტურის მუდმივა, ჩვეულებრივ აღინიშნება როგორც  $a_0$ , წარმოადგენს ფუნდამენტურ ფიზიკურ მუდმივას, რომელიც ახასიათებს ელექტრომაგნიტური ურთიერთობის ძალას. იყო შემოღებული 1916 წელს გერმანელი ფიზიკოსის არნოლდ ზომერფელდის მიერ როგორც რელატივისტური შესწორებების ზომა ატომური სპექტრული ზოლების აღწერისას ბორის მოდელის ფარგლებში. ანუ ახასიათებს სპექტრული ზოლების ეგრე წოდებულ თხელ სტრუქტურას. ამიტომაც ზოგჯერ მას უწოდებენ ზომერფელდის მუდმივას.



სურ. 10. გამტარობის ზონური თეორია. (a) მეტალების ვალენტური ზონა სრულად არაა შევსებული. მის ზემო ნაწილში განლაგებულია გამტარობის ზონა. დიელექტრიკებსა და ნახევარგამტარებში (b) თავისუფალ და ვალენტურ ზონებს შორის იმყოფება აკრძალული ზონა. აკრძალული ზონის სიგანე დიელექტრიკებში ~10 ევ, ხოლო ნახევარგამტარებში ~1 ევ.

**მეტალებში** ჩვეულებრივ ტემპერატურებზე შევსებულია მხოლოდ ვალენტური ზონის ქვედა დონეები (იხ. სურ. 10a). უფრო მაღალ თავისუფალ დონეებზე გადასასვლელად მცირე ენერჯიაა საჭირო, რომელიც მათ შეიძლება გადაეცეს ელექტრული ველის მიერ. ამ შემთხვევაში, აღნიშნული ელექტრონები გადაიქცევიან ე.წ. გამტარობის ელექტრონებად, რომლებიც ქმნიან ელექტრულ დენს. შესაბამისად მეტალების ვალენტური ზონის თავისუფალი დონეების შემცავ ზედა ნაწილს ეწოდება **გამტარობის ზონა**.

**დიელექტრიკებში** ვალენტური ზონის ყველა დონეები შევსებულია, თანაც თავისუფალი ზონისაგან გამოყოფილნი არიან აკრძალული ზონით (იხ. სურ. 10b). აკრძალულ ზონაში თავისუფალი ელექტრონები არ არსებობენ. ეს ზონა საკმაოდ ფართოა, ~ 10 ევ (ელექტრონვოლტი<sup>24</sup>), ამიტომ ჩვეულებრივ პირობებში ელექტრონები ვალენტურიდან თავისუფალ ზონაში ვერ გადადიან, რაც იმას ნიშნავს, რომ ასეთ ნივთიერებაში ელექტრული დენი ვერ წარმოიქმნება. ელექტრონები თავისუფალ ზონაში გადავლენ მხოლოდ გარღვევისას, როცა დიელექტრიკი კარგავს თავის დიელექტრიკულ თვისებებს.

**ნახევარგამტარებში**, როგორც დიელექტრიკებში არსებობს შევსებული ვალენტური და აკრძალული ზონები. თუმცა ამ უკანასკნელის სიგანე შედარებით მცირეა (დაახლოებით 1 ევ) ამიტომ მათში დენის წარმოქმნის პირობები გამარტივებულია.

## 7.2. ელექტრული ველი. პოლარიზება.

ელექტრულ მუხტებს შორის, ანუ ელექტრონული მუხტების მატარებელ სხეულებს შორის კავშირი და ურთიერთქმედება ხორციელდება მატერიის განსაკუთრებული ფორმის, **ელექტრული ველის** მეშვეობით. ბუნებაში არსებობს **ელექტროსტატიკური** ანუ უძრავი მუხტების ველი და **გრიგალური ელექტრული ველი**, რომელიც აღიძვრება ინდუქციის<sup>25</sup> შედეგად. ელექტრული ველის დამაბულობა  $\vec{E}$  – არის ვექტორული სიდიდე, რომელიც რიცხობრივად იმ  $\vec{F}$  ძალის ტოლია, რომლითაც ველი ახდენს ზემოქმედებას მასში მოცემულ წერტილში მოთავსებულ ცალკეულ წერტილოვან  $q$  მუხტზე, ხოლო მიმართულება ემთხვევა იმ ძალის მიმართულებას, რომელიც მოქმედებს დადებით მუხტზე.

<sup>24</sup>ერთი ელექტრონვოლტი იმ ენერჯიას ტოლია რომელიც საჭიროა ელემენტარული მუხტის გადასატანათ ელექტროსტატიკურ ველში ორ წერტილს შორის 1 ვ პოტენციალთა სხვაობის პირობებში. ვინაიდან მუშაობა  $q$  მუხტის გადატანისას შეადგენს  $qU$  (სადაც  $U$  – პოტენციალთა სხვაობაა), ხოლო ელემენტარული მუხტი შეადგენს  $1,602 \cdot 10^{-19}$  კლ, ამიტომაც 1 ევ =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  ჯ.

<sup>25</sup> ელექტრომაგნიტური ინდუქცია – ელექტრული დენის წარმოქმნა შეკრულ კონტურში მასში გავლილი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების გამო. ელექტრომაგნიტური ინდუქცია აღმოაჩინა ფარადეიმ 1831 წ. მან დაადგინა რომ ელექტრომამოძრავებელი ძალა (ემძ) რომელიც აღიძვრება შეკრულ გამტარ კონტურში მის მიერ შემოფარგლულ ზედაპირში გავლილი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარის პროპორციულია. ემძ-ის მნიშვნელობა არაა დამოკიდებული იმაზე თუ რა არის მაგნიტური ნაკადის ცვლილების მიზეზი – თვით მაგნიტური ველის ცვლილება, თუ კონტურის (ან მისი ნაწილის) მოძრაობა მაგნიტურ ველში. ამ ძალით გამოწვეულ ელექტრულ დენს ინდუქციური დენი ეწოდება.



$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (30)$$

აქ  $\vec{E}$  ელექტრული ველის დამაბულობაა. მისი ერთეული SI სისტემაში ნ/კ, ან ვოლტი მეტრზე (ვ/მ)<sup>26</sup>.

ელექტრული ველის ზეგავლენით დიელექტრიკებში ადგილი აქვს მუხტის მატარებლების ურთიერთწანაცვლებას მოლეკულის ან ატომის ფარგლებში. ამ მოვლენას ეწოდება **დიელექტრიკის პოლარიზება**. გარე ელექტრული ველის გავლენით ელექტრონების გარსი (უპირატესად მისი გარე ფენა), წაინაცვლება ბირთვის მიმართ ველში მოქმედი ძალის შესაბამისად. ამის შედეგად ატომი ან მოლეკულა ხდება პოლარული, ანუ წარმოიქმნება **დიპოლი**. ეს მოვლენა ცნობილია **ელექტრონული პოლარიზების** სახელით. იონური კავშირების მქონე დიელექტრიკებში გარე ელექტრული ველის ზემოქმედებით ადგილი აქვს დადებითი და უარყოფითი მუხტების ურთიერთწანაცვლებას. ამ მოვლენას ეწოდება **იონური პოლარიზება**. თუ განხილული მაგალითების შემთხვევაში გარე ელექტრული ველის ზემოქმედების შეწყვეტისას, მუხტები უბრუნდებიან საწყის მდგომარეობას, მაშინ ასეთ პოლარიზებას ეწოდება **ინდუცირებული პოლარიზება**.

ზოგადათ, ნეიტრალულ მოლეკულაში მუხტების განაწილება შესაძლოა ასიმეტრიულიც იყოს: ერთ ნაწილში შესაძლოა ჭარბობდეს დადებითი მუხტები, მეორეში კი უარყოფითი. ასეთ მოლეკულებს პოლარულს ან **დიპოლებს** (ხისტი დიპოლები) უწოდებენ. ასეთია წყლის მოლეკულა და აგრეთვე ორგანული ნაერთების უმეტესობა. როგორც ზემოთ თქმულიდან გამომდინარეობს **ელექტრული დიპოლი არის სისტემა, რომელიც შედგება ორი ტოლი და განსხვავებული ნიშნის მუხტისაგან**. ეს მუხტები, ერთმანეთისაგან დაშორებული არიან რაღაც  $\vec{\ell}$  მანძილზე (იხ. სურ. 11a). დიპოლის ძირითადი მახასიათებელია ელექტრული მომენტი  $\vec{P}$  – ვექტორული სიდიდე, რომელიც რიცხობრივად მუხტის  $q$  აბსოლუტური მნიშვნელობის და მუხტებს შორის  $\ell$  მანძილის ნამრავლს ტოლია

$$\vec{P} = q \vec{\ell} \quad (31)$$

სადაც  $\vec{\ell}$  – უარყოფით მუხტზე მიდებული და დადებითისკენ მიმართული ვექტორია.

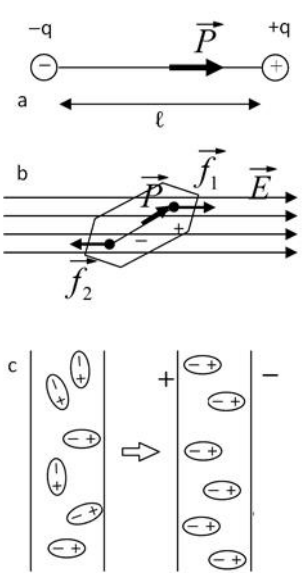
ელექტრული მომენტის ვექტორი მიდებულია დიპოლის ცენტრზე და მიმართულია უარყოფითიდან დადებითი მუხტისაკენ. თუ დიპოლი მოთავსებულია ერთგვაროვან ელექტრულ ველში დამაბულობით  $\vec{E}$  მაშინ მის მუხტებზე იმოქმედებენ ტოლი და საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალები  $\vec{f}_1$  და  $\vec{f}_2$  (იხ. სურ. 11b).

პოლარული მოლეკულიდან შედგენილ დიელექტრიკში დიპოლები განლაგდებიან უწყსრივად, თანაც სითბური მოძრაობის გამო მათი ორიენტირება გამუდმებით იცვლება. თუ ასეთ დიელექტრიკს მოვათავსებთ ელექტრულ ველში, მაშინ დიპოლების განლაგება ორიენტირებული იქნება დამაბულობის ვექტორის მიმართულებით (იხ. სურ. 11c).

ველის მაორიენტირებელ ზემოქმედებას ეწინააღმდეგება მოლეკულების სითბური მოძრაობა და მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედი ძალები. ამის შედეგად დიელექტრიკის მოლეკულები განიცდიან მხოლოდ გარკვეულ ნაწილობრივ ორიენტაციას ველის მიმართულებით, რომლის (ორიენტაციის) ხარისხი დამაბულობის პროპორციულია,

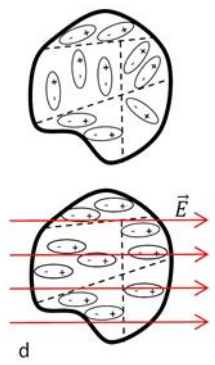
<sup>26</sup> ვინაიდან  $U = \frac{A}{q}$  (სადაც,  $U$  – ძაბვა,  $A$  – ამ ძაბვის მიერ შესრულებული მუშაობა  $q$  – მუხტის გადასატანათ) ხოლო  $A = Fs$  (სადაც,  $F$  – არის ძალა, რომელიც ასრულებს მუშაობას  $s$  – მანძილზე  $q$  – მუხტის გადასატანათ), შეიძლება ჩავწეროთ  $U = \frac{Fs}{q}$ . გავყოთ ეს გამოსახულება  $s$  – მანძილზე:  $\frac{U}{s} = \frac{F}{q} = E$ . ეს კი ნიშნავს, რომ ელექტრული ველის დამაბულობა შეიძლება იყოს გაზომილი როგორც ნ/კ, აგრეთვე ვ/მ.

ხოლო მოლეკულების ელექტრულ მომენტებს უჩნდება მდგენელი ველის მიმართულებით. ამ მოვლენას ეწოდება დიელექტრიკის ორიენტაციული პოლარიზება. როდესაც გარე ველის ზემოქმედება წყდება, დიპოლები კვლავ უწესრიგოდ განლაგდებიან. პოლარული მოლეკულიდან შედგენილ დიელექტრიკში დიპოლები განლაგებულნი არიან უწესრიგოდ, თანაც სითბური მოძრაობის გამო მათი ორიენტირება გამუდმებით იცვლება. თუ ასეთ დიელექტრიკს მოვათავსებთ ელექტრულ ველში, მაშინ დიპოლების განლაგება ორიენტირებული იქნება დამაბულობის ვექტორის მიმართულებით (იხ. სურ. 11b).



სურ. 11. დიპოლი და დიპოლის მომენტი.

(a) დიპოლის და დიპოლური მომენტის გრაფიკული გამოსახვა. (b) ძალები რომლებიც მოქმედებენ დიპოლზე ერთგვაროვან ელექტრულ ველში. (c) პოლარული მოლეკულები ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოთავსებამდე და მოთავსების შემდეგ. (d) სპონტანური პოლარიზება (სეგნეტოელექტრიკები) და დიპოლების წარმოქმნა, რომლებიც დიელექტრიკის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოთავსების შემდეგ ორიენტირდებიან დაოვანი ხაზების მიმართულებით.



ზოგიერთ ნივთიერებას ბუნებრივად გააჩნია უბნები, რომლებიც ხასიათდებიან პოლარული მოლეკულების გარკვეული ორიენტაციით. მათ დომენები ეწოდებათ. დომენების წარმოქმნის პროცესს სპონტანური პოლარიზაცია ჰქვია. ელექტრულ ველში დომენები ველის მიმართულებით ორიენტირდებიან, რითიც უზრუნველყოფენ ყველა მოლეკულის მაქსიმალურად შესაძლო ორიენტირებას (იხ. სურ. 11d). ასეთი ტიპის დიელექტრიკებს სეგნეტოელექტრიკები ეწოდებათ (სეგნეტური მარილიდან, რომელშიც ეს თვისებები პირველად იყო აღმოჩენილი). მათ მიეკუთნებათ, მაგალითად, ბარიუმის ტიტანატი ( $BaTiO_3$ ) და სხვა ნივთიერებები. ელექტრული ველის ზეგავლენით შეიძლება მოხდეს რთული მოლეკულის სტრუქტურის ზოგიერთი რგოლების ურთიერთწანაცვლება. ასეთი რამ შეიძლება მოხდეს ორგანულ ქსოვილებში შემავალ ცილებში გარე ელექტრული ველის გავლენით. ამ მოვლენას დიელექტრიკის დეფორმაციული ან სტრუქტურული პოლარიზება ეწოდება.

დიელექტრიკის პოლარიზება რაოდენობრივად ხასიათდება  $\vec{P}_p$  (პოლარიზაციის) ვექტორის მეშვეობით. ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოთავსებულ ერთგვაროვან

დიელექტრიკისათვის პოლარიზების ვექტორი რაოდენობრივად ატომებსა და მოლეკულებში გარე ველის მიერ წარმოქმნილი დიპოლური ელექტრული მომენტების ჯამის ტოლია.

$$\vec{P}_P = \sum_{\Delta V} \frac{\vec{P}_i}{\Delta V} \quad (32)$$

პოლარიზების ვექტორი მიმართულია გარე ველის დამაბულობის გასწვრივ (საწინააღმდეგო მიმართულებით). პოლარიზება იზომება – კლ/მ<sup>2</sup>. პოლარიზების ვექტორის მნიშვნელობა ველის დამაბულობის პროპორციულია.

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (33)$$

სადაც  $\chi$  არის უგანზომილო სიდიდე, რომელიც ახასიათებს დიელექტრიკის უნარს ველის ზეგავლენით განიცადოს პოლარიზება. დამოკიდებულია ნივთიერების ბუნებაზე. მას დიელექტრული ამთვისებლობა უწოდებენ. ამის გარდა მნიშვნელოვანია დიელექტრიკული შეღწევადობის კოეფიციენტიც  $\epsilon_0$ , რომელიც გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ მცირდება დიელექტრიკის ჯამური ველის დამაბულობა, იგივე ველის დამაბულობასთან ვაკუუმში.

ორგანული ნივთიერებები (ცილები, ნახშირწყლები, ცხიმები...), რომლებისგანაც შედგება ორგანიზმის ქსოვილების მკვრივი უბნები, წარმოადგენენ დიელექტრიკებს. ამიტომ მათშიც ელექტრული ველის ზეგავლენით ადგილი აქვს პოლარიზებას. სწორედ პოლარიზბა საფუძვლად უდევს ქსოვილებზე ელექტრული ველის შემოქმედებას. ნივთიერების დიელექტრული შეღწევადობა დამოკიდებულია როგორც ატომებისა და მოლეკულების თვისებებზე (მაგ. დიპოლურ მომენტზე), ასევე მათ ურთიერთგანლაგებაზე. ამიტომ დიელექტრული შეღწევადობის ცვლილება შეიძლება გამოვიყენოთ ნივთიერების სტრუქტურის შესასწავლად.

მოლეკულების პოლარიზება შეიძლება მოხდეს კრისტალზე მექანიკური ზემოქმედების შედეგად. ამ დროს მუხტის ნიშანი დამოკიდებულია დეფორმაციის ხასიათზე. ამ მოვლენას პირდაპირი პიეზოელექტრული ეფექტი უწოდებენ. იგი კარგად ვლინდება კვარცსა და ბევრ სხვა კრისტალში. ცნობილია შებრუნებული პიეზოელექტრული ეფექტი, რომლის შედეგადაც ასეთი კრისტალის მოთავსება ელექტრულ ველში, გამოიწვევს მის გეომეტრულ ფორმის შეცვლას. ეს ეფექტი გამოიყენება ელექტრული რხევების მექანიკურში გარდასაქმნელად (მაგ. ულტრაბგერების გენერატორებში).

### 7.3. მაგნიტური ველი.

აქამდე ჩვენ ვსაუბრობდით უძრავი მუხტების ურთიერთქმედებაზე. მოძრავი ელექტრული მუხტების ან დენიანი გამტარების ურთიერთქმედება ხორციელდება მატერიის განსხვავებული ფორმის, მაგნიტური ველის მეშვეობით. მაგნიტური ველის ძირითადი მახასიათებელია მაგნიტური ინდუქცია  $\vec{B}$  – ვექტორული სიდიდე, რომელიც რაოდენობრივად განისაზღვრება  $\vec{F}$  ძალით, რომელიც ერთგვაროვან ველში ვექტორ  $\vec{B}$ -ს პერპენდიკულარულად მოთავსებულ  $l$  სიგრძის გამტარზე, მასში  $I$  დენის გადინებისას, მოქმედებს. ეს დამოკიდებულობა ცხადად რომ წარმოვიდგინოთ, საჭიროა შევადაროთ მაგნიტური ინდუქციის და ელექტრული ველის დამაბულობის ვექტორები. ორივე ეს სიდიდე მეზობელ სისტემებში მყოფ მუხტებზე და მათ შორის მოქმედ ძალებზეა დამოკიდებული. ოღონდ ელექტრული ველის შემთხვევაში მუხტი იმყოფება მოსვენებულ მდგომარეობაში, ხოლო მაგნიტური ველის წარმოქმნისას მუხტი მოძრაობს გარკვეული  $v$  სიჩქარით  $l$  სიგრძის გამტარის გასწვრივ ისე, რომ ამ სიჩქარის განსაზღვრა შეიძლება შემდეგნაირად:

$$v = \frac{d\ell}{dt} \quad (34)$$

ნათელია, რომ დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობისას „გადატანილი მუხტის“ რაოდენობა განისაზღვრება სიჩქარის სიდიდით. რაც მეტია სიჩქარე, მით მეტი მუხტი გაივლის  $\ell$  სიგრძის გამტარში. ამიტომაც  $v\ell$ -ის მნიშვნელობა ცალსახად განსაზღვრავს „გადატანილი მუხტის“ რაოდენობას. ასე რომ, ელექტრული ველის დამაბულობის ანალოგიურად და (34)-ის გამოყენებით, მაგნიტური ინდუქციის განსაზღვრისათვის, შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი შეფარდება:

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{F}{q \frac{d\ell}{dt}} \quad (35)$$

მაგრამ გამტარის სიგრძე მუდმივი სიდიდეა, ხოლო „გადატანილი მუხტის“ ნაცვლად შეიძლება ავიღოთ თავად მუხტის ცვლილება დროში და განისაზღვროს ამ ცვლილების სიჩქარე:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (36)$$

(36) ფორმულაში მიღებული სიდიდე ცნობილია როგორც დენის ძალა. მაშასადამე ფორმულა (35)-ის მნიშვნელი შეიძლება გარდაიქმნას შემდეგნაირად:

$$q \frac{d\ell}{dt} = \ell \frac{dq}{dt} = I\ell$$

და საბოლოოდ შეიძლება ჩაიწეროს:

$$B = \frac{F}{I\ell} \quad (37)$$

აქედან, ძალის განსაზღვრისათვის (ამ ძალას უწოდებენ ლორენცის ძალას) შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი შეფარდება:

$$F = BI\ell \quad (38)$$

უფრო კონკრეტულად რომ ითქვას,  $\vec{B}$  ისეთი ვექტორია, რომ  $\vec{B}$  ინდუქციის მქონე მაგნიტური ველის მხრიდან  $\vec{v}$  სიჩქარით მოძრავ  $q$  მუხტზე მოქმედი ლორენცის  $\vec{F}$  ძალა ვექტორულ ფორმაში ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}] \quad (39)$$

ან თავისი მნიშვნელობით:

$$F = qvB \sin \alpha$$

სადაც  $\alpha$  – არის კუთხე სიჩქარისა და მაგნიტური ინდუქციის ვექტორებს შორის (ვექტორ  $\vec{F}$ -ის მიმართულება ამ ორივეს პერპენდიკულარულია, ხოლო მისი მიმართულება განისაზღვრება მარჯვენა ბურღის წესით). იმ შემთხვევაში, როდესაც სიჩქარის და მაგნიტური ინდუქციის ვექტორები პერპენდიკულარულია ერთმანეთის მიმართ,  $F = qvB$ .

საერთოდ, ლორენცის ძალის განსაზღვრისას, საჭიროა ელექტრული ველის დამაბულობის გათვალისწინებაც. ამიტომაც ვექტორულ ფორმაში ლორენცის ძალა შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგნაირად:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]) \quad (40)$$

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულება განისაზღვრება ველის მოცემულ წერტილში მოთავსებული მაგნიტური ისრის ჩრდილოეთი პოლუსის მიმართულებით. მისი განზომილობის ერთეული SI სისტემაში არის **ტესლა** (ქართ. აღნ. ტ; საერთაშ. – T), დაერქვა გამომგონელი გამომგონელის ნიკოლა ტესლას საპატივსაცემოდ. ერთი ტესლა განსაზღვრავს ისეთი ინდუქციის მქონე ერთგვაროვან მაგნიტურ ველს, რომელშიც 1 მეტრის სიგრძის სწორ გამტარზე 1 ამპერი დენის გადინებისას, მოქმედებს 1 ნიუტონი ძალა. განზომილობის ერთეული CGS სისტემაში **გაუსია** (ქართ. აღნ. გს; საერთაშ. – G), დაერქვა გერმანელი ფიზიკოსის და მათემატიკოსის კარლ ფრიდრიხ გაუსის საპატივსაცემოდ. 1 გს = 100 მკტ = 10<sup>-4</sup> ტ. CGS სისტემის ძირითადი ერთეულების მეშვეობით შეიძლება შემდეგნაირად გამოისახოს: 1 გს = 1 გ<sup>1/2</sup>·სმ<sup>-1/2</sup>·წმ<sup>-1</sup>.

მაგნიტური ველი ხასიათდება აგრეთვე **დაძაბულობით**  $\vec{H}$  – ვექტორული სიდიდით, რომლის რიცხობრივი მნიშვნელობა განისაზღვრება ბიო-სავარ-ლაპლასის კანონის საფუძველზე და ფიზიკურად დაკავშირებულია იმ დენთან, რომელსაც წარმოქმნის განხილული ველი, ხოლო მიმართულება ემთხვევა მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებას. მაგნიტური ველის დაძაბულობა დამოკიდებულია როგორც დენის ძალაზე, აგრეთვე გამტარის კონფიგურაციაზე.

მაგნიტური ველის დაძაბულობის წარმოდგენა შეიძლება მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  და დამაგნიტების  $\vec{M}$  ვექტორების სხვაობის სახით. საერთაშორისო SI სისტემაში:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

სადაც  $\mu_0$  არის მაგნიტური მუდმივა – ზოგიერთ ელექტრომაგნეტიზმის კანონის გამოსახულებაში შემავალი ფიზიკური კონსტანტა, რომელიც შემოღებულია პროპორციულობის კოეფიციენტის სახით კანონების SI სისტემაში ჩაწერისას. ზოგჯერ მას უწოდებენ ვაკუმის მაგნიტურ შეღწევადობას. იზომება SI სისტემაში ჰნ/მ (ჰენრი<sup>27</sup> მეტრზე), ან ნ/ა<sup>2</sup> (ნიუტონ ამპერ კვადრატზე).  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  ჰნ/მ.  $\vec{M}$  – დამაგნიტობის ვექტორი. უმარტივესი შემთხვევისათვის იზოტროპული (მაგნიტური თვისებებით) გარემოს შემთხვევაში და საკმაოდ დაბალი სიხშირეების მიახლოებაში, დამაგნიტობა წრფიულად არის დამოკიდებული მაგნიტური ველის ინდუქციაზე  $\vec{B}$ :

$$\vec{M} = \alpha \vec{B}$$

მაგრამ ამ წრფიული დამოკიდებულების აღწერა მიღებულია არა  $\alpha$  კოეფიციენტის მეშვეობით, არამედ დაკავშირებული სიდიდეების გამოყენებით – მაგნიტური ამთვისებლობით  $\chi$ , ან მაგნიტური შეღწევადობით  $\mu$ :

$$\vec{M} = \frac{\chi}{1 + 4\pi\chi} \vec{B} = \frac{\mu - 1}{4\pi\mu} \vec{B}$$

ვაკუმში (ან მაგნიტური პოლარიზაციის უნარის მქონე გარემოს არ არსებობის პირობებში, ან და თუ ეს უკანასკნელი შეიძლება არ მივიღოთ მხედველობაში) მაგნიტური ველის დაძაბულობა ( $\vec{H}$ ) ემთხვევა მაგნიტური ინდუქციის ვექტორს ( $\vec{B}$ ) რაღაც  $\mu_0$  კოეფიციენტის სიზუსტით (SI სისტემაში).

<sup>27</sup> ჰენრი (ჰნ ან H) – ინდუქტივობის გაზომვის ერთეული საერთაშორისო SI სისტემაში. წრედს გააჩნია ერთი ჰენრის ოდენობის ინდუქტივობა, თუ დენის ცვლილება სიჩქარით ერთი ამპერი წამში ჰქმნის ერთი ვოლტის ოდენობის ინდუქციის ელექტრო მამოძრავებელ ძალას. SI სისტემის სხვა ერთეულებით შეიძლება შემდეგნაირად გამოისახოს: ჰნ = ვ·წმ·ა<sup>-1</sup> = კგ·მ<sup>2</sup>·წმ<sup>-2</sup>·ა<sup>-2</sup>.

**მაგნიტური ამთვისებლობა**  $\chi$  განისაზღვრება ნივთიერების მოცულობის ერთეულის დამაგნიტების და დამამაგნიტებელი მაგნიტური ველის დამაბულობის შეფარდებით. თავისი არსით ამთვისებლობა უგანზომილო სიდიდეა.

$$\chi = \frac{M}{H}$$

სადაც  $M$  – ნივთიერების დამაგნიტებაა მაგნიტური ველის მოქმედებით, ხოლო  $H$  – მაგნიტური ველის დამაბულობა.

**მაგნიტური შეღწევადობა**  $\mu$  – ფიზიკური სიდიდე, გარემოს თვისებებზე დამოკიდებული კოეფიციენტი, რომელიც ასახავს ნივთიერებაში მაგნიტური ინდუქციის კავშირს მაგნიტური ველის დამაბულობასთან. სხვადასხვა გარემოებისათვის ეს კოეფიციენტი განსხვავებულია. ამიტომაც საუბრობენ გარკვეული გარემოს მაგნიტურ შეღწევადობაზე (იგულისხმება მისი შემადგენლობა, მდგომარეობა, ტემპერატურა და ა.შ.). საერთო შემთხვევაში მაგნიტური ინდუქციის და მაგნიტური ველის დამაბულობის შეფარდება მაგნიტური შეღწევადობის მეშვეობით აღიწერება როგორც:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

ერთეულების საერთაშორისო SI სისტემაში შემოაქვთ როგორც განზომილებიანი (აბსოლუტური), ასევე განზომილების გარაშე (შეფარდებითი) მაგნიტური შეღწევადობები:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

აქ  $\mu_r$  – შეფარდებითი, ხოლო  $\mu$  – აბსოლუტური მაგნიტური შეღწევადობაა,  $\mu_0$  – მაგნიტური მუდმივაა.

აბსოლუტური მაგნიტური შეღწევადობის განზომილება SI სისტემაში იგივეა რაც მაგნიტური მუდმივასი, ანუ ჰნ/მ (ჰენრი მეტრზე) ან ნ/ა<sup>2</sup> (ნიუტონ ამპერ კვადრატზე). შეფარდებითი მაგნიტური შეღწევადობა SI სისტემაში უკავშირდება მაგნიტურ ამთვისებლობას ( $\chi$ ) შემდეგი შეფარდებით:

$$\mu_r = 1 + \chi$$

### მაგნიტური მომენტი

დენიანი გამტარის მაგნიტური თვისებები ხასიათდება სიდიდით, რომელსაც კონტურის **მაგნიტური მომენტი** ეწოდება. ბრტყელი, ჩაკეტილი კონტურის  $\vec{I}$  დენის შემოვლისას წარმოიქმნება მაგნიტური მომენტი ( $\vec{P}_M$ ), რომელიც წარმოადგენს ვექტორულ სიდიდეს, და რიცხობრივად დენისა  $\vec{I}$  და კონტურის ფართის  $S$  ნამრავლის ტოლია.

$$\vec{P}_M = \vec{I}S \tag{41}$$

ეს ვექტორი მიდებულობა კონტურის ცენტრზე, მიმართულია მისი სიბრტყის პერპენდიკულარულად და შეესაბამება დენის მიმართულებას მარჯვენა ბურღის წესის მიხედვით. თუ დენიან კონტურს მოვათავსებთ  $\vec{H}$  დამაბულობის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, მაშინ ველი კონტურის დენთან ურთიერთობისას წარმოქმნის ძალთა წყვილს, რომელიც ცდილობს დააყენოს კონტური ინდუქციის ვექტორის პერპენდიკულარულად, ანუ ისე, რომ კონტურის მაგნიტური მომენტის ვექტორი  $\vec{P}_M$  ემთხვეოდეს ველის  $\vec{B}$  მიმართულებას. კონტურზე მოქმედი ძალები გარე ველის ინდუქციის  $\vec{B}$  და კონტურის მაგნიტური მომენტის  $\vec{P}_M$  პროპორციულია.

ნივთიერებათა მაგნიტურ თვისებებს ძირითადად ელექტრონების ორბიტალური მოძრაობა და სპინი განსაზღვრავენ. თავის მხრივ ელექტრონები შეიძლება განვიხილოთ

როგორც თავისებური მიკროდენები, რომლებიც ატომებისა და მოლეკულების მიკრომაგნიტურ ველებს ჰქმნიან. ეს მიკროველები ხასიათდებიან შესაბამისი მაგნიტური მომენტებით. თუ  $e$  მუხტის მქონე ელექტრონი  $r$  რადიუსის წრიულ ორბიტაზე  $v$  სიხშირით ბრუნავს, მაშინ მიკროდენის ძალა  $i = ev$ , ხოლო წრფიული სიჩქარე  $v = 2\pi r\nu$ . მაშინ (41) შესაბამისად ელექტრონის ორბიტალური მაგნიტური მომენტი

$$p_{o.m.} = iS = ev\pi r^2$$

მაგრამ

$$v = \frac{v}{2\pi r}$$

მაშინ

$$p_{o.m.} = \frac{evr}{2} \quad (42)$$

ელემენტარული მაგნიტური მომენტის განსაზღვრისათვის შემოღებულ იქნა მაგნეტონის ცნება. ასე **ბორის მაგნეტონი** – ელექტრონის მინიმალური მაგნიტური მომენტი ატომში. დაერქვა ნილს ბორის საპატივცემლოდ, რომელმაც ის გამოთვალა 1913 წ<sup>28</sup>.

მოდით ცოტა გაუსწროთ მოვლენებს, და განვიხილოთ ატომური ფიზიკისათვის განკუთვნილი ეს მასალა უკვე ამ თავში, რათგან ამას ითხოვს ჩვენი მსჯელობების სვლა. მამ ასე, გაუსის ათვლის სისტემაში (CGS) ბორის მაგნეტონი განისაზღვრება როგორც

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2cm_e} \quad (43)$$

ხოლო საერთაშორისო SI სისტემაში როგორც

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \quad (44)$$

სადაც  $\hbar$  – პლანკი-დირაკის მუდმივაა,  $e$  – ელემენტარული ელექტრული მუხტი,  $m_e$  – ელექტრონის მასა,  $c$  – სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში.

$\mu_B$  სიდიდის ფიზიკური არსი ადვილადაა გასაგები, თუ განვიხილეთ ელექტრონის მოძრაობის ნახევარკლასიკური განმარტება (42)  $r$  რადიუსის წრიულ ორბიტაზე  $v$  სიჩქარით. ასეთი სისტემა წარმოადგენს ხვიის ანალოგს, რომელშიც გაედინება  $i$  ძალის დენი. ეს დენის ძალა ელექტრონის მუხტის და მისი ბრუნვის პერიოდის შეფარდების ტოლია:

$$i = \frac{ev}{2\pi r}$$

კლასიკური ელექტროდინამიკის თანახმად და (42) გამოყენებით, დენიანი ხვიის მაგნიტური მომენტი, რომელიც  $S$  ფართს მოიცავს, CGS ათვლის სისტემაში იქნება:

$$\mu = \frac{iS}{c} = \frac{evr}{2c} = \frac{eM_\ell}{2mc} \quad (45)$$

სადაც,  $M_\ell = mvr$  – ელექტრონის ორბიტალური იმპულსის მომენტია (მისი ე.წ. კუთხური მომენტი). თუ გავითვალისწინებთ, რომ კვანტური კანონების თანახმად, ელექტრონის ორბიტალურ მომენტს შეუძლია მხოლოდ პლანკის მუდმივას ჯერადი დისკრეტული მნიშვნელობების მიღება:

$$M_\ell = \hbar\ell$$

<sup>28</sup> პირველმა აღმოაჩინა და გამოთვალა რუმინელმა ფიზიკოსმა სტეფან პროკოპიუმ 1911 წ.

სადაც  $\ell$  – ორბიტალური კვანტური რიცხვია, რომელიც იღებს მნიშვნელობებს:

$$\ell = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$\mu_\ell = \frac{e\hbar\ell}{2mc} = \mu_B \cdot \ell \quad (46)$$

ამრიგად, ელექტრონის ორბიტალური მაგნიტური მომენტი ბორის მაგნეტონის ჯერადია. მაშასადამე, მოცემულ შემთხვევაში  $\mu_B$  (ბორის მაგნეტონი) თამაშობს ელემენტარული მაგნიტური მომენტის როლს, და წარმოადგენს ამ მომენტის „კვანტს“.

ელექტრონის სრული მაგნიტური მომენტის აღწერისას ბირთვის გარშემო ბრუნვით განპირობებული ორბიტალური იმპულსის მომენტის  $M_\ell$  გარდა საჭიროა გავითვალისწინოთ მისი საკუთარი მექანიკური მომენტიც – სპინი, რომელიც  $\hbar$ -ის ერთეულებში  $s = 1/2$  ტოლია. მაგრამ, მისი აღწერისათვის საჭიროა ახალი ცნებების, გირომაგნიტური შეფარდების და გ-ფაქტორის შემოღება.

**გირომაგნიტური შეფარდება (მაგნიტომექანიკური შეფარდება)** – წარმოადგენს ელემენტარული ნაწილაკის (ან ელემენტარული ნაწილაკების სისტემის) დიპოლური მაგნიტური მომენტის შეფარდებას მის მექანიკურ მომენტთან. საერთაშორისო SI სისტემაში მისი ერთეული არის  $[\text{წმ} \cdot \text{ა} \cdot \text{კგ}^{-1} = \text{წმ}^{-1} \cdot \text{ტ}^{-1}]$ . ხშირად იგულისხმება, რომ გირომაგნიტური შეფარდება იზომება  $q/2mc$ -ს ერთეულებში, სადაც  $c$  – სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში, ხოლო  $q$  და  $m$  – ნაწილაკის მუხტი და მასა. ამ შემთხვევაში გირომაგნიტური შეფარდება წარმოგვიდგება როგორც უგანზომილო სედიდე.

ატომური სისტემის განსხვავებული მდგომარეობებისათვის გირომაგნიტური შეფარდება განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\gamma = g\gamma_0$$

სადაც,  $g$  – ლანდეს მამრავლი (ან და უფრო მარტივად გ-ფაქტორი),  $\gamma_0$  – გირომაგნიტური შეფარდების ერთეული, რომელიც CGS ათვლის სისტემაში გამოიყურება შემდეგნაირად:

$$\gamma_0 = -\frac{e}{2m_e c}$$

აქ,  $e$  – ელემენტალური მუხტი,  $m_e$  – ელექტრონის მასა,  $c$  – სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში.

SI სისტემაში გირომაგნიტური შეფარდების ერთეული გამოიყურება შემდეგნაირად:

$$\gamma_0 = -\frac{e}{2m_e}$$

ავლნიშნოთ, რომ ბირთვების შემთხვევაში გირომაგნიტური შეფარდების ერთეული:

$$\text{CGS სისტემაში } \gamma_0 = -\frac{e}{2m_p c} \quad \text{ხოლო SI სისტემაში } \gamma_0 = -\frac{e}{2m_p}$$

სადაც,  $m_p$  – პროტონის მასაა.

კლასიკური თეორიის თანახმად, გირომაგნიტური შეფარდება წარმოადგენს პროპორციულობის კოეფიციენტს გარე მაგნიტურ ველში მოთავსებულ მაგნიტური მომენტის ვექტორის პრეცესიის კუთხური სიჩქარისა  $\vec{\Omega}_p$  და მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორებს შორის:

$$\vec{\Omega} = \gamma \vec{B}$$



კვანტურ თეორიაში გირომაგნიტური შეფარდებით განისაზღვრება დონეების გახლეჩის სიდიდე ზეემანის ეფექტში<sup>29</sup>.

რაც ეხება **g-ფაქტორს** – ის წარმოადგენს მამრავლს, რომელიც აკავშირებს ნაწილაკის გირომაგნიტურ შეფარდებას მის კლასიკურ მნიშვნელობასთან:

$$\gamma = g\gamma_0$$

სადაც კლასიკური მნიშვნელობა გამოიყურება შემდეგნაირად:

$$\gamma_0 = q/2mc$$

აქ,  $q$  – ნაწილაკის მუხტი,  $m$  – მისი მასა,  $c$  – სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში.

კლასიკურ ნაწილაკისათვის  $g$ -ფაქტორი 1-ის ტოლია, 1/2 სპინის მქონე თავისუფალი კვანტური ნაწილაკების შემთხვევაში, ეს სიდიდე 2-ს უტოლდება (დირაკის განტოლების თანახმად). რეალური ნაწილაკებისათვის  $g$ -ფაქტორის ექსპერიმენტალურად დადგენილი მნიშვნელობები შეიძლება განსხვავდებოდეს როგორც 1-ისგან, ასევე 2-სგანაც, და წარმოადგენდნენ ნაწილაკის ერთ ერთ მახასიათებელს. ზოგჯერ  $g$ -ფაქტორს განსაზღვრავენ ნიშნის გათვალისწინებით შემდეგი განტოლების მიხედვით:

$$\mu_s = \frac{g|g|}{2mc} S$$

სადაც,  $\mu_s$  – ნაწილაკის მაგნიტური მომენტი (დაკავშირებული თავის  $S$  სპინთან).

### ელექტრონის $g$ -ფაქტორი.

კვანტური ელექტრონის ამღწერი დირაკის განტოლება იძლევა  $g$ -ფაქტორისათვის (-2) მნიშვნელობას. მაგრამ ექსპერიმენტებმა, რომლებიც 1947 წელს ჩაატარეს პოლიკარპ კუმმა და ფოლიმ უჩვენა, რომ ელექტრონის  $g$ -ფაქტორი განსხვავდება ორისაგან. ეს მოვლენა ახსნა ჯულიან შვინგერმა კვანტური ელექტროდინამიკის ფარგლებში და აჩვენა, რომ სხვაობას განაპირობებს ელექტრონის ურთიერთობა ვირტუალურ ფოტონებთან<sup>30</sup>. ელექტრონის  $g$ -ფაქტორის ორისაგან შეფარდებითი გადახრის თეორიული მნიშვნელობა გამოიყურება შემდეგნაირად:

$$\alpha = \frac{||g| - 2|}{2} = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\pi} - 0,328479 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + 1,29 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \dots$$

სადაც,  $\alpha$  – თხელი სტრუქტურის მუდმივაა (იხ. ფორმულა (2)). ეს მნიშვნელობა ეთანხმება ექსპერიმენტულს  $10^{-6}$  სიზუსტით.

1955 წელს პოლიკარპ კუმმა მიიღო ნობელის პრემია ფიზიკის დარგში ელექტრონის მაგნიტური მომენტის ზუსტი განსაზღვრისათვის (ესე იგი  $g$ -ფაქტორისაც).

### ზოგიერთი ნაწილაკის $g$ -ფაქტორი

ნაწილაკი	$g$ -ფაქტორი
ელექტრონი $g_e$	-2,00231930436153(53)
ნეიტრონი $g_n$	-3,8260854(90)
პროტონი $g_p$	+5,585694713(46)

<sup>29</sup> ზეემანის ეფექტი – ატომური სპექტრების გახლეჩის მოვლენა მაგნიტურ ველში. დაერქვა პიტერ ზეემანის საპატივსაცემოდ, რომელმაც აღმოაჩინა ეს ეფექტი 1896 წ.

<sup>30</sup> ვირტუალური ნაწილაკი – კვანტური ველის თეორიის ცნება. წარმოადგენს ობიექტს, რომელიც ხასიათდება შესაბამისი რეალური ნაწილაკის თითქმის ყველა კვანტური რიცხვით, მაგრამ ირღვევა ნაწილაკისათვის დამახასიათებელი კავშირი მის ენერგიასა და იმპულსს შორის. ასეთი ნაწილაკები დაბადებისას ვერ „გაფრინდებიან უსასრულობაში“; უნდა მოხდეს მათი შთაინთქმევა სხვა ნაწილაკებით, ან რეალურ ნაწილაკებად დაშლა.

ამრიგად, სპინური მაგნიტური მომენტი:

$$\mu_s = g_e \mu_B S \quad (47)$$

სადაც,  $g_e$  – ელექტრონის  $g$ -ფაქტორია. რელატივისტურ კვანტურ თეორიაში, დირაკის განტოლებებიდან გამომდინარე  $g_e$  გამოდის ორის ტოლი, ესეიგი ორჯერ დიდი იმ სიდიდეზე, რომელიც მიღებულია ფორმულა (46) თანახმად. მაგრამ, ვინაიდან  $s = 1/2$ , თეორიულად მივიღებთ:

$$\mu_s = \mu_B.$$

მაგრამ, მიუხედავად ამისა, ცნობილია, რომ ელექტრონის  $g$ -ფაქტორი:

$$g_e = 2,00231930436153 \quad (53)$$

ასე რომ, თეორიულად ელექტრონის სრული მაგნიტური მომენტი გამოიყურება ასე:

$$\mu = \mu_\ell + \mu_s = \mu_B \cdot \ell + \mu_B = \mu_B(\ell + 1) \quad (48)$$

ბირთვის მაგნიტური დიპოლური მომენტი  $\vec{\mu}$  განსაზღვრავს ბირთვის და ერთგვაროვანი  $\vec{H}$  დამაბულობის მაგნიტური ველის ურთიერთობის ენერჯიას ( $E$ ). ნუკლონების და ბირთვების მაგნიტური მომენტები იზომება ბირთვულ მაგნეტონებში  $\mu_N$ . (43) და (44) ფორმულების ანალოგიით ბირთვული მაგნეტონი განისაზღვრება როგორც:

CGS ათვლის სისტემაში	SI სისტემაში	
$\mu_N = \frac{e\hbar}{2cm_p}$	$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$	(49)

სადაც,  $m_p$  – პროტონის მასაა, ხოლო დანარჩენი აღნიშვნები (43) და (44) ანალოგიურია.

$\mu_N$  ბორის მაგნეტონზე ( $\mu_B$ ) —  $m_p/m_e = 1836$  ჯერ ნაკლებია. ბირთვის მაგნიტური მომენტი  $\mu_{AN}$  ( $AN$  – Atomic Nucleus) განისაზღვრება ნუკლონების სპინური  $\vec{S}$  და ორბიტალური  $\vec{\ell}$  მომენტებით.

$$\vec{\mu}_{AN} = \mu_N \sum_{i=1}^A (\gamma_\ell^i \vec{\ell}_i + \gamma_s^i \vec{S}_i)$$

სადაც,  $\gamma_\ell, \gamma_s$  – ორბიტალური და სპინური გირომაგნიტური შეფარდებებია.

**ნუკლონების გირომაგნიტური შეფარდებები**

	$\gamma_\ell$	$\gamma_s$
პროტონი ( $p$ )	1	5.58550
ნეიტრონი ( $n$ )	0	-3.82629

დირაკმა აჩვენა, რომ  $1/2$  სპინის მქონე წერტილოვანი დამუხტული ნაწილაკისათვის სპინური გირომაგნიტური შეფარდება  $\gamma_s$  უნდა იყოს 2-ის, ნეიტრალური ნაწილაკისათვის კი 0-ის ტოლი. ის რომ  $\gamma_{sp} \neq 2$  და  $\gamma_{sn} \neq 0$ , მიუთითებს ნუკლონების არაწერტილოვან ბუნებაზე. სპინური მაგნიტური მომენტები პროტონისათვის  $\mu_p$  და ნეიტრონისათვის  $\mu_n$  შემდეგია:

$$\mu_p = \gamma_{sp} \mu_N / 2 = 2,79275 \mu_N \qquad \mu_n = \gamma_{sn} \mu_N / 2 = -1,91348 \mu_N$$

ცხრილში მოყვანილია ზოგიერთი ბირთვის სპინები და მაგნიტური მომენტები

ბირთვი	Z	სპინი $\hbar$ -ის ერთეულებში	ბირთვული მომენტი ბირთვულ მაგნეტონებში
$^2\text{H}$	1	1	0.8574
$^3\text{H}$	1	1/2	2.9789
$^3\text{He}$	2	1/2	-2.1275
$^4\text{He}$	2	0	0
$^{14}\text{N}$	7	1	0.406
$^{57}\text{Fe}$	26	1/2	0.0905
$^{63}\text{Cu}$	29	3/2	2.2260
$^{180}\text{Hf}$	72	0	0
$^{185}\text{Re}$	75	5/2	3.1716
$^{241}\text{Pu}$	94	5/2	-0.730

მაგნიტური მომენტის უარყოფითი მნიშვნელობები მიუთითებს იმაზე, რომ ბირთვის სპინი და მაგნიტური მომენტი საწინააღმდეგო მიმართულებისანი არიან. მიაქციეთ ყურადღება, რომ მაგნიტური მომენტების მნიშვნელობები მოყვანილია ბირთვულ მაგნეტონებში. ამიტომაც ცხრილი 5-ში მოყვანილია ბორის მაგნეტონის მიახლოებითი მნიშვნელობები (ელექტრონის მაგნიტური მომენტის „კვანტი“) და ბირთვული მაგნეტონი (ბირთვის მაგნიტური მომენტის „კვანტი“), ათვლის სისტემაზე დამოკიდებულებით:

ცხრილი 5

სისტემა	ბორის მაგნეტონი	ბირთვული მაგნეტონი	ერთეულები
SI	$927,40 \cdot 10^{-26}$	$50,51 \cdot 10^{-28}$	ჯ/ტ (ჯოულ/ტესლა)
CGS	$927,40 \cdot 10^{-23}$	$50,51 \cdot 10^{-25}$	ერგ/გს (ერგ/გაუს)
	$5,79 \cdot 10^{-5}$	$3,15 \cdot 10^{-8}$	ევ/ტ (ელექტრონვოლტ/ტესლა)
	$5,79 \cdot 10^{-9}$	$3,15 \cdot 10^{-12}$	ევ/გს (ელექტრონვოლტ/გაუს)

ორბიტების გარკვეული ურთიერთ ორიენტაციის შემთხვევაში, და თუ ყველა ელექტრონი შეწყვილებულია, შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ელექტრონის მაგნიტური მომენტების სრულ კომპენსაციას, რის შედეგადაც ატომის ან მოლეკულის მაგნიტური მომენტი  $p_{m.m.} = 0$ . ასეთ ნივთიერებებს ეწოდება **დიამაგნეტიკები**. იმ ნივთიერებებს რომლებშიც მოლეკულების და ატომების მაგნიტური მომენტების ასეთი კომპენსაცია არ ხდება ანუ  $p_{m.m.} > 0$ , ეწოდება **პარამაგნეტიკები**. პარამაგნიტური ნივთიერების ატომების მაგნიტური მომენტები სივრცეში უწყსრიგოდ არიან განლაგებულნი და მთლიანობაში აწონასწორებენ ერთმანეთს. ამიტომ ჩვეულებრივ მდგომარეობაში ეს სხეულები, როგორც დიამაგნეტიკებიც საკუთარ მაგნიტურ ველს არ წარმოქმნიან ანუ „არამაგნიტურები“ არიან. თუ დია- ან პარამაგნეტიკზე გარე  $\vec{H}$  მაგნიტური ველი მოქმედებს, ელექტრონული ორბიტები პრეცესიულ მოძრაობას იწყებენ. წარმოიქმნება ე.წ. ალძრული ველი რომელიც გარე ველის საწინააღმდეგოდაა მიმართული (ლენცის წესის მიხედვით). ამ მოვლენას **დიამაგნიტური ეფექტი** ეწოდება, და ის დამახასიათებელია როგორც დია, ასევე პარამაგნეტიკებისათვისაც. დიამაგნეტიკებში ეს ეფექტი განაპირობებს მათ ქცევას მაგნიტურ ველში: განიზიდება მაგნიტის ორივე პოლუსის მიერ. ასეთია ზოგიერთი

მეტალი (ბისმუტი, ვერცხლი, ...) აგრეთვე ფოსფორი, ნახშირბადი, წყალი და ორგანული ნივთიერებების უმრავლესობა.

პარამაგნეტიკებში გარე ველის ზემოქმედებით (დიამაგნეტიკური ეფექტის დამოუკიდებლად) ადგილი აქვს საკუთარი მაგნიტური მომენტების ორიენტაციას, რის შედეგადაც იქმნება გარე ველის მდგენელები, რაც იწვევს გარე ველის გაძლიერებას. ამ მოვლენას **პარამაგნეტიკური ეფექტი** ეწოდება. პარამაგნეტიკური ნივთიერებები მაგნიტის პოლუსების მიერ მიიზიდებიან. გარე ველის ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ, როგორც პარამაგნეტიკები უბრუნდებიან საწყის მდგომარეობას.

#### 7.4. ელექტრული დენი.

ელექტრულ დენს უწოდებენ მუხტების მიმართულ გადაადგილებას. მუხტების მატარებლები შეიძლება იყვნენ: მეტალებში – ელექტრონები, ელექტროლიტებში – იონები (კათიონები და ანიონები), აირებში – იონები და ელექტრონები, ვაკუუმში (გარკვეულ პირობებში) – ელექტრონები, ნახევარგამტარებში – ელექტრონები და ხვრელები (ელექტრონულ-ხვრელური გამტარბა). ისტორიულად **დენის მიმართულება** გამტარში ემთხვევა დადებითი მუხტების გადაადგილების მარულებას. ამასთან, თუ დენის ერთადერთ მატარებლად წარმოდგენილია უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები (მაგალითად ელექტრონები მეტალებში), მაშინ დენის მიმართულება დამუხტული ნაწილაკების გაადგილების საპირისპიროა. ელექტრულ დენს გააჩნია რაოდენობრივი მახასიათებლები: სკალარული – დენის ძალა, და ვექტორული – დენის სიმკვრივე.

**დენის ძალა** – ფიზიკური სიდიდე რომელიც წარმოადგენს გამტარის განივკვეთში გარკვეულ დროში გავლილი მუხტების რაოდენობის შეფარდებას ამ დროის შუალედის მნიშვნელობასთან. ანუ, ფაქტიურად ეს მუხტების გადაადგილების სიჩქარეა (იხ.(36)):

$$I = \frac{dq}{dt}$$

ერთეულების საერთაშორისო SI სისტემაში დენის ძალა იზომება ამპერებში (ა). ომის კანონის თანახმად დენის ძალა წრედის მონაკვეთზე პირდაპირ პროპორციულია ამ მონაკვეთზე მიდებული ძაბვისა და უკუ პროპორციულია მისი წინაღობისა:

$$I = \frac{U}{R}$$

**დენის სიმკვრივე** – ეს ვექტორული სიდიდეა რომლის აბსოლუტური მნიშვნელობა გამტარში დენის მიმართულების პერპენდიკულარულ გარკვეულ კვეთში გამავალი დენის ძალის და ამ კვეთის ფართობის შეფარდებას ტოლია, ხოლო ვექტორის მიმართულება ემთხვევა დენის წარმომშობი დადებითი მუხტების მოძრაობის მიმართულებას.

დიფერენციალურ ფორმაში ჩაწერილი ომის კანონის თანახმად, დენის სიმკვრივე ( $\vec{j}$ ) გარემოში ელექტრული ველის დამაბულობის ( $\vec{E}$ ) და გარემოს გამტარობის ( $L$ ) პროპორციულია:

$$\vec{j} = L\vec{E} = \frac{\vec{E}}{R}$$

რადგან გამტარობა წარმოადგენს წინაღობის უკუ მნიშვნელობას.

ელექტრო ძაბვა ელექტრული წრედის ან ელექტრული ველის A და B წერტილებს შორის წარმოადგენს ფიზიკურ სიდიდეს, რომლის მნიშვნელობაც იმ ეფექტური ელექტრული ველის (გარე ველების ჩათვლით) მუშაობის ტოლია, რომელიც სრულდება ერთიანი სასინჯი მუხტის გადატანისას A დან B წერტილში. საერთო შემთხვევაში ძაბვა  $U_{AB}$  A და B წერტილებს შორის განსხვავდება ამ წერტილებს შორის პოტენციალთა

სხვაობისაგან გარე ძალების მუშაობით ერთიანი დადებითი მუხტის გადატანისას. ამ მუშაობას უწოდებენ ელექტრომაგნიტურ ძალას  $\mathcal{E}_{AB}$  წრედის მოცემულ მონაკვეთზე:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}_{AB}$$

გარე ძალების არ არსებობის პირობებში:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

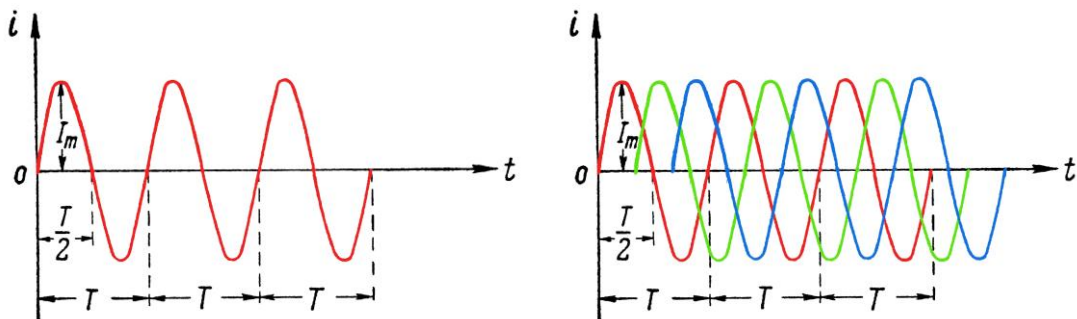
## 7.5. ცვლადი დენი.

ცვლადი ეწოდება ისეთ დენს, რომლის მყისიერი მნიშვნელობა პერიოდულად იცვლება აბსოლუტური მნიშვნელობითა და მიმართულებით, ე.ი. ეს არის მუხტის მატარებლების რხევითი მოძრაობა. ეს რხევები შეიძლება სხვადასხვაგვარი იყოს, მაგრამ პრაქტიკაში უპირატესად სინუსოიდალური დენია გავრცელებული, რომელსაც გულისხმობენ „ცვლად დენზე“ საუბრისას. ცვლადი დენის პირობითი აღნიშვნა ("alternating current", შემოკლებით AC) ხელსაწყოებზე: ~ ან ≈ (სინუსოიდის ნიშანი), ან და ლათინური ასოებით AC.

პერიოდულ ცვლად დენს უწოდებენ ისეთ ელექტრულ დენს, რომელიც დროის ტოლ შუალედებში იმეორებს თავის ცვლილებების სრულ ციკლს და უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას.

სურ. 12-ზე მოყვანილ დიაგრამაზე ჩვენ ვხედავთ, რომ დროის ტოლ შუალედებში დენის გრაფიკი სრულად, ცვლილებების გარეშე აისახება. დროს ( $T$ ) რომელშიც ცვლადი პერიოდული დენი ასრულებს თავისი ცვლილებების სრულ ციკლს და უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას ეწოდება ცვლადი დენის პერიოდი. სიდიდეს, რომელიც წარმოადგენს პერიოდის უკუ მნიშვნელობას ეწოდება ცვლადი დენის სიხშირე ( $\nu$ ):

$$\nu = 1/T$$



სურ. 12. ერთფაზიანი (მარცხნივ) და სამფაზიანი (მარჯვნივ) პერიოდული ცვლადი დენის გამოსახულება.  $I_m$  – დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა (ამპლიტუდა);  $T$  – ცვლადი დენის პერიოდი, რომლის უკუ მნიშვნელობა წარმოადგენს მის სიხშირეს. სამფაზიანი დენის შემთხვევაში ყოველი შემდეგი სინუსოიდა (მწვანე და ლურჯი ფერის) მიედინება  $2\pi/3$  ფაზის წანაცვლებით.

თუ დროს გამოვხატავთ წამებში, სიხშირის განზომილება იქნება  $1/\text{წმ}$ . ცვლადი დენის სიხშირის განზომილების ერთეულად მიღებულია 1 ჰერცი (1 ჰც, 1 Hz),  $1 \text{ ჰც} = 1/\text{წმ}$ . ქვეყნების უმეტესობაში ელექტროტექნიკაში მიღებულია სიხშირეები 50 ან 60 ჰც.

სინუსოიდალურ დენს უწოდებენ პერიოდულ ცვლად დენს, რომელიც დროის განმავლობაში იცვლება სინუსის კარმონიული კანონის მიხედვით. სინუსოიდალური დენი თავისი ბუნებით ელემენტალურია, ანუ შეუძლებელია მისი დაშლა სხვა, უფრო მარტივ ცვლად დენებზე. ცვლადი სინუსოიდალური დენი გამოისახება ფორმულით:

$$i = I_m \sin \omega t$$

სადაც  $I_m$  – სინუსოიდალური დენის ამპლიტუდა;  $\omega t$  – რაღაც კუთხე, რომელსაც ეწოდება სინუსოიდალური დენის ფაზა. სინუსოიდალური დენის ფაზა  $t$  დროის პროპორციულად იცვლება.

ფაზის გამოსახულებაში შემავალი  $\omega$  სამრავლი – წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს და მას ეწოდება ცვლადი დენის კუთხური სიხშირე (ცვლადი დენის წრიული სიხშირე). სინუსოიდალური დენის კუთხური სიხშირე დამოკიდებულია ამ დენის სიხშირეზე და განისაზღვრება ფორმულით:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

სინუსოიდალური დენის ზემომოყვანილი ფორმულა აღწერს შემთხვევას, როდესაც დენის ცვლილების დაკვირვება იწყება  $t = 0$  დროის მომენტიდან. თუ საწყისი დრო არაა ნულის ტოლი, მაშინ ფორმულას ექნება შემდეგი სახე:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

სადაც,  $(\omega t + \psi)$  – ცვლადი სინუსოიდალური დენის ფაზა;  $\psi$  – კუთხე, რომელსაც ეწოდება ცვლადი სინუსოიდალური დენის საწყისი ფაზა. თუ კი ფორმულაში  $t = 0$ , მაშინ

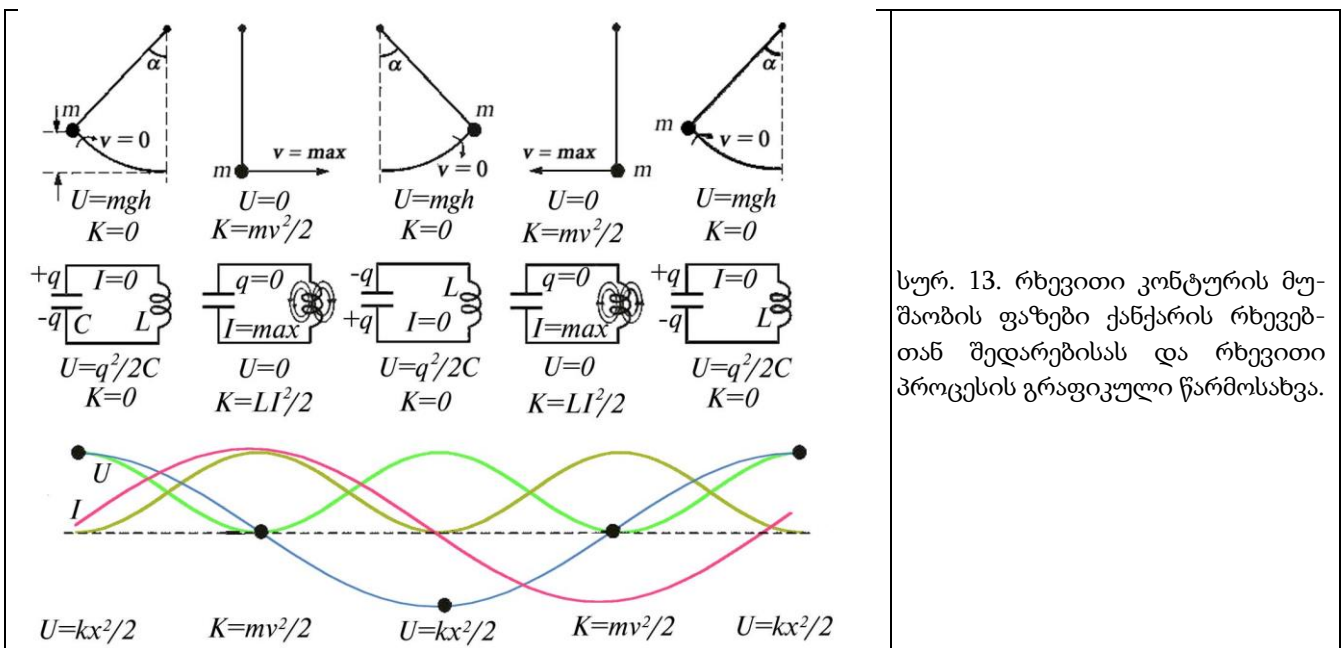
$$i = I_m \sin \psi$$

ასე რომ საწყისი ფაზა ეს სინუსოიდალური დენის ფაზაა  $t = 0$  დროის მომენტში.

ცვლადი სინუსოიდალური დენის მრავალფაზიან სისტემებში ყველაზე დიდი გამოყენება ჰპოვა ელექტრომომარაგების სამფაზიანმა სისტემამ (იხ. სურ. 12 (მარჯვენა)). სამფაზიანი სისტემა ეწოდება ერთფაზიანი ელექტრული წრედების ერთობას, რომელშიც მოქმედებს ერთი სიხშირის მქონე სამი ელექტრომომარაგებელი ძალა, რომლებიც ფაზით არიან წანაცვლებულები ერთმანეთის მიმართ  $120^\circ$ , ან  $\left(\frac{2}{3}\pi\right)$ .

## 7.6. ელექტრული რხევები

უმარტივესი ელექტრული რხევითი კონტური შედგენილია პარალელურად შეერთებული კონდენსატორისა (C) და ინდუქტივობისაგან (L). სურ. 13-ზე ნაჩვენებია ქანქარის რხევის ფაზები და მისი შესაბამისი რხევითი კონტურის ფაზები.



სურ. 13. რხევითი კონტურის მუშაობის ფაზები ქანქარის რხევებთან შედარებისას და რხევითი პროცესის გრაფიკული წარმოსახვა.

კონდენსატორის ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს მისი ტევადობა, რომელიც იზომება ფარადებში (ფ) და ახასიათებს მის უნარს დააგროვოს ელექტრული მუხტი. 1 ფარადი შეესაბამება ისეთი კონდენსატორის ტევადობას რომელშიც 1 კულონის ოდენობის მუხტი ჰქმნის მის შემონაფენებს შორის 1 ვოლტის ოდენობის ძაბვას. ფარადი ძალზე დიდი ტევადობაა ცალკეული გამტარის შემთხვევაში: 1 ფ ტევადობა ექნებოდა განმარტოვებულ რკინის სფეროს, რომლის რადიუსი იქნებოდა მზის 13 რადიუსის<sup>31</sup> ტოლი (დედამიწის ზომის<sup>32</sup> განმარტოვებულ რკინის სფეროს ტევადობა კი შეადგენს  $710 \text{ მკფ} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ ფ}$ ).

ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობა, რომელიც შედგება მეტალის ორი ერთნაირი პარალელური ფირფიტისაგან (თითოეული ფირფიტის ფართი  $S$ -ის ტოლია) რომლებიც  $d$  მანძილით არიან დაშორებული, საერთაშორისო SI სისტემაში გამოისახება ფორმულით:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

სადაც,  $\epsilon$  – ფირფიტებს შორის მყოფი გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობაა (ვაკუუმში ის 1-ის ტოლია),  $\epsilon_0$  – ელექტრული მუდმივა, რომელიც რიცხობრივად  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ფ/მ}$  ტოლია. ეს ფორმულა მართებულია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც  $d$  ბევრად მცირეა თავად ფირფიტების ზომებზე. საერთო შემთხვევაში მისაღებია კონდენსატორის ტევადობის შემდეგნაირი წარმოსახვა:

$$C = \frac{dq}{d\phi}$$

ანუ მუხტის ცვლილება გამტარის პოტენციალზე დამოკიდებულებით.

კონდენსატორს შეუძლია დააგროვოს ელექტრული ენერგია. დამუხტული კონდენსატორის ენერგია:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

სადაც,  $U$  – ძაბვაა (პოტენციალთა სხვაობა), რომლამდეც კონდენსატორი არის დამუხტული,  $q$  – ელექტრული მუხტი.

ვთქვათ ჩვენ ჩავხსენით (განვრთეთ) წრედი და დავმუხტეთ კონდენსატორი რაღაც  $W$  ენერგიით. ამ შემთხვევაში ეს ეკვივალენტურია მის დამუხტვას  $U = \sqrt{2C W}$  ძაბვამდე.

ამ დროს კონდენსატორის შემონაფენებზე გროვდება  $+q$  და  $-q$  მუხტები და მის ფირფიტებს შორის წარმოიქმნება ელექტრული ველი, რომელსაც ექნება რაღაც („პოტენციალური“) ენერგია. ქანქარის შემთხვევაში ეს ეკვივალენტურია მისი გადაწევისა გარკვეულ მანძილზე პოტენციალური ენერგიის  $U = mgh$  მნიშვნელობამდე. გრაფიკზე ქანქარის და კონტურის პოტენციალურ ენერგიას შეესაბამება მწვანე ფერის სინუსოიდა. კონტურის შეკვრის შემდეგ დროის საწყის მომენტში წრედში დენი არ გადის ( $I = 0$ ). ქანქარის მოძრაობის სიჩქარეც დროის საწყის მომენტში ასევე ნულის ტოლია ( $v = 0$ ) ამიტომაც ქანქარის კინეტიკური ენერგია ასევე ნულის ტოლია, და გრაფიკზე ამას ასახავს მუქი მწვანე ფერის სინუსოიდა. მაგრამ შემდეგ იწყება კონდენსატორის განმუხტვა  $L$  ინდუქტივობაზე და მისი ელექტრული ველი შემცირდება. ამასთან კონტურში წარმოიქმნება ელექტრული დენი, ხოლო ინდუქტივობის კოჭაში აღიძვრება მაგნიტური ველი.

<sup>31</sup> მზის რადიუსი  $\sim 7 \cdot 10^8 \text{ მ}$

<sup>32</sup> დედამიწის რადიუსი  $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ მ}$

გარკვეულ დროში, რომელიც რხევის პერიოდის მეოთხედის ( $\frac{1}{4}T$ ) ტოლია კონდენსატორი სრულად განიმუხტება და ელექტრული ველი გაქრება ( $U = 0$ ). მაგრამ მაგნიტური ველი ამ დროისათვის მიაღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას და შესაბამისად ელექტრული ველის ენერგია გადაიქცევა მაგნიტური ველის ენერგიათ ( $K = \frac{LI^2}{2}$ ). ქანქარა ამ დროისათვის იმყოფება თავის მოძრაობის ქვედა წერტილში, რომელსაც შეესაბამება პოტენციალური ენერგიის ნულოვანი მნიშვნელობა და მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია ( $K = \frac{mv^2}{2}$ ). დროის ეს მომენტი კონტურისთვის დამახასიათებელია როგორც მომენტი მაქსიმალური დენის ძალით. გრაფიკზე დენი წარმოდგენილია წითელი ფერის სინუსოიდით.

დროის მომდევნო მომენტებში მაგნიტური ველი იწყებს მიღევას რათგან არ არიან მისი ხელშემწყობი დენები. ეს მიღევადი ველი წარმოქმნის თვითინდუქციის დენს, რომელიც ლენცის კანონის თანახმად, ხელს უწყობს კონდენსატორის განმუხტვის დენს და მამასადამე ექნება იგივე მიმართულება. ამიტომაც კონდენსატორი იწყებს გადამუხტვას და მის ფირფიტებს შორის წარმოიქმნება საწინააღმდეგო მიმართულების ელექტრული ველი. რხევის ნახევარი პერიოდის ( $\frac{1}{2}T$ ) ოდენობის დროში მაგნიტური ველი სრულად გაქრება, ხოლო ელექტრული ველი აღწევს თავის მაქსიმუმს ( $U = q^2/2C$ ), ანუ მაგნიტური

ველის ენერგია კვლავ გადადის ელექტრული ველის ენერგიაში. ამასთან დაბვა კონდენსატორზე აღწევს საწყის მნიშვნელობას, ოღონდ შეცვლილი პოლარობით. გრაფიკზე დაბვა ნაჩვენებია ლურჯი ფერის სინუსოიდით. შემდგომში კონდენსატორი ისევ იწყებს განმუხტვას და კონტურში წარმოიქმნება პროცესის წინა სტადიის საწინააღმდეგო მიმართულების დენი. პერიოდის სამ მეოთხედ დროში ( $\frac{3}{4}T$ ) კონდენსატორი კვლავ განმუხტული აღმოჩნდება, ხოლო ელექტრული ველის ენერგია გადაიქცევა მაგნიტური ველის ენერგიათ და ასე შემდეგ. რხევის სრული პერიოდის  $T$  დროის ინტერვალში, კონტურის ელექტრული მდგომარეობა იქნება იგივე რაც რხევის დაწყებისას.

მაგნიტური და ელექტრული ველების დამაბულობის პერიოდული ცვლილების პროცესს ელექტრომაგნიტური რხევები ეწოდება. ამ დროს ელექტრული ველი პერიოდულად გარდაიქმნება მაგნიტურში, ხოლო მაგნიტური ელექტრულში.

თუ კონტურის ომური წინაღობა ნულის ტოლია, მაშინ აღწერილი პროცესი გრძელდება დროში შეუზღუდავად და კონტურში წარმოიქმნება მიუღვევადი რხევები.

მექანიკური რხევები, რომელიც წარმოიქმნება მხოლოდ თვით რხევად სისტემაში განვითარებული ძალების მეშვეობით (დრეკადი ძალები) საკუთარი რხევები ეწოდება. ანალოგიურად, კონტურში ენერგიის გარკვეული მარაგის მიწოდებისას წარმოქმნილი ელექტრული რხევები რომლებიც ინარჩუნებენ ამ მდგომარეობას კონტურში წარმოქმნილი ინდუქციური დენის მეშვეობით, საკუთარ ელექტრულ რხევებს უწოდებენ. საკუთარი რხევის  $T$  პერიოდი კონტურში დამოკიდებულია კოჭის  $L$  ინდუქტივობაზე და  $C$  ტევადობაზე:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

ეს ფორმულა პირველად მიიღო ინგლისელმა ფიზიკოსმა ტომსონმა და ამიტომაც მას მისი სახელი დაერქვა. ტომსონის ფორმულიდან შეიძლება მივიღოთ კონტურის საკუთარი სიხშირის გამოსახულება:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



სადაც,  $\omega_0$  – კონტურის საკუთარი სიხშირეა,  $C$  – კონდენსატორის ტევადობა,  $L$  – კოჭის ინდუქტივობა.

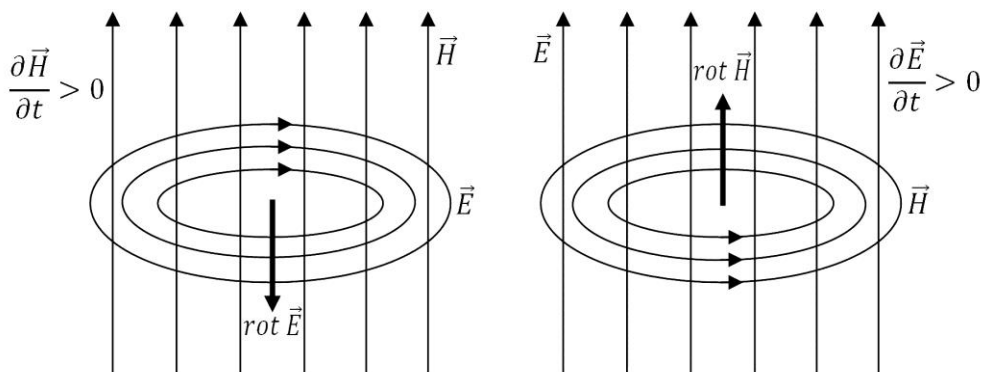
კონტურის წინაღობა რომ ნულის ტოლი ყოფილიყო, მასში წარმოქმნილი რხევები მიუღწევადი იქნებოდა. სინამდვილეში კი წინაღობა ყოველთვის განსხვავდება ნულისგან, ამიტომაც კონტურში თავდაპირველად მომარაგებული ენერგია შეუწყვეტლად იხარჯება სითბოს გამოყოფაზე. ამის შედეგად ელექტრული რხევების ინტენსივობა თანდათან კლებულობს, ანუ დროის გავლისას კლებულობს კონდენსატორის შემონაფენებზე წარმოქმნილი მუხტიც. ამას ემატება მაქსიმალური ელექტრული ველი, რომელიც იქმნება კონდენსატორის ფირფიტებს შორის და ასევე ინდუქტივობის კოჭაში შექმნილი მაგნიტური ველი. მაშასადამე კონტურში შემცირდება დენის ძალაც, ანუ რხევები იქნება მიღწევადი.

თუ კონდენსატორის ენერგია (პოტენციალური ენერგია) ნულის ტოლია, მაგნიტური ველის ენერგია (კინეტიკური) მაქსიმალურია და პირიქით.

### 7.7. ელექტრომაგნიტური ველი. ელექტრომაგნიტური ტალღები.

როგორც უკვე ითქვა ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის დროს მაგნიტური ველის ცვლილება იწვევს გრიგალური ელექტრული ველის აღძვრას. 1865 წელს მაქსველმა წამოაყენა ჰიპოთეზა, რომ უნდა არსებობდეს შებრუნებული პროცესიც, ე.ი. ელექტრული ველის ცვლილებამ უნდა გამოიწვიოს მაგნიტური ველის აღძვრა. ამრიგად ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ცნება ყველაზე ზოგადი სახით მოიცავს ორ მოვლენას.

მაგნიტური ველის დამაბულობის ცვლილება სივრცის რომელიმე წერტილში გამოიწვევს მეზობელ წერტილებში გრიგალური ელექტრული ველის აღძვრას, რომლის დამაბულობის ძალწირებიც განლაგებულნი არიან მაგნიტური ველის პერპენდიკულარულად. გრიგალური ელექტრული ველი ხასიათდება სიდიდით, რომელსაც ეწოდება ველის დამაბულობის როტორი:  $rot \vec{E}$ . როტორის ვექტორი მიდებულობს ველის ცენტრში მისი ძალწირების სიბრტყის პერპენდიკულარულად და მიმართულია მარჯვენა ბურღის წესის თანახმად (იხ. სურ. 14). ელექტრული დენის არაგამტარ გარემოში ინდუცირებული გრიგალური ელექტრული ველის დამაბულობის როტორი მაგნიტური ველის დამაბულობის ცვლილების სიჩქარის პირდაპირპროპორციულია:



სურ. 14. მაქსველის განტოლებები: ელექტრული ველის დამაბულობების ვექტორული ველის როტორი, რომლის მიმართულება განისაზღვრება მარჯვენა ბურღის წესის მიხედვით, განსაზღვრავს როტორის საპირისპირო მიმართულების მაგნიტურ ველს. მაგნიტური ველის დამაბულობების ვექტორული ველის როტორი, განისაზღვრება ცვლადი ელექტრული ველით, რომლის მიმართულება ემთხვევა როტორის მიმართულებას.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (50)$$

$\mu_a$  – არის გარემოს აბსოლუტური მაგნიტური შეღწევადობა.

ზემოთ თქმულის ანალოგიურად, ელექტრული ველის დამაბულობის ცვლილება ასევე გამოიწვევს სივრცის მეზობელ წერტილში გრიგალური მაგნიტური ვეილს აღძვრას

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (51)$$

სადაც  $\varepsilon_a$  – გარემოს აბსოლუტური დიელექტრიკული შეღწევადობაა.

ერთმანეთის გამომწვევი ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველების ერთობლიობას ელექტრომაგნიტური ველი ეწოდება. იგი საწყისი წერტილიდან ყოველი მიმართულებით ვრცელდება, გარემოს თვისებებზე დამოკიდებული სიჩქარით (ვაკუუმში მისი სიჩქარეა  $\sim 3 \cdot 10^8$  მ/წმ). ამ პროცესს ეწოდება ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელება.

ვინაიდან, როგორც უკვე გავერკვიეთ, ტალღებს ჰქმნიან არა მხოლოდ მექანიკური სისტემები, უპრიანი იქნება გავიხსენოთ ტალღის ზოგიერთი პარამეტრი და განმარტება.

ტალღის ფრონტი – წერტილების გეომეტრიული ადგილი რომლებამდეც დროის რაღაც მომენტისათვის მივიდნენ რხევები. წერტილების გეომეტრიულ ადგილს რომლებიც ერთ ფაზაში ირხევიან, ტალღური ზედაპირი ეწოდება. ტალღური ზედაპირების რაოდენობა უსასრულოა, ხოლო ტალღური ფრონტი მხოლოდ ერთია. ტალღური ფრონტი ამავედროულად ტალღური ზედაპირიცაა.

ტალღის ზედაპირის ფორმით განასხვავებენ ბრტყელ და სფერულ ტალღებს.

ბრტყელი ტალღა – ეს ტალღაა, რომლის ტალღური ზედაპირიც წარმოადგენს ურთიერთ პარალელურ სიბრტყეებს. ბრტყელი ტალღის მაგალითი – ტალღა რომელიც წარმოიქმნება აირიან ცილინდრში, დგუშით რხევების წარმოქმნისას.

სფერული ტალღა – ეს ტალღაა, რომლის ტალღური ზედაპირიც წარმოადგენს კონცენტრული სფეროების ერთობას. სფერული ტალღების მაგალითი – ტალღები, რომლებიც გენერირდებიან ერთგვაროვანი გარემოს წერტილოვან კერაში.

აქ საჭიროა აღინიშნოს, რომ ბრტყელი ტალღის წარმოდგენა შეიძლება როგორც სფერულის, რომლის სიმრუდის რადიუსი უსასრულოების ტოლია.

ბრტყელი ტალღის განტოლება განსაზღვრავს გარემოს ნებისმიერი წერტილის წანაცვლებას, ანუ მის გადახრას მდგრადი წონასწორული მდგომარეობიდან, რომელიც იმყოფება გამომასხივნილიდან „ $x$ “ მანძილზე მოცემულ  $t$  დროის მომენტში:

$$Z(x, t) = A \sin[(\omega t - kx) + \varphi_0]$$

სადაც,  $A$  – რხევების ამპლიტუდა;  $\omega$  – ციკლური რხევითი სიხშირე;  $k$  – ტალღური რიცხვი,  $k = \omega/v$  ( $v$  – ტალღის სიჩქარე);  $\varphi_0$  – საწყისი ფაზა; სიდიდეს  $\varphi = (\omega t - kx) + \varphi_0$

ტალღის ფაზა ეწოდება.

ტალღის გავრცელების სიჩქარე – არის ტალღური ფრონტის გავრცელების სიჩქარე. ტალღის გავრცელების სიჩქარე ტალღის ტიპზე (გრძივი თუ განივი) და ტალღის გავრცელების გარემოს თვისებებზეა დამოკიდებული (სიმკვრივე, ტემპერატურა).

ტალღის სიგრძე – ტალღური ფრონტის მიერ რხევის პერიოდის ოდენობის დროში გავლილი მანძილი:

$$\lambda = vT$$

ვინაიდან ტალღის სიხშირე

$$v = 1/T$$

შეიძლება მივიღოთ ტალღის სიგრძის და სიხშირის დამაკავშირებელი ფორმულა:

$$\lambda = v/v$$

ცხადია რომ, ვინაიდან ტალღის გავრცელების სიჩქარე გარემოს თვისებებზეა დამოკიდებული, ტალღის სიგრძე ერთნაირი სიხშირის პირობებში შეიცვლება ტალღის გადასვლისას ერთი გარემოდან მეორეში. ტალღის სიგრძე ერთ ფაზაში მორხევი წერტილების შორის უმცირესი მანძილის ტოლია. ასე რომ მორხენი სინუსოიდალური ტალღა პერიოდულია როგორც დროში ასევე სივრცეში. დროითი პერიოდი უტოლდება გარემოს ნაწილაკების რხევის პერიოდს  $T$ , სივრცული პერიოდი კი ტალღის სიგრძის ( $\lambda$ ) ტოლია. ტალღური რიცხვი  $k = 2\pi/\lambda$  წარმოადგენს ციკლური სიხშირის  $\omega = 2\pi/T$  სივრცულ ანალოგს. ასე რომ, ელექტრული ველის განტოლება ბრტყელი ტალღის განტოლების ანალოგიურად შეიძლება იყოს ჩაწერილი როგორც ზემომოყვანილი სინუსის მეშვეობით, ასევე კოსინუსით.

ზემოთ მოყვანილი ფორმულებიდან ჩანს, რომ ელექტრომაგნიტური ველის დამატებით მით მეტია, რაც უფრო მეტია მისი ელექტრული  $\vec{E}$  და მაგნიტური  $\vec{H}$  მდგენელების ცვლილების სიჩქარე ანუ რაც მეტია მათი რხევების სიხშირე. შეიძლება იმის დამტკიცება, რომ მათ შორის არსებობს შემდეგი სახის კავშირი:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = -\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (52)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial x} = \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (53)$$

განტოლებებს (52) და (53) უწოდებენ მაქსველის განტოლებებს ბრტყელი ელექტრომაგნიტური ტალღისათვის. ელექტრომაგნიტური ტალღის სიგრძე  $\lambda$  რხევების სიხშირესთან დაკავშირებულია ცნობილი დამოკიდებულებით:

$$\lambda = vT = v/\nu \text{ (გარემოში),}$$

ხოლო ვაკუუმში:

$$\lambda = cT = c/\nu.$$

## 7.8. ელექტრომაგნიტური ტალღების კლასიფიცირება

ელექტრომაგნიტური ტალღების დაყოფა მიღებულია სიხშირების დიაპაზონში (ცხრილი 6).

დიაპაზონებს შორის მკვეთრ გადასვლებს ადგილი არა აქვთ, ზოგჯერ ისინი გადაფარავენ ერთმანეთს და მათ შორის საზღვრები პირობითია. ვინაიდან გამოსხივების გავრცელების სიჩქარე (ვაკუუმში) მუდმივია, მისი რხევის სიხშირე მკაფიოდ არის დაკავშირებული ტალღის სიგრძესთან ვაკუუმში.

**იონიზირებადი ელექტრომაგნიტური გამოსხივება.** ამ ჯგუფს ტრადიციულად მიაკუთნებენ რენტგენის და გამა-გამოსხივებას, თუმცა უნდა ითქვას რომ ატომების იონიზირება შეუძლიათ როგორც ულტრაიისფერ გამოსხივებას ასევე ხილულ სინათლესაც. საზღვრები რენტგენის და გამა-გამოსხივების შორის საკმაოდ პირობითია. საერთო ორიენტირისათვის შეიძლება მივიღოთ, რომ რენტგენის კვანტების ენერგია იმყოფება საზღვრებში 20 ევ – 0,1 მევ, ხოლო გამა-კვანტების ენერგია აღემატება 0,1 მევ. ვიწრო გაგებით გამა-გამოსხივება გამოსხივდება ბირთვიდან, ხოლო რენტგენული –

ატომის ქვემოდმყოფ გარსებიდან ელექტრონების ამოგდებით. თუმცა ეს კლასიფიცირება მიუღებელია ხისტი გამოსხივებებისათვის, რომელიც გენერირდება ატომების და ბირთვების მონაწილეობის გარეშე (მაგალითად, სინქროტრონული ან მუხრუჭოვანი გამოსხივება).

ცხრილი 6

დიაპაზონის სახელი	ტალღის სიგრძე, $\lambda$	სიხშირე, $\nu = c/\lambda$
რადიოტალღები		
ზეგრძელი	$> 10$ კმ	$< 30$ კჰც
გრძელი	$10$ კმ – $1$ კმ	$30$ კჰც – $300$ კჰც
საშუალო	$1$ კმ – $100$ მ	$300$ კჰც – $3$ მჰც
მოკლე	$100$ მ – $10$ მ	$3$ მჰც – $30$ მჰც
ულტრაოკლე	$10$ მ – $0,1$ მმ	$30$ მჰც – $3$ ტჰც
ოპტიკური გამოსხივება (სინათლე)		
ინფრაწითელი გამოსხივება	$1$ მმ – $7700$ Å	$300$ კჰც – $429$ ტჰც
ხილული სინათლე	$7700$ Å – $3800$ Å	$429$ ტჰც – $750$ ტჰც
ულტრაიისფერი	$3800$ Å – $100$ Å	$7,5 \cdot 10^{14}$ ჰც – $3 \cdot 10^{16}$ ჰც
იონიზირებადი გამოსხივება		
რენტგენის	$100$ Å – $5$ პმ	$3 \cdot 10^{16}$ ჰც – $6 \cdot 10^{19}$ ჰც
გამა	$< 5$ პმ	$> 6 \cdot 10^{19}$ ჰც

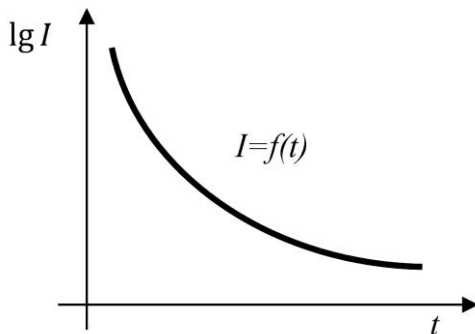
## 8. ელექტრული მოვლენები უჯრედებსა და ქსოვილებში.

### 8.1. უჯრედებისა და ქსოვილების ელექტროგამტარობა.

ბიოლოგიურ ობიექტებს გააჩნია როგორც გამტარების, ასევე დიელექტრიკების თვისებები. მათ გამტარობას განაპირობებს უჯრედებსა და ქსოვილებში თავისუფალი იონების არსებობა. მათ დიელექტრიკულ თვისებებს განსაზღვრავენ მათივე სტრუქტურული კომპონენტები და პოლარიზაციის მოვლენა. ელექტროგამტარობა უკუპროპორციულია გამტარის წინააღმდეგობისა  $L = 1/R$  თავის მხრივ, გამტარის წინააღმდეგობა

$$R = \frac{\rho \ell}{S}$$

სადაც  $\rho$  – გამტარის კუთრი წინააღმდეგობაა,  $\ell$  – მისი სიგრძე და  $S$  – განივკვეთი.



სურ. 15. ბიოლოგიურ სისტემებში მუდმივი დენის გავლისას წარმოიქმნება პოლარიზაციის მზარდი ემპ, რომელიც ამცირებს დენის ძალას ათასჯერამდე. ამიტომაც ეფექტის საილუსტრაციოთ გამოვიყენეთ ლოგარითმული სკალა.

ომის კანონის თანახმად

$$U = IR$$

სადაც  $U$  – პოტენციალთა სხვაობაა,  $I$  – დენის ძალა.

ცოცხალ ორგანიზმში მუდმივი დენის გატარებისას დენის ძალა დროის განმავლობაში იცვლება მიუხედავად იმისა, რომ მიდებულნი ძაბვა უცვლელი რჩება. დენის ძალა მონოტონურად მცირდება სანამ გარკვეულ მუდმივ დონეზე არ სტაბილიზირდება. დენის ძალა მცირდება საწყისთან შედარებით 100 ჯერ და 1000 ჯერაც კი (იხ. სურ. 15). ეს ეფექტი გამოწვეულია პოლარიზაციის მოვლენით. ბიოლოგიურ სისტემებში მუდმივი დენის გავლისას მასში აღიძვრება მზარდი ელექტრო მამოძრავებელი ძალა (ემპ) – პოლარიზაციის ემპ, რომელიც მიმართულია დენის მოძრაობის საპირისპიროდ. ის ამცირებს ობიექტზე მიდებულ პოტენციალთა სხვაობას, რაც, თავის მხრივ, ამცირებს დენს. ამდენად, რადგანაც პოლარიზაციის ემპ  $P(t)$  არის დროის ფუნქცია, ომის კანონი ბიოლოგიური ობიექტებისათვის ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$IR = U - P(t)$$

პოლარიზაციის ემპ დაკავშირებულია ცოცხალი უჯრედების უნართან დააგროვონ მუხტები მათში დენის გავლისას, აგრეთვე ტევადობასთან და ქსოვილების დიელექტრიკულ თვისებებთან, რაც თავის მხრივ განპირობებულია პოლარიზაციის მოვლენებით.

მეტალებისაგან განსხვავებით უჯრედებში თავისუფალი მუხტები (იონები) ველის გავლენით შეიძლება გადაადგილდნენ უჯრედის ერთი მხრიდან მეორეში მხოლოდ მემბრანით შემოფარგლულ მოცულობაში. შეზღუდული მუხტების გადაადგილება კიდევ უფრო გაძნელებულია. ამავ დროს, როგორც ნებისმიერ სხვა შემთხვევაში, ამ მუხტების გადაადგილებისას იქმნება წანაცვლების დენები. როგორც ითქვა, ელექტრული ველის

გავლენით შეზოჭილი მუხტების გადაადგილებას და ამის შედეგად გარე ველის საწინააღმდეგო მიმართულების ველის წარმოქმნას, პოლარიზაცია ეწოდება.

არსებობს პოლარიზაციის რამდენიმე სახე. ელექტრონულ პოლარიზაციაზე უკვე ვისაუბრეთ და მხოლოდ იმას დაუმატებთ, რომ მას ესაჭიროვება ძალზე მცირე რელაქსაციის დრო (დრო, რომელიც საჭიროა პოლარიზაციისათვის)  $\sim 10^{-16}-10^{-14}$  წმ.

იონური პოლარიზაციის დროს კრისტალურ მესერში გადაინაცვლებიან იონები, რის შედეგადაც წარმოიქმნება დიპოლური მომენტი, რომელიც გარე ველის საწინააღმდეგოდაა მიმართული. იონური პოლარიზაციის რელაქსაციის დრო  $\sim 10^{-14}-10^{-12}$  წმ.

დიპოლური პოლარიზაცია განსაკუთრებულ როლს თამაშობს იმ ნივთიერებებისათვის რომლებსაც ახასიათებთ დიდი დიპოლური მომენტი. მაგალითად ცილებს და სხვა მაღალმოლეკულურ ნაერთებს, რაც გამოწვეულია იონოგენური ჯგუფების დისოციაციითა და იონების ადსორბციით<sup>33</sup>. ამ ნივთიერებათა ხსნარებში პოლარული მოლეკულების ბრუნვით გამოწვეული დიპოლური პოლარიზაცია, ძალზე მაღალია. რელაქსაციის დრო ემთხვევა მოლეკულების შემობრუნების დროს. პოლარული მოლეკულების რელაქსაციის დრო  $\tau$  დამოკიდებულია გარემოს სიბლანტეზე –  $\mu$ , ტემპერატურაზე –  $T$ , და მოლეკულის რადიუსზე –  $r$

$$\tau = 4\pi \frac{\mu r^3}{kT}$$

აქ,  $k$  – ბოლცმანის მუდმივაა.

აღნიშნულიდან გამომდინარე რელაქსაციის დროა ამ შემთხვევაში  $\sim 10^{-13}-10^{-7}$  წმ.

მაკროსტრუქტურული პოლარიზაცია აღიძვრება ელექტრული ველის გავლენით ნივთიერების ელექტრული თვისებების არაერთგვაროვნობის შედეგად. მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციისათვის აუცილებელია სხვადასხვაგვარი გამტარობის ფენების არსებობა. გარე ველის გავლენით გამტარ სუბსტანციაში არსებული ელექტრონები და იონები გადაადგილდებიან მოცემული ფენის საზღვრამდე. შემდგომი გადაადგილება გამწვანებულია მეზობელი ფენების დაბალი გამტარობის გამო. ამის შედეგად სისტემის ზოგიერთი უბანი შეიძენს დიპოლურ მომენტს და იქცევა ისე, როგორც გიგანტური პოლარიზებული მოლეკულა. მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციის რელაქსაციის დრო შეადგენს  $\sim 10^{-8}-10^{-3}$  წმ.

ბიოლოგიური ობიექტები ჰეტეროგენულ<sup>34</sup> სტრუქტურებს წარმოადგენენ. ეს ჰეტეროგენულობა განპირობებულია მემბრანების არსებობით. მათ რიცხვს მიეკუთვნებიან უჯრედული გარე და შიდა ენდოპლაზმური მემბრანებიც. უჯრედის ციტოპლაზმას ახასიათებს კარგი ელექტროგამტარობა მასში დიდი რაოდენობით თავისუფალი ელექტრონების არსებობის გამო. ამავე დროს მემბრანების წინაღობა ძალზე დიდია, დაახლოებით 1000 ომ/სმ<sup>2</sup>, რაც განპირობებულია იონების მიმართ მათი დაბალი გამტარობით. მაკროსტრუქტურული პოლარიზაცია მიმდინარეობს უჯრედის მთელ მოცულობაში. ამ პოლარიზაციის გამო ქსოვილების დიელექტრიკული შეღწევადობა (მუდმივი ელექტრული ველისათვის) ძალზე მაღალია. ზედაპირული პოლარიზაცია შეინიშნება ზედაპირებზე რომელთაც ორმაგი ელექტრული ფენა გააჩნია. რელაქსაციის დრო ამ შემთხვევაში  $10^{-3}$  დან 1 წმ ბდე.

ელექტროლიტური პოლარიზაცია აღიძვრება ელექტროლიტის ხსნარში ჩაშვებულ ელექტროდებს შორის. აქ რელაქსაციის დრო  $10^{-4} - 10^2$  წმ.

<sup>33</sup> ადსორბცია (ლათ. *ad* – ამასთან; *sorbeo* – შთანთქმა) – ნივთიერების კონცენტრირების პროცესი ფაზათა მოცულობიდან მათი გაყოფის საზღვარზე.

<sup>34</sup> ჰეტეროგენული – განსხვავებული, არაერთნაირი, შედგენილი განსხვავებულებისაგან.

ბიოლოგიურ ობიექტებს ახასიათებს პოლარიზაციის ყველა აღწერილი სახე. პოტენციალთა სხვაობის ზეგავლენით ქსოვილებში აღიმკვრება საწინააღმდეგოდ მიმართული ელექტრული ველი, რომელიც მნიშვნელოვნად ამცირებს მიდებულ ველს და ამით განაპირობებს ქსოვილების მაღალ წინაღობას მუდმივი დენის მიმართ ( $10^6 - 10^7$  ომ-ის რიგისა).

ქვემოთ მოყვანილია ცხრილი (ცხრილი 7) რომელშიც ნაჩვენებია რელაქსაციის დრო პოლარიზაციის ყველა სახეობისათვის.

ცხრილი 7

	ელექტრო- ნული	იონური	დიპოლური	მაკროსტრუქ- ტურული	ზედაპირული	ელექტროლი- ტური
$\tau$ (წმ)	$10^{-16}-10^{-14}$	$10^{-14}-10^{-12}$	$10^{-13}-10^{-7}$	$10^{-8}-10^{-3}$	$10^{-3} - 1\text{წმ}$	$10^{-4} - 10^2$

## 8.2. ქსოვილების და უჯრედების გამტარობა ცვლადი დენის მიმართ.

იმის გამო, რომ ბიოლოგიურ სისტემებს მათში დენის გავლისას გააჩნიათ მუხტების დაგროვების უნარი, მათი ელექტრული თვისებების აღწერისას ომური წინაღობის განხილვა არაა საკმარისი. აუცილებელია ელექტრული ტევადობის ცნების გამოყენებაც:

$$c = dq/d\phi$$

ბიოლოგიური ობიექტების ტევადობა განისაზღვრება პოლარიზაციული ტევადობით, რომელიც ქსოვილში დენის გავლის შედეგად წარმოიქმნება. პოლარიზაციული ტევადობა  $c_p$  ასახავს ობიექტში დაგროვილი მუხტის შეფარდებას მის პოტენციალთან ცვლადი დენის გავლის პირობებში. მუხტის დაგროვება  $t$  დროში შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვადგინოთ:

$$q = \int_0^t Idt$$

ხოლო პოტენციალის ცვლილება:

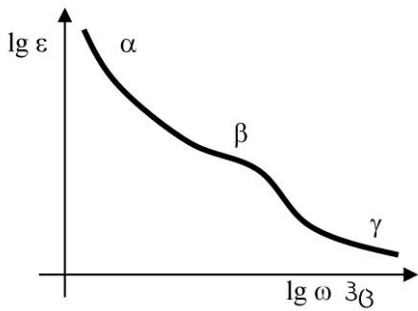
$$\Delta\phi = R(I_0 - I_t)$$

მაშინ პოლარიზაციის ტევადობის მნიშვნელობა შემდეგნაირად წარმოგვიდგება:

$$c_p = \frac{\int_0^t Idt}{R(I_0 - I_t)}$$

სადაც  $I_0$  და  $I_t$  დენის ძალის საწყისი და საბოლოო მნიშვნელობაა.  $I$  – დენის მყისიერი მნიშვნელობა;  $R$  - ობიექტის წინაღობა.

ბიოლოგიური ობიექტის პოლარიზაციულ ტევადობას ემატება მემბრანის სტატიკური ტევადობის საკმაოდ მაღალი მნიშვნელობა ( $1 \text{ მკვ/სმ}^2$ ). როგორც ზემოთ მოყვანილი განტოლებიდან ჩანს პოლარიზაციული ტევადობის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ველის ზემოქმედების ხანგრძლივობაზე ( $t$ ) და ვინაიდან აქტიური წინაღობა  $R \sim \frac{1}{c_\omega}$  (სადაც  $\omega$  არის ცვლადი დენის წრიული სიხშირე), დაბალი სიხშირეებისათვის მან შეიძლება კიდევაც გადააჭარბოს სტატიკურ ტევადობას. უფრო მაღალი სიხშირეებისათვის ( $>10 \text{ კჰც}$ ) სტატიკური ტევადობა რამდენიმე რიგით დაბალია პოლარიზაციულზე. ბიოლოგიური ობიექტების წინაღობის და ტევადობის დამოკიდებულება სიხშირეზე სამი უბნით ( $\alpha, \beta$  და  $\gamma$ ) ხასიათდება:



სურ. 16. α, β და γ დისპერსიების ილუსტრირება.

**α – დისპერსიას** ადგილი აქვს დაბალი სიხშირეებისათვის (დაახლოვებით 1 კჰც). ამ დიაპაზონში დიელექტრიკული შეღწევადობის შემცირება განპირობებულია მხოლოდ უჯრედის მემბრანის ზედაპირული პოლარიზაციის შემცირების ეფექტით. ეს იმის შედეგია, რომ 1 კჰც სიხშირის ცვლადი დენი პრაქტიკულად მხოლოდ უჯრედმორის არეში გაედინება, რადგან საკუთრივ უჯრედის წინაღობა დაბალი სიხშირეებისათვის ძალზე მაღალია. ცვლადი დენის სიხშირის ზრდის კვალობაზე ზედაპირული პოლარიზაციის ეფექტი მცირდება, რაც გამოიწვევს როგორც დიელექტრიკული შეღწევადობის, ასევე ქსოვილის წინაღობის შემცირებას.

**β – დისპერსიას** ადგილი აქვს  $10^3 - 10^6$  კჰც დიაპაზონში. ამ მოვლენის შესახებ სხვადასხვაგვარი მოსაზრება არსებობს, თუმცა ყველაზე სრულად მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციის თეორია ითვლება. ამ თეორიის თანახმად, მოცემული სიხშირის დიაპაზონში ბიოლოგიური ობიექტების ტევადობა და გამტარობა განპირობებულია მემბრანების არსებობით გამოწვეული მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციით. ამავე დროს ეს თეორია, როგორც წმინდა ფიზიკური შეხედულებათა სისტემა, სრულად ვერ აღწერს ისეთ სპეციფიკურ ბიოლოგიურ ეფექტებს, როგორცაა უჯრედული შეღწევადობა და უჯრედების ელექტრული თვისებების დამოკიდებულება იონურ ნაკადებზე. ამჟამად სწრაფად ვითარდება ბიოლოგიური ობიექტების ელექტროქიმიური თეორია, რომლის თანახმადაც ბიოლოგიურ სისტემებში და მეტალი-ხსნარის საზღვარზე მიღებული პოლარიზაციის მექანიზმები ერთნაირია. ეს თეორია ავსებს მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციის თეორიას ელექტრული პოლარიზაციის მოსაზრებით, იმ თვალსაზრისით, რომ პირველის არსი მდგომარეობს იონების განაწილებაში მაკროსტრუქტურულ მოცულობაში, ესე იგი გაყოფის საზღვრის ელექტროლიტური პოლარიზაციაში. ამგვარი მიდგომის ღირსება იმაში მდგომარეობს, რომ ქსოვილების ელექტრული თვისებების აღწერისას საშუალებას იძლევა გავითვალისწინოთ უჯრედული შეღწევადობისა და მემბრანაში იონური ნაკადების როლი. უფრო სწორად, შესაძლებელი ხდება ქსოვილებში იონების შემცველობის გათვალისწინება.

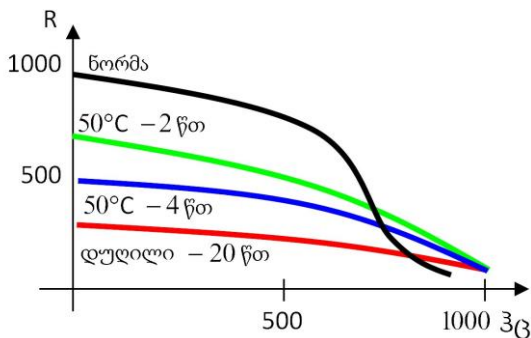
**γ – დისპერსია.** დიელექტრული შეღწევადობის γ – დისპერსიას ადგილი აქვს 1000 მჰც და უფრო მაღალი სიხშირის რხევებისათვის. ამ დიაპაზონში დიელექტრიკული შეღწევადობის შემცირება განპირობებულია პოლარიზაციის ეფექტის შემცირებით, რაც თავის მხრივ წყლის დიპოლებითაა გამოწვეული. γ – დისპერსიის სიდიდე დამოკიდებული იქნება გამოსაკვლევ ქსოვილებში თავისუფალი წყლის შემცველობაზე. ზემოაღნიშნული სიხშირეებისათვის ( $>10^{10}$  ჰც-ზე) წყლის დიპოლებით გამოწვეული პოლარიზაციის ეფექტი არ გამოვლინდება. დიელექტრიკული შეღწევადობა იქნება ძალზე დაბალი, რაც განაპირობებს რელაქსაციის დროის სიმცირეს.

ზემოთ აღნიშნულ სამ ძირითად პოლარიზაციულ პროცესს (ზედაპირული, მაკროსტრუქტურული და დიპოლური) შეიძლება დაუმატოთ ნაკლებად გამოხატული პოლარიზაციული ეფექტები:



1. ცილოვანი და სხვა ორგანული მოლეკულების პოლარიზაცია, რომელთაც გააჩნიათ დიპოლური მომენტები. ამ ტიპის პოლარიზაციას ადგილი აქვს რამდენიმე მკვ-ის რიგის სიხშირეებზე.
2. შებმული წყლის ჰიდრატული გარსების პოლარიზაცია (ადგილი აქვს დიაპაზონში: 100 – 1000 მკვ).
3. მაკრომოლეკულების შებმული პოლარული ჯგუფების პოლარიზაცია. ამ ჯგუფებს რელაქსაციის მცირე დრო გააჩნიათ, უფრო მცირე ვიდრე თვით მოლეკულების მაკროდიპოლებს (100 – 1000 მკვ).

ელექტრული პარამეტრების სიხშირული დამოკიდებულების ზოგადი ხასიათი ყველა ქსოვილისათვის ერთნაირია. ეს განპირობებულია უჯრედების ქიმიური შემადგენლობით და სტრუქტურის ერთიანობით. ინდივიდუალური განსხვავებები განპირობებულია უჯრედების ფორმითა და ზომებით, მათი შეღწევადობის მნიშვნელობით, თავისუფალი იონებისა და წყლის შემცველობით და ა.შ. ელექტროგამტარობის გაზომვას ბიო-სამედიცინო კვლევებში საკმაოდ დიდი მნიშვნელობა აქვს იმიტომ, რომ ამ ტიპის კვლევებისათვის გამოიყენება ძალზე დაბალი ძაბვის დენი (50 მვ), რომელსაც ბიოლოგიურ ქსოვილებში მიმდინარე პროცესებში არსებითი ცვლილებები არ შეაქვთ და ამდენათ მათ არ აზიანებენ. ამის გამო ეს მეთოდი უნდა მივაკუთვნოთ არაინვაზიური მეთოდების რიგს, რომლებიც საშუალებას იძლევიან შევაფასოთ ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესები მისი სტრუქტურისა და ფუნქციონირების წესის დარღვევის გარეშე.



სურ. 17. ელექტროგამტარობის მეთოდის ილუსტრაცია

მაგალითად, როგორც უკვე ითქვა, დაბალი სიხშირეებისათვის ობიექტის წინაღობა წარმოადგენს მემბრანების შეღწევადობის ზომას, ამდენად ელექტროგამტარობის მეთოდით შეიძლება შევაფასოთ მემბრანების შეღწევადობა იონებისადმი (სურ. 17). ამ მეთოდს დიდი მნიშვნელობა აქვს პათოლოგიური პროცესების შესწავლისათვის. ეს იმიტომ, რომ განპირობებულია, რომ, მაგალითად, ანთებითი პროცესის პირველ ეტაპზე ადგილი აქვს ქსოვილების წინაღობის ზრდას. ამას თავის მხრივ ის განაპირობებს, რომ ანთების დროს ადგილი აქვს უჯრედების გაჯირჯვას. უჯრედშორისი მანძილის მოცულობა მცირდება, რის შედეგადაც იზრდება ომური წინაღობა. ამ დროს უჯრედების სტრუქტურა პრაქტიკულად ჯერ კიდევ სტაბილურია და მათი ტევადობა არ იცვლება. ცხადია, რომ ტევადობის უცვლელობა წინაღობის ზრდის კვალობაზე ქსოვილების გაჯირჯვლაზე მიუთითებს, ხოლო წინაღობის შემცირება ტევადობის უცვლელობის პირობებში მიუთითებს უჯრედების მოცულობის შემცირებაზე.

ანთების უფრო გვიანდელ სტადიაზე ადგილი აქვს ღრმა სტრუქტურულ ცვლილებებს. კიდევ უფრო იზრდება უჯრედული შეღწევადობა, რასაც თან ახლავს ტევადობის და წინაღობის შემცირება. ამგვარად ქსოვილების ელექტრული პარამეტრების გაზომვა შეიძლება განხილული იქნეს როგორც ანთებითი პროცესების დიაგნოსტიკის საშუალება.

ელექტროგამტარობის მეთოდით ასევე შესაძლებელია ორგანიზმზე სხვადასხვა დამაზიანებელი ფაქტორების გავლენის შეფასება, რათგანაც ისინი იწვევენ ქსოვილების ელექტრული პარამეტრების ცვლილებას. ქსოვილის დალუპვის შემთხვევაში დისპერსია ქრება. დამაზიანებელი ფაქტორების ზეგავლენით მაღალსიხშირული წინააღობის შემცირება მიუთითებს უჯრედებში თავისუფალი იონების კონცენტრაციის გაზრდაზე და პირიქით. ხშირად ქსოვილების სიცოცხლის უნარიანობის შეფასებისათვის გამოიყენება პოლარიზაციის კოეფიციენტი  $k$  – რომელიც გამოითვლება როგორც ობიექტის წინააღობის შეფარდება დაბალ სიხშირეზე, წინააღობასთან მაღალ სიხშირეზე ( $10^4$  ჰც აქ მიიჩნევა დაბალ სიხშირედ, ხოლო  $10^7$  მაღალ სიხშირედ).

$$k = \frac{R_{10}^4}{R_{10}^6} \text{ პოლარიზაციის კოეფიციენტი ახასიათებს დისპერსიას.}$$

ინტაქტური ქსოვილებისათვის მისი სიდიდე განპირობებულია ორგანიზმის მდებარეობით ევოლუციის “გენიალოგიურ ხეზე”. მაგალითად ძუძუმწოვართა ღვიძლისათვის იგი  $\sim 9 - 10$  მაშინ როცა ბაყაყებისათვის  $2 - 3$ . კოეფიციენტი  $k$  - აგრეთვე დამოკიდებულია ქსოვილებში ნივთიერებათა ცვლის ინტენსივობაზე. ქსოვილის კვდომისას კოეფიციენტი მცირდება, ხოლო სიკვდილის შემთხვევაში უტოლდება ერთს.

ცვლადი დენის შემთხვევაში ელექტროლიტის ხსნარით შეკრულ წრედში პოლარიზაციულ მოვლენებს ადგილი არა აქვთ და წრედის საერთო წინააღობა (მუდმივ დენტან შეფარდებით) მნიშვნელოვნად მცირდება მით უფრო მეტად, რაც მეტია ცვლადი დენის სიხშირე. ორგანიზმის ქსოვილებისათვის ეს მოვლენა ძლიერდება ტევადური გამტარობის ზრდის გამო. ამიტომაც, მაგალითად, მაღალსიხშირიანი პროცედურების დროს ორგანიზმის ქსოვილების სრული წინააღობა (*იმპედანსი*) ელექტროდებს შორის მცირდება ასეულ და ათასეულ ომამდე.

ფიზიოლოგიასა და მედიცინაში ელექტროგამტარობის მეთოდს იყენებდნენ ორგანოების სისხლით შევსების შეფასებისათვის. ეს მეთოდი ემყარება იმ ფაქტს, რომ ორგანოს სისხლით შევსებისას, სისტოლის დროს მცირდება მისი წინააღობა, რადგან სისხლის კუთრი წინააღობა უფრო დაბალია ვიდრე უჯრედისა. დიასტოლის დროს ორგანოს წინააღობა იზრდება. მეთოდს, რომელიც ემყარება სისხლის შევსების კვალობაზე ორგანოების წინააღობის რეგისტრაციას, ეწოდება *რეოგრაფია*. რეგისტრირებული წინააღობის პირველი წარმოებული  $dR/dt$  ახასიათებს სისხლით შევსების სიჩქარეს.

მედიცინაში სამკურნალო მიზნით ფართოდ გამოიყენება ქსოვილების გათბობა მაღალი სიხშირის დენით (*დიათერმია*), მაღალი სიხშირის მაგნიტური ველით (*ინდუქტომეტრია*), ულტრამაღალსიხშირის ელექტრული ველით (ე.წ. YBH -თერაპია). ზოგადად ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველის ენერგია, რომელიც ორგანოებში სხვადასხვა სახის პოლარიზაციას იწვევს, საბოლოოდ სითბოში გარდაიქმნება. სითბური ეფექტი დამოკიდებულია როგორც მოქმედ ფიზიკურ ფაქტორებზე, ასევე ქსოვილების დიელექტრული შეღწევადობის და სიხშირულ მახასიათებლებზე.

### 8.3. გულის ელექტრული ველის რეგისტრაცია.

როგორც ვიცით ბიოპოტენციალები ელექტრულ პოტენციალებს წარმოადგენენ, რომლებიც აღიძვრებიან უჯრედებსა და ქსოვილებში მათი ცხოველქმედების პროცესში. ცალკეული უჯრედების პოტენციალები იკრიბებიან და წარმოქმნიან პოტენციალთა ზოგად სხვაობას, რომელიც შეიძლება გაზომილი იქნეს ორგანიზმის სხვადასხვა წერტილებს შორის. რამდენადაც ბიოპოტენციალების გენერაცია უშუალოდ არის დაკავშირებული ორგანიზმში მიმდინარე ფიზიოლოგიური პროცესების ხასიათთან, მათი ცვლილება ძალზე ზუსტად ასახავს ორგანიზმის მდგომარეობას ნორმასა და

პათოლოგიაში. ამდენად ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია და ანალიზი კლინიკური და ზოგადად ფიზიოლოგიური გამოკვლევების მძლავრ იარაღს წარმოადგენს.

ახდენენ სხვადასხვა სახის ბიოპოტენციალების რეგისტრაციას, რაც საფუძვლად უდევს ისეთ მეთოდებს როგორცაა: ელექტროკარდიოგრაფია (ეკგ), ელექტროენცეფალოგრაფია (ეეგ), ნერვებისა და კუნთების ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია (ელექტრომიოგრაფია), თვალის ბადურას ბიოპოტენციალების რეგისტრაცია (ელექტრორეტინოგრაფია) და ა.შ. ამათგან შევხვდებით მხოლოდ ეკგ-ს.

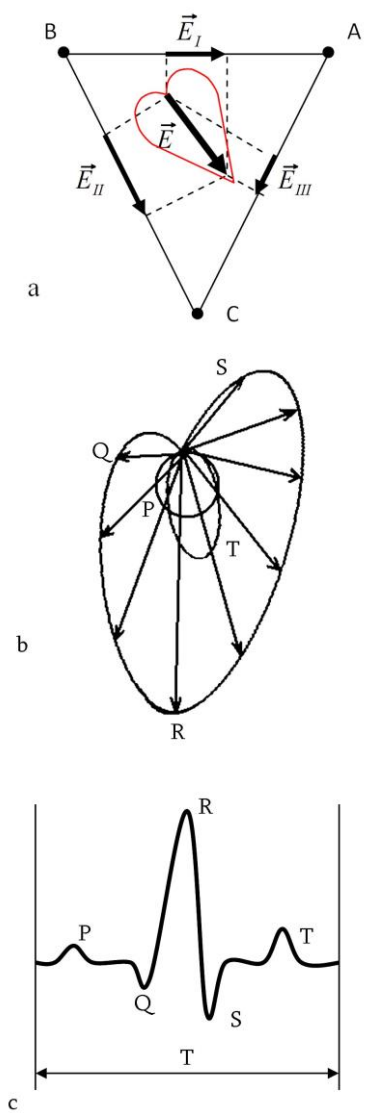
გულის ბიოპოტენციალები აღიძვრებიან მისი ნერვულ-კუნთოვანი აპარატის უჯრედების აღზნების პროცესში. მუშაობის ერთი ციკლის განმავლობაში აღზნება ვრცელდება გულის ნერვულ კუნთოვანი აპარატის სხვადასხვა უბნებზე გარკვეული თანმიმდევრობით. ამიტომ ჯამურ სხვაობის მყისიერი მნიშვნელობა სხვადასხვა ადგილზე სხვადასხვაა. ამათგან უდიდესია პოტენციალთა სხვაობა გულის ფუძის და მწვერვალს შორისა ე.წ. გულის ელექტრული ღერძის მიმართულებით. ეს მიმართულება მიახლოებით ემთხვევა გულის ანატომიურ ღერძს. ისტორიულად ის, რომ გული არის ელექტრული პოტენციალების გენერატორი პირველად აჩვენეს 1856 წელს კიოლიკერმა და მიულერმა, ე.წ. ფიზიოლოგიური რეოსკოპის<sup>35</sup> (ბაყაყის თათები) საშუალებით.

თანამედროვე ელექტროკარდიოგრაფიას საფუძვლად უდევს *ეინდჰოვენის* მოსაზრება, რომლის მიხედვით სხეული განიხილება როგორც გარემო, რომელსაც ყოველ წერტილში გააჩნია ერთგვაროვანი გამტარობა (ერთნაირი წინააღობა) ხოლო მარცხენა ხელი (A), მარჯვენა ხელი (B) და მარცხენა ფეხი (C) განიხილება როგორც სამი ერთმანეთისაგან და სამკუთხედის ცენტრისაგან თანაბრად დაშორებული წერტილი. ამ სამკუთხედის ცენტრში განლაგებულია გული, რომელიც განიხილება როგორც დენის წყარო: მოძრავი ელექტრული დიპოლი. ეს არის ვექტორი  $\vec{E}$ , რომელიც განლაგებულია გულის ღერძის გასწვრივ და მიდებულობს წინა გულის ძგიდეზე მდებარე ნერვულ კვანძზე. მას პირობითად უწოდებენ – *ინტეგრალურ ელექტრულ ვექტორს* (იევ). ეინდჰოვენმა წამოაყენა წინადადება კარდიოგრაფიის დროს გაიზომოს პოტენციალთა სხვაობა სამიდან ყოველ ორ წერტილს შორის რომლებიც წარმოადგენენ ტოლგვერდა სამკუთხედის ABC წვერებს. ეს სამკუთხედი აგებულია ადამიანის სხეულში სიმეტრიულად ისე, რომ მისი ცენტრი ემთხვევა იევ-ის მოდების წერტილს. ყოველი გაზომილი პოტენციალთა სხვაობა პროპორციულია  $\vec{E}$  ვექტორის პროექციისა იმ წერტილების დამაკავშირებელ წრფეზე, რომელთა შორისაც იზომება პოტენციალთა სხვაობა, ანუ განხილული ABC სამკუთხედის სათანადო გვერდზე:

$$\varphi_A - \varphi_B = E_I; \quad \varphi_C - \varphi_B = E_{II}; \quad \varphi_C - \varphi_A = E_{III}$$

ამ პროექციების შედარებისას შესაძლებელია თვით  $\vec{E}$  ვექტორის წარმოსახვა (იხ. სურ. 18a). იმის გამო რომ გულის კუნთის აღზნება სხვადასხვა ნაწილებში თანმიმდევრულად მიმდინარეობს აღნიშნული ვექტორი სრული ციკლის განმავლობაში (სამი ბრუნვი) იცვლის მიმართულებას და მნიშვნელობას. ამ ვექტორის ბოლო, გულის მუშაობის პროცესში რთულ სივრცულ ტრაექტორიას აღწერს. პროექციაში ეს ტრაექტორია წარმოადგენს სამ ყულფს, სტანდარტის მიხედვით მათ აღნიშნავენ ასოებით: P, QRS და T (იხ. სურ. 18b).

<sup>35</sup> ამ სახელში იგულისხმება ბაყაყის სხეულიდან ამოჭრილი ცოცხალი ნერვულ-კუნთოვანი პრეპარატი, რომელსაც გამოიყენებენ ელექტრული დენების და განმუხტვების რეგისტრირებისათვის. ჩვეულებრივ ამისათვის ამოიჭრება ბაყაყის ერთ ერთი უკანა ფეხი მასთან დაკავშირებულ ნერვთან ერთად. ეს ნერვი უკავშირდება სხეულს ან მავთულებს რათა გამოვლინდეს ელექტრული განმუხტვა, და გალვანომეტრის ანალოგიურად, რომელშიც ირხევა მაგნიტური ისარი, რეოგრაფი პასუხობს გაღიზიანებას კუნთის შეკუმშვებით.



სურ. 18. გულის ბიოპოტენციალების კვლევა (კარდიოგრაფია).  
 (a) ეინდჰოვენის სამკუთხედი. მარცხენა ხელი (A), მარჯვენა ხელი (B) და მარცხენა ფეხი (C) თანაბარდამორებულელებული არიან სამკუთხედის ცენტრიდან და ფორმირებენ ე.წ. განხრებს (I, II და III), რომლებზეც იზომება იევ-ის შესაბამისი პროექციები.  
 (b) იევ-ის გულის ზედაპირზე გადაადგილება ფრონტალურ პროექციაში სამ ბრუნში – P, QRS, T.  
 (c) ერთერთი განხრის ტიპური კარდიოგრამა. აქ, T დროში (სისტოლა) იევ ასრულებს სამ ბრუნს თავისი მოდების წერტილის ირგვლივ. ამასთან, პირველი ბრუნის განმავლობაში (P)  $\vec{E}$  ვექტორის პროექცია არ იცვლის მიმართულებას და რჩება დადებითი მთელი ციკლის განმავლობაში. მეორე ბრუნის განმავლობაში (QRS)  $\vec{E}$  ვექტორის პროექცია ორ ჯერ იცვლის მიმართულებას (პიკები Q და S). მესამე ბრუნის დროს (T)  $\vec{E}$  ვექტორის პროექცია კვლავ არ იცვლის მიმართულებას და რჩება დადებითი მთელი ციკლის განმავლობაში.

გულის ბიოპოტენციალების რეგისტრაციის დროს ელექტროდებს ათავსებენ იმ ადგილებზე, რომელიც შეიძლება ჩაითვალოს ABC ეინჰოვენის სამკუთხედის ელექტრულ ანალოგებად: მარცხენა წინამხარზე, მარჯვენა წინამხარზე და მარცხენა ფეხის წვივზე, რომლების აღინიშნება როგორც: მცხ – მარცხენა ხელი, მჯხ – მარჯვენა ხელი და მცფ – მარცხენა ფეხი. ელექტროდების მიმაგრების ყოველი ორი წერტილი ჰქმნის სტანდარტულ განხრებს: I – (მცხ – მჯხ), II – (მცფ – მჯხ) და III – (მცფ – მცხ).

მიღებულ მრუდს (სურ. 18c) ეწოდება ელექტროკარდიოგრამა (ეკგ) და ფიზიკური თვალსაზრისით ის წარმოადგენს პოტენციალთა სხვაობის მყისიერი მნიშვნელობების დროში ცვლილების (გულის მუშაობის ციკლში) გრაფიკს შესაბამის განხრებში. ელექტროკარდიოგრამაზე გამოიკვეთება სამი დამახასიათებელი ფორმის კბილანები, რომლებსაც შემდეგაირად აღნიშნავენ: P, QRS და T. ეს კბილანები კაყოფილები არიან ნულოვანი პოტენციალის უბნებით (ამ დროს ხდება პოტენციალების ერთმანეთთან კომპენსაცია).

შემდგომში სამ ძირითად ელექტროდს დაუმატეს მეოთხე – გულმკერდის ელექტროდი (გე), რომელიც მაგრდება გულის მიდამოებში. განხრებს, რომლებიც შექმნილია ამ ელექტროდის მიერ ძირითად განხრებთან ეწოდება გულმკერდის (აღინიშნება CP, CL და CR). სულ კარდიოგრამის გადაღებისას სარგებლობენ 10-ზე მეტ განხრით.

კარდიოგრამის გადაღების პრინციპები შეიძლება აიხსნას შემდეგნაირად:

როგორც ითქვა გული წარმოადგენს დიპოლს. მის ირგვლივ წარმოიქმნება ელექტრული ველი, რომლის სიდიდეც სივრცის ნებისმიერ წერტილში დიპოლიდან გარკვეულ მანძილზე დამოკიდებულია მისი ელექტრული მომენტის სიდიდეზე და მიმართულებაზე. ამრიგად გულის ირგვლივ ადამიანის სხეულის ნებისმიერ წერტილში არსებობს ელექტრული ველი, რომელიც იქმნება გულის მუშაობის შედეგად. ელექტრო-კარდიოგრამა ფიზიკურ თვალსაზრისით წარმოადგენს გულის ციკლის განმავლობაში სტანდარტულ განხრებში ზემოთხსენებული ელექტრული ველის პოტენციალთა სხვაობის მყისიერი მნიშვნელობების გრაფიკს.

#### **8.4. რენტგენოლოგია.**

ძალზე მნიშვნელოვანი სამედიცინო გამოყენების გამო აუცილებელია შევხებით რენტგენის გამოსხივების საკითხს. რენტგენული გამოსხივება ეწოდება ელექტრომაგნიტურ ტალღებს (ტალღის სიგრძე 80 დან 0,00001 ნმ მდე). იგი გრძელტალღოვან ნაწილში ესაზღვრება ულტრაიისფერ გამოსხივებას, ხოლო მოკლელტალღოვან ნაწილში –  $\gamma$  გამოსხივებას. სამედიცინო მიზნებისათვის გამოიყენებენ რენტგენის გამოსხივებას  $\lambda = 0,006$  ნმ დიაპაზონში (შესაბამისად სიხშირე  $10^{15}$  ჰც-ის რიგისა). როგორც უკვე ითქვა რენტგენის გამოსხივება მოკლელტალღოვანი ელექტრომაგნიტური გამოსხივებაა, თუმცა ტალღის მცირე სიგრძის გამო მისი ტალღური თვისებების აღმოჩენა საკმაოდ გვიან მოხერხდა.

არსებობს რენტგენული გამოსხივების ორი სახე: დამუხრუჭებითი და მახასიათებელი. ისინი ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან როგორც გენერაციის მექანიზმით ასევე სპექტრული მახასიათებლებით. ორივე სახის გამოსხივება მიიღება ე.წ. რენტგენის მილში. ამ მილის პირველი ნიმუშები 1912 – 1913 წლებში შეიქმნა. რენტგენის მილის ძირითადი ელემენტებია: სპეციალური ფორმის მინის ბალონი, ელექტრონების წყარო (კათოდი), მოწყობილობა რომელსაც ეჯახებიან ელექტრონები (ანოდი). მახასიათებელი გამოსხივება წარმოიქმნება შიდა გარსების ელექტრონების ენერგეტიკულ დონეებს შორის გადასვლისას. დამუხრუჭებითი რენტგენის გამოსხივების დროს ხდება კათოდიდან ამოგლეჯილი ელექტრონების ანოდზე დამუხრუჭება.

მოკლელტალღოვანობის გამო რენტგენული გამოსხივება ხასიათდება ნივთიერების დიდი განჭოლვის უნარით, ამიტომაც ის იძლევა ინფორმაციას ცოცხალ ქსოვილებში ღრმად განლაგებული ფენების შესახებ (რენტგენოდიაგნოსტიკა). თავიდან, ამ დიაგნოსტიკის სამი ძირითადი გზა არსებობდა:

- **რენტგენოსკოპია** – გამოსაკვლევი ორგანოს გამოსახულება მიიღება სპეციალურ ეკრანზე.
- **რენტგენოგრაფია** – გამოსახულება მიიღება ფოტოფირზე.
- **ფლუოროგრაფია** – გამოსახულება ფიქსირდება საკმაოდ შემცირებული ზომის ეკრანზე.

მაგრამ თანამედროვე რენტგენური გამოკვლევები იყენებენ ახალ შესაძლებლობებს, რომლებიც გამოვლინდა რენტგენული **კომპიუტერული ტომოგრაფიის** დანერგვის შემდეგ. ტომოგრაფიის პრინციპებს ჩვენ განვიხილავთ მომდევნო თავში (ოპტიკის ელემენტებში), აქ კი შევხებით ამ კვლევების მხოლოდ სააპარატო ნაწილს.

**კომპიუტერული ტომოგრაფია (კტ)** – წარმოადგენს საგნის შიდა აგებულების ფენოვანი, დაუზიანებელი კვლევის მეთოდს. მეთოდი ეფუძნება სიმკვრივით განსხვავებული ქსოვილების რენტგენული გამოსხივების შესუსტების სხვაობის გაზომვას შემდგომი რთულ კომპიუტერული დამუშავებით. სადღეისოთ რენტგენული კომპიუტერული

**ტომოგრაფია (რკტ)** წარმოადგენს რენტგენულ გამოსხივებაზე აგებულ ადამიანის შინაგანი ორგანოების გამოკვლევის ძირითად ტომოგრაფიულ მეთოდს.

პირველი მათემატიკური ალგორითმები კტ-სათვის შემუშავდა 1917 წ ავსტრიელი მათემატიკოსის ი.რადონის მიერ. ამ მეთოდის ფიზიკურ საფუძვლეს წარმოადგენს გამოსხივების ექსპონენციური შესუსტების კანონი, რომელიც მართებულია სწორედ რომ შთანთქმელ გარემოებისათვის. გამოსხივების რენტგენულ დიაპაზონში ექსპონენციური კანონი სრულდება მაღალი სიზუსტით, ამიტომაც შემუშავებული მათემატიკური ალგორითმები პირველად გამოიყენეს სწორედაც რომ რკტ-სათვის.

1963 წ ამერიკელმა ფიზიკოსმა ა.კორმაკმა ხელმეორედ (მაგრამ რადონისაგან განსხვავებული ხერხით) ამოხსნა ტომოგრაფიული აღდგენის ამოცანა, ხოლო 1969 წ ინგლისელმა „EMI Ltd.“ ფირმის ინჟინერ-ფიზიკოსმა გ.ხაუნსვილდმა შექმნა „EMI-სკანერი“ – პირველი რკტ. ამ ხელსაწყოს კლინიკური შემოწმებები ჩატარდა 1971 წ, და ის აკეთებდა მხოლოდ თავის სკანირებას. საინტერესოა, რომ კტ-ს შექმნისათვის საჭირო სახსრები ფირმა EMI-მ მოიპოვა ჯგუფთან The Beatles მომგებიანი კონტრაქტის შედეგად.

1979 წ „კომპიუტერული ტომოგრაფიის შექმნისათვის“ კორმაკსა და ხაუნსვილდს მიენიჭა ნობელის პრემია ფიზიოლოგიასა და მედიცინაში.

კტ-ს მეთოდით ვიზუალიზირებული სტრუქტურების ვიზუალური და რაოდენობრივი შეფასებისათვის გამოიყენება რენტგენული გამოსხივების შესუსტების სკალა, რომელიც ხაუნსვილდის სკალის სახელით არის ცნობილი (მის ვიზუალურ ასახვას აპარატის მონიტორზე წარმოადგენს გამოსახულების შავ-თეთრი სპექტრი). სკალის ერთეულების დიაპაზონი („დენსიტომეტრიკული მაჩვენებლების – *Hounsfield units*“), რომელიც შეესაბამება ორგანიზმის ანატომიური სტრუქტურების მიერ რენტგენული გამოსხივების შესუსტების ხარისხს, შეადგენს  $-1024$ -დან ( $2^{10}=10\text{bit}$ )  $+3071$ -მდე (0-ის ჩათვლით იქნება  $3 \cdot 2^{10}=30 \text{ bit}$ ), ანუ სულ 4096 (40 bit) შესუსტების რიცხვი. ხაუნსვილდის სკალის საშუალო მაჩვენებელი (0 HU) შეესაბამება წყლის სიმკვრივეს, უარყოფითი მნიშვნელობები – ჰაერსა და ცხიმოვან ქსოვილებს, დადებითი – რბილ ქსოვილებს, ძვლის ქსოვილს და უფრო მკვრივ ნივთიერებებს (მეტალი). პრაქტიკაში შესუსტების გაზომილი სიდიდეები შეიძლება განსხვავდებოდეს სხვა და სხვა აპარატში.

უნდა აღინიშნოს, რომ „რენტგენული სიმკვრივე“ წარმოადგენს ქსოვილის მიერ შთანთქმული გამოსხივების გასაშუალებელ მნიშვნელობას. რთული ანატომიურ-ჰისტოლოგიური სტრუქტურის შეფასებისას, მისი „რენტგენული სიმკვრივის“ ცვლილება ყოველთვის არ გვაძლევს საშუალებას დაზუსტებით ვისაუბროთ იმაზე თუ რა ქსოვილია ვიზუალიზირებული (მაგალითად, ცხიმით გაჯერებულ რბილ ქსოვილებს გააჩნიათ ისეთივე სიმკვრივე, როგორც წყალს).

კომპიუტერის ჩვეულებრივ მონიტორს შეუძლია ნაცრისფერის 256 ელფერის (8 bit) გამოსახვა, ზოგიერთ სპეციალიზირებულ სამედიცინო აპარატს შეუძლია 1024-მდე (10 bit) ელფერის ჩვენება. ხაუნსვილდის სკალის მნიშვნელოვანი დიაპაზონისა (40 bit) და თანამედროვე მონიტორებით შავ-თეთრ სპექტრში ამ დიაპაზონის სრულად გამოსახვის შეზღუდულობის გამო, გამოიყენება ნაცრისფერი გრადიენტის პროგრამული გადაანგარიშება სკალის სასურველი დიაპაზონის გამოვლენის მიზნით. შეიძლება გამოვიყენოთ გამოსახულების შავ-თეთრი სპექტრის დენსიტომეტრიკული მაჩვენებლების როგორც ფართო დიაპაზონი („ფანჯარა“) – ამ დროს ხდება სტრუქტურის ყველა სიმკვრივის ვიზუალიზირება, მაგრამ ახლომდებარე სიმკვრივეების გარჩევა შეუძლებელია, აგრეთვე მეტ-ნაკლებად ვიწრო დიაპაზონი მოცემული ცენტრითა და სიგანით („ფილტვის ფანჯარა“, „რბილი ქსოვილის ფანჯარა“ და ა.შ.; ამ დროს იკარგება ინფორმაცია სტრუქტურებზე რომლებიც ფანჯრის გარედ რჩებიან, სამაგიეროთ კარგად გაირჩევიან

ახლომყოფი სიმკვრივეების მქონი სტრუქტურები). მარტივად რომ ითქვას, ფანჯრის ცენტრის და სიგანის ცვლილება შეიძლება შევადაროთ შესაბამისად განათების და კონტრასტის ცვლილებასთან.

თანამედროვე კტ წარმოადგენს რთულ პროგრამულ-ტექნიკურ კომპლექსს. გარემოში გავლილი რენტგენის გამოსხივების რეგისტრირებისათვის გამოიყენება ზემგრძნობიარე დეტექტორები. ამ დეტექტორების კონსტრუქცია და მათი წარმოებისათვის საჭირო მასალები გამუდმებით იხვეწება. კტ-ის წარმოებისას მკაცრი მოთხოვნილობები წაყენება თავად რენტგენის გამომასხივებელს. აპარატის განუყრელ შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს პროგრამული უზრუნველყოფის ვრცელი პაკეტი, რომელიც შესაძლებლობას იძლევა ჩატარდეს კტ კვლევების სრული სპექტრი ოპტიმალური პარამეტრებით, შემდეგ კი მოხდეს მიღებული კტ-გამოსახულებების დამუშავება და ანალიზი.

მათემატიკური თვალსაზრისით გამოსახულების აგება წრფიული განტოლებათა სისტემის ამოხსნაზეა დაყვანილი. ასე მაგალითად, 200×200 პიქსელის ზომის ტომოგრამის მიღებისათვის სისტემა შეიცავს 40 000 განტოლებას. ასეთი სისტემების ამოსახსნელად შემუშავდა სპეციალიზირებული მეთოდები, რომლებიც პარალელურად ჩატარებულ გამოთვლებზეა ორიენტირებული.

კტ-ს პროგრესი პირდაპირ უკავშირდება დეტექტორების რაოდენობის ზრდას, ანუ ერთდროულად მიღებული პროექციების რაოდენობის ზრდას.

**1 თაობის აპარატი** მოგვევლინა 1973 წ. პირველი თაობის აპარატებში ათვლების აღება ხდებოდა ნაბიჯებით – ერთი რენტგენის მილი იყო მიმართული ერთ დეტექტორზე, სკანირება სრულდებოდა ნაბიჯ-ნაბიჯ და ერთი ფენისათვის აპარატს სჭირდებოდა ერთი სრული ხვიის შესრულება. ყოველი ფენა მუშავდებოდა დაახლოვებით 4 წუთი.

**2 თაობის აპარატში** გამოიყენებდნენ მარაოს ტიპის კონსტრუქციას. ბრუნვის რგოლზე რენტგენის მილის პირდაპირ ყენდებოდა რამდენიმე დეტექტორი. გამოსახულების დამუშავების დრო შეადგენდა 20 წამს.

**3 თაობის აპარატში** გამოიყენებდნენ ე.წ. სპირალურ ტომოგრაფიას. რენტგენის მილი და დეტექტორები მაგიდის ერთი ბიჯის გავლისას ასრულებდნენ სინქრონულად სრულ ბრუნს საათის ისრის მიმართულებით. ამის გამო მნიშვნობრივად შეამცირა კვლევის დრო. გაიზარდა დეტექტორების რაოდენობაც. შესამჩნევად შემცირდა გამოსახულების დამუშავების და რეკონსტრუირების დროც.

სპირალური კტ გამოიყენება კლინიკებში 1988 წლიდან, იმ დროიდან როდესაც Siemens Medical Solutions კომპანიამ წარმოადგინა პირველი სპირალური კომპიუტერული ტომოგრაფი. სპირალური სკანირება მდგომარეობს ერთდროულად ორი ქმედების შესრულებაში: გამოსხივების წყაროს (რენტგენის მილის, რომელშიც გენერირდება გამოსხივება) განუწყვეტლივ ბრუნვაში პაციენტის სხეულის გარშემო, და მაგიდის, რომელზეც იმყოფება პაციენტი, უწყვეტი წინსვლითი მოძრაობისაგან სკანირების გრძივი z ღერძის გასწვრივ გენტრის აპერტურაში<sup>36</sup>. ამ შემთხვევაში რენტგენის მილის მოძრაობის ტრაექტორია z ღერძის (პაციენტისანი მაგიდის მოძრაობის მიმართულების) მიმართ იღებს სპირალის ფორმას.

**4 თაობის აპარატს** გააჩნია 1088 ლუმინისცენტური დეტექტორი, რომლებიც განლაგდებიან მთელ გენტრის რგოლში<sup>37</sup>. ბრუნავს მხოლოდ რენტგენის მილი. ამ მეთოდის წყალობით ბრუნვის დრო შემცირდა 0,7 წამამდე. მაგრამ მნიშვნელოვანი განსხვავება

<sup>36</sup> აპერტურა (ლათ. *Apertura* – ნახვრეტი, შესართავი, პირი).

<sup>37</sup> გენტრის რგოლი – მოძრავი, როგორც წესი კალიცოს მაგვარი ტომოგრაფის ან მამოგრაფის აპარატის ნაწილი, რომელიც შეიცავს სკანირების მოწყობილობას. წარმოადგენს მწოლიარე პაციენტის როტაციული მულტიველითი დასხივების სისტემას.

გამოსახულების ხარისხში მე-3 თაობის აპარატებთან შედარებით ამ თაობის აპარატებს არა აქვთ.

**5 თაობის აპარატები** ასრულებენ მრავალფენოვან („მულტისპირალურ“, „მულტიანა-თლებიან“) კომპიუტერულ ტომოგრაფიას (**მფკტ**). აპარატი პირველად იყო წარმოდგენილი კომპანია Elscint Co მიერ 1992 წელს. ამ აპარატის პრინციპული სხვაობა წინა თაობების სპირალური ტომოგრაფებისაგან იმაშია, რომ გენტრის წრეში მოთავსებულია არა ერთი არამედ ორი და მეტი დეტექტორების რიგი. იმისათვის რომ რენტგენული გამოსხივება ერთდროულად მიღებულიყი სხვა და სხვა რიგებში მყოფი დეტექტორების მიერ, შეიმუშავეს რენტგენის სხივების კონის ახალი – სივრცული გეომეტრიული ფორმა.

1992 წ. გამოჩნდა პირველი ორანათლიანი (ორსპირალური) **მფკტ**, დეტექტორების ორი რიგით, ხოლო 1998 წ. – ოთხანათლიანი (ოთხსპირალური), შესაბამისად დეტექტორების უკვე ოთხი რიგით. ზემოდჩამოთვლილი თავისებურებების გარდა, გაიზარდა რენტგენის მილის ბრუნვების რაოდენობა – ერთიდან ორამდე ერთ წამში. ამრიგად, მეხუთე თაობის ოთხსპირალური **მფკტ** სადღეისოთ რვაჯერ უფრო სწრაფია, ვიდრე მეოთხე თაობის ჩვეულებრივი სპირალური **კტ**. 2004 – 2005 წწ იყო წარმოდგენილი 32-, 64- და 128-ანათლიანი **მფკტ**, მათ შორის ორი რენტგენის მილით. 2007 წ. ფირმა Toshiba-ამ გამოუშვა 320-ანათლიანი კომპიუტერული ტომოგრაფები, ხოლო 2013 წ. – 512- და 640-ანათლიანი. ისინი არა მხოლოდ გამოსახულების მიღების საშუალებას იძლეოდნენ, არამედ შეეძლოთ პრაქტიკულად „რეალურ“ დროში დაკვირვებოდნენ თავის ტვინში და გულში მიმდინარე ფიზიოლოგიურ პროცესებს. ახალი თაობის **კტ**-ს წყალობით შესაძლებელი გახდა ორგანიზმის ყველა ორგანოს და სისტემის 3D-მოდელების აგება.

ასეთი სისტემის თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ რენტგენის მილის ერთ ბრუნში შესაძლებელი ხდება მთელი ორგანოს სკანირება, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს გამოკვლევის დროს, და აგრეთვე საშუალებას იძლევა არითმიების მქონე პაციენტების გამოკვლევას.

2005 წ. Siemens Medical Solutions კომპანიის მიერ იყო წარმოდგენილი პირველი აპარატი რენტგენის გამოსხივების ორი წყაროთი (Dual Source Computed Tomography). ამ ხელსაწყოს თეორიული წინაპირობა არსებობდა ჯერ კიდევ 1979 წ. მაგრამ მაშინ ამის ტექნიკური რეალიზება იყო შეუძლებელი.

თავისი არსით, ეს ხელსაწყო იყო **მფკტ** ტექნოლოგიის ლოგიკური გაგრძელება. მაგრამ საქმე იმაშია, რომ გულის გამოკვლევისას (**კტ**-კორონაროგრაფია) საჭიროა მუდმივ და სწრაფ მოძრაობაში მყოფი ობიექტების გამოსახულების მიღება, რაც მოითხოვს სკანირების ძალზე მცირე პერიოდს. **მფკტ**-ში ამას აღწევდნენ **ეკგ**-ს და ჩვეულებრივი კვლევის სინქრონიზირებით მილის სწრაფი ბრუნვის პირობებში. ამ დროს საჭირო ხდება მილის ბრუნვის სიჩქარის გაზრდა ტომოგრაფის გენტრის რგოლში. სადღეისოთ მიღწეულია მისი გაზრდის ტექნიკური ზღვარი, ვინაიდან მილის ბრუნვისას 0,33 წმ-ში მისი წონა იზრდება 28 ჯერ (გადამეტტვირთვა 28 გ). იმისათვის რომ მივიღოთ 100 მწმ-ზე მცირე დროში გარჩევადობა, საჭიროა 75 გ-ზე მეტი გადამეტტვირთვის გადალახვა.

ორი რენტგენის მილის ერთმანეთის მიმართ 90° განლაგება იძლევა დროში გარჩევადობას, რომელიც უტოლდება მილის ბრუნვის მეოთხედს (83 მწმ ბრუნვის 0,33 წმ-ში შესრულებისას). ამის გამო შესაძლებელი გახდა გულის გამოსახულების მიღება მისი შეკუმშვის სიხშირისაგან დამოუკიდებლად.

აგრეთვე ამ აპარატს კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი უპირატესობა გააჩნია: ყოველ მილს შეუძლია საკუთარ რეჟიმში მუშაობა (ძაბვის და დენის განსხვავებული მნიშვნელობებით – კვ და მა შესაბამისად). ეს კი საშუალებას იძლევა მოხდეს გამოსახულების ახლომდებარე და სხვა და სხვა სიბრტყეებში მყოფი ობიექტების უკეთესი დიფერენ-



ცირება. ასეთი კონსტრუქცია განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სისხლძარღვების და ძვლებთან ან მეტალოკონსტრუქციებთან ახლომდებარე წარმონაქმნების კონტრასტირებისას. აღნიშნული ეფექტი ეფუძნება გამოსხივების განსხვავებულ შთანთქმაზე მისი პარამეტრების ცვლილებისას სისხლისა და იოდისშემცველი საკონტრასტო ნივთიერების ნარევი ამ პარამეტრების უცვლელიობის დროს ჰიდროოქსიაპატიტში (ძვლის ძირითადი შემადგენელი) ან მეტალებში.

დანარჩენში ეს აპარატები წარმოადგენენ ჩვეულებრივ მფკტ-აპარატებს და გააჩნიათ მათი ყველა უპირატესობა.

### **8.5. მაგნიტობიოლოგია და ბიომაგნეტიზმი.**

წინა თავში ჩვენ უკვე ვისაუბრეთ ერთიან ელექტრომაგნიტურ ველზე, აგრეთვე ელექტრული და მაგნიტური ველებისათვის დამახასიათებელ პარამეტრებზე. მაგრამ, ამ თავში უჯრედებსა და ქსოვილებში ელექტრული მოვლენების განხილვისას, ჩვენ შევხებით საერთო პრობლემის მხოლოდ ელექტრულ მდგენელს. არაფერი ითქვა მაგნიტურ ველებზე და მათ მოქმედებაზე ცოცხალ სისტემებზე. ამიტომაც მოდით ამ ხარვეზის შესავსებათ განვიხილოთ როგორც მაგნიტური ველების ზეგავლენა ბიოლოგიურ სისტემებზე, ასევე მაგნიტური ველები, რომლებსაც ეს სისტემები ჰქმნიან, მითუმეტეს რომ მეცნიერებაში არსებობენ ამ საგნის შემსწავლი მთელი მიმართულებები.

**მაგნიტობიოლოგია** – ესაა არაიონიზირებადი გამოსხივებების რადიობიოლოგიის ერთ-ერთი მიმართულება; აგრეთვე ბიოფიზიკის განხრა, რომელიც სწავლობს სუსტ, დაბალსიხშირიან მაგნიტურ ველებში (რომლებიც არ იწვევენ ქსოვილების გათბობას) მიღებულ ბიოლოგიურ ეფექტებს. ადამიანებზე ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ზეგავლენის პირველი ცდები ჩაატარა დე არსონვალმა 1891 წ – ჰერცის მიერ თავისუფალი ელექტრომაგნიტური ტალღების აღმოჩენისა და მის მიერ პირველი გამომსხივებელის შექმნის სამი წლის თავზე. სადღეისოთ ბიოფიზიკის ეს დარგი ჩამოყალიბდა როგორც თანამედროვე ბუნებისმეტყველების ერთ-ერთი აღიარებული მიმართულება, რომელსაც დაერქვა ელექტრომაგნიტობიოლოგია (შემდგომში ჩვენ გამოვიყენებთ ტერმინს – მაგნიტობიოლოგია). მაგნიტობიოლოგიური კვლევების ძირითად მიზანს წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური ველის კანონზომიერებების და მოქმედების მექანიზმების დადგენა სხვა და სხვა ბიოლოგიურ სისტემებზე, კერძოდ კი ბიოქიმიური რეაქციების მსვლელობის სიჩქარეზე.

პასუხი კითხვაზე თუ რა გავლენას ახდენს მაგნიტური ველი ქიმიური რეაქციის სიჩქარეზე დიდი ხანია აინტერესებს ფიზიკოსებს, ქიმიკოსებს და ბიოლოგებს – ყველას, ვისაც უწევდა გარე ფაქტორების გავლენის შესწავლა ნივთიერებათა გარდაქმნებზე. ამ კითხვაზე პასუხი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ბიოლოგებისათვის, ვინაიდან ბიოქიმიური პროცესები ყოველთვის მიმდინარეობდა და მიმდინარეობს დედამიწის მაგნიტურ ველში. და თუ დედამიწის მაგნიტურ ველს და მის ვარიაციებს შეუძლია ელემენტარულ ქიმიურ რეაქციებზე ზეგავლენა, მაშინ სრულიად შესაძლებელია, რომ ასეთი ველები მნიშვნელოვან გავლენას მოახდენენ დედამიწის ორგანიზმების ცხოველქმედობაზე. სადღეისოთ დაგროვილია უამრავი მოწმობა იმის თაობაზე, რომ არსებობენ ბუნებრივი წარმოშობის ელექტრომაგნიტური ველები (რეგისტრირებული თანამედროვე ხელსაწყოებით მათი შესაძლებლობების ზღვარზე), რომლებიც წარმოადგენენ ადამიანის ჯამრთელობისათვის პოტენციურ საფრთხეს და ერთ რიგში იმყოფებიან ისეთ მნიშვნელოვან კლიმატურ ფაქტორებთან, როგორცაა ტემპერატურა, წნევა და ა.შ.

ცხადია, რომ გარე ველში მიმდინარე რეაქციის მონაწილე ნაწილაკების თვისებების შეცვლისათვის, გარედან შემოტანილი ენერგია უნდა იყოს თანაზომადი ნაწილაკთა

მოძრაობის სითბურ ენერგიასთან, ან ადმატებოდეს მას. მაგრამ მაგნიტური ურთიერთობის და სითბური მოძრაობის ენერგიები ხდებიან თანაზომადი მხოლოდ მაშინ, როდესაც მაგნიტური ველის დამაბულობა ადმატება  $H = 10^6$  ერსტედს<sup>38</sup>. ასე მაგალითად, მაგნიტური ველი დამაბულობით  $H = 1,4 \cdot 10^4$  ერს ცვლის თავისუფალი რადიკალის<sup>39</sup> ენერგიას ისევე, როგორც  $1^\circ\text{C}$  მისი ტემპერატურის ცვლილება. ამიტომაც, იმის იმედი, რომ მაგნიტური ველი გამოიწვევს მნიშვნელოვან ცვლილებებს მოლეკულურ დონეზე, ბოლო დრომდე უმეტესი მკვლევარის ცნობიერებაში უკავშირდებოდა მხოლოდ რეაქციებს ძალზე დაბალ ტემპერატურაზე, ან და ზემოლიერ მაგნიტურ ველებში. უმეტეს ბიოლოგიურ ცდებში გამოყენებული მაგნიტური ველების „სისუსტე“ სითბური რხევების ენერგიებთან შედარებაში აღინიშნებოდა როგორც „ $kT$  პრობლემა“. არც თუ ისე დაბალი ტემპერატურების შემთხვევაში ატომების და ნივთიერების მცირე მოლეკულების ენერგიები განუწყვეტლივი ქაოსური სითბური მოძრაობის შედეგად ისეთი ძლიერი შემთხვევითი ფლუკტუაციების ზეგავლენის ქვეშ მოიქცევიან, რომ ჩვეულებრივი მაგნიტური ველებით ( $10^4$  ერს-მდე) გამოწვეული ენერგიის ცვლილებები, აღმოჩნდებიან შეუმჩნეველი. ამიტომაც ასეთი სახის მაგნიტური ველების ზეგავლენა ქიმიური რეაქციების სიჩქარეზე არამნიშვნელოვანია ტემპერატურული ზეგავლენის ფონზე. როგორც ჩანს, შესამჩნევი ეფექტის მიღება მცირე მოლეკულებზე შესაძლებელი იქნებოდა მხოლოდ 100 და 1000 ჯერ უფრო ძლიერ მაგნიტურ ველებში ვიდრე ჩვეულებრივ მიიღებენ ლაბორატორიულ პირობებში. მაგრამ ასეთი სახის ზემოლიერი მაგნიტური ველების შენარჩუნება სადღეისოთ შეიძლება მხოლოდ ძალზე მცირე დროის განმავლობაში ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$  წმ), ასე რომ ცდები მაგნიტური ველების ზეგავლენის შესახებ ქიმიური რეაქციის კინეტიკაზე აქამდე არ ჩატარებულა. ეს ერთის მხრივ. მაგრამ, მეორეს მხრივ, ექსპერიმენტების შედეგები ქიმიურ რეაქციებზე სუსტი მაგნიტური ველების ზეგავლენის შესახებ, საწინააღმდეგოზე მოწმობენ. ამ ფენომენის მიზეზები ჯერ ბოლომდე არაა გამოვლენილი, ამიტომ ჩვენც მათ არ შევხებით.

რაც შეეხება ბიომაგნიტიზმს, ის წარმოადგენს ბიოლოგიური ობიექტების მაგნიტურ ველებს. ყველა ორგანიზმის ცხოველქმედობას თან ახლავს მათში გამდინარე, ძალზე სუსტი ელექტრული დენები – ბიოდენები, რომლებიც წარმოიქმნება უჯრედების (ძირითადად კუნთოვანი და ნერვული) ელექტროაქტივობის შედეგად. ბიოდენები წარმოქმნიან ორგანიზმის ფარგლებს გაცილებულ მაგნიტურ ველს ინდუქციით  $10^{-14} - 10^{-11}$  ტ, რომელსაც ბიომაგნიტურს უწოდებენ. ბიომაგნიტური ველის ცვლილება და ამის შედეგად მის გენერირებაზე პასუხისმგებელი ბიოდენების შესახებ ინფორმაციის მიღება, წარმოადგენს XX ს 70-ან წწ შექმნილი კვლევების მიმართულების მეთოდსა და საგანს, რომელსაც „**ბიომაგნიტიზმი**“ ეწოდა. მაგნიტობიოლოგიისაგან განსხვავებით, რომელიც სწავლობს მაგნიტური ველის ზეგავლენას ცოცხალ ორგანიზმებზე.

1960-ანი წლების დასასრულს ზეგამტარობის ფიზიკის განვითარების შედეგად შესაძლებელი გახდა შექმნილიყო ახალი საზომი ხელსაწყო, რომელსაც **სკვიდი** უწოდეს. სკვიდი წარმოადგენს მაგნიტომეტრების მგრძნობიარე ელემენტს. მაგნიტომეტრებს გამო-

<sup>38</sup> **ერსტედი** (ქართ. შემ. **ერს**, საერთ. **Oe**) – მაგნიტური ველის დამაბულობის ერთეული გაუსის ერთეულთა სისტემაში (CGS). 1 ერსტედი არის მაგნიტური ველის დამაბულობა ვაკუუმში 1 გაუსის (ქართ. შემ. **გს**, საერთ. **G**) ინდუქციის პირობებში ( $1\text{გს} = 10^{-4}\text{ტ}$ ). SI სისტემაში მაგნიტური ველის დამაბულობა იზომება ა/მ ( $1\text{ერს} = 1000/(4\pi)$  ა/მ  $\approx 79,5774715$  ა/მ).

<sup>39</sup> **თავისუფალი რადიკალები** – მოლეკულის ან ატომის სახეობა, რომელსაც შეუძლია დამოუკიდებელი არსებობა (ანუ მას ახასიათებს შედარებითი სტაბილობა) და რომელსაც გააჩნია ერთი ან ორი შეუწყვილადი ელექტრონი. შეუწყვილადი ელექტრონი განმარტოვებულად იკავებს ატომურ ან მოლეკულურ ორბიტალს. როგორც წესი, რადიკალებს გააჩნია პარამაგნიტური თვისებები, ვინაიდან შეუწყვილადი ელექტრონების არსებობა იწვევს ურთიერთობას მაგნიტურ ველთან.

იყენებენ მაგნიტური ველის გასაზომად, და მაშასადამე, ისეთი ფიზიკური სიდიდეებისა როგორცაა ელექტრული დენი, მაგნიტური ამთვისებლობა, მაგნეტიკის გადაადგილება და ა.შ. ამ ახალი საზომი ხელსაწყოების გრძნობიერება სულ მცირე 1000 ჯერ უფრო მაღალია ვიდრე საუკეთესო არა ზეგამტარიანი მაგნიტომეტრების შემთხვევაში. ზეგამტარე მდგომარეობის შესანარჩუნებლად, რომელიც მიიღება ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე, სკვიდი თავსდება დიუარის ჭურჭელში თხევადი ჰელიუმით (4,2 K). 1986 წ. ოქსიდური მაღალტემპერატურიანი ზეგამტარების აღმოჩენის შემდეგ, შესაძლებელი გახდა შექმნილიყო „აზოტური“ სკვიდები, რომლების მუშაობდნენ 77 K.

ასეთმა ხელსაწყომ (სკვიდ-მაგნიტომეტრმა) ძალზე სწრაფად იპოვა გამოყენება ცოცხალი ორგანიზმების მიერ და პირველ ყოვლისა ადამიანის სხეულით წარმოებული მაგნიტური ველების გაზომვისას. დაიწყო განვითარება კვლევების ახალმა დარგმა, რომელიც ეფუძნებოდა ამ სუსტი ველების მიერ მოწოდებული ინფორმაციის ანალიზს. ამ კვლევის დარგს **მაგნიტობიოლოგიისაგან** განსხვავებით (რომელიც იკვლევს ძლიერი მაგნიტური ველების გავლენას ბიოლოგიურ პროცესებზე) დაერქვა **ბიომაგნეტიზმი**. პრაქტიკულად ბიომაგნეტიზმი აღმოაჩინეს სკვიდის გამოყენების შედეგად მაგნიტომეტრების მგრძნობიარობის მკვეთრი ზრდის გამო. ბიომაგნიტური სიგნალები ძალზე სუსტია და მათი გაზომვა წარმოადგენს არც თუ ისე მარტივ ფიზიკურ ამოცანას. პირველყოვლისა ეს აიხსნება გარემოში მაგნიტური ხმაურის მაღალი დონით. ამ ხმაურისაგან დაცვის სპეციალური ზომების გამოყენების გარეშე ბიომაგნიტური კვლევების ჩატარება შეუძლებელია.

არსებობს ამ ხმაურისაგან დაცვის სხვა და სხვა ხერხები. ყველაზე რადიკალური კი შედარებით დიდი მოცულობის (ოთახის) შექმნა, რომელშიც მაგნიტური ეკრანების გამოყენების გამო ეს ხმაური მკვეთრად შემცირებულია. ეკრანიერებული ოთახი საკმაოდ ძვირადღირებული ნაგებობაა, და მხოლოდ უმსხვილეს სამეცნიერო ცენტრებს შეუძლიათ თავის თავს მისი აგების ნება მისცენ. ასეთი ოთახების რაოდენობა მთელ მსოფლიოში თითებზე ჩამოსათვლელია.

არსებობს გარე ხმაურის ზეგავლენის შესუსტების სხვა, უფრო ხელმისაწვდომი ხერხიც. აღნიშნული ხერხი ეფუძნება იმ მოსაზრებას, რომ უმეტესწილად, ჩვენს გარემოში არსებული მაგნიტური ხმაური წარმოიშობება დედამიწის მაგნიტური ველის ქაოტური რხევების (ფლუქტუაციების) და საწარმო ელექტროდანადგარების ქმედების გამო. ძლიერი მაგნიტური ანომალიების და ელექტრული დანადგარების მოშორებით, მაგნიტური ველი დროში კი ფლუქტუირებს, მაგრამ სივრცულად ერთგვაროვანია, და სუსტად იცვლება ადამიანის სხეულთან შესადარ მანძილებზე. საკუთარი ბიომაგნიტური ველი კი მკვეთრად მცირდება ცოცხალი ორგანიზმისგან დაშორებისას. ეს ნიშნავს, რომ მიუხედავად იმისა, რომ გარე ველები გაცილებით უფრო მძლავრია, მათ უფრო მცირე გრადიენტი გააჩნიათ (ანუ ცვლილების სიჩქარე ობიექტისგან დაშორებისას), ვიდრე ბიომაგნიტურ ველებს.

ხელსაწყოს მიმღები მოწყობილობა, რომელშიც როგორც მგრძნობიარე ელემენტი გამოიყენება სკვიდი, იწყობა ისეთნაირად, რომ მას გააჩნია გრძნობიერება მხოლოდ ბიომაგნიტური ველის გრადიენტის მიმართ – ამ შემთხვევაში ხელსაწყოს გრადიომეტრი ეწოდება. მაგრამ, ხშირად გარე (ხმაურის) ველებს ახასიათებს შესამჩნევი გრადიენტები, მაშინ საჭირო ხდება სხვა ხელსაწყოს გამოყენება, რომელიც ზომავს მაგნიტური ველის ინდუქციის მეორე სივრცულ წარმოებულს – მეორე რიგის გრადიომეტრის. მაგრამ უნდა აღინიშნოს რომ გრადიომეტრების გამოყენებაც უკეთესია ადგილებში „მაგნიტურად მშვიდი“ გარემოთი, და ამიტომაც ზოგი მკვლევარი ჯგუფები მუშაობენ სოფლებში, სპეციალურად აგებულ არამაგნიტურ შენობებში.

სადღეისოდ ინტენსიური ბიომანტური კვლევები მიმდინარეობს როგორც მაგნიტოეკრანირებულ ოთახებში, ასევე მათ გარეშეც, გრადიომეტრების გამოყენებით. ბიომანტური მოვლენების ფართო სპექტრში არსებობს ბევრი ამოცანები, რომლებიც სათვისაც დასაშვებია გარე ხმაურის შემცირების სხვა და სხვა დონეები.

ცოცხალი ორგანიზმის მაგნიტური ველები შეიძლება სამმა მიზეზმა გამოიწვიოს. პირველყოვლისა ეს უჯრედული მემბრანების ელექტრული აქტიურობით (უპირატესად კუნთოვანი და ნერვული უჯრედებით) გამოწვეული იონური დენებია. ბიომანტური ველების შემდეგი წყარო – ორგანიზმში შემთხვევით ან სპეციალურად მოხვედრილი უმცირესი ფერომანტური ნაწილაკები. ეს ორი წყარო ჰქმნის საკუთარ მაგნიტურ ველებს. გარდა ამის, გარე მაგნიტური ველის ზედდების შემთხვევაში წარმოიქმნება სხვა და სხვა ორგანოების მაგნიტური ამთვისებლობის არაერთგვაროვნობები, რომლებიც ამახინჯებენ ზედდებულ გარე ველს.

ბოლო ორ შემთხვევაში მაგნიტურ ველს თან არ ახლავს ელექტრული ველის წარმოქმნა, ამიტომაც ორგანიზმში მაგნიტური ნაწილაკების ქცევისა და სხვა და სხვა ორგანოების მაგნიტური თვისებების კვლევისას გამოიყენება მხოლოდ მაგნიტომეტრიული მეთოდები. რაც შეეხება ბიოდენებს, ისინი მაგნიტური ველების გარდა იწვევენ სხეულის ზედაპირზე ელექტრული პოტენციალების განაწილებას. ამ პოტენციალების რეგისტრაცია უკვე კაი ხანია გამოიყენება კვლევებში და კლინიკურ პრაქტიკაში – ესენია ელექტროკარდიოგრაფია, ელექტროენცეფალოგრაფია და ა.შ. ბიომანტური ველების რეგისტრირებას ელექტრონოგრაფიული მეთოდების ანალოგიით (კარდიოგრაფია, ენცეფალოგრაფია და ა.შ.) ბიომანტოგრაფია ეწოდება. შეიძლება მოგვეჩვენოს, რომ მათი მაგნიტური ანალოგები, ანუ მაგნიტოკარდიოგრაფია და მაგნიტოენცეფალოგრაფია, რომლებიც არეგისტრირებენ ორგანიზმში მიმავალი იმავე ელექტრული პროცესების სიგნალებს, პრაქტიკულად ანალოგიურ ინფორმაციას იძლევიან გამოსაკვლევ ორგანოების შესახებ. მაგრამ, როგორც ეს ელექტრომანტეტიზმის თეორიიდან გამომდინარეობს, დენის წყაროს აგებულება ელექტროგამტარ გარემოში (ორგანიზმში) და ამავე გარემოს არაერთგვაროვნობა სხვადასხვაგვარად აისახება მაგნიტური და ელექტრული ველების განაწილებაზე: ბიოელექტრული აქტივობის ზოგი სახეობა ამჟღავნებს თავის თავს უპირატესად ელექტრულ ველში, სუსტი მაგნიტური სიგნალის გამოცემით, ზოგი კი – პირიქით. ამიტომაც არსებობს ბევრი პროცესი, მაგნიტოგრაფიული დაკვირვება რომლებზეც უპირატესობით სარგებლობს.

ბიომანტოგრაფიის უპირატესობებში შეიძლება ჩავთვალოთ შემდეგი:

- მაგნიტოგრაფიას არა სჭირდება ობიექტთან უშუალო კონტაქტი, ანუ საშუალებას იძლევა გაზომვები შესრულდეს შემოსაკრავის ან სხვა დაბრკოლების გავლით. ეს კი არა მხოლოდ პრაქტიკულია, არამედ მონაცემების რეგისტრაციის ელექტრულ მეთოდებთან შედარებით ამას პრინციპული უპირატესობა გააჩნია, ვინაიდან კანზე ელექტროდების მიმაგრების ადგილები შეიძლება ნელად ცვლადი კონტაქტური პოტენციალების წყაროებად იქცნენ. ასეთნაირ პარაზიტულ ეფექტებს არა აქვს ადგილი მაგნიტოგრაფულ მეთოდებში და ამიტომაც მაგნიტოგრაფია საშუალებას იძლევა, კერძოდ, საიმედოთ გამოიკვლიოს ნელა მიმდინარე პროცესები (სადღეისოთ მახასიათებელი დრო ათეულ წუთებს აღწევს);
- მაგნიტური ველები სწრაფად სუსტდება აქტივობის წყაროსგან დაშორებისას, ვინაიდან თავად მომუშავე ორგანოში შედარებით ძლიერი ბიოდენების შედეგს წარმოადგენენ, იმ დროს როდესაც ზედაპირული პოტენციალები განისაზღვრებიან უფრო სუსტი და „გადაღბნილი“ დენებით კანში. ამიტომაც მაგნიტოგრაფია უფრო

მოხერხებულია ბიოელექტრული აქტივობის ადგილის ზუსტი განსაზღვრისათვის (ლოკალიზებაში);

- და ბოლოს, მაგნიტური ველის ინდუქცია, როგორც ვექტორი, ხასიათდება არა მხოლოდ აბსოლუტური სიდიდით, არამედ მიმართულებითაც, რაც ასევე დამატებით სასარგებლო ინფორმაციას იძლევა.

მაგნიტოგრაფია და ელექტრონოგრაფია იძლევიან განსხვავებულ ინფორმაციას ორგანიზმში მოდინარე ბიოდენების შესახებ, ამიტომაც ისინი კი არ კონკურირებენ, არამედ ავსებენ ერთმანეთს. და პირიქითაც, სწორედ მათი კომბინაცია იძლევა უფრო სრულ ინფორმაციას გამოსაკვლევ პროცესების შესახებ. მაგრამ ყოველ მეთოდს გააჩნია თავისი ქმედების არეალი, სადაც ერთი გარკვეული მეთოდის გამოყენება უმჯობესია.

ბიომაგნეტიზმი აღმოჩნდა არ მხოლოდ ბიოლოგიური მეცნიერების მნიშვნელოვანი ნაწილი, არამედ ის უზრუნველყოფს ბაზას ზემგრძნობიარე მაგნიტომეტრიის სხვაგვარი გამოყენების განვითარებისათვის.

ბოლო წლებში მნიშვნელოვნად გაფართოვდა მაგნიტომეტრიის გამოყენების წინა-ჩვენებები. იოგების დაჭიმვის, მოტეხილობების, დამწვრობის და ჭრილობების მკურნალობისას, მაგნიტოთერაპია არა მხოლოდ ხელს უწყობს აღდგენით პროცესებს, არამედ უფრო სწრაფი შედეგების მიღწევის საშუალებას იძლევა, ნაკლები ნაწიბურებით და კაგგი კოსმეტიკური ეფექტით. ტრავმების დროს მაგნიტური მკურნალობა ორ და მეტ ჯერ ამცირებს შეხორცების დროს. ქრონიკული პრობლემების მკურნალობისას, მაგალითად, ზოგიერთი ფორმების არტრიტი, დეგენერატიული მდგომარეობები, დიაბეტური წყლულები და კიბო, მაგნიტოთერაპიამ აჩვენა შესანიშნავი შედეგები, რომლებიც გამოვლინდა მდგომარეობის გაუმჯობესებაში ან გამოჯანმრთელებაში.

ფართო გამოყენება ბიომაგნეტიზმმა მიიღო დიაგნოსტიკის მეთოდებშიც. რბილი და მკვრივი ქსოვილთა პათოლოგიის დიაგნოსტიკის ერთ ერთ ყველაზე თანამედროვე მეთოდთან მიჩნეულია MRI<sup>40</sup> (ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსი), ან, როგორც მას ხშირად უწოდებენ მაგნიტურ-რეზონანსული ტომოგრაფია, რომელმაც კვლევის სიზუსტით უკვე კაი ხანია გაუსწრო რენტგენს და კომპიუტერულ ტომოგრაფიას. მაგნიტური ველის გამოყენებით კვლევების სხვა წამყვან მეთოდებში ძირითადად მიაკუთვნიან: SQUID (კვანტურ ინტერფერენციულ დიაგნოსტიკას) და MKG (მაგნიტოკარდიოგრაფიას). მაგრამ, ვინაიდან რეზონანსული მეთოდების დეტალური განხილვისათვის ჩვენ გვესაჭიროება ცოდნა ატომის აგებულების შესახებ, ჩვენ დაუბრუნდებით ამ მეთოდებს მოგვიანებით, თავში რომელიც მიემდგნა ატომური და კვანტური ფიზიკის ელემენტებს.

იაპონიაში და აღმოსავლეთის სხვა ქვეყნებში დიდი რაოდენობით აწარმოებენ სახლში გამოსაყენებელ გამაჯანსაღებელ მაგნიტურ მოწყობილობებს. ერთ-ერთი ყველაზე პოპულარული და ეფექტურია მაგნიტური ლეიბები და ბალიშები (მუთაქები). ეს ნივთები უნიკალურია იმიტომაც, რომ მათ არ ესაჭიროება გამაჯანსაღებელი პროცედურებისათვის სპეციალური დროის გამოყოფა – მათზე სძინავთ და მკურნალობენ ძილში.

ფიზიკის კანონებზე დაფუძნებული და შესაბამის კვლევებში არგუმენტირებულია მაგნიტური ველის სხვა სამკურნალო ეფექტიც, რომელიც წარმოადგენს სისხლისა და ლიმფის მიმოქცევის აქტივირებას. მაგნიტური ლეიბების გამოყენების ანგარიშებში, პაციენტები იტყობინებიან ძილის დროს ფეხებში სითბოს შეგრძნების გაზრდაზე, კუნთოვანი დამაბულობის მოხსნაზე და სახსრებში ტკივილის გაქრობაზე. სისხლის მიმოქცევის გაუმჯობესება ფარადეის კანონს (ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი) და ჰოლის

<sup>40</sup> Magnetic resonance imaging – მაგნიტურ რეზონანსული გამოსახულება.

ეფექტს<sup>41</sup> ეფუძნება – ორ დიდი ხანი ცნობილ ფიზიკის კანონს. ეს კანონები ხსნიან მაგნიტური პოლუსების გავლენის მექანიზმებს იონური ნაკადების წარმოქმნაზე და ბიოელექტრულ აქტივობაზე, რაც თავის მხრივ, იწვევს სისხლძარღვების გაფართოებას და სისხლის მიმოქცევის გაუმჯობესებას.

უკანასკნელ წლებში, ნანოტექნოლოგიების განვითარებასთან ერთად, გაჩნდა ტერმინი **მაგნიტური ნანოსტრუქტურა** (ინგ. *magnetic nanostructure*) – ხელოვნური ჰეტეროსტრუქტურა (ნახევარგამტარების ფიზიკის ტერმინი, რომელიც ასახავს აპკზე გაზრდილ სხვა და სხვა ნახევარგამტარებიდან შემდგარ ფენოვან სტრუქტურას), რომელსაც გააჩნია **გიგანტური** ან **გვირაბული (ტუნელური) მაგნიტოწინაღობა**. ეს სტრუქტურა წარმოადგენს მრავალფენა აპკს, რომელშიც ერთმანეთს ენაცვლებიან ფერომაგნიტური და არამაგნიტური მასალები.

მაგალითად, ნანოსტრუქტურაში Co-Ni-Cu/Cu მონაცვლეობენ ფერომაგნიტური (Co-Ni-Cu) და არამაგნიტური (Cu) ფენები. ფენების სისქე ელექტრონების თავისუფალი გარბენის (საშუალო მანძილის, რომელსაც ელექტრონი გაირბენს შეჯახების გარეშე) სიგრძის რიგისაა, ანუ რამდენიმე ნანომეტრი. გარედან მოდებული მაგნიტური ველის დამაბულობის ნულიდან რაღაც სიდიდემდე ვარირებით შეიძლება ისეთნაირად შეიცვალოს მრავალფენოვანი სტრუქტურის მაგნიტური კონფიგურაცია, რომ ელექტრული წინაღობა შეიცვლება ძალზე ფართო საზღვრებში. ნანოსტრუქტურაში Co-Ni-Cu/Cu მნიშვნელობით უდიდესი გიგანტური მაგნიტოწინაღობა მიღებულია 0,7 ნმ სისქის Cu-ის ფენებისათვის. მაგნიტური ნანოსტრუქტურები შეიძლება მაგნიტური ველების დეტექტორებად იყოს გამოყენებული.

მოდით განვმარტოთ, თუ რას წარმოადგენენ გიგანტური და ტუნელური მაგნიტოწინაღობები.

**გიგანტური მაგნეტოწინაღობა, გიგანტური მაგნიტოწინაღობა, (გმწ)** (ინგ. *Giant magnetoresistance, GMR*) – კვანტურმექანიკური ეფექტი, რომელიც მეტალის თხელ აპკებში აღინიშნება, და სადაც ფერომაგნიტური და გამტარი არამაგნიტური ფენები ენაცვლებიან ერთმანეთს. ეფექტი მდგომარეობს ასეთი სტრუქტურის ელექტროწინაღობის მნიშვნელოვან ცვლილებაში მეზობელ მაგნიტურ ფენების დამაგნიტების ურთიერთ მიმართულების შეცვლისას. დამაგნიტების მიმართულება შეიძლება იმართებოდეს, მაგალითად, გარე მაგნიტური ველის მოდებით. ეფექტი ეფუძნება სპინის მიმართულებაზე დამოკიდებულ ელექტრონების განზნევას. გიგანტური მაგნეტოწინაღობა აღმოაჩინეს 1988 წ. ფიზიკოსებმა ალბერტ ფერტმა და პეტერ გრიუნბერგმა, რისთვისაც 2007 წ. მათ მიენიჭათ ნობელის პრემია ფიზიკაში.

ეფექტის გამოყენების ძირითადი სფერო – მაგნიტური ველის დეტექტორები, რომლებსაც გამოიყენებენ მყარი დისკებიდან ინფორმაციის ასათვლელად, ბიოსენსორები, მიკროელექტრომექანიკური სისტემები (მემს)<sup>42</sup> და სხვა. გიგანტური მაგნეტოწინაღობის მქონე მრავალფენოვანი სტრუქტურები გამოიყენებოდა მაგნიტორეზისტიულ ოპერატიულ მეხსიერებებში როგორც 1 ბიტი ინფორმაციის შემნახავი უჯრედები.

**ტუნელური მაგნიტური წინაღობა ან ტუნელური მაგნიტოწინაღობა (ტმწ, ინგ. Tunnel magnetoresistance (TMR))** – კვანტურმექანიკური ეფექტი, რომელიც აღინიშნება

<sup>41</sup> **ჰოლის ეფექტი** – განივი პოტენციალთა სხვაობის წარმოქმნის მოვლენა (ასევე მას **ჰოლის ძაბვას** უწოდებენ), რომელიც წარმოიქმნება მუდმივი დენიანი გამტარის მაგნიტურ ველში მოთავსებისას. აღმოჩენილია ედვინ ჰოლის მიერ 1879 წ. ოქროს თხელ ფირფიტებში.

<sup>42</sup> **მიკროელექტრომექანიკური სისტემები (მემს)** – ესაა მიკროსისტემური ტექნიკის მოწყობილობა, რომელიც შესრულებულია მოცულობითი მექანიკის ტექნოლოგიით. მემს-ის ზომები 1 მკმ – 1 მმ დიაპაზონშია სიმძლავრეზე, გამოყენების არეზე, მოწყობილობაში მყოფი სქემების და მათში ელემენტების რაოდენობაზე დამოკიდებულებით.

დენის გადინებისას თხელი (~1 ნმ) დიელექტრიკის ფენით გაყოფილ ფერომაგნეტიკების ორ ფენას შორის (ანუ, დენი გაედინება დიელექტრიკში). ამასთან, მოწყობილობის საერთო წინაღობა, რომელშიც დენი გაედინება ტუნელური ეფექტის გამო, დამოკიდებულია ორი მაგნიტური ფენის დამაგნიტების ველების ურთიერთორიენტაციაზე. წინაღობა მეტია ფენების ანტიპარალელურ დამაგნიტების შემთხვევაში. ტუნელური მაგნიტური წინაღობის ეფექტი ძალიან ჰგავს გიგანტური მაგნიტური წინაღობის ეფექტს, ოღონდ მასში არამაგნიტური მეტალის ფენის ნაცვლად გამოიყენება იზოლატორის (ტუნელური ბარიერის) ფენა.

ეფექტი იყო აღმოჩენილი 1975 წ მიშელ ჟულიერის მიერ. ფერომაგნეტიკის სახით მან გამოყენა რკინა, დიელექტრიკად კი გერმანიუმი. ეფექტი მქლავნდებოდა 4,2 K ტემპერატურაზე, ამიტომაც არ მიიქცია ყურადღება პრაქტიკული გამოყენების გამო.

ოთახის ტემპერატურაზე ეფექტის მოქმედება პირველად იყო აღმოჩენილი 1995 წ კვლევებისადმი ინტერესის განახლებისას გიგანტური მაგნიტური წინაღობის ეფექტის აღმოჩენის შემდეგ, ტერუნობუ მიაზაკის მიერ და მისგან დამოუკიდებლად მეცნიერების ჯგუფით ჯაგადიშ მუდერას თავოსნობით. სადღეისოდ, ტუნელური მაგნიტური წინაღობის ეფექტის საფუძველზე, შეიქმნა მაგნიტური ოპერატიული მეხსიერება (MRAM), და გარდა ამისა ის გამოიყენება მყარი დისკების წამკითხავ თავებში.

2001 წ ბატლერის და მატონის ჯგუფებმა ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად თეორიულად იწინასწარმეტყველეს, რომ ფერომაგნეტიკის სახით რკინისა, ხოლო დიელექტრიკად მაგნიუმის ოქსიდის გამოყენებისას, ტუნელური მაგნიტოწინაღობის ეფექტი შეიძლება გაიზარდოს რამდენიმე ათასი პროცენტით. 2004 წ პერკინის და იუასის ჯგუფებმა შესძლეს Fe/MgO/Fe საფუძველზე შეექმნათ მოწყობილობა, რომელშიც ოთახის ტემპერატურაზე მიაღწიეს ტუნელური მაგნიტოწინაღობის 200% მნიშვნელობას.

2007 წ ტუნელურ მაგნიტორეზისტურ ეფექტზე, მაგნიუმის ოქსიდის საფუძველზე აგებულმა მოწყობილობებმა სრულად შეცვალეს გიგანტურ მაგნიტურ წინაღობაზე აგებული მოწყობილობები, ინფორმაციის მაგნიტური შენახვის მოწყობილობების ბაზარზე.

## 9. ოპტიკის ელემენტები.

### 9.1. სინათლის ბუნება.

XVII საუკუნის ბოლოს თითქმის ერთდროულად წარმოიშვა ორი თითქოს ერთმანეთის გამომრიცხავი თეორია სინათლის ბუნების შესახებ. ნიუტონის მიერ შემოთავაზებული თეორიის თანახმად სინათლე წარმოადგენს კორპუსკულების ნაკადს, რომლებიც გამოედინებიან მანათებელი სხეულიდან სწორხაზოვანი ტრაექტორიით. ჰიუგენსის თეორიის თანახმად სინათლე განიხილება როგორც დრეკადი ტალღა, რომელიც ვრცელდება მსოფლიო ეთერში. 100 წელზე მეტ ხანს კორპუსკულარულ თეორიას ჰყავდა უფრო მეტი მიმდევარი ვიდრე ტალღურს. XIX საუკუნის დასაწყისში ფრენელმა შესძლო ტალღოვანი თეორიის საფუძველზე აეხსნა იმ დროისათვის ცნობილი ყველა ოპტიკური მოვლენა. შედეგად სინათლის ტალღოვანმა თეორიამ მიიღო საერთო აღიარება, ხოლო კორპუსკულარული თეორია დავიწყებული იქნა თითქმის 1 საუკუნე.

თავდაპირველად ფიქრობდნენ, რომ სინათლე არის განივი ტალღა, რომელიც ვრცელდება ჰიპოტეტურ დრეკად გარემოში (მსოფლიო ეთერი). 1864 წელს მაქსველმა შექმნა სინათლის ელექტრომაგნიტური თეორია, რომლის თანახმად სინათლე არის ელექტრომაგნიტური ტალღა, რომლის სიგრძე მდებარეობს 100 Å და 1 მმ-მდე. ოპტიკურ გამოსხივებას ან სინათლეს მიეკუთნება ინფრაწითელი, ხილული და ულტრაიისფერი გამოსხივებები.

- ინფრაწითელი გამოსხივება ეწოდება ელექტრომაგნიტურ ტალღას რომელსაც გამოასხივებს გაცხელებული სხეული (ტალღის სიგრძე 1მმ – 7700 Å).
- ხილული გამოსხივება ან ხილული სინათლე ეწოდება ელექტრომაგნიტურ ტალღას რომლის სიგრძეა 7700 Å და 3800 Å მდეა.
- ულტრაიისფერი გამოსხივება – ელექტრომაგნიტური ტალღა რომლის სიგრძეა 3800 Å და 100 Å მდეა.

XX საუკუნის დასაწყისში დადგინდა რომ სინათლეს ორმაგი ბუნება გააჩნია. აღმოაჩინეს სინათლის მატარებელი ელემენტარული ნაწილაკები (ფოტონები) რომელთაც ტალღური ბუნება გააჩნია (არ ახასიათებთ მოსვენების მასა).

მაქსველის თეორიის საფუძველზე სინათლე წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური ბუნების ტალღას. იგი შედგება ურთიერთმართებულ სიბრტყეებში მერხევი ელექტრული ველის დამაბულობის  $\vec{E}$  და მაგნიტური ველის ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორებისაგან. სინათლის ტალღები განივია. აქ უნდა ითქვას, რომ ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა სხვა ტალღებიც: რადიოტალღები, ინფრაწითელი და ულტრაიისფერი გამოსხივებები, რენტგენის და  $\gamma$  – გამოსხივება. ეს ტალღები ერთმანეთისგან მხოლოდ ტალღის სიგრძით განსხვავდებიან. ისევე როგორც მექანიკური, სხვა ბუნების ტალღებიც შეიძლება იყოს სფერული ან ბრტყელი. გადავიდეთ ისევ სინათლის ტალღის აღწერაზე.

თუ სინათლის ბრტყელი ტალღა ვრცელდება  $x$  ღერძის მიმართულებით, იგი აღიწერება შემდეგი განტოლებებით:

$$\begin{cases} \vec{E} = E \cos(\omega t - kx + \varphi) \\ \vec{B} = B \cos(\omega t - kx + \varphi) \end{cases}$$

სადაც  $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$  – რხევის წრიული სიხშირეა,  $T$  – პერიოდი,  $\nu = 1/T$  – რხევის სიხშირე,  $k = 2\pi/\lambda$  – ტალღური რიცხვი,  $\lambda$  – ტალღის სიგრძე,  $\varphi$  – რხევის საწყისი ფაზა.



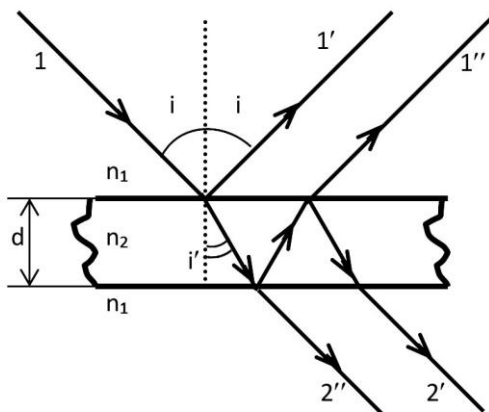
როგორც ცნობილია სინათლის ელექტროქიმიური, ფოტოქიმიური და ფიზიოლოგიური ზემოქმედება უმეტეს წილად განპირობებულია მხოლოდ სინათლის ელექტრული ვექტორის მოქმედებით. მას ხშირად სინათლის ვექტორს უწოდებენ. ამიტომ ვისაუბრებთ მხოლოდ სინათლის ტალღის ელექტრულ მდგენელზე და სინათლის ტალღურ განტოლებას ასე ჩავწერთ:

$$\vec{E} = E \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

ეს განტოლება აღწერს სინათლის ელექტრული ველის დამახულობის  $\vec{E}$  ვექტორის რხევას და მასში 4 პარამეტრი შედის ( $E_0, \omega, k, \varphi$ ). მაგრამ რათგან ორი პარამეტრი ( $\omega, k$ ) ერთმანეთთან კავშირში იმყოფებიან ( $\omega/k = \lambda/T$ ), ფაქტობრივად სამი დამოუკიდებელი პარამეტრი რჩება. სწორედ მათი განაწილების მიხედვით ადამიანი ღებულობს ინფორმაციას გარა სამყაროში მიმდინარე მოვლენების შესახებ.

## 9.2. ოპტიკის ძირითადი ცნებები.

სინათლის ტალღებს კოჰერენტული ეწოდება, თუ ტალღების ზედდების ნებისმიერ წერტილში ფაზათა სხვაობა  $\varphi_1 - \varphi_2$  დროის მიხედვით არ იცვლება. ანუ სხვა სიტყვებით კოჰერენტულ ტალღებს ახასიათებს ერთი სიხშირე და მუდმივი ფაზათა სხვაობა. კოჰერენტული ეწოდება აგრეთვე შესაბამისი სინათლის ტალღის წყაროებსაც. სინათლის კოჰერენტული ტალღების ზედდების არეში მისი ინტენსივობა სხვადასხვაგვარი იქნება იმის მიხედვით თუ როგორია ფაზათა შორის სხვაობა ზედდების არის სხვადასხვა წერტილში. მართლაც ტალღების კოჰერენტულობის შემთხვევაში ყველა წერტილში ერთ და იმავე დროს ფაზათა სხვაობა ხომ ერთნაირი იქნება, და იმის და მიხედვით თუ რა მნიშვნელობა ექნება ამ ფაზათა სხვაობას ანუ ფაზაში იქნებიან ტალღები თუ პირიქით საწინააღმდეგო ფაზებში, შედეგად მივიღებთ სინათლის ინტენსიობის გამდიერებას ან მილევას. მივიღებთ ე.წ. ინტერფერენციულ სურათს. კოჰერენტული ტალღების ზედდების არეს ინტერფერენციული ველი ეწოდება.



სურ. 19. განსხვავებული სვლელობის სიგრძის კოჰერენტული სხივების მიღება მინის  $d$  სისქის ფირფიტაზე ( $n_2$ ).

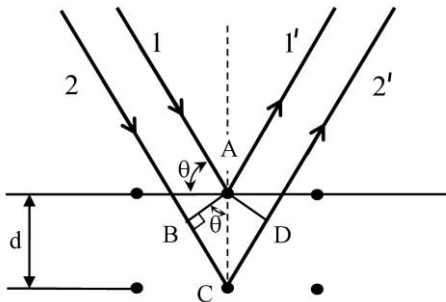
სინათლის ბუნებრივი წყაროები არ არიან კოჰერენტული, ამიტომ კოჰერენტული ტალღის მისაღებად ახდენენ ერთი სინათლის წყაროს მიერ გამოსხივებული სხივის გაყოფას არეკვლისა და გარდატეხის მოვლენების გამოყენებით. სურ. 19-ზე მოყვანილია სხივი (1), რომლის არეკვლისას ვიღებთ კოჰერენტულ სხივებს ( $1', 1'', 2'$  და  $2''$ ). შემდეგ ხდება მათი ზედდება და ინტერფერენციული სურათის მიღება. ამგვარ ინტერფერენციულ ველში ერთმანეთს ენაცვლებიან ინტენსივობის მაქსიმუმები და მინიმუმები, რის გამოც ველში მოთავსებულ ეკრანზე გამოჩნდება ინტერფერენციული სურათი (ჩაბნელებ-

ბული და განათებული ზოლების სახით). მანძილს ორ მეზობელ მინიმუმებს შორის ეწოდება ინტერფერენციული ზოლის სიგანე.

ეხლა უფრო დაწვრილებით ავლწეროთ მოყვანილი სურათი. გვაქვს ორი სინათლის გამტარი გარემო  $n_1$  და  $n_2$  (ვთქვათ  $n_1$  – ჰაერი, ხოლო  $n_2$  – მინის ფირფიტა, რომლის სისქეა  $d$ ). მინის ფირფიტას ეცემა სხივი (1) (დაცემის კუთხე  $i$ ) იმავე კუთხით ხდება სხივის არეკვლა (სხივი 1'). დაცემული სხივის ნაწილი გარდატყდება მინის ფირფიტაში (გარდატყბის კუთხე  $i'$ ) და ფირფიტის ქვედა ზედაპირიდან არეკვლის და შემდგომი გარდატყბის მერე (მინიდან ჰაერში გასვლისას) მივიღებთ სხივს 1''. ქვედა ზედაპირიდანაც სხივი მთლიანად ვერ აირეკლება, ნაწილი გააგრძელებს გზას და ჰაერში გარდატყბის შემდეგ მივიღებთ ორ სხივს 2' და 2''. აღსანიშნავია რომ სხივი 2'' გაივლის უფრო მეტ მანძილს ვიდრე სხივი 1', შემდეგ რიგში დგას სხივი 1'' და საბოლოოდ ყველაზე დიდი მანძილი გავლილი აქვს სხივ 2'.

### 9.3. სინათლის დიფრაქცია.

სინათლის დიფრაქცია ეწოდება სინათლის ტალღების მიერ გავრცელების გზაზე არსებული საგნების გარშემოვლის მოვლენას, სინათლის შეღწევას საგნის გეომეტრიულ ჩრდილში ე.ი. აქ საუბარი გვექნება გეომეტრიული ოპტიკიდან გადახრის მოვლენაზე. იმისათვის რომ დიფრაქციის მოვლენას ადგილი ჰქონდეს აუცილებელია, რომ სინათლის ტალღის სიგრძე  $\lambda$  დაბრყოლების ხაზოვანი ზომების თანაზომი იყოს. დიფრაქციული მოვლენების ახსნა შეიძლება ჰიუგენს-ფრენელის პრინციპზე დაყრდნობით, რომლის თანახმადაც სივრცის ყოველი წერტილი რომლამდეც მიაღწევს სინათლის ტალღა, იქცევა მეორადი ტალღების წყაროდ. ეს ტალღები კოჰერენტულები არიან და მამასადამე შეუძლიათ ინტერფერირება.



სურ. 20. ვულფი-ბრეგის პირობა. დიფრაქციულ მესერზე რომლის ბიჯი  $d$ -ს ტოლია  $\theta$  კუთხით ერთმანეთის პარალელურად ვარდება ორი სხივი (ტალღა) (1 და 2). ამ სხივების სვლელობის სხვაობის დადგენა შეიძლება ორი მართკუთხა სამკუთხედიდან ABC და ADC.

განვიხილოთ დიფრაქციის მაგალითი სივრცულ დიფრაქციულ მესერზე რომლის კვანძებს შორის მანძილი  $d$ -ს ტოლია (იხ. სურ. 20). ამ მესერს ეცემა სხივი დაცურების კუთხით  $\theta$  ორი ფენიდან არეკვლილი სხივების სვლელობის სხვაობა:

$$\Delta = BC + CD = 2d \sin \theta$$

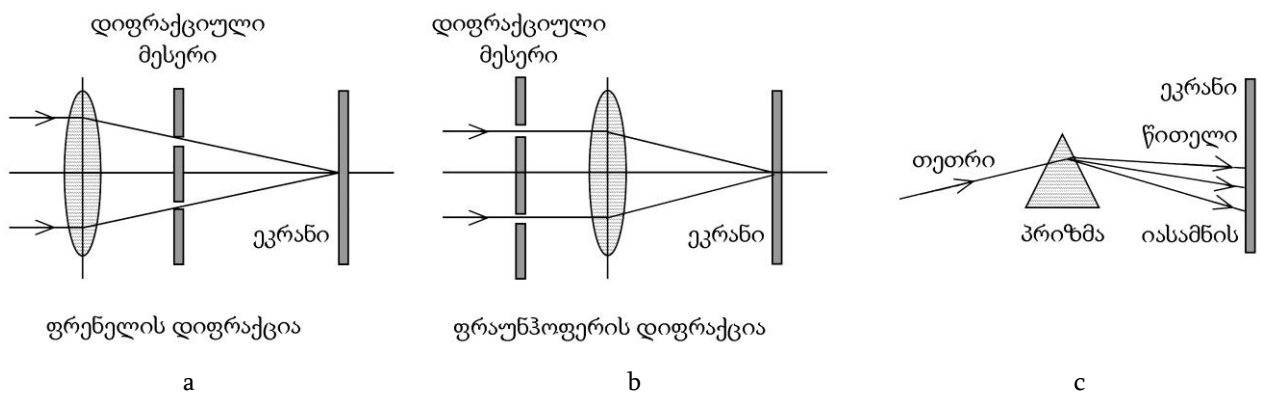
ინტერფერენციული სურათი აღინიშნება იმ მიმართულებებში რომლებსათვისაც სრულდება ვულფი-ბრეგის პირობა

$$2d \sin \theta = m\lambda \tag{54}$$

სადაც  $m = 1, 2, 3, \dots$  – დიფრაქციული მაქსიმუმის რიგია.

ტალღური ზედაპირების მიხედვით არჩევენ სინათლის ორი სახის დიფრაქციას: ფრაუნჰოფერის და ფრენელის დიფრაქცია. ფრაუნჰოფერის დიფრაქცია (სურ. 21b) მიიღება პარალელურ სხივთა კონაში, ანუ რაც იგივეა სინათლის ბრტყელი ტალღებით.

როდესაც დიფრაქცია ხორციელდება სფერული ტალღებით მას ფრენელის დიფრაქცია ეწოდება (სურ. 21a). თუ დიდრაქციას განიცდის არამონოქრომატული (ტალღას ეწოდება მონოქრომატული, თუ მას ახასიათებს ერთი გარკვეული სიგრძე), არამედ თეთრი სინათლე (4000 – 7500 Å ინტერვალში) მაშინ სხვადასხვა ტალღის სიგრძის (ფერის) შესაბამისი დიფრაქციული მაქსიმუმები (რეფლექსები) ეკრანზე აღარ თანხვდებიან ერთმანეთს და ფაქტიურად მოხდება თეთრი სინათლის დაშლა შემადგენელ ნაწილებათ ე.ი. დისპერსია (სურ. 21c). დიფრაქციას სწავლობენ ე.წ. დიფრაქციული მესერის მეშვეობით. დიფრაქციული მესერი ეს არის თხელ გაუმჭვირვალე სიბრტყეში განლაგებული პარალელურ ჭრილთა ერთობლიობა, რომლებიც ერთმანეთისგან ტოლი მანძილებით არიან დაშორებული და აქვთ ერთნაირი სიგრძე. დიფრაქციული მესერი შეიძლება აიგოს ტოლ მანძილებზე განლაგებულ წერტილებისაგან. დიფრაქციული მესერი შეიძლება იყოს როგორც გამჭვირვალე ასევე გაუმჭვირვალე. ამ ბოლო შემთხვევაში საუბარია ამრეკვლი მესერზე.



სურ. 21. (a,b) წარმოდგენილია ორი სახის დიფრაქცია: ფრენელის (a) და ფრაუნჰოფერის (b) დიფრაქციები. (c) თეთრი სინათლის დაშლა შემადგენელ ფერებათ (დისპერსიის მოვლენა).

დისპერსიის მოვლენას შეიძლება დავაკვირდეთ სპეციალური ოპტიკური ხელსაწყო, პრიზმის მეშვეობით. სურათზე (იხ. სურ. 21c) ნაჩვენებია თუ როგორ დაიშლება თეთრი ფერის სხივი შემადგენელ ნაწილებად ე.წ. სპექტრის მიღება. მიღებულ სურათზე ზემო ნაწილში იქნება განთავსებული წითელი ფერი, ხოლო ქვემოთაში – იისფერი.

#### 9.4. პოლარიზებული სინათლე.

როგორც უკვე ითქვა სინათლის ტალღა ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა. მასში სინათლის ვექტორი ( $\vec{E}$  ვექტორი) ტალღის გავრცელების მართებულ სიბრტყეში ირხევა. როგორც ითქვა სინათლე განივი ტალღაა. ბუნებრივი სინათლის ტალღაში  $\vec{E}$  ვექტორი შეიძლება ირხევოდეს სინათლის გავრცელების მიმართულების პერპენდიკულარულ ყველა სიბრტყეში. ასეთ სინათლეს არაპოლარიზებული ეწოდება. თუ სინათლის ტალღაში ელექტრული ველის დამაბულობის ვექტორი მხოლოდ ერთ სიბრტყეში ირხევა, მაშინ სინათლეს პოლარიზებული ეწოდება. პოლარიზაცია შეიძლება იყოს სრული ან ნაწილობრივი. სიბრტყეს, რომელშიც ასეთი რხევები მიმდინარეობს ეწოდება პოლარიზაციის სიბრტყე.

პოლარიზებული სინათლე შეიძლება მივიღოთ ბუნებრივი სინათლის პოლარიზატორში გატარებისას. პოლარიზატორი არის ოპტიკური ხელსაწყო, რომელიც მხოლოდ ისეთი სინათლის ტალღებს ატარებს, რომლებშიც ელექტრული ვექტორის რხევა მიმდინარეობს გარკვეულ ე.წ. პოლარიზაციის სიბრტყეში. ადვილად მისახვედრია, რომ

თუ სინათლის ტალღის გავრცელების გზაზე მიმდევრობით განვათავსებთ ორ პოლარიზატორს, რომელთა პოლარიზაციის სიბრტყეები ურთიერთმართობულია, მაშინ სისტემაში სინათლის ტალღა ვერ გაივლის. თუ პოლარიზატორში გავატარებთ ნაწილობრივ პოლარიზებულ სინათლეს და პოლარიზატორს ვატრიალებთ სინათლის გავრცელების მიმართულების ირგვლივ, მივიღებთ სხვადასხვა ინტენსივობის სინათლის ტალღებს. კუთხე რომელზეც უნდა დავატრიალოთ პოლარიზატორი იმისათვის, რომ ინტენსივობის მაქსიმუმიდან გადავიდეთ ინტენსივობის მინიმუმამდე  $\pi/2$  ტოლია. სინათლის ტალღის პოლარიზაციის ხარისხს ახასიათებს სიდიდე:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (55)$$

ბუნებრივი სინათლის ტალღის შემთხვევაში პოლარიზატორში გასული სინათლის ინტენსივობის მინიმუმი და მაქსიმუმი ტოლია  $I_{max} = I_{min}$  და ამიტომ  $P = 0$  ე.ი. ბუნებრივი სინათლის ტალღის პოლარიზაციის ხარისხი ნულის ტოლია.

ბუნებაში პოლარიზებული სინათლის ტალღა შეიძლება მივიღოთ სინათლის არეკვლის ან გარდატეხის გზით. ორი დიელექტრიკული გარემოს გამყოფ ზედაპირზე დაცემული სინათლის ტალღა როგორც ცნობილია იშლება არეკვლილ და გარდატეხილ სინათლის ტალღებად. როგორც ცდები გვიჩვენებენ, თითოეული ნაწილობრივ პოლარიზებულია. ამასთან, პოლარიზაციის ხარისხი დამოკიდებულია სინათლის ტალღის დაცემის კუთხეზე. თუ სინათლის დაცემის კუთხე  $\alpha = \alpha_{Br}$  რომლისათვისაც სრულდება პირობა:

$$\text{tg } \alpha_{Br} = n_{21} \quad (56)$$

სადაც  $n_{21}$  – სინათლის ამრეკლავი გარემოს ფარდობითი გარდატეხის მაჩვენებელია, მაშინ არეკვლილი სინათლის ტალღა სრულად პოლარიზებულია.

$\alpha_{Br}$  – ეწოდება ბრუსტერის კუთხე, ხოლო გამოსახულებას (56) – ბრუსტერის კანონი. ზემოთ მოყვანილ (55) განტოლებიდან შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ თუ სინათლის ტალღა მთლიანად პოლარიზებულია მაშინ  $I_{min} = 0$  და  $P = 1$ .

ნივთიერებები რომლებიც იწვევენ ბრტყლად პოლარიზებული სინათლის პოლარიზაციის სიბრტყის ბრუნვას, ოპტიკურად აქტიური ნივთიერებები ეწოდება. საინტერესოა რომ ცოცხალი სტრუქტურები აგებულია მხოლოდ ისეთ ნივთიერებებისაგან, რომლებიც პოლარიზაციის სიბრტყეს მარჯვნივ ატრიალებენ. პოლარიზაციის მოვლენას იყენებენ ხელსაწყოებში, რომლებსაც პოლარიმეტრები ეწოდებათ. მათი მეშვეობით შეიძლება განვსაზღვროთ ნივთიერების კონცენტრაცია. ამის გარდა, პოლარიზაციის მოვლენას იყენებენ ე.წ. პოლარიზაციულ მიკროსკოპებში. გამჭვირვალე ბიოლოგიური ობიექტების გასინჯვისას ჩვეულებრივ მიკროსკოპში ხშირად არ შეიმჩნევა მათი სხვადასხვა სტრუქტურები. ასეთ შემთხვევაში გამოიყენებენ პოლარიზაციულ მიკროსკოპებს. ისინი ჩვეულებრივი მიკროსკოპის ანალოგიურია, მაგრამ კონდენსორის წინ მოთავსებულია სინათლის პოლარიზატორი. მეორე პოლარიზატორი, რომელსაც ანალიზატორი ეწოდება მოთავსებულია მიკროსკოპის ობიექტივსა და ოკულარს შორის. სასაგნე მაგიდა ბრუნავს ოპტიკური ღერძის გარშემო. ე.ი. პოლარიზაციულ მიკროსკოპში საგანი ისინჯება პოლარიზებულ სინათლეში და საშუალებას იძლევა სხვადასხვა გარემოში აღმოვაჩინოთ ოპტიკური ანიზოტროპიები. ოპტიკური ანიზოტროპია ახასიათებს, მაგალითად, კუნთოვან, ძვლოვან და სხვა ქსოვილებს, ამიტომ მათი გასინჯვა შეიძლება პოლარიზაციული მიკროსკოპით.

## 9.5. ჰოლოგრაფია.

ადამიანი გარემომცველ სამყაროს შეიცნობს სხეულებიდან არეკლილი სინათლის ტალღების საშუალებით. ეს იმას ნიშნავს, რომ არეკვლილი სინათლის ტალღა ამრეკლი სხეულის შესახებ გარკვეულ ინფორმაციას შეიცავს. ეს ინფორმაცია ასახულია არეკვლილი ტალღის სტრუქტურაში, ე.ი. ტალღაში სიხშირის, ამპლიტუდისა და ფაზების განაწილებაში. ჩვეულებრივი ფოტოგრაფირებისას რეგისტრირდება მხოლოდ ტალღის ორი პარამეტრი: სიხშირე და ამპლიტუდა, მიიღება საგნის ორგანოზომილოვანი გამოსახულება. ფოტოგრაფირებისას ფაზების ფიქსირება არ ხდება. ამავე დროს სწორედ ფაზების განაწილებაშია ჩადებული ინფორმაცია სხეულის სივრცული სტრუქტურის შესახებ.

1948 წელს დ. გაბორმა წამოაყენა არეკვლილი სინათლის ტალღის ფოტოფირზე ფიქსირების ახალი მეტად ორიგინალური მეთოდი ფაზების განაწილების ფიქსირების გზით. ამ იდეის სრულად რეალიზება შესაძლო გახდა მხოლოდ მის შემდეგ, რაც შეიქმნა კოჰერენტული სინათლის ისეთი მძლავრი წყაროები როგორცაა ლაზერები. საქმე იმაშია, რომ კოჰერენტული ტალღები, რომლებიც მიიღებიან სინათლის ტალღის ორად გაყოფისას ერთი ფაზის მქონე სინათლის ტალღის ანუ ცუგის<sup>43</sup> საკმარის სიგრძეს ვერ უზრუნველყოფს, რაც სხვადასხვა ტალღების ზედდებას იწვევს. ამიტომ ზედდებული ტალღების ფაზათა სხვაობა მუდმივი არ არის რაც ზღუდავს ასეთი გზით ფოტოფირზე საგნიდან არეკვლილი სხივებში ფაზათა განაწილების დაფიქსირების შესაძლებლობას. რაც შეეხება ლაზერულ სხივს, მისი ცუგის სიგრძე ჩვეულებრივ სინათლესთან შედარებით (რომლის ცუგის სიგრძეა 3 მეტრია) პრაქტიკულად უსასრულოა და შესაბამისად ლაზერის სხივის ორად გაყოფით ყოველთვის სრულყოფილ ინტერფერენციულ სურათს მივიღებთ. ესე იგი საგნიდან არეკვლილ სხივში ფაზათა განაწილება საიმედოთ შეიძლება დავაფიქსიროთ. საბოლოო ანგარიშით შესაძლებელი ხდება ტალღის სამივე მახასიათებლის ფიქსირება, ანუ შესაძლებელი ხდება ფოტოფირზე არეკვლილი ტალღის სტრუქტურის დაფიქსირება.

ამ ფირის სათანადო ქიმიური დამუშავების შემდეგ სურათის – ჰოლოგრამის ძლიერი კოჰერენტული სხივით დასხივების შემთხვევაში აღდგება საგნის წარმოსახვითი გამოსახულება, რომელიც იმდენად მკაფიოა, რომ ხშირად ნამდვილისაგან ძნელად გასარჩევია. ზედაპირი რომელზეც ჰოლოგრამაა ჩაწერილი საინტერესო თვისებით ხასიათდება. კერძოდ, საგნის გამოსახულება ჩაწერილია მის ყოველ მცირე ნაწილში. ამიტომ საგნის სივრცული გამოსახულება შესაძლებელია აღვადგინოთ ნებისმიერი მცირე ნაწილიდან, თუმცა რეალურად ეს ძნელია, რათგან ამ დროს მცირდება გამოსახულების მომცემი სხივის ინტენსივობა რაც ამცირებს გამოსახულების ხარისხს.

ჰოლოგრამის ეს უნარი საშუალებას იძლევა მცირე ფართზე შევინახოთ უზარმაზარი ინფორმაცია. საინტერესოა აგრეთვე ჰოლოგრამის ზოგი სხვა თავისებურებაც. მაგ. თუ ერთ და იმავე ფირზე ორჯერ გადავიღებთ რაიმე საგნის ჰოლოგრამას, მაშინ მეორე წაშლის პირველს და დარჩება მხოლოდ ის ცვლილებები რაც საგანმა განიცადა ამ ორ გადაღების შორის დროის შუალედში. განსაკუთრებით საინტერესოა ის ფაქტი, რომ შესაძლებელია ჰოლოგრამა გადავიღოთ ერთი სიგრძის ტალღით ხოლო მისი აღდგენა მოვახდინოთ სხვა სიგრძის ტალღით. ე.ი. შესაძლებელია გადაღება მოვახდინოთ უხილავი სხივებით (ულტრაიისფერი ან ინფრაწითელი), ხოლო აღდგენა მოხდეს ხილული სინათლით.

ჰოლოგრაფიის პრინციპი საფუძვლად უდევს ჰოლოგრაფიულ მიკროსკოპიას, რაც საგნის გადიდებულ გამოსახულებასთან ერთად მის სივრცულ გამოსახულებას იძლევა.

<sup>43</sup> მეორეხადი აღზფოთებების შეზღუდულ მწკრივს ტალღის ცუგი ეწოდება.

ჰოლოგრაფიით შეიძლება დავაფიქსიროთ აგრეთვე უმცირესი გადაადგილება, ვინაიდან ერთ ფირზე გადაღებისას საბოლოოდ ფიქსირდება მხოლოდ ის გამოსახულება, რომელიც შეიცვალა მიიღება ბუნდოვანი (გადღაბნილი) ჰოლოგრამა და სწორედ ამ გადაღბნილობის ხარისხით შეიძლება გადაადგილების სიჩქარის დადგენა.

### **9.6. ბოჭკოვანი ოპტიკა.**

ტალღური ოპტიკის ელემენტებზე საუბარის დასასრულს ძალზე მოკლეთ შევეხოთ ბოჭკოვანი ოპტიკის საკითხებს. ეს ტექნოლოგია ეყრდნობა სინათლის ტალღის თვისებას განიცადოს სრული შინაგანი არეკვლა. როდესაც სინათლე თავისი გავრცელების გზაზე ერთ გარემოში, მიაღწევს მეორე უფრო ნაკლები სიმკვრივის გარემოს, და თუ დაცემის კუთხე აღემატება გარკვეულ (ზღვრულ) მნიშვნელობას, მაშინ ადგილი ექნება სრულ შინაგან არეკვლას. ე.ი. სინათლის ტალღა მეორე გარემოში არ გავრცელდება. ამ პრინციპზე დაყრდნობით თუ რაიმე გამჭვირვალე ნივთიერებისაგან დამზადებულ ბოჭკოს ეცემა სინათლის ტალღა გარკვეული კუთხით, მაშინ სხივი სრული შინაგანი არეკვლის გამო მიაღწევს ბოჭკოს მეორე მხარეს. გარემო, რომელიც აკრავს ბოჭკოს, ჰაერი, მართლაც უფრო ნაკლები სიმკვრივისაა. მაღალი ხარისხის ოპტიკურ ბიჭკოებში სინათლის ტალღის გავრცელებისას მისი ინტენსივობა მცირედ იცვლება, რაც კარგ პირობებს ქმნის ოპტიკური ბოჭკოების საინფორმაციო სისტემებში გამოყენებისათვის. მედიცინაში ბოჭკოვანი ოპტიკა გამოიყენება ინტროსკოპებში, ადამიანის შინაგანი ორგანოების დასათვალიერებლად. ამის გარდა ბოჭკოვანი ოპტიკას იყენებენ ორგანიზმში ლაზერული გამოსხივების შესაყვანად.

### **9.7. გეომეტრიული ოპტიკის ელემენტები.**

ზოგიერთი ოპტიკური ხელსაწყო მუშაობის პრინციპში გარკვევისას, საჭირო ხდება ოპტიკურ სისტემაში ე.წ. სხივების სვლის განხილვა. ამისათვის მასალის სრულყოფილი აღთქმისათვის უპრიანი იქნებოდა განვეხილა გეომეტრიული ოპტიკის ელემენტები. უფრო სწორედ, არა სრული გეომეტრიული ოპტიკის ნაწილი, არამედ მხოლოდ ლინზებში გამოსახულების ფორმირების პრინციპები.

ტრადიციულად ლინზა წარმოადგენს ორი გარდამტეხი პოლირებული ზედაპირის მქონე დეტალს, რომელიც გაკეთებულია ერთგვაროვანი გამჭვირვალე მასალისაგან. ეს ზედაპირები შეიძლება იყოს: ორივე სფერული, ან ერთი სფერული მეორე კი ბრტყელი. ლინზის მასალად ჩვეულებრივ ოპტიკურ მასალებს გამოიყენებენ – ასეთს როგორცაა ჩვეულებრივი თუ ოპტიკური მინები, კრისტალები, ოპტიკურათ გამჭვირვალე პლასტმასები და სხვა ამგვარი მასალა.

ფორმის მიხედვით არჩევენ შემკრებ (დადებითი) და გამბნევს (უარყოფითი) ლინზებს. შემკრები ლინზების ჯგუფს ჩვეულებრივ მიაკუთნებენ ლინზებს რომელთა შუა ნაწილი გვერდებზე სქელია, ხოლო გამბნევს ლინზებში კი პირიქით შუაგული გვერდებზე თხელია. უნდა აღინიშნოს, რომ ნათქვამი ეხება მხოლოდ იმ შემთხვევას, როდესაც ლინზის მასალის გარდატეხის მაჩვენებელი გარემოს მაჩვენებელზე მეტია. თუ ლინზის მასალის ეს პარამეტრი ნაკლებია გარემოს მაჩვენებელზე, სიტუაცია შემობრუნდება. მაგალითად ჰაერის ბუშტუკა წყალში წარმოადგენს ორმაგ ამოხნევილ გამბნევს ლინზას.

ლინზები, როგორც წესი, ხასიათდებიან ოპტიკური ძალით და ფოკუსური მანძილით.

ოპტიკური ძალა ეს არის სიდიდე, რომელიც განსაზღვრავს ღერძსიმეტრიული ლინზების და ასეთი ლინზებიდან შემდგარ ცენტრირებული ოპტიკური სისტემების

გარდატეხის შესაძლებლობას. იზომება დიოპტრიებში<sup>44</sup> (აღნიშვნა **დპტრ**): 1 დპტრ = 1 მ<sup>-1</sup>. დიოპტრია არ შედის ერთეულების საერთაშორისო (SI) სისტემაში, და მიეკუთვნება არასისტემურ ერთეულებს.

სისტემის ოპტიკური ძალა განისაზღვრება ფორმულით:

$$D = \frac{n_0}{f}$$

სადაც,  $f$  – სისტემის ფოკუსური მანძილია,  $n_0$  – სისტემის ირგვლივ მყოფი გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი.

**ფოკუსური მანძილი** ეს არის მანძილი ოპტიკური სისტემის ცენტრიდან მის მთავარ ფოკუსამდე, ხოლო ლინზის ფოკუსი – არის წერტილი რომელშიც იკრიფება ლინზის მიერ გარდატეხილი სხივები ან მათი გაგრძელება სისტემაზე მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად მათი ვარდნის შემდეგ.

ოპტიკური ძალა დადებითია შემკრებ ოპტიკურ სისტემებში და უარყოფითია გამბნევი სისტემების შემთხვევაში.

ფოკუსური მანძილიდან განსხვავებით, რომელიც ძირითადად გამოსახულების მასშტაბს განსაზღვრავს, ოპტიკური ძალა განსაზღვრავს სინათლის სხივების კონის შეკვრულობას, ანუ ფოკუსური მანძილის შებრუნებულ სიდიდეს. თუ კი ფოკუსური მანძილი მოცემულია სანტიმეტრებში, მაშინ ოპტიკურ ძალას დიოპტრიებში მივიღებთ 100-ის ფოკუსურ მანძილზე გაყოფის შემდეგ. შესაბამისად, თუ მოცემულია ოპტიკური ძალა შეიძლება ვიპოვოთ ფოკუსური მანძილი 100-ის გაყოფის შედეგად დიოპტრიებში გამოსახულ ოპტიკურ ძალაზე.

ოპტიკური ძალა ორი ლინზიდან შემდგარი სისტემის (ოპტიკური ძალები  $D_1$  და  $D_2$ ), რომელიც ჰაერში იმყოფება განისაზღვრება ფორმულით

$$D = D_1 + D_2 - dD_1D_2$$

სადაც,  $d$  – არის მანძილი პირველი ლინზის უკანა მთავარი სიბრტყისა და მეორე ლინზის წინა მთავარი სიბრტყის შორის. თხელი ლინზების შემთხვევაში ემთხვევა ლინზებს შორის მანძილს.

ლინზების ოპტიკური ძალის გასაზომად გამოიყენებენ დიოპტრიმეტრებს, რომლებიც ასევე ასტიგმატური და საკონტაქტო ლინზების გაზომვის საშუალებას იძლევიან.

ამოზნექილ-ჩაზნექილ ლინზას ეწოდება მენისკი და ის შეიძლება იყოს შემკრები (ცენტრისკენ სქელდება), გამბნევი (სქელდება ნაპირებისაკენ) ან ტელესკოპური (ფოკუსური მანძილი უსასრულობის ტოლია). ასე მაგალითად ახლომხედველების სათვალეები როგორც წესი უარყოფითი მენისკებია.

ერთნაირი რადიუსების მქონე მენისკის ოპტიკური ძალა არ უდრის ნულს, ის დადებითია და დამოკიდებულია მინის გარდატეხის მაჩვენებელზე და ლინზის სისქეზე. მენისკს რომლის ზედაპირების სიმრუდის ცენტრები იმყოფებიან ერთ წერტილში კონცენტრული ლინზა ეწოდება (ოპტიკური ძალა ყოველთვის უარყოფითია).

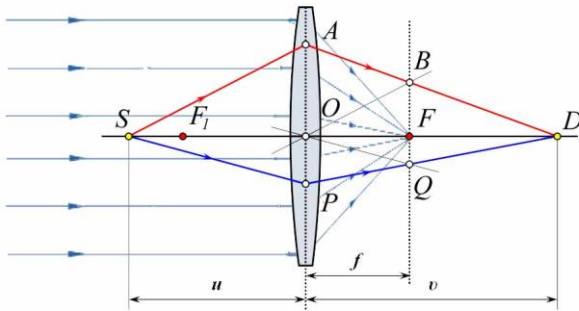
ხშირად ტექნიკაში გამოიყენება ცნება ლინზის (ლუპის) გადიდება და აღინიშნება როგორც  $2\times$ ,  $3\times$  და ა.შ. ამ შემთხვევაში, ლინზაში ძლიერ ახლო ყურებისას, გადიდება ითვლება ფორმულით:

$$\Gamma_d = \frac{F + d}{F} = \frac{d}{F} + 1$$

<sup>44</sup> 1 დიოპტრია უდრის ისეთი ლინზის ან სფერული სარკის ოპტიკურ ძალას, რომლის ფოკუსური მანძილი 1 მ ტოლია.

სადაც,  $F$  – ფოკუსური მანძილია,  $d$  – საუკეთესო ხედვის მანძილი (საშუალო ხნის ზრდასრული ადამიანისათვის ~ 25 სმ).

ლინზისათვის, რომლის ფოკუსური მანძილი 25 სმ გადიდება შეადგენს  $2\times$ . ლინზისათვის, რომლის ფოკუსური მანძილი 10 სმ გადიდება შეადგენს  $3,5\times$ .



სურ. 22. სხივების სვლა თხელ ლინზაში. ლინზაზე პარალელური სხივების დაცემისას ისინი გროვდებიან ლინზის ფოკალურ სიბრტყეში (პუნქტირის ხაზი BQ) მისი ოპტიკური ცენტრიდან  $f$  მანძილზე ( $F$  წერტილი). ლინზიდან  $u$  მანძილზე მყოფი  $S$  წერტილის გამოსახულება ( $F_1$  ფოკუსის მარცხნივ) ფორმირდება ლინზიდან  $v$  მანძილზე მარჯვენა მხარეს შეუღლებული ფოკუსის წერტილში ( $D$ ).

ლინზას, რომლის სისქე მიღებულია ნულის ტოლად, ოპტიკაში „თხელს“ ეძახიან. ასეთ ლინზისათვის უჩვენებენ არა ორ მთავარ სიბრტყეს, არამედ ერთს, რომელშიც ეს სიბრტყეები (წინა და უკანა) თითქოს ერთიანდებიან.

განვიხილოთ ნებისმიერი მიმართულების სხივების სვლელობის აგება თხელ შემკრებ ლინზაში (სურ. 22). ამისათვის გამოვიყენოთ თხელი ლინზის ორი თვისება:

1. ლინზის ოპტიკურ ცენტრზე გავლილი სხივი არ იცვლის თავის მიმართულებას;
2. ლინზაში გავლილი პარალელური სხივები იკრიფებიან ფოკალურ სიბრტყეში.

განვიხილოთ ნებისმიერი მიმართულების სხივი  $SA$ , რომელიც ეცემა ლინზას  $A$  წერტილში. ავავოთ მისი სვლის გზები ლინზაში გარდატეხის შემდეგ. ამისათვის გავავლოთ  $SA$ -ს პარალელური სხივი  $OB$ , რომელიც გადის ლინზის  $O$  ოპტიკურ ცენტრში. ლინზის პირველი წესის თანახმად სხივი  $OB$  არ შეიცვლის თავის მიმართულებას და გადაკვეთს ფოკალურ სიბრტყეს  $B$  წერტილში. ლინზის მეორე თვისების თანახმად მისი პარალელური სხივი  $SA$  გარდატეხის შემდეგ გადაკვეთს ფოკალურ სიბრტყეს იმავე წერტილში. ამ რიგად, ლინზაში გავლის შემდეგ სხივი  $SA$  წავა  $AB$  მიმართულებით.

ანალოგიურად შეიძლება სხვა სხივების აგებაც, მაგალითად სხივი  $SPQ$ .

ავღნიშნოთ  $SO$  მანძილი ლინზიდან სინათლის წყარომდე როგორც  $u$ , მანძილი  $OD$  ლინზიდან სხივების ფოკუსირების წერტილამდე როგორც  $v$ , ფოკუსური მანძილი  $OF$  როგორც  $f$ . გამოვიყვანოთ ამ სიდიდეების დამაკავშირებელი ფორმულა.

განვიხილოთ მსგავსი სამკუთხედების ორი წყვილი:  $\Delta SOA$  და  $\Delta OFB$ ,  $\Delta DOA$  და  $\Delta DFB$ . ჩავწეროთ პროპორციები

$$\frac{OA}{u} = \frac{FB}{f}; \quad \frac{OA}{v} = \frac{FB}{v-f}$$

პირველი პროპორციის გაყოფისას მეორეზე მივიღებთ

$$\frac{v}{u} = \frac{v-f}{f}; \quad \frac{v}{u} = \frac{v}{f} - 1$$

გამოსახულების ორივე ნაწილის  $v$ -ზე გაყოფის და წევრების გადაჯგუფების შემდეგ მივდივართ საბოლოო ფორმულამდე

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$



სადაც  $f$  – თხელი ლინზის ფოკუსური მანძილია.

ჩვენს მიერ მიღებული გამოსახულება ცნობილია ლინზის ფორმულის სახელით.

უნდა აღინიშნოს, რომ  $u$ ,  $v$  და  $f$  სიდიდეების ნიშნები ისმევა შემდეგი მოსაზრებებიდან გამომდინარე:

- ნამდვილი საგნის ნამდვილი გამოსახულებისათვის შემკრებ ლინზაში ყველა ეს სიდიდე დადებითია.
- თუ გამოსახულება წარმოსახვითია – გამოსახულებამდე მანძილი მიიღება უარყოფითად.
- თუ საგანი წარმოსახვითია – მანძილი საგნამდე უარყოფითია.
- თუ ლინზა გამბნევიანია – ფოკუსური მანძილი უარყოფითია.

### **9.8. მხედველობა.**

როგორც უკვე აღინიშნა, ჩვენში შემოსული ინფორმაციის შეფარდებითი წილის მიხედვით, „ვიზუალური“ შეადგენს მისი საერთო რაოდენობის 80 დან 90 %-მდე. ეს ინფორმაცია საკმაოდ რთული გზით მოგვევლინება. პირველყოვლისა საჭიროა სპეციალური ორგანოს არსებობა, რომელსაც შეუძლია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების (სინათლის ტალღების) აღქმა – თვალის. სინათლის ტალღის აღქმის შემდეგ, არსებობს მოვლენათა განვითარების ორი გზა. იმის გამო, რომ თვალში სინათლის დეტექტორების სივრცული განლაგება (თუ კი ის მოხერხდა) ადებს გარკვეულ შეზღუდვებს „ხედვის სიღრმეზე“, გამოსახულების აღქმისათვის ყველაზე მარტივია მისი ორგანოში მიღებულ პროექციებში გადაყვანა. შემდეგ კი, პროექციების სპეციალური ანალიზის მეშვეობით (ამაზე ოდნავ მოგვიანებით ვისაუბრებთ) შეიძლება სივრცული, სამგანზომილებიანი გამოსახულების აღდგენა. სხვადასხვა პროექციების მიღება შეიძლება განხორციელდეს ერთი (მაგალითად, ფასეტური ხედვა მწერებში), ან რამდენიმე თვალით, რომლებიც მოაგროვებენ ინფორმაციას ობიექტის სხვა და სხვა პროექციების შესახებ. მაგრამ ყველაზე საინტერესო არის ის, რომ შეიძლება მხოლოდ ორი თვალის გამოყენება, ხოლო პროექციების რაოდენობა (აპროქსიმაციების და ინტერპოლაციების მეშვეობით) გაიზარდოს უკვე შემდეგ, ინფორმაციის თავის ტვინში ანალიზის დროს. შემდეგი ნაბიჯი ეს უკვე პროექციების შეჯერებაა და სამგანზომილებიანი ობიექტის რეკონსტრუქცია. ორი ბოლო ნაბიჯი (აპროქსიმაცია-ინტერპოლაცია და რეკონსტრუქცია) გულისხმობს ცოცხალი სისტემის ორგანიზების საკმაოდ მაღალ დონეს (ძუძუმწოვრებში) და ჩვენთვის უდიდეს ინტერესს წარმოადგენს. ამიტომაც მხედველობაზე საუბრისას (ხილული ინფორმაციის მიღების შესახებ), ჩვენ ვიხილავთ სწორედ მაღალორგანიზებულ ცოცხალ სისტემებს.

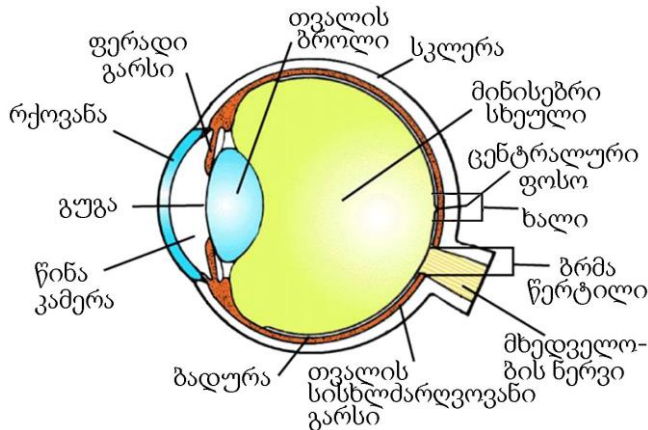
ამრიგად, ვიზუალური ინფორმაციის მიღება შეიცავს სამ ეტაპს:

1. სამგანზომილებიანი (3D) ობიექტის ორგანოში მიღებული (2D) პროექციის მიღება (თვალი);
2.  $n$ -რაოდენობის პროექციების მიღება (2 პროექცია თვალებით, შემდეგ კი გამოსახულების აპროქსიმირება თავის ტვინში);
3. პროექციების ანალიზის შედეგად სამგანზომილებიანი გამოსახულების მიღება (თავის ტვინი).

ვინაიდან ჩვენ გვინტერესებს სწორედ ჩვენი გრძნობის ორგანოებით მიღებული ინფორმაცია, განხილვის საგნათ უნდა იქცეს ადამიანის თვალი.

## ადამიანის თვალი. 2D პროექციის მირება.

თვალის კაკალი (bulbus oculi) მიახლოებით სფერული ფორმის სხეულია (სურ. 23); მისი დიამეტრი ~2,5 სმ. თვალის კაკლის კედელი ანატომიურად და ფუნქციურად სამი გარსისგან შედგება.



სურ. 23. ადამიანის თვალის სქემატური ქრილი.

- გარეთა მკვრივი ფიბრიზული გარსი (tunica fibrosa bulbi) შედგება ბოჭკოვანი შემაერთებული ქსოვილისგან მისი უკანა ნაწილი თეთრი ფერისაა და მას გარსი ანუ სკლერა (ლათ. sclera) ეწოდება. უფრო მცირე წინა ნაწილი ანუ რქოვანი (ლათ. cornea) გამოდრეკილია და გამჭვირვალე; იგი არ შეიცავს სისხლის ძარღვებს მასში უხვადაა ნერვული დაბოლოებები რის გამოც ძალიან მგრძნობიარეა.
- თვალის კაკლის შუა ანუ სისხლძარღვოვანი გარსი (tunica vasculosa bulbi) იყოფა სამ ნაწილად: წინას ეწოდება ფერადი გარსი (ლათ. iris).
- უკანა — სისხლძარღვოვანი გარსი (chorioida).

ფერადი გარსის შუა ადგილას მოთავსებულია ხვრელი – გუგა (ლათ. pupilla) მის სისქეში მოთავსებულია გლუვკუნთოვანი ბოჭკოები, რომელთა ერთი ნაწილი განლაგებულია გუგის ირგვლივ ცირკულარულად და შეადგენს გუგის შემავიწროებელ კუნთს ხოლო, მეორე ნაწილი – სხივისებურად და ქმნის გუგის გამაგანიერებელ კუნთს. ორივე კუნთის ინერვაცია წარმოებს ვეგეტატიური ნერვული სისტემიდან ამასთან შემავიწროებელ კუნთს აინერვირებს თვალის მამოძრავებელი ნერვის შემადგენლობაში მყოფი პარასიმპათიური ბოჭკოები, გამაგანიერებელ კუნთს კი სიმპათიური ბოჭკოები. ასე რომ, ფერად გარსს შეუძლია დეფორმირება და ამითი გუგას დიამეტრის ცვლა. ეს ცვლილება რეფლექტორულია და დამოკიდებულია თვალში შესული სინათლის რაოდენობაზე; ძლიერი განათების შემთხვევაში გუგას დიამეტრი 2 მმ, ხოლო დაბალზე – 8 მმ. ფერადი გარსი შეიცავს პიგმენტს, რომლის რაოდენობაც ცვალებადია და განსაზღვრავს თვალის ფერს.

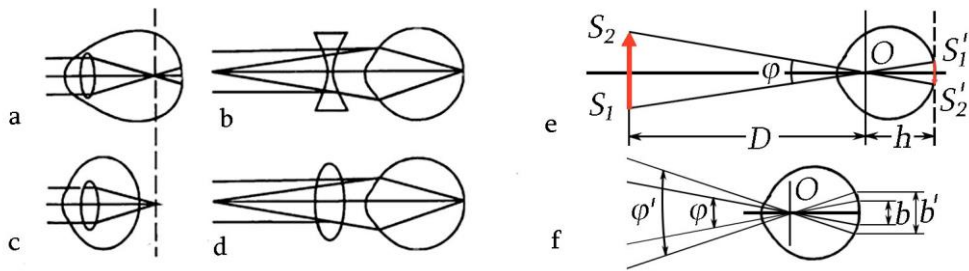
თვალის კაკლის შინაგანი გარსი ანუ ბადურა (ლათ. retina) წარმოადგენს მხედველობის ნერვის პერიფერიულ აპარატს. მიუხედავად იმისა, რომ ბადურა მეტად თხელია, მისი ჰისტოლოგიური აგებულება განსაკუთრებული სირთულით გამოირჩევა. ბადურას ფერისა და სინათლის შემგრძნებ ელემენტებს წარმოადგენს სპეციალიზებული ნერვული უჯრედები, კოლბები და ჩხირები კოლბების საერთო რაოდენობა შვიდი მილიონია, ჩხირების ოცდაათი მილიონი. მხედველობის ნერვის თვალის კაკალში შესვლის ადგილი იმყოფება ღერძის უკანა ბოლოს ოდნავ მედიალურად. თვალის

ფსკერზე იგი ქმნის მრგვალ გორაკს, რომელსაც მხედველობის ნერვის დისკო (discus nervi optici) ეწოდება. ეს ადგილი თეთრი ფერისაა და მასში ცოტაა სინათლის მიმღები ნერვული უჯრედები. დისკოდან 4 მილიმეტრის დაშორებით თვალის კაკლის უკანა პოლუსში, მდებარეობს ხალი (ლათ. macula), რომელიც წარმოადგენს უმახვილესი მხედველობის ადგილს. ხალის ცენტრში არის მომცრო ორმო, რომელსაც ცენტრალური ფოსო (fovea centralis) ეწოდება. ბადურას ნერვული უჯრედების მორჩები შედის მხედველობის ნერვის შემადგენლობაში, რომელიც მიემართება ქალას ღრუში მხედველობის ხვრელით. მხედველობის ნერვის შუა ღერძის გასწვრივ გაივლის ბადურას ცენტრალური არტერია, რომელიც კვებავს გარსს. მხედველობის ნერვი გარშემორტყმული ტვინის სამივე გარსით, რომლებიც ქმნიან მის ბუდეებს და შემდეგ უკავშირდებიან სკლერას. თვალის კაკლის კედელი გარს ერტყმის თვალის გამჭვირვალე ბირთვს, რომელსაც შეადგენს ბროლი -(lens cristallina) წარმოადგენს ორმხრივ გამოდრეკილ სხეულს. მისი უფერო ნივთიერება შედგება ცენტრალურად მდებარე შედარებით მკვრივი ბირთვისგან და პერიფერიულად მოთავსებული რბილი, ანუ ქერქოვანი ნივთიერებისგან. გარედან ბროლი დაფარულია თხელი და გამჭვირვალე ჩანთით, რომელსაც ბროლის კაფსულა ეწოდება. თავის ეკვატორული კიდის გასწვრივ ბროლი დაკავშირებულია წამწამოვან სხეულთან ირგვლივი იოგით, რომელსაც წამწამოვანი სარტყელი ეწოდება. ამ იოგის დაჭიმვა ან მოდუნება იწვევს ბროლის გარდატეხის უნარის შეცვლას. ამ პროცესს რომლის შედეგადაც საგანი ზუსტად აისახება ბადურაზე აკომოდაცია ეწოდება. რაც უფრო ახლოა საგანი, მით უფრო მეტი უნდა იყოს ბროლის გამოდრეკილობა; ამას ხელს უწყობს წამწამოვანი კუნთის შეკუმშვით გამოწვეული წამწამოვანი სარტყლის მოდუნება. სფერული ფორმის მინისებრი სხეული (corpus vitreum) ავსებს თვალის კაკლის ღრუს იმ ნაწილს, რომელიც ბროლის უკან მდებარეობს. მის წინა ნაწილში აღინიშნება ჩაღრმავება, რომელშიც მოთავსებულია ბროლი. მინისებრი სხეულის ჟელატინისმაგვარი მასა შედგება უწვრილესი ბოჭკოების ბადისგან, რომელთა შორის სივრცეები ამოვსებულია სითხით. გარედან დაფარულია თხელი გარსით, რომელსაც ეწოდება მინისებრი გარსი. ისევე როგორც ბროლი მინისებრი სხეულიც მოკლებულია სისხლის ძარღვებს. ნამი (humor aqueus) წარმოადგენს ცილის უმნიშვნელო რაოდენობის შემცველ სითხეს, რომელიც გამოიყოფა წამწამოვანი მორჩების და ფერადი გარსის სისხლის ძარღვების მიერ. ნამით ამოვსებულია ბროლის წინა მდებარე და ერთმანეთთან დაკავშირებული ორი მომცრო სივრცე, ანუ თვალის საკნები (camerae bulbi). წინა საკანი მოთავსებულია რქოვანასა და ფერად გარსს შორის, უკან კი - ფერად გარსს და წამწამოვან სარტყელს შორის. საკნები ერთმანეთთან არიან დაკავშირებული გუგის საშუალებით. სინათლის სხივებმა ვიდრე ისინი ბადურას მიაღწევენ უნდა გაიარონ: რქოვანა, წინა სენაკის ნამი, ბროლი და მინისები სხეული.

თავისი აგებულებით თვალი, როგორც ოპტიკური სისტემა, წააგავს ფოტოაპარატს. ობიექტივის როლს ასრულებს თვალის ბროლი წინა კამერის და მინისებრი სხეულის გარდამტეხი გარემოსთან ერთად. გამოსახულება მიიღება ბადურის შუქმგრძნობიარე ზედაპირზე. მკვეთრი გამოსახულების მიღება ხორციელდება აკომოდაციის გზით. და ბოლოს, გუგა ასრულებს დიამეტრში ცვალებადი დიაფრაგმის როლს. თვალის აკომოდაციის უნარი უზრუნველყოფს ბადურაზე, სხვა და სხვა მანძილებზე მყოფი საგნების მკვეთრი გამოსახულების მიღებას. ნორმალური თვალი, მოსვენებულ მდგომარეობაში, ანუ აკომოდაციით მიღებული გამდიერების გარეშე, იძლევა ბადურაზე მოშორებული ობიექტების (მაგალითად, ვარსკვლავების) მკაფიო გამოსახულებას. კუნთების დაძაბვის მეშვეობით, რომლებიც ზრდიან თვალის ბროლის სიმრუდის რადიუსს, და მაშასადამე ამცირებს მის ფოკუსურ მანძილს, თვალი ახორციელებს საჭირო მანძილის დაყენებას.

უმცირესი მანძილი, რომელზეც ნორმალურ თვალს შეუძლია მკაფიოდ დაინახოს საგნები, იცვლება ასაკის მიხედვით 10 სმ-ან (20 წ ასაკამდე) 22 სმ-მდე (დაახლოებით 40 წ ასაკისათვის). უფრო ხანდაზმულებში თვალის აკომოდაციის უნარი კიდევ უფრო მცირდება: უმცირესი მანძილი აღწევს 30 სმ და მეტს – ასაკობრივი შორსმხედველობა.

ნორმალური მხედველობა სულაც არაა დამახასიათებელი ყველა ადამიანისათვის. არც თუ ისე იშვიათია, როდესაც თვალის უკანა ფოკუსი მოსვენებულ მდგომარეობაში იმყოფება არა თავად ბადურაზე (როგორც ნორმალურ თვალში), არამედ მის ამა თუ იმ მხარესაა მოქცეული. თუ თვალის ფოკუსი მოსვენებულ მდგომარეობაში თვალის შიგნით, ბადურას წინ იმყოფება (სურ. 24a), მაშინ თვალს ახლომხედველი ეწოდება. ასეთ თვალს არ შეუძლია მკაფიოდ დაინახოს მოშორებული საგნები, ვინაიდან კუნთების დამაბზვა აკომოდაციის დროს, კიდევ უფრო აშორებს ფოკუსს ბადურის ზედაპირს. ახლომხედველობის გასასწორებლად საჭიროა გამბნევი ლინზის გამოყენება (სურ. 24b).



სურ. 24. თვალის ახლომხედველობა (a) სწორდება გამბნევი ლინზის მეშვეობით (b); შორსმხედველობა (c) — შემკრებით (d). (e) ხედვის კუთხის ილუსტრაცია ( $\varphi = S_1 S_2 / h = S_1 S_2 / D$ ); (f) ხედვის კუთხის გაზრდისას იზრდება საგნის გამოსახულება ბადურაზე ( $N = b' / b = \varphi' / \varphi$ ).

შორსმხედველ თვალში, ფოკუსი მოსვენებულ მდგომარეობაში იმყოფება ბადურის უკან (სურ. 24c). სხივის გარდატეხა ამ დროს ნორმალურთან შედარებით უფრო მცირეა. ძალზე მოშორებულ საგნებზე ცქერის დროსაც კი, შორსმხედველ თვალს გარკვეული ძალისხმევა სჭირდება. რაც შეეხება ახლომდებარე საგნებს, აკომოდაციური შესაძლებლობა აქ უკვე არაა საკმარისი. ამიტომ, შორსმხედველობის გასასწორებლად გამოიყენებენ სათვალეს შემკრები ლინზებით (სურ. 24d), რომელიც მოსვენებულ მდგომარეობაში დაიყვანს თვალის ფოკუსს ბადურაზე.

დროა განვიხილოთ თვალის შესაიარაღებლად საჭირო ოპტიკური ხელსაწყოები.

მიუხედავად იმისა, რომ თვალი არ წარმოადგენს თხელ ლინზას, მასში შეიძლება მოინახოს წერტილი, რომელშიც სხივები პრაქტიკულად უცვლელად გადიან, ანუ წერტილი, რომელიც მოგვევლინება ოპტიკური ცენტრის სახით. თვალის ოპტიკური ცენტრი იმყოფება თვალის ბროლში, მისი უკანა ზედაპირის მახლობლად. მანძილი  $h$  ოპტიკური ცენტრიდან ბადურამდე (სურ. 24e), რომელსაც თვალის სიღრმე ეწოდება, ნორმალური თვალისათვის შეადგენს 15 მმ.

ოპტიკური ცენტრის მდებარეობის ცოდნა საშუალებას იძლევა თვალის ბადურაზე აიგოს რაიმე საგნის გამოსახულება. მიღებული გამოსახულება ყოველთვის ნამდვილი, შემცირებული და გადაბრუნებულია (სურ. 24e). კუთხე  $\varphi$ , რომლითაც თვალის ოპტიკური ცენტრიდან ( $O$ ) ჩანს  $S_1 S_2$  საგანი, ხედვის კუთხე ეწოდება.

თვალის ბადურა რთული აგებულებისაა და შედგება ცალკეული შუქმგრძობიარე ელემენტისაგან. ამიტომაც, თუ ობიექტის ორი წერტილი ისე ახლოსაა ერთმანეთთან, რომ ბადურაზე მათი გამოსახულება ერთსა და იმავე ელემენტში მოხვდება, მაშინ ისინა თვალით აღიქმება როგორც ერთი წერტილი. მინიმალური ხედვის კუთხე, რომელზეც

ორი განათებული წერტილი, ან ორი შავი წერტილი თეთრ ფონზე აღიქმება თვალით განცალკევებულად, შეადგენს დაახლოვებით ერთ წუთს.

თვალი ცუდათ არჩევს იმ საგნის დეტალებს, რომელსაც ის უცქერის 1' ნაკლები კუთხით. ეს არის კუთხე, რომლითაც ჩანს 1 სმ სიგრძის მონაკვეთი თვალიდან 34 მ მანძილზე. ცუდი განათების შემთხვევაში (ბინდზე) გარჩევადობის მინიმალური კუთხე იზრდება და შეიძლება 1° მიაღწიოს.

საგნის თვალთან მიახლოებისას ჩვენ ვზრდით ხედვის კუთხეს, და მაშასადამე ვიძენთ შესაძლებლობას უკეთ გავარჩიოთ წვრილი დეტალები. მაგრამ, თვალთან ძალიან ახლოს საგანს ვერ მივიტანთ, ვინაიდან მისი აკომოდაციის შესაძლებლობა შეზღუდულია. ნორმალური თვალისათვის საგანზე ცქერის ყველაზე ხელსაყრელი აღმოჩნდა მანძილი 25 სმ, რომელზეც თვალი საკმაოდ კარგად არჩევს დეტალებს და თანაც ძალიან არ იღლება. ამ მანძილს ეწოდება საუკეთესო ხედვის მანძილი. ახლომხედველი თვალისათვის ეს მანძილი ნაკლებია. ამიტომ ახლომხედველი ადამიანები, მოათავსებენ რა საგანს თვალთან უფრო ახლოს, ვიდრე ამას აკეთებენ ნორმალური თვალის მქონე ადამიანები, ან შორსმხედველები, ხედავენ მას უფრო დიდი ხედვის კუთხით და შეუძლიათ უკეთ გაარჩიონ წვრილი დეტალები.

ხედვის კუთხის მნიშვნელოვანი ზრდა ხორციელდება ოპტიკური ხელსაწყოების დახმარებით. ეს ხელსაწყოები, თავისი დანიშნულებით, შეიძლება დაიყოს შემდეგ ორ დიდ ჯგუფად.

1. ხელსაწყოები, რომლებიც გამოიყენება ძალიან წვრილი საგნების დათვალისა დათვალის (ლუპა, მიკროსკოპი). ეს ხელსაწყოები თითქოს და „ადიდებენ“ გასასინჯ საგნებს.
2. ხელსაწყოები, რომლებიც გამოიყენება დაშორებული ობიექტების შესწავლისას (ჭოგრი, დურბინი, ტელესკოპი და ა.შ.). ეს ხელსაწყოები თითქოს და „გვიახლოვებენ“ შესასწავლ საგნებს.

ოპტიკური ხელსაწყოების გამოყენების დროს, ხედვის კუთხის გაზრდის გამო, საგნის გამოსახულების ზომები ბადურაზე იზრდება შეუიარაღებელი თვალის მიღებული გამოსახულებასთან შედარებით და მაშასადამე იზრდება დეტალების გარჩევის შესაძლებლობაც. შეიარაღებული თვალის ბადურაზე მიღებული გამოსახულების  $b'$  სიგრძის შეფარდებას შეუიარაღებული თვალის მიღებული გამოსახულების  $b$  სიგრძესთან (სურ. 24f) ოპტიკური ხელსაწყოს გადიდებას უწოდებენ.

მაშ ასე, ერთი თვალის მეშვეობით ჩვენ აღვიქვავთ სამგანზომილებიანი ობიექტის ორგანზომილებიან პროექციას, რომელიც აისახება თვალის ბადურის ზედაპირზე. რომ არ არსებობდეს გარე სამყაროს სივრცული აღქმის შესაძლებლობა, ჩვენი ცხოვრება ამ სამყაროში დიდ სირთულეებთან იქნებოდა დაკავშირებული. პირველ ყოვლის ეს ძალიან გაართულებდა ჩვენ სივრცულ ორიენტაციას. ამ ფაქტის გააზრებისათვის სცადეთ ერთი თვალის ახვევა და თქვენთვის უცნობ გარემოში გასვლა. ბოლო პირობის შესრულება აუცილებელია, ვინაიდან ნაცნობი გარემო უკვე აღბეჭდილია თქვენს გონებაში (იმყოფება თქვენ თავში არსებულ „მონაცემთა ბაზაში“) და ექსპერიმენტი ჩაიშლება. თქვენ დარწმუნდებით რომ ეს საკმაოდ რთულია, ვინაიდან თხვენი სამყარო აღმოჩნდება ბრტყელი (ორგანზომილებიანი). ისმის კითხვა, თუ როგორ იქმნება სივრცული სურათი? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემათ განვიხილოთ პირველ ყოვლისა პროექციების ფორმირების პრინციპები, რისთვისაც ჩვენ დაგვჭირდება ტომოგრაფიის საწყისებში გარკვევა.

## ტომოგრაფია.

**ტომოგრაფია** (ბერძ. კვეთი) – ობიექტის შიდა სტრუქტურის ფენოვანი გამოსახულების მიღება. ანსხვავებენ მის ორ სახეობას: ანატომიურსა და რეკონსტრუირებულს.

### **ანატომიური ტომოგრაფია.**

ანატომიური, ან დამანგრეველი ტომოგრაფია (ბიოტომია) ეფუძნება გამოსაკვლევი ორგანიზმის კვთების ფიზიკურ შესრულებას, მათი შემდგომი ფიქსაციით ქიმიური ნივთიერებების გამოყენებით. ანატომიური ტომოგრაფიის კლასიკურ მაგალითს წარმოადგენენ პიროგოვის კვთები და ჰისტოლოგიური პრეპარატების გამოსახულებები. ორგანიზმის ფორმის შესანარჩუნებლად კვთების გაკეთების პროცესში, ის ფიქსირდება, მაგალითად გაყინვის გზით.

### **რეკონსტრუქტიული ტომოგრაფია.**

რეკონსტრუქტიული, ან არადამანგრეველი ტომოგრაფია – ესაა მეტი განზომილების მქონე ობიექტში, მისი ნაკლებ განზომილობის მქონე პროექციების მეშვეობით ამა თუ იმ გზით ინფორმაციის მიღება სასურველი პარამეტრის განაწილების შესახებ, ობიექტის დაზიანების გარეშე; წარმოადგენს ანატომიური ტომოგრაფიის ანტონიმს. ეს ცნება შეიცავს ანალოგურ რეკონსტრუქტიულ ტომოგრაფიას და გამოთვლით (კომპიუტერულ) ტომოგრაფიას.

**ანალოგური რეკონსტრუქტიული ტომოგრაფია** – წარმოადგენს რეკონსტრუქტიულ ტომოგრაფიას, რომელიც გამოიყენებს ობიექტის პარამეტრის განაწილების აღსადგენად არა ციფრულ, არამედ ანალოგურ მოწყობილობებს (მაგალითად ოპტიკურებს).

მეთოდი იყო შემოთავაზებული 1921 წლის დასაწყისში რენტგენოლოგიური კვლევებისათვის ფრანგ ექიმ ბოკაჟეს მიერ და რეალიზებული აპარატის სახით (რომელსაც „ტომოგრაფი“ დაარქვეს) იტალიელი ინჟინერი ვალეზონოს მიერ (1930 წ). აპარატი შედგებოდა რენტგენოგრაფიის სამი კომპონენტისაგან: რენტგენის მილის, რენტგენის ფირის და კვლევის ობიექტისაგან, რომლებშიც პირველი ორი მოძრავი იყო. ტომოგრაფი იძლეოდა ერთ სურათს – გამოსაკვლევი ობიექტის ამორჩეულ სიღრმეზე მყოფი ფენის გამოსახულებას. ყველაზე გავრცელებული იყო გადაღების მეთოდი, რომელშიც კვლევის ობიექტი უძრავი რჩებოდა, ხოლო რენტგენის მილი და კასეტა ფირით შეთანხმებულად მოძრაობდნენ საპირისპირო მიმართულებებით. კასეტის და მილის სინქრონული მოძრაობის შემთხვევაში მკვეთრი გამოსახულება მიიღებოდა მხოლოდ ამორჩეული ფენისათვის, ვინაიდან მხოლოდ მისი შენატანი საერთო ექსპოზიციაში ფირთან მიმართებაში უძრავი რჩებოდა, ყველა დანარჩენი გამოსახულება იღდაბნებოდა და თითქმის არ უშლიდა სურათის ანალიზის ჩატარებას. მეთოდმა მიიღო **კლასიკური ტომოგრაფიის** სახელი (წრფიული ტომოგრაფია).

**გამოთვლითი ტომოგრაფია** – მათემატიკის დარგი, რომელიც აწვითარებს ობიექტის შიდა სტრუქტურის რეკონსტრუქციის მათემატიკურ მეთოდებს და ალგორითმებს მისი პროექციული მონაცემების მიხედვით. ეს მონაცემები წარმოადგენენ ობიექტის ციფრულ სურათებს, რომელიც კეთდება სხვა და სხვა გადამკვეთი მიმართულებებით მისი მრავალჯერადი გაშუქებისას. როგორც წესი, შიდა სტრუქტურა წარმოადგენილია ვოქსელურ<sup>45</sup> ფორმაში. პროექციული სურათების მასივიდან ვოქსელების მასივის მიღებას *პირდაპირი ტომოგრაფიული ამოცანა* ეწოდება.

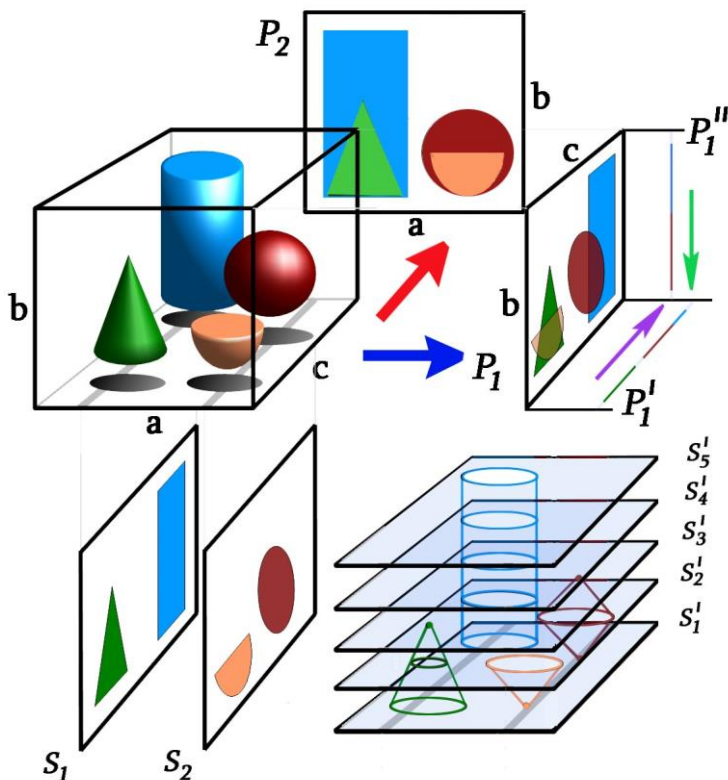
ცნობილია რამდენიმე ათასი ალგორითმი, რომლებიც გამოიყენება გამოთვლით (რეკონსტრუქტიულ) ტომოგრაფიაში. მაგრამ თვით პრობლემის ამოსახსნელად შეიძლება გამოვიყენოთ ორი მიდგომა: რეკონსტრუქცია უკუ (ფურიე) ან პირდაპირ სივრცეში. უფრო დაწვრილებით ეს საკითხები გაიშუქება მოგვიანებით, თავში, რომელიც მიძღვნი-

<sup>45</sup> **ვოქსელი** (ინგ. *Voxel* – შედგება ორი სიტყვისაგან: მოცულობითი (ინგ. *volumetric*) და პიქსელი (ინგ. *pixel*) – მოცულობითი გამოსახულების ელემენტი, რომელიც შეიცავს რასტრის ელემენტის მნიშვნელობას სამგანზომილებიან სივრცეში.

ლია ობიექტების სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციას. ეხლა კი შეუდგეთ საკვანძო საკითხების განმარტებას:

- რა არის პროექცია;
- სხვა და სხვა პროექციების მიღების პრინციპები;
- პროექციების მიმართულება.

სურ. 25-ზე მოყვანილია სამგანზომილებიანი ობიექტების ჯგუფი: ცილინდრი, სფერო, ნახევარსფერო და კონუსი ორი ურთიერთპერპენდიკულარული ორგანზომილებიანი ( $P_1$  და  $P_2$ ) და ორი ერთგანზომილებიანი ( $P'_1$  და  $P''_1$ ) პროექციით. უნდა აღინიშნოს, რომ ყველა შესაძლო პროექციების რაოდენობა უსასრულოა. სურათზე პროექციების მიმართულებებს ასახავენ ფერადი ისრები. პროექციების ყოველი მომდევნო ნაბიჯს თან ახლავს საწყისი განზომილობის ერთით შემცირება.



სურ. 25. ტომოგრაფიის პრინციპი.

მოყვანილია სამგანზომილებიანი ობიექტების ჯგუფი, მათი ორგანზომილებიანი –  $P_1$  (პროექციების მიმართულება ლურჯი ფერის ისრითაა ნაჩვენები) და  $P_2$  (პროექციების მიმართულებას წითელი ისარი უჩვენებს) და ორი ერთგანზომილებიანი  $P'_1$  (პროექციების მიმართულებას მწვანე ფერის ისარი უჩვენებს) და  $P''_1$  (პროექციების მიმართულება იისფერი ისრითაა ნაჩვენები) პროექციები. ასევე ნაჩვენებია ვერტიკალური –  $S_1$  და  $S_2$  და ჰორიზონტალური –  $S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5$  კვეთები.

მაშ ასე, სამგანზომილებიანი ობიექტიდან – სიგანე (a), სიმაღლე (b) და სიღრმე (c) პროექციების პირველ ნაბიჯზე  $P_1$  პროექციის შემთხვევაში (პროექციების მიმართულებას უჩვენებს ლურჯი ფერის ისარი) ვაშორებთ სიგანეს (a), ხოლო  $P_2$  პროექციის შემთხვევაში (წითელი ფერის ისარი) – სიღრმეს (c). პირველ შემთხვევაში ორგანზომილებიანი პროექცია ხასიათდება სიმაღლითა და სიღრმით (მეტრიკა b,c), მეორეში კი – სიგანით და სიმაღლით (a,b). პროექციების მეორე ნაბიჯზე ორგანზომილებიანი  $P_1$  ობიექტიდან ერთგანზომილებიანი  $P'_1$  პროექციის მიღებისას (პროექციების მიმართულებას უჩვენებს მწვანე ფერის ისარი) ვაშორებთ სიმაღლეს (b), ხოლო  $P''_1$  პროექციის მიღებისას (იისფერი ისარი) ვაშორებთ სიღრმეს (c). უნდა მიექცეს ყურადღება, რომ ერთგანზომილებიანი პროექციაში მიღებული მონაკვეთები ხასიათდება მხოლოდ სიგრძით (მონაკვეთის სისქე ნულის ტოლია). ანუ, პროექციების ყოველ მომდევნო ნაბიჯზე პროექციის მიმართულებიდან გამომდინარე შორდება ერთ-ერთი კოორდინატა (მეტრიკა) და მასთან ერთად მასში მყოფი ინფორმაციაც. მაგრამ გამოსახულებების რეკონსტრუქციის დროს

(ერთგანზომილებიანი პროექციიდან ორგანზომილებიანში და ორგანზომილებიანი პროექციიდან სამგანზომილებიან გამოსახულებაში) ეს ინფორმაცია შეიძლება აღდგენილი იქნას სხვა პროექციებიდან გამომდინარე.

განვიხილოთ თუ როგორ ფორმირდება პროექციები. როგორც სურ. 25-დან ჩანს პროექციებზე ჩვენ ვღებულობთ გამოსახულებების ზედღებას:

- პროექცია  $P_1$  – ცილინდრის პროექციის (მართკუთხედის) ზედღება სფეროს პროექციაზე (წრეზე), და კონუსის პროექციის (სამკუთხედის) ზედღება ნახევარსფეროს პროექციაზე (ნახევარწრეზე).
- პროექცია  $P_2$  – კონუსის პროექციის (სამკუთხედის) ზედღება ცილინდრის პროექციაზე (მართკუთხედზე) და ნახევარსფეროს პროექციის (ნახევარწრის) ზედღება სფეროს პროექციაზე (წრეზე).

ფიგურების პროექციების ზედღება რომ თავიდან ავიცილოთ შეიძლება გაკეთდეს კვეთები, და სამგანზომილებიანი ობიექტი ფენებად დაიშალოს სურ. 25-ზე მოყვანილია ორი ასეთი ურთიერთპარალელური ვერტიკალური კვეთი  $S_1$  და  $S_2$ , რომლებიც ფაქტიურად წარმოადგენენ საწყისი სამგანზომილებიანი ობიექტის ტომოგრამას (მისი შიდა სტრუქტურის კვეთებში გამოსახვას). ნათელია, რომ სწორედ კვეთის სისქე განაპირობებს ჩატარებული ტომოგრაფიის გარჩევადობას. ყოველ კვეთაში სრულდება მათში მყოფი ობიექტების პროეცირება კვეთის სიბრტყეზე. ამიტომაც,  $S_1$  კვეთში კონუსის ნაცვლად ჩვენ გვექნება სამკუთხედი, ხოლო ცილინდრის მაგივრათ – მართკუთხედი.  $S_2$  კვეთში ნახევარსფეროს ნაცვლად მივიღებთ ნახევარწრეს, ხოლო სფეროს ნაცვლად – წრეს. ჩვენ თავი ავარიდეთ ამ ფიგურების ზედღებას, როგორც ეს იყო  $P_1$  პროექციაში, მაგრამ თავად ფიგურებმა დაკარგეს საწყისი ინფორმაციის მნიშვნელოვანი ნაწილი. მდგომარეობა შეიძლება რამდენადმე გაუმჯობესდეს, უფრო წვრილი კვეთების გაკეთების შემთხვევაში.

ამასთან დაკავშირებით შეიძლება განვიხილოთ პერპენდიკულარული მიმართულების ხუთი უფრო წვრილი კვეთი ( $S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5$ ). ამ ტომოგრამაზე ცილინდრის და კონუსის სტრუქტურები შენარჩუნებულია, მაგრამ ნახევარსფეროსა და სფეროს ნაცვლათ მივიღებთ კონუსისებურ ფიგურებს. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ბოლო შემთხვევაში რომ განხილულიყო არა ხუთი, არამედ ორი პროექცია (როგორც ეს იყო წინა შემთხვევაში), მივიღებდით გაცილებით უარეს სურათს: ერთ კვეთაში ( $S'_1, S'_2, S'_3$  გაერთიანებისას) ჩვენ გვექნებოდა ოთხი წრე, ხოლო მეორეში ( $S'_3, S'_4, S'_5$  გაერთიანებისას) – ერთ წრე (ცილინდრის პროექცია) და ორი წერტილი (კონუსის და სფეროს წვეროები). აქედან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ კვეთების მიმართულების არჩევა ტომოგრაფიული ანალიზის ჩატარებისას საკმაოდ მნიშვნელოვანია, თუ არ ითქვას რომ განმსაზღვრავია.

იმის შემდეგ, რაც ჩვენ გავერკვიეთ პროექციებში და განვიხილეთ ტომოგრაფიის საწყისები, შეიძლება კვლავ დაუბრუნდეთ მხედველობას და განვიხილოთ მხედველობითი ინფორმაციის ფორმირების მეორე და მესამე ეტაპები.

### ინფორმაციის დამუშავება თავის ტვინში.

მაშ ასე, თვალის მეშვეობით ჩვენ ვიღებთ საწყისი 3D ობიექტის ერთ 2D პროექციას. ვინაიდან ჩვენ ორი თვალი გაგვაჩნია, პროექციების რაოდენობაც ორი იქნება, რაც ცხადია არაა საკმარისი ობიექტის ნორმალური რექონსტრუქციისათვის. საჭიროა  $n$  რაოდენობის პროექციების მიღება, სადაც  $n \gg 2$ . რამდენია ამ საჭირო პროექციების რაოდენობა და სად უნდა მოინახოს ისინი? როგორც აღმოჩნდა ობიექტის 3D რექონსტრუქციისათვის საჭიროა 52-ზე მეტი პროექციის არსებობა. შეიძლება კიდევაც ითქვას, რომ რაც მეტია პროექციების რაოდენობა, მით უკეთ გაირჩევა ობიექტის დეტალები. როგორ შეივსოს



არასაკმარისი ინფორმაცია? ან და რა უნდა მოვიმოქმედოთ, თუ ობიექტის დეტალები პროექციაში არ იკვეთებიან ან დაკარგულია?

ნაკლული პროექციების სინთეზის ილუსტრირებისათვის მივმართოთ ციფრული ფოტოგრაფიის პრინციპებს. ციფრულ ფოტოგრაფიაში და საერთოდ გამოთვლით ტექნიკაში არსებობს ცნება პიქსელი – ორგანზომილებიანი გამოსახულების ფორმირების ელემენტი (ერთეული). თვალში, პიქსელების ანალოგს წარმოადგენენ ზადურაზე მყოფი ნერვული რეცეპტორები (კოლბები და ჩხირები). იმისათვის რომ გავერკვიოთ ნაკლული პროექციების ფორმირების მექანიზმში, დაგვჭირდება ისეთი მათემატიკური ცნებების, განხილვა როგორცაა ინტერპოლაცია და აპროქსიმაცია.

ინტერპოლაცია, ინტერპოლირება (ლათ. *Inter-polis* – გასწორებული, გარდაქმნილი) – გამოთვლით მათემატიკაში სიდიდის შუალედური მნიშვნელობების მონახვის ხერხი ცნობილი მნიშვნელობების დისკრეტული ნაკრების მიხედვით.

აპროქსიმაცია (ლათ. *proxima* – უახლოვესი) ანუ მიახლოება – სამეცნიერო ხერხი, რომელშიც ერთი ობიექტები შეიცვლება საწყის ობიექტთან გარკვეული სახით ახლოს მყოფი, მაგრამ უფრო მარტივი მეორე ობიექტებით.

აპროქსიმაცია საშუალებას იძლევა მოინახოს ობიექტის რიცხობრივი მახასიათებლები და ხარისხობრივი თვისებები ამოცანის დაყვანით უფრო მარტივი ან უფრო მოსახერხებელი ობიექტების გამოკვლევამდე (მაგალითად ისეთის, რომელთა მახასიათებლები ადვილად გამოითვლება, ან და რომელთა თვისებები უკვე ცნობილია). რიცხვების თეორიაში, კერძოდ, გამოიკვლევა ირაციონალური რიცხვების მიახლოება რაციონალურებთან. გეომეტრიაში განიხილება მრუდების აპროქსიმაცია ტეხილებით. მათემატიკის ზოგიერთი განხრა მთლიანად ეძღვნება აპროქსიმაციას, მაგალითად, ფუნქციების მიახლოების თეორია, ან და ანალიზის რიცხობრივი მეთოდები.

ერთი შეხედვით ეს ორი ცნება იდენტურია, მაგრამ განსხვავება მაინც არსებობს. ინტერპოლაცია და აპროქსიმაცია გამოიყენება ფუნქციების ასაგებად მონაცემათა ნაკრების მიხედვით. მაგრამ, თუ აპროქსიმაციის შემთხვევაში მრუდმა უნდა გარკვეული სახით მიუახლოვოს მონაცემები, ინტერპოლაციის დროს ფუნქცია უნდა მკაცრად დაემთხვას მონაცემებს საკვანძო წერტილებში.

გარდა ამისა, ინტერპოლაცია უნდა გვესმოდეს როგორც უბრალოდ ორ კვანძს შორის შუალედური მნიშვნელობების ძიება (მაგალითად,  $f(0) = 0$ ;  $f(2) = 1$ ;  $f(1) = ?$ ). აპროქსიმაცია კი უფრო ფართო გაგებით შეიძლება გავიგოთ როგორც, მაგალითად, რთული მათემატიკური ფუნქციების შეცვლა უფრო მარტივი ფუნქციებით (მაგალითად, გარკვეულ მიდამოში გაწრფილებული ტეილორის რიგში დაშლით), და ასევე რთული ობიექტების ნებისმიერი მიახლოება უფრო მარტივ/მოსახერხებელ/ნათელ ობიექტებთან.

ამრიგად, გამოსახულებების ინტერპოლაცია გარკვეულ ეტაპზე მიმდინარეობს ყველა ციფრულ ფოტოგრაფიებზე. ის სრულდება ყოველ ჯერზე, როდესაც იცვლება სურათის ზომა ან გაშლილობა, პიქსელების ერთი ნაკრებიდან მეორეში გადასვლისას. ინტერპოლაციის არსი მდგომარეობს არსებული მონაცემების გამოყენებაში, უცნობ წერტილებში მოსალოდნე მნიშვნელობების მისაღებად. მაგალითად, თუ თქვენ გინდათ გაიგოთ თუ რა ტემპერატურა იყო შუადღეს, არა და გაზომვები აწარმოეთ 11 და 13 საათებში, შეიძლება ივარაუდოთ მისი მნიშვნელობა წრფიული ინტერპოლაციის გამოყენებით, რაც გულისხმობს ორი არსებული ტემპერატურის საშუალო არითმეტიკულის აღებას. თუ კი თქვენ გექნებოდათ ტემპერატურის დამატებითი გაზომვა 11:30-ზე, თქვენ შეიძლება შეგინინათ, რომ შუადღემდე ტემპერატურა უფრო სწრაფად იზრდებოდა და გამოიყენოთ ეს დამატებითი გაზომვა კვადრატულ ინტერპოლაციისათვის. რაც მეტი იქნება ტემპერა-

ტურების გაზომვების რაოდენობა შუადღის მახლობლად, მით უფრო კომპლექსური (და მოლოდინში უფრო ზუსტი) შეიძლება იყოს თქვენი ინტერპოლაციის ალგორითმი.

გამოსახულებების ინტერპოლაცია ციფრულ კამერებში მიმდინარეობს ორ განზომილებაში, და გარშემო მყოფი პიქსელების მნიშვნელობებიდან გამომდინარე ცდილობს პიქსელის ფერში და განათებაში საუკეთესო მიახლოებების მიღწევას. ჰაერის ტემპერატურის მერყევობისაგან განსხვავებით, პიქსელთა მნიშვნელობები წერტილიდან წერტილში გადასვლისას შეიძლება ბევრად უფრო მკვეთრად განსხვავდებოდეს. როგორც აღინიშნა ტემპერატურის მაგალითში, რაც მეტია ინფორმაცია გარშემო მყოფ პიქსელების შესახებ, მით უკეთ ამოქმედდება ინტერპოლაცია. სწორედ ამიტომ გამოსახულება სწრაფად უარესდება მისი გაწელების შემთხვევაში, და გარდა ამისა ინტერპოლაცია ვერასოდეს ვერ შესძლებს გამოსახულებაში მასში არ არსებული დეტალიზების დამატებას. ამ შემთხვევაში გამოიყენება გამოსახულების აპროქსიმაცია.

ინტერპოლაციის საყოველთაოდ მიღებული ალგორითმები შეიძლება დაიყოს ორ კატეგორიად: **ადაპტიური** და **არაადაპტიური**. ადაპტიური მეთოდები იცვლება ინტერპოლაციის საგნიდან გამომდინარე (მკვეთრი საზღვრები, გლუვი ტექსტურა), მაშინ როდესაც არაადაპტიური მეთოდები ყველა პიქსელს ერთნაირად ამუშავებენ.

ციფრული ფოტოგრაფიის საკმაოდ საერთო პრინციპების განხილვამ საშუალება მოგვცა გამოსახულების პროექციების სინთეზის (შექმნის) პრინციპული შესაძლებლობის შეცნობა. გამოსახულების დეტალიზაციიდან გამომდინარე პროექციების რაოდენობა შეიძლება გაიზარდოს ან პირიქით შემცირდეს. სწორედ ამ პრინციპზე დაყრდნობით იქმნება პროექციები ინტერპოლაციის და აპროქსიმაციის გამოყენებით ციფრულ მოწყობილობებში, და მაღალი ალბათობით ცოცხალ სისტემებშიც. რა თქმა უნდა ეს ყველაფერი სრულდება „ავტომატურად“, ჩვენი გონების მიღმა. ასევე „ავტომატურად“ მიმდინარეობს ხილვადი ინფორმაციის მიღების ბოლო ეტაპიც – სამგანზომილებიანი გამოსახულების მიღება პროექციების ანალიზის საფუძველზე. უფრო დაწვრილებით სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია იქნება განხილული მოგვიანებით.

იმის შემდეგ რაც განიხილა მხედველობის პრინციპები – ჩვენს რეალობაში მიმდინარე მოვლენების შესახებ ინფორმაციის შემცავი ელექტრომაგნიტური გამოსხივების (ხილული სინათლის) აღქმის (შეუიარაღებელი თვალით) და ჩვენს გონებაში დამუშავების საკითხები, დროა ეს თვალი შევაიარალოთ. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ უნდა განიხილოს სპეციალური, ადამიანის მიერ შექმნილი ხელსაწყოები, რომლებიც საშუალებას იძლევა მივიღოთ გაცილებით მეტი ინფორმაცია ჩვენ გარე სამყაროს შესახებ.

## **9.9. ოპტიკური ხელსაწყოები**

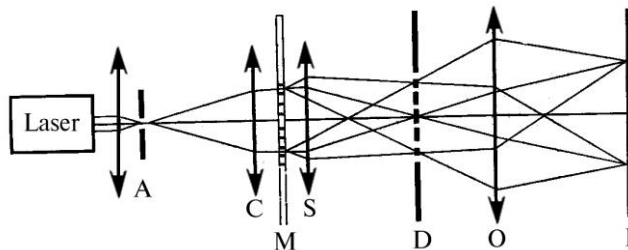
### **დიფრაქტომეტრი**

ოპტიკური ხელსაწყოების განხილვა დავიწყოთ დიფრაქტომეტრით, რომელიც სხვა და სხვა ობიექტების თხელი სტრუქტურის შესწავლის საშუალებას იძლევა მათი დიფრაქციული მაქსიმუმების (რეფლექსების) განლაგების და ინტენსივობის ანალიზის საფუძველზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ რენტგენის სხივების დიფრაქციის გამოყენება სტრუქტურული ანალიზის ჩატარებისათვის (რენტგენოდიფრაქციული ანალიზი) პირველად იყო შემოთავაზებული ლაუეს მიერ, რისთვისაც 1914 წელს მას მიენიჭა ნობელის პრემია. მოვლენის თეორიული დასაბუთება განახორციელეს ვულფმა და ბრეგმა (ვულფი-ბრეგის პირობა), ხოლო როგორც მეთოდი რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი შეიმუშავეს დებაიმ და შერერმა. მეთოდი საშუალებას იძლევა დადგინდეს ნივთიერების ატომარული სტრუქტურა, რომელშიც შედის ელემენტარული უჯრედის სივრცული ჯგუფის, მისი

ზომების და ფორმის დადგენა და ასევე კრისტალის სიმეტრიის ჯგუფის განსაზღვრა. რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი დღესაც წარმოადგენს ყველაზე გავრცელებულ მეთოდს ნივთიერების სტრუქტურის დასადგენათ, მისი სიმარტივის და შედარებითი სიიარვის გამო.

სტრუქტურული ანალიზის დიფრაქციის მეთოდის შემდგომ გამოყენებამ მაგრამ გაცილებით გრძელი ტალღის სიგრძის მქონე (ხილული სინათლე) ელექტრომაგნიტური გამოსხივების წყაროს გამოყენებით, მიიყვანა მკვლევარები ოპტიკური დიფრაქტომეტრის იდეამდე. ვინაიდან ხილული სინათლის ტალღის სიგრძე რენტგენის სხივებთან შედარებით 4 რიგით მაღალია, ეს მეთოდი საშუალებას იძლეოდა გამოეკვლიათ ელექტრონული მიკროფოტოსურათები მიღებული  $\sim 50.000\times$  გადიდებისას. ოპტიკური დიფრაქციის და საერთოდ სადღეისოთ აღიარებული კრისტალოგრაფიული ელექტრონული მიკროსკოპის მეთოდის, ფუძემდებლად ითვლება ა.კლუგი (1964), რომელმაც ელექტრონულ მიკროსკოპზე მიღებული გამოსახულება გამოიკვლია მის მიერ კონსტრუირებულ ოპტიკურ დიფრაქტომეტრზე. ამის შედეგად მიღებული სურათი შეიძლება გაიშიფროს რათა დადგინდეს გამოსაკვლევი ობიექტის სტრუქტურა. გარდა ამის, თუ დიფრაქციულ სიბრტყეში მოვათავსებთ სპეციალურ სივრცულ ფილტრს („მასკას“) და გავატარებთ მხოლოდ გამოსაკვლევი სტრუქტურისთვის დამახასიათებელ რეფლექსებს, შეიძლება აღდგეს საწყისი ობიექტის „გაფილტრული“ გამოსახულება. ამ შრომებისათვის 1982 წ კლუგს მიენიჭა ნობელის პრემია.



სურ. 26. ოპტიკური დიფრაქტომეტრის სქემა. *A* – აპერტურის დიაფრაგმა; *C* – კონდენსორის ლინზა; *M* – კვლევის ობიექტი, რომლის პერიოდულობა შეესაბამება გამოსხივების ტალღის სიგრძეს; *S* – დიფრაქციული ლინზა; *D* – დიფრაქციული სიბრტყე; *O* – გამოსახულების აღსადგენი ლინზა (ფურიეს უკუ გარდაქმნისათვის); *I* – საწყისი ობიექტის აღდგენილი და გაფილტრული გამოსახულება.

სურ. 26-ზე მოყვანილია ოპტიკური დიფრაქტომეტრის სქემა, რომლის გამოსხივების წყაროდ გამოიყენება He-Ne ლაზერი ( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ). ლაზერული სხივების „კონის“ დიამერი განისაზღვრება გამომასხივებლის შიდა დიამეტრით ( $\sim 1\text{მმ}$ ). ამიტომაც წერტილოვანი სინათლის წყაროს მიღებისათვის ეს „კონა“ ფოკუსირდება სპეციალურ აპერტურულ დიაფრაგმაზე (*A*), რომელზეც არის ფოკუსირებულ კონდენსორის ლინზა (*C*). მიღებულ ფართო „კონაში“ თავსდება კვლევის ობიექტი (*M*), რომლის პერიოდულობა შეესაბამება გამომსხიველის ტალღის სიგრძეს. ობიექტზე დიფრაგირებული სხივები იკრიფება დიფრაქციული ლინზის (*S*) მეშვეობით დიფრაქციულ სიბრტყეში (*D*). აქ ფორმირდება კვლევის ობიექტის ე.წ. ფურიე გამოსახვა, რომლის ანალიზის საფუძველზე შეიძლება გამოსაკვლევი სტრუქტურის პარამეტრების დადგენა. შემდეგ ამ სიბრტყეში შეიძლება მოთავსდეს სპეციალური „მასკა“ რათა მოშორდეს რეფლექსები, რომლებიც არ მიეკუთვნებიან თვით სტრუქტურის პერიოდულობას და სპეციალური ლინზით (*O*) შეკრეფის შემდეგ, ანუ ფურიეს უკუ გარდაქმნის მერე, ამ ლინზის ფოკალურ სიბრტყეში (*I*) ფორმირდება საწყისი ობიექტის აღდგენილი და გაფილტრული გამოსახულება.

უფრო სრულად დიფრაქციის თეორია განიხილება ქვემოთ, მაკრომოლეკულების სტრუქტურისადმი მიძღვნილ თავში.

## ოპტიკური მიკროსკოპი

შემდეგ პუნქტად განვიხილოთ ოპტიკური მიკროსკოპის მუშაობის პრინციპი. სურ. 27-ზე მოყვანილია ოპტიკური მიკროსკოპის სქემა. უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტრონული მიკროსკოპი აგებულია ანალოგური სქემით, მაგრამ ვინაიდან იქ გამოსხივების წყაროთ სინათლის ნაცვლად გამოიყენება ელექტრონების ნაკადი, ლინზებიც უნდა იყოს მაგნიტური და არა ოპტიკური.

პირველი შედგენილი ოპტიკური მიკროსკოპი გამოიგონეს ჰოლანდიელმა სათვალის ხელოსნებმა ჰანს იანსენმა და მისმა შვილმა ზაქარი იანსენმა 1590 წ, ხოლო 1609 წ გალილეო გალილემ გამოიგონა შედგენილი მიკროსკოპი ამოხნექილი და შეზნექილი ლინზებით. მაგრამ ბევრნი, ოპტიკური მიკროსკოპის შემქმნელათ აღიარებს ანტონი ვან ლევეხუკს, რომელმაც 1674 წ გააუმჯობესა ეს მიკროსკოპი ერთუჯრედიანი ორგანიზმების დანახვის შესაძლებლობამდე. ლევენხუკის მიკროსკოპი იყო უკიდურესად მარტივი და წარმოადგენდა ფირფიტას, რომლის ცენტრში იყო ჩამაგრებული ლინზა. დამკვირვებელს უნდა ეცქირა მეორე მხარეს დამაგრებულ ობიექტისათვის, რომელშიც ფანჯრიდან ან სანთელიდან გაედინებოდა ძლიერი სინათლე, ლინზის მეშვეობით. კონსტრუქციის სიმარტივის მიუხედავად ამ მიკროსკოპის გადიდება რამდენჯერმე აღემატებოდა იმ დროინდელ მიკროსკოპების შესაძლებლობას, რამაც მისცა საშუალება პირველად ენახა ერთროციტები, ბაქტერიები, საფუარი, სპერმატოზოიდები, მწერების თვალის და კუნთების ბოჭკოების აგებულება, ინფუზორიები და მათი ბევრი ფორმა. ლივენხუკმა გაშლია ხუთასზე მეტი ლინზა და გააკეთა სულ ცოტა 25 სხვადასხვა ტიპის მიკროსკოპი რომლებითგანაც შემორჩა მხოლოდ ცხრა. ჩვენ დრომდე მოსულ მიკროსკოპებს შუძლიათ გაადიდონ გამოსახულება 275 ჯერ, მაგრამ არსებობს ცნობები, რომ ლევენხუკს ჰქონდა მიკროსკოპები, რომლებიც 500 ჯერ ადიდებდნენ.

1866-1873 – ერნსტ აბემ აღმოაჩინა აბეს რიცხვი და პირველმა განავითარა მიკროსკოპის თეორია, რაც წარმოადგენდა გარღვევას მიკროსკოპის შექმნის მაშინდელ ტექნოლოგიაში, რომელიც ეფუძნებოდა ცდების და შეცდომების მეთოდს. „კარლ ცეის“-ის კომპანია ამ აღმოჩენის დანერგვით ხდება იმ დროინდელი მიკროსკოპების წამყვანი მწარმოებელი.

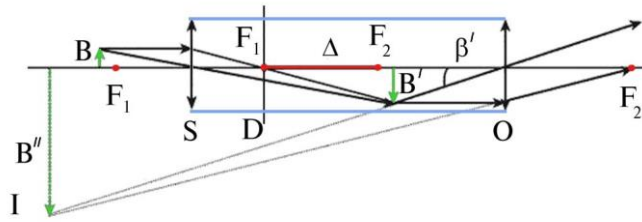
1931 – ერნსტ რუსკა იწყებს პირველი ელექტრონული მიკროსკოპის შექმნას გამჭოლი ელექტრონული მიკროსკოპის (Transmission Electron Microscope – TEM) პრინციპით. დამოუკიდებელი მიმართულების სახით ფორმირდება ელექტრონული ოპტიკა. ამ შრომებისათვის 1986 წ რუსკას მიენიჭა ნობელის პრემია.

1981 – გერდ ბინინგმა და გენრიხ რორერმა შეიმუშავეს სკანერული გვირაბული მიკროსკოპი<sup>46</sup> (Scanning Tunneling Microscope – STM) – სკანერული ზონდური მიკროსკოპის ვარიანტი, რომელიც იყო განკუთვნილი გამტარი ზედაპირების რელიეფის გასაზომათ მაღალი სივრცული გარჩევით. ამ გამოგონებისათვის ავტორებს 1986 წ მიენიჭათ ნობელის პრემია.

1986 – კელვინ ქუეიტი და კრისტოფერ გერბერი ჰქმნიან სკანერულ ატომურ-მძლავლურ მიკროსკოპს (Atomic Force Microscope – AFM) – მაღალი გარჩევის უნარობის სკანერულ ზონდურ მიკროსკოპს. გამოიყენება ზედაპირული რელიეფის გამოსაკვლევათ ძალზე მაღალი გარჩევის უნარით (ათეული ანგსტრემებიდან ატომურ მანძილებამდე). სკანერული გვირაბული მიკროსკოპისგან განსხვავებით ამ მიკროსკოპით შეიძლება როგორც გამტარი, ასევე გაუმტარი ზედაპირების შესწავლა. იმის გამო, რომ ამ მიკროს-

<sup>46</sup> გვირაბული ეფექტი – მიკრონაწილაკის მიერ პოტენციალური ბარიერის (დაბრკოლების) გადალახვა იმ შემთხვევაში, როდესაც მისი სრული ენერგია (რომელიც ამ დროს რჩება უცვლელი) ბარიერის სიმაღლეზე დაბალია. გვირაბული ეფექტი – კვანტური ბუნების მოვლენაა და სრულად ეწინააღმდეგება კლასიკურ მექანიკას.

კოპს შეეძლო არა მარტო სკანირება, არამედ ატომებთან მანიპულირება, მას დაარქვეს მძლავლური.



სურ. 27. მიკროსკოპის ოპტიკური სქემა. ამ ნახაზზე გამოყენებულია იგივე აღნიშვნები, რაც წინა ნახაზზე.  $B$  - კვლევის ობიექტი;  $S$  - ობიექტივის ლინზა;  $D$  - დიფრაქციული სიბრტყე, რომელიც იმყოფება ობიექტივის ფოკალურ სიბრტყეში ( $F_1$ );  $O$  - ოკულარი ( $F_2$  - ოკულარის ფოკუსი);  $I$  - ობიექტის გადიდებული წარმოსახვითი გამოსახულების ფორმირების სიბრტყე.

განვიხილოთ სხივების სვლელობა ოპტიკურ მიკროსკოპში. სურ. 27-დან ჩანს, რომ  $S$  ობიექტივის წინა ფოკუსის ( $F_1$ ) მახლობლად მოთავსებული  $B$  ობიექტიდან გამოსული სხივები ვულფი-ბრეგის პირობის შესრულების შემთხვევაში ჩამოაყალიბებენ მის ფოკალურ სიბრტყეში ( $F_1$ ), მაგრამ უკვე ობიექტივიდან მარჯვნივ (უკანა ფოკუსი), დიფრაქციულ სურათს ( $D$ ), ობიექტის ეგრე წოდებულ ფურიე წარმოსახვას.

საგანი  $B$  თავსდება ობიექტივის წინა ფოკუსის ( $F_1$ ) მახლობლად ისეთი გათვლით, რომ მისი ნამდვილი გადიდებული გამოსახულება  $B'$  იმყოფებოდეს ოკულარისა და მის უკანა ფოკუსის შორის. ამასთან ოკულარი იძლევა გადიდებულ წარმოსახვით გამოსახულებას  $B''$ , რომელსაც ხედავს თვალი.

ობიექტივსა და საგანს შორის მანძილის შეცვლით აღწევენ იმას, რომ გამოსახულება  $B''$  აღმოჩნდეს თვალის შორეულ აკომოდაციის სიბრტყეში (ამ შემთხვევაში თვალი არ იღლება). ნორმალური ხედვის ადამიანისათვის  $B'$  იმყოფება ოკულარის ფოკალურ სიბრტყეში, ხოლო  $B''$  მიიღება უსასრულობაში.

მიკროსკოპის ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს მისი კუთხური გადიდება. ეს ცნება ლუპის კუთხური გადიდების ანალოგიურია. მიკროსკოპის კუთხური გადიდება – ეს არის ოკულარში გამოსახული ობიექტის ხედვის კუთხის ( $\beta'$ ) შეფარდება იმ ხედვის კუთხესთან, რომლითაც ობიექტი ჩანს „შეუიარაღებელი“ თვალით საუკეთესო ხედვის მანძილიდან ( $a_0$ ):

$$\Gamma = \beta' / \beta$$

მიკროსკოპის გადიდება დამოკიდებულია ობიექტივის და ოკულარის ფოკუსურ მანძილებზე, და აგრეთვე ტუბუსის ოპტიკურ სიგრძეზე ( $\Delta$ ) – ასე ეძახიან მანძილს ობიექტივის უკანა და ოკულარის წინა ფოკუსებს შორის. სურათზე (სურ. 27) შესაბამისი უბანი  $F_1$  და  $F_2$  ფოკუსებს შორის გამოყოფილია წითელი ხაზით.

გამოყვანის გარეშე მოვიყვანოთ ფორმულა, რომელიც განსაზღვრავს მიკროსკოპის გადიდებას ნორმალური თვალისათვის.

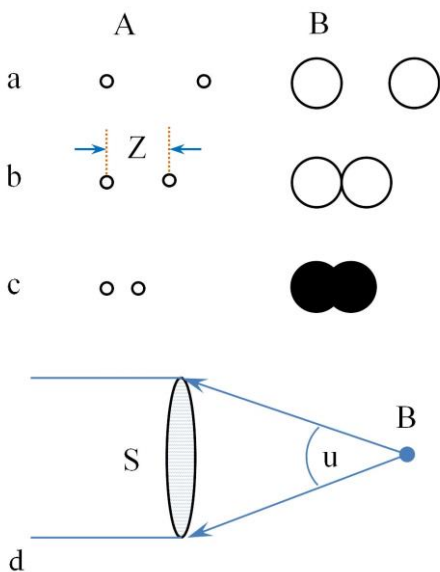
$$\Gamma = a_0 \cdot \Delta / (F_1 - F_2)$$

სადაც,  $a_0$  – საუკეთესო ხედვის მანძილია,  $\Delta$  – ტუბუსის ოპტიკური სიგრძე,  $F_1$  და  $F_2$  ობიექტივის და ოკულარის ფოკუსური მანძილებია. ტიპურ შემთხვევაში  $a_0 = 250$  მმ,  $\Delta = 160$  მმ,  $F_1 = 2$  მმ,  $F_2 = 15$  მმ მივიღებთ:  $\Gamma = 1330$  მმ.

შეიძლება შეიქმნას შთაბეჭდილება, რომ ტუბუსის ოპტიკური სიგრძის გაზრდით, შეიძლება ნებისმიერი გადიდების მიღწევა და აქედან გამომდინარე ობიექტის უმცირესი

დეტალების დანახვა. მაგრამ სინათლის ტალღური თვისებების გათვალისწინება გვიჩვენებს, რომ თვითონ მიკროსკოპით გარჩეული მცირე დეტალების ზომები ადებენ მიღებულ გამოსახულებას შეზღუდვებს, რომლებიც უკავშირდებიან ობიექტივში გასული სინათლის სხივების დიფრაქციას. დიფრაქციის გამო განათებული წერტილის გამოსახულების ნაცვლად, ჩვენ მივიღებთ მცირე ზომის წრეს. თუ კი ჩვენ უცქერით ობიექტის ერთმანეთისაგან საკმაოდ მანძილზე დაშორებულ დეტალებს (წერტილებს), ობიექტივი მოგვცემს მათ გამოსახულებას ორი გაცალკევებული წრის სახით და ჩვენ შეგვეძლება მათი (დეტალების) გარჩევა (სურ. 28a). გარჩეული წერტილების უმცირეს მანძილს შეესაბამება წრების „შეხება“ (სურ. 28b). თუ კი წერტილები ძალიან ახლოს არიან ერთმანეთთან, მაშინ მათი შესაბამისი „წრეები“ გადაიფარებიან და აღიქმებიან ერთი წერტილის სახით (სურ. 28c).

ძირითადი მახასიათებელი, რომელიც უჩვენებს მიკროსკოპის შესაძლებლობებს ამ მიმართულებით, არის მისი **გარჩევის ზღვარი**. მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი ( $Z$ ) – არის საგნის ორ წერტილს შორის უმცირესი მანძილი, რომელზეც ისინი განირჩევიან როგორც ცალკე ობიექტები (ანუ მიკროსკოპში აღიქმებიან როგორც ორი წერტილი). გარჩევის ზღვარის უკუ სიდიდეს ეწოდება **გარჩევითი უნარი**. რაც უფრო ნაკლებია გარჩევის ზღვარი, მით უფრო მეტია გარჩევითი უნარი. თეორიაში, მიკროსკოპის გარჩევითი უნარი დამოკიდებულია განათებისთვის გამოყენებული გამოსხივების ტალღის სიგრძეზე და ობიექტივის კუთხურ აპერტურაზე. კუთხური აპერტურა ( $u$ ) – წარმოადგენს ობიექტივის ლინზაში საგნიდან მოსული სხივთა კონის განაპირა სხივებს შორის კუთხეს (სურ. 28d).



სურ. 28. გარჩევითი უნარი (a,b,c) და კუთხური აპერტურა (d). A სვეტი – განათებული წერტილები. B სვეტი – განათებული წერტილის გამოსახულება განათებული წრის სახით. a – განათებული წერტილები ერთმანეთისაგან საკმაოდ მოშორებულ მანძილზე იმყოფებიან. b – განათებული წერტილების გამოსახულებები ეხებიან ერთმანეთს; მანძილი წერტილებს შორის ( $Z$ ) გარჩევის ზღვარს შეესაბამება. c – ახლომდებარე წერტილები აღიქმებიან როგორც ერთი ობიექტი. d – კუთხური აპერტურის ილუსტრაცია;  $u$  – კუთხე ობიექტივის ლინზაში ( $S$ ) საგნიდან ( $B$ ) შემავალი სინათლის კონის განაპირა სხივებს შორის.

გამოყვანის გარეშე მოვიყვანოთ მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარის ფორმულა ჰაერის გარემოში:

$$Z = \frac{0,5\lambda}{\sin(u/2)} \quad (57)$$

სადაც,  $\lambda$  – ობიექტის გამანათებელი სინათლის ტალღის სიგრძეა.

თანამედროვე მიკროსკოპების კუთხური აპერტურა  $140^\circ$  აღწევს. თუ კი მივიღებთ  $\lambda = 0,555$  მკმ, მაშინ გარჩევითი ზღვარის მნიშვნელობა იქნება  $Z_M = 0,3$  მკმ.

გავარკვიოთ, რამდენად დიდი უნდა იყოს მიკროსკოპის გადიდება, ობიექტივის მოცემული გარჩევის ზღვარის პირობებში. გავითვალისწინოთ რომ თვალს გააჩნია

საკუთარი გარჩევის ზღვარი რომელიც განპირობებულია თვალის ბადისებრი გარსის აგებულებით. ცნობილია რომ თვალის გარჩევის ზღვარი:  $Z_{Eye} = 145 - 290$  მკმ. იმისათვის რომ თვალს შეემლოს იმავე წერტილების გარჩევა, რომელსაც არჩევს მიკროსკოპი, საჭიროა გადიდება:

$$\Gamma_{Lim} = Z_{Eye} / Z_M$$

ამ გადიდებას ეწოდება **სასარგებლო გადიდება**.

ავლნიშნოთ, რომ მიკროსკოპის გამოყენებისას ობიექტის ფოტოგრაფირებისათვის, მოყვანილ ფორმულაში  $Z_{Eye}$  ნაცვლად საჭიროა ფოტომასალის გარჩევითი ზღვარის  $Z_{Ph}$  გამოყენება. მიკროსკოპის სასარგებლო გადიდება ეს ისეთი გადიდებაა, რომელზეც მიკროსკოპის გარჩევითი ზღვარის ზომის საგნის გამოსახულებას ექნება თვალის გარჩევითი ზღვარის მნიშვნელობა. თუ გამოვიყენებთ მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარის ზემომოყვანილი შეფასება ( $Z_M \approx 0,3$  მკმ), მივიღებთ რომ:  $\Gamma_{Lim} \sim 500 - 1000$ . აზრი არა აქვს ვეცადოთ მიკროსკოპის დიდი გადიდების მიღება, ვინაიდან ამით არანაირი დამატებითი დეტალის მონახვა მაინც ვერ მოხერხდება. მიკროსკოპის სასარგებლო გადიდება წარმოადგენს მიკროსკოპის და თვალის გარჩევით უნარების გონიერ შეფარდებას.

და ბოლოს ავღწეროთ მიკროსკოპის სპეციალური ხერხები, რომლებსაც გამოიყენებენ მისი გარჩევითი შესაძლებლობის გაზრდისათვის (ანუ, გარჩევითი ზღვარის შემცირებისათვის).

1. **იმერსია**. ზოგიერთ მიკროსკოპში გარჩევითი ზღვარის შემცირებისათვის სივრცეს ობიექტივსა და საგანს შორის ავსებენ სპეციალური სითხით – *იმერსიით*. ასეთ მიკროსკოპს იმერსიულს უწოდებენ. იმერსიის ეფექტი მდგომარეობს ტალღის სიგრძის შემცირებაში:  $\lambda = \lambda_0 / n$ , სადაც  $\lambda_0$  – სინათლის ტალღის სიგრძეა ვაკუუმში, ხოლო  $n$  – იმერსიის გარდატეხის მაჩვენებელი. ამ შემთხვევაში მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარი განისაზღვრება ფორმულით:

$$Z = 0,5\lambda_0 / n \cdot \sin(u/2)$$

მნიშვნელში მყოფ სიდიდეს **რიცხოვრივი აპერტურა** ეწოდება  $A$ :

$$A = n \cdot \sin(u/2)$$

ბოლო ორი ფორმულის გაერთიანებით მივიღებთ:

$$Z = \lambda_0 / 2A$$

ავლნიშნოთ, რომ იმერსიული მიკროსკოპებისათვის სპეციალურ ობიექტივებს ჰქმნიან, ვინაიდან თხიერ გარემოში იცვლება ობიექტივის ფოკუსური მანძილი.

2. **ულტრაიისფერი მიკროსკოპია** (უი-მიკროსკოპია). გარჩევითი ზღვარის შესამცირებლად გამოიყენებენ თვალით უხილავ მოკლეტალღოვან ულტრაიისფერ გამოსხივებას. უი-მიკროსკოპებში მიკროობიექტი გამოიკვლევა ულტრაიისფერ სხივებში (ამ შემთხვევაში ლინზებს აკეთებენ კვარცის მინიდან, ხოლო რეგისტრირება ხდება ფოტოფირზე, ან სპეციალურ ლუმინისცენტურ ეკრანზე).
3. **მიკროსკოპული ობიექტების გაზომვა**. მიკროსკოპის მეშვეობით შეიძლება გამოსაკვლევი ობიექტის ზომების ნახვა. ამისათვის იყენებენ ოკულარ-მიკრომეტრს. უმარტივესი ოკულარ-მიკრომეტრი წარმოადგენს მრგვალ მინის ფირფიტას, რომელზეც დატანილია დანაყოფებიანი სკალა. მიკრომეტრს ათავსებენ ობიექტივში მიღებული გამოსახულების სიბრტყეში. ოკულარში ყურებისას ობიექტის და სკალის გამოსახულებები ემთხვევიან და შეიძლება ინახოს სკალის რა მანძილი შეესაბამება

გასაზომ სიდიდეს. წინასწარ უნდა დადგინდეს ცნობილი ობიექტის ზომების მიხედვით მიკრომეტრის დანაყოფის ფასი.

4. **მიკროპროექცია** და **მიკროფოტოგრაფია**. მიკროსკოპის მეშვეობით შეიძლება არა მხოლოდ ოკულარიდან ობიექტზე დაკვირვება, არამედ მისი ფოტოგრაფირება ან და ეკრანზე გამოსახულების პროეცირება. ამ შემთხვევაში გამოიყენებენ სპეციალურ ოკულარებს, რომლებიც აპროეცირებენ შუალედურ  $A'B'$  გამოსახულებას ფოტოფირზე ან ეკრანზე.
5. **ულტრამიკროსკოპია**. მიკროსკოპი საშუალებას იძლევა მოინახოს ნაწილაკები რომელთა ზომა გარჩევითი ზღვრის მიღმა იმყოფება. ეს მეთოდი გამოიყენებს ირიბ განათებას, რის გამოც მიკრონაწილაკები ჩანან როგორც ნათელი წერტილები ბნელ ფონზე. ამ დროს ნაწილაკის აგებულობის ნახვა შეუძლებელია, შეიძლება მხოლოდ მათი არსებობის ფაქტის დადგენა.

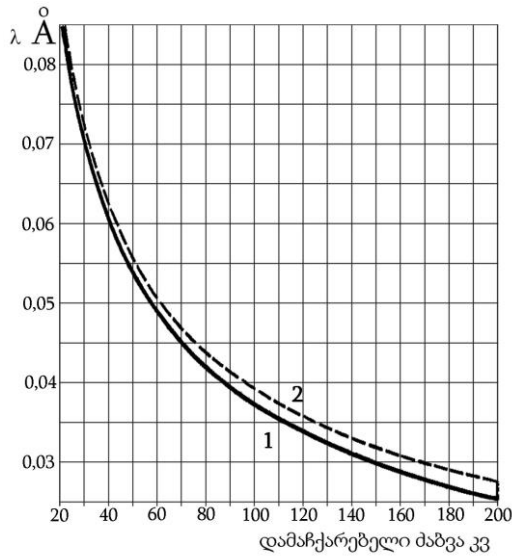
თეორია გვიჩვენებს, რომ რა ძლიერიც არ უნდა იყოს მიკროსკოპი ყველა ობიექტი რომლის ზომაც იქნება 3 მკმ -ზე ნაკლები გამოსახება დეტალების გარეშე, როგორც ერთი წერტილი. მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ არ შეიძლება ასეთი ნაწილაკების ნახვა, თვალყურის დევნა ან და მათი დათვლა.

იმ ნაწილაკების კვლევისათვის რომელთა ზომები მიკროსკოპის გარჩევის ზღვარზეა დაბალი, გამოიყენება მოწყობილობა, რომელსაც ულტრამიკროსკოპი ჰქვია. ამ მიკროსკოპის მთავარ ნაწილს წარმოადგენს ძლიერი გამმანათებელი, რათა მოგვეცეს შესაძლებლობა ირიბი განათების პირობებში ჩვეულებრივ მიკროსკოპში ამ წესით განათებული ნაწილაკების გამოკვლევა. ულტრამიკროსკოპია ეფუძნება იმ ფაქტს, რომ სითხეებში და აირებში მყოფი მცირე ზომის ნაწილაკების გამოჩენა შესაძლებელია ძლიერი გვერდითი განათებისას (გავიხსენოთ მტვერის ნაწილაკები, რომლებიც გამოჩნდებიან მზის სხივში).

### **ელექტრონული მიკროსკოპი.**

როგორც თვით ხელსაწყო სახელიდან გამომდინარეობს, გამოსხივების წყაროთ მასში გამოიყენებენ ელექტრონებს, შესაბამისად „ოპტიკაც“ უნდა იყოს წარმოდგენილი ელექტრონული ლინზებით. როგორც უკვე აღინიშნა, მიკროსკოპის გარჩევითი უნარიანობა დამოკიდებულია გამოსხივების ტალღის სიგრძეზე, ამ შემთხვევაში ელექტრონის. მაგრამ ელექტრონის ტალღის სიგრძე დამოკიდებულია მისი გამოსხივების პირობებზე – ელექტრონული მიკროსკოპის კათოდზე მიდებულ ამაჩქარებელ ძაბვაზე. რაც მეტია ამაჩქარებელი ძაბვა, მით ნაკლებია ელექტრონის ტალღის სიგრძე, მაშასადამე უკეთესია მიკროსკოპის გარჩევითი უნარიანობა. სურ. 29-ზე მოყვანილია ორი მრუდი რომლებზეც ასახულია ტალღის სიგრძის დამოკიდებულება ამაჩქარებელ ძაბვაზე. ყველაზე ზუსტი რატემაუნდა იქნება პირველი მრუდი, ვინაიდან მასში გათვალისწინებულია ელექტრონის მოძრაობის რელატივისტური შესწორება. ყველაზე გამოსადეგი (მუშა) ამაჩქარებელი ძაბვები (სხვადასხვა ტიპის მიკროსკოპებში) იმყოფება 60 – 100 კვ-ის ფარგლებში. მაღალი გარჩევითი უნარიანობის ელექტრონულ მიკროსკოპებში (ბიომაკრომოლეკულების შესწავლისას) ჩვეულებრივ გამოიყენებენ 80 კვ ოდენობის ძაბვას. უფრო თანამედროვე მიკროსკოპებში, გაუმჯობესებული ვაკუუმური სისტემით ( $\sim 10^{-9}$  ტორ  $\sim 10^{-6}$  ტორ-ის ნაცვლათ) შესაძლებელია უფრო მაღალ ძაბვაზე მუშაობა 100 და 120 კვ-იც კი. ულტრათხელი ანათლების მიკროსკოპიაში ჩვეულებრივ გამოიყენებენ უფრო დაბალ ამაჩქარებელ ძაბვას (60 კვ). მოყვანილი ნახატიდან ჩანს, რომ ამაჩქარებელი ძაბვების ეს სხვაობა ძალიან მოქმედებს ელექტრონის ტალღის სიგრძეზე, და მაშასადამე ხელსაწყოს გარჩევით უნარიანობაზე.





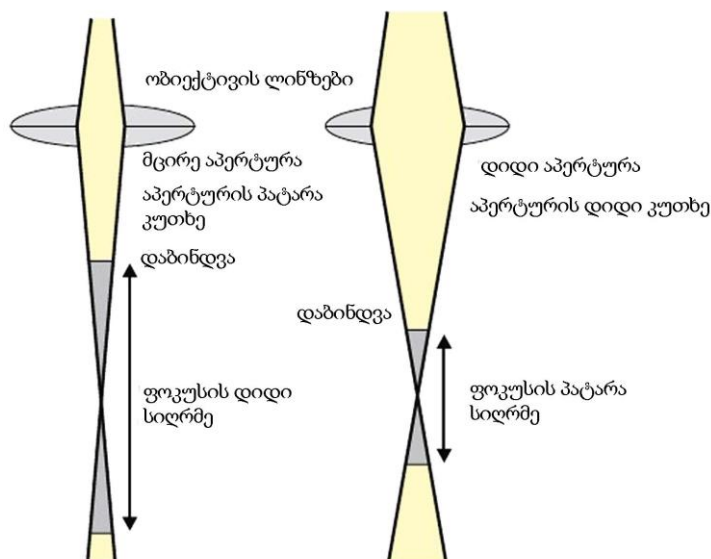
სურ. 29. ელექტრონის ტალღის სიგრძის დამოკიდებულება ამაჩქარებელ ძაბვაზე. 1 – რელატივისტური შესწორებით; 2 – რელატივისტური შესწორების გარეშე.

ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში (ცხრილი 8) ნაჩვენებია ელექტრონების ტალღების სიგრძეები ზემოთაღნიშნული ამაჩქარებელი ძაბვების პირობები (ტალღის სიგრძეები მოყვანილია რელატივისტური შესწორებებით). აგრეთვე ცხრილში აღნიშნულია ფორმულა (57) მიხედვით დათვლილი ხელსაწყოს გარჩევითი უნარიანობის მნიშვნელობები.

ცხრილი 8

U (კვ)	$\lambda$ (Å)	$\sin \frac{u}{2}$	u (გრად)	Z (Å)
60	0,049	0,021	0,6	1,7
80	0,042			2
100	0,0365			0,9
120	0,034			0,8

ცხრილში მოყვანილია ხელსაწყოს გარჩევითი უნარიანობის მონაცემები აპერტურის ერთი მნიშვნელობისათვის. უნდა აღინიშნოს, რომ აპერტურის მაჩვენებელი გავლენას ახდენს მიღებული გამოსახულების ფოკუსის სიღრმეზე (იხ. სურ. 30). როგორც ვხედავთ ამ პარამეტრის სიდიდე საკმაოდ მცირეა, რითიც აიხსნება მაღალი გარჩევის უნარიანობის ტრანსმისიური (გამჭოლი) მიკროსკოპების ერთერთი ძირითადი თვისება – ფოკუსის დიდი სიღრმე. ამ თვისების შედეგად მიკროფოტოსურათებზე ჩვენ გვაქვს სამგანზომილებიანი ობიექტის ორგანზომილებიანი პროექცია. ფაქტიურად მიკროფოტოსურათი წარმოადგენს ობიექტის „რენტგენის სურათს“.



სურ. 30. ფოკუსის სიღრმის დამოკიდებულება აპერტურის კუთხის სიდიდეზე.

ელექტრონულ მიკროსკოპს გააჩნია ელექტრონული ლინზები, რომლებსაც სინათლის ლინზების მაგვარად გააჩნიათ გარკვეული პარამეტრები: ფოკუსური მანძილი, აპერტურა, აბერაციის კონსტანტები და ა.შ. ელექტრონულ მიკროსკოპზე მუშაობისას აუცილებელია წამოდგენა გვერდის სხივების შესაძლო სვლელობის შესახებ და ობიექტის გამოსახულებაზე კონტრასტის წარმოქმნის მიზეზებზე. ასეთი აუცილებლობა განაპირობა იმან, რომ მხოლოდ კონტრასტის ფორმირების კანონების გაგება საშუალებას მოგვცემს საუკეთესოდ გამოვიყენოთ ხელსაწყო შესაძლებლობები და მოვახდინოთ ელექტრონულმიკროსკოპიული კვლევების სწორი ინტერპრეტირება.

ყველა გამჭოლი მიკროსკოპი (როგორც სინათლის, ასევე ელექტრონული) მსგავსია იმ გაგებით, რომ გამოსაკვლევი ობიექტი „ნათდება“ სივრცულად კოჰერენტული<sup>47</sup> ტალღური გამოსხივებით. ობიექტის კოჰერენტული გამოსხივებით განათებისას (სურ. 27), გამოსხივების მკაცრი სივრცული პერიოდულობის გამო, ობიექტზე ცალკეულ სხივების კონებს შორის, რომლებზეც შეიძლება წარმოსახვაში გამოსხივების ნაკადის დაყოფა, წარმოიქმნება გარკვეული ფაზური შეფარდებები. ფაზების ეს შეფარდებები განისაზღვრება გამანათებელი სისტემის გეომეტრიით და ოპტიკური მანძილით გამოსხივების წყაროსა და ობიექტის განათებული წერტილს შორის. ობიექტის „გამუქებისას“ მისი წერტილიდან წერტილამდე თვისებების ცვლილების მიხედვით, სხივები მეტნაკლები ხარისხით აბსორბირდებიან (შთაინთქმებიან) და დიფრაგირებენ. ობიექტის სხვადასხვა წერტილებიდან გამოსული სხივები გაბნევის ან დიფრაქციის შედეგად გადაიხრებიან საწყისი მიმართულებიდან და თავისი კოჰერენტულობის გამო შეუძლიათ ინტერფერირება. ამრიგად, ობიექტის უკან წარმოიქმნება მოდიფიცირებული ტალღური ველი, რომელიც შეიცავს სპეციალური ექსპერიმენტული პირობების საპასუხო სრულ ინფორმაციას ობიექტის შესახებ. დიფრაქციით და ინტერფერენციით განპირობებული გამოსხივების ენერჯის განაწილება რეგისტრირდება შესაბამისი მიმღებით (მაგალითად ფოტოფირით), რომელიც მოთავსებულია ოპტიკური ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში. მიღებულ გამოსახულებას ობიექტის დიფრაქციული სურათი ეწოდება.

მიკროსკოპში არსებობს სპეციალური გამანათებელი სისტემა რომელიც შედგება გამოსხივების წყაროსა (სინათლის მიკროსკოპში ეს ნათურაა, ხოლო ელექტრონულში – კათოდური სისტემა) და ლინზისაგან (კონდენსორი), რომელიც გარდაქმნის განათების წყაოდან გამოსულ გაშლილ სხივების კონას პარალელურში. ამრიგად ობიექტზე ვარდება ბრტყელი ტალღა. დაუშვათ, რომ ობიექტის ოპტიკური თვისებები პერიოდულად იცვლება სივრცეში. ასეთ ობიექტს პირობითად დავარქვათ მესერი, თანაც თვისებების ცვლილების ხასიათის სპეციფიკას თავიდან არ განვიხილავთ. მაგალითად, შეიძლება პერიოდულად იცვლებოდეს აბსორბციის კოეფიციენტი, მაშინ საუბრობენ აბსორბციულ მესერზე, თუ კი იცვლება გარდატეხის კოეფიციენტი, საუბარია ფაზურ მესერზე. წარმოდგენა ობიექტის შესახებ როგორც პერიოდულ მესერზე გაცილებით ნაკლებადაა შეზღუდული ვიდრე ეს ერთი შეხედვით გვეჩვენება. პრინციპში ყველა ობიექტის წარმოდგენა შეიძლება პერიოდული სტრუქტურების სუპერპოზიციის სახით (ფურიეს დაშლა). ელექტრონულ მიკროსკოპიაში ეს სრულდება განსაკუთრებულად, პირველყოვლისა ელექტრონული ლინზების მცირე აპერტურის გამო, რომლებიც ატარე-

<sup>47</sup> კოჰერენტულობაში ადრე გულისხმობდნენ ორი და მეტი სინათლის სხივის ერთმანეთში ინტერფერირების შესაძლებლობას. ლაზერული სინათლის წყაროების გავრცელებასთან ეს ცნება განაზოგადეს და ეხლა კოჰერენტულობას განიხილავენ როგორც ტალღური გამოსხივების სივრცული და დროითი პერიოდულობის სრულყოფილობის საზომს. ამასთან დაკავშირებით არჩევენ სივრცულ და დროით კოჰერენტულობას. ობიექტი „ნათდება“ სივრცულად კოჰერენტული გამოსხივებით.

ბენ თითქმის პარალელურ სხივებს, და მეორეც, იმიტომ რომ კრისტალური ობიექტები თავისთავად წარმოადგენენ სამგანზომილებიან წერტილოვან მესერებს.

დავიწყოთ უმარტივესი შემთხვევის განხილვით: მესერის, რომელშიც მონაცვლებიან განსხვავებული სიგანის მქონე გამჭვირვალე და გაუმჭვირვალე ზოლები (აბსორბციული მესერი). როგორც ვიცით, სინათლის სხივების პარალელური კონით განათებული ასეთი მესერი გამოიწვევს გარკვეულ მიმართულებით სინათლის დიფრაქციას. ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ ვიპოვოთ დიფრაქციული სურათის პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდი, და ვაწარმოოთ სურათის ისეთი ინტერპრეტირება, რომ მივიღოთ რაც შეიძლება უფრო სრული ინფორმაცია ობიექტის შესახებ. ამ მიზნით, მიკროსკოპში გამოსაკვლევი ობიექტის უკან ათავსებენ გამადიდებელ ლინზებს. სურ. 27 განმარტავს სხივების სვლას ლინზის და ობიექტის ასეთი განლაგებისას. ლინზა აგროვებს ობიექტის სხვადასხვა წერტილიდან გამოსულ ყველა პარალელურ სხივს ლინზისა და ეკრანს შორის არსებულ ფოკალურ სიბრტყეში მყოფ წერტილში. ამ რიგად ამ სიბრტყეში წარმოიქმნება ენერჯის განსაკუთრებული განაწილება, რომელსაც ახეს მიხედვით ეწოდება ობიექტის პირვანდელი გამოსახულება. განხილულ შემთხვევაში, ნახატის სიბრტყის პერპენდიკულარულად განლაგებულ ფოკალურ სიბრტყეში წარმოიქმნებოდა პარალელური ხაზების ერთობლიობა, რომელიც უნდა განვიხილოთ როგორც დიფრაქციული სურათი.

ფოკალური სიბრტყის მიღმა სხივები კვლავ იშლებიან. სხვა სიბრტყეში, რომელიც ასევე ნაჩვენებია სქემაზე, წერტილში იკრიფება ობიექტის ერთი და იმავე ადგილიდან სხვადასხვა მიმართულებით გასული სხივები. ის სხივები, რომლებიც იკრიფება შესაბამის „გამოსახულების წერტილში“ გამოსულია, როგორც ეს ჩანს სურ. 27-ან, პირველადი გამოსახულების სხვადასხვა „დიფრაქციული წერტილებიდან“ და ამიტომაც გადიან სხვადასხვა მანძილს. ვინაიდან ეს სხივები კოჰერენტულია, ისინი ინტერფერირებენ ერთმანეთში. ამრიგად, გამოსახულების სიბრტყეში წარმოიქმნება ობიექტის მეორადი ნამდვილი გამოსახულება, როგორც პირველადი გამოსახულებიდან გამოსული სხივების ინტერფერენციის შედეგი. რაც უფრო მეტი სხივების რაოდენობა იღებს მონაწილეობას წერტილის გამოსახვაში, ანუ რაც მეტია ობიექტივის ლინზაში მოხვედრილი დიფრაგირებული სხივების რაოდენობა, მით მეტია მისი გამოსახულების „შესაბამისობა“ თავის თავთან. ლუმერის წესის თანახმად:

*თუ კი ოპტიკური სისტემა ჰქმნის გამოსახულებას დამახინჯებების გარეშე და სრულად იჭერს ობიექტის მიერ დიფრაგირებულ სინათლეს, მაშინ გამოსახულება სწორედ გადასცემს ობიექტის მიერ გაზნეული გამოსხივების ამპლიტუდების და ფაზების განაწილებას.*

მაგრამ იმის მოთხოვნა, რომ ობიექტივმა სრულად დაიჭიროს სინათლის ყველა დიფრაგირებული სხივი პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამავდროულად, რთული ობიექტის შემთხვევაში მაინც, ძნელია წინასწარ განვსაზღვროთ თუ რამდენად იმოქმედებს გამოსახულების ხარისხზე მხოლოდ დიფრაგირებული სხივების ნაწილის გამოყენება.

ამიტომაც ელექტრონული მიკროსკოპის დიდი უპირეტესობა სინათლის მიკროსკოპის მიმართ მდგომარეობს იმაში, რომ ობიექტის გამოსახულება დიდ გადიდებაზე მაღალი რიგის დიფრაქციული მაქსიმუმების გაუთვალისწინებლადაც კი საკმაოდ კარგად „შეესაბამება“ ობიექტს.

როგორც სინათლის, ასევე ელექტრონულ მიკროსკოპში ობიექტივის ფოკალურ სიბრტყეში, როგორც ეს სურ. 27-ზეა ნაჩვენები, წარმოიქმნება ობიექტის დიფრაქციული სურათი. მაგრამ დიფრაქციული სურათების წარმოქმნა ოპტიკურ და ელექტრონულ მიკროსკოპებში პრინციპულად განსხვავებულია.

პერიოდული ობიექტის სინათლეოპტიკურ გამოსახულებაზე შეიძლება მკაფიოდ განისაზღვროს სინათლის დიფრაქციის წარმომშვები ელემენტები – ანუ კვლევის ობიექტი, რომელიც გამჭირვალეა სინათლის ტალღების მიმართ ჰქმნის გამოსახულებას რომელშიც შეიძლება მკაფიოდ დავინახოთ მისი შიდა სტრუქტურა. ამის საწინააღმდეგოდ, კრისტალების ელექტრონულ მიკროფოტოსურათებზე არ აღინიშნება ელექტრონული დიფრაქციის წარმომშობი სივრცული მესერის გამოსახულება. ძალზე მაღალ გადიდებაზეც კი შეუძლებელია კრისტალური მესერის გამოსახულების მიღება. თხელი კრისტალების კრისტალური მესერის სიბრტყეების გამოსახულების მიღება შეიძლება დიფრაქციული სურათის ორი ან რამდენიმე რეფლექსის გამოყენებით. ამის მიზეზი გამოსახულების შექმნის პირობებშია ჩადებული. სინათლეოპტიკური გამოსახულების შექმნაში მონაწილეობს პირველადი გამოსახულების ყველა გამოვლენილი დიფრაქციული მაქსიმუმი. როგორც ეს ჩანს სურ. 27-ზე მოყვანილი სქემიდან, გამოსახულებაში თავისი წვლილი შეაქვთ, ნულოვან და პირველი რიგის დიფრაქციულ მაქსიმუმებს. ამ შემთხვევაში გამოსახულება სწორედ გადმოსცემს საწყისი მესერის კვანძების რაოდენობას და მანძილს მათ შორის.

ელექტრონულ მიკროფოტოსურათზე გამოსახულება იქმნება სხივების მხოლოდ ცენტრალური კონით (ანუ ნულოვანი რიგის დიფრაქციული მაქსიმუმით). ელექტრონული ლინზების სფერული აბერაციის მაღალი მნიშვნელობის გამო გამოსახულების შემქმნელი სხივების დერძისმიმდებარე კუთხე უნდა იყოს მცირე, რასაც უზრუნველყოფს ე.წ. აპერტურის დიაფრაგმა. ამიტომაც, გამოსახულების შექმნისას, ზოგადად რომ ითქვას, შეუძლებელია კრისტალურ მესერზე დიფრაგირებული ყველა სხივის გამოყენება. ყველა დიფრაქციული მაქსიმუმი (რეფლესი) ცენტრალურის გამოკლებით, კავდება აპერტურის დიაფრაგმით, ამიტომაც კრისტალური მესერის გამოსახულება ვერ შეიქმნება.

ობიექტის გამოსახულებაზე ამპლიტუდების და ფაზების განაწილების სწორი გადაცემის ერთ-ერთი პირობა, ლუმერის წესის თანახმად, მდგომარეობს იმაში რომ ობიექტზე დიფრაგირებული სინათლე უნდა სრულად მოხვდეს ობიექტივში. მაგრამ ელექტრონულ მიკროსკოპში გამოსახულების შექმნისას ჩვეულებრივ გამოიყენება მხოლოდ პირველი რიგის დიფრაქციული მაქსიმუმები, რასაც ბუნებრივად ინფორმაციის დაკარგვა ახლავს. თანაც გამოსახულების გადიდების ზრდა ვერ მიგვაღებინებს დამატებით ინფორმაციას.

ის ფაქტი, რომ ელექტრონულ მიკროსკოპში ნულოვანი რიგის (სხივების ცენტრალური კონა) ერთი დიფრაქციული მაქსიმუმიც კი ჰქმნის გამოსახულებას ერთი შეხედვით ეწინააღმდეგება აბეს მოთხოვნას, რომლის თანახმადაც ობიექტის ნამდვილი გამოსახულების (ანუ მეორადი გამოსახულების) შესაქმნელად აუცილებელია სულ მცირე კიდევ ერთი დიფრაქციული მაქსიმუმი. მაგრამ უნდა გვახსოვდეს, რომ ელექტრონული სხივები დიფრაგირებენ კრისტალურ მესერზე, რომლის გამოსახულებაც ნორმალურ პირობებში არ უნდა წარმოიქმნას. წარმოიქმნება მხოლოდ კრისტალის გეომეტრიული ფორმის გამოსახულება. კრისტალის გეომეტრიული ფორმით განპირობებული ყველა დიფრაქციული ეფექტი, ელექტრონების მცირე ტალღის სიგრძის გამო, მოთავსებულია „სხივების ცენტრალურ კონაში“. მართალია რომ, ვინაიდან ელექტრონების გამამანათებელი კონის აპერტურა სასრულია, ამ დიფრაქციული ეფექტების ნახვა არ შეიძლება, მაგრამ შესაძლებელია მათი დაკვირვება გარკვეული ხერხების გამოყენებით, რისთვისაც:

1. ობიექტები უნდა იყვნენ რაც შეიძლება მცირე ზომისა, რათა სხივის გადახრა დიფრაქციის დროს დიდი იყოს;

2. გამოსახულების წყარო და ელექტრონული სხივის სივრცითი კუთხე (აპერტურა) უნდა იყვნენ რაც შეიძლება უფრო მცირე, რათა დიფრაქციული სურათი გახდეს მაქსიმალურად მკვეთრი.

სინათლის და ელექტრონულ მიკროსკოპებში გამოსახულების შექმნის პროცესების შედარებისას ნათელი ხდება, რომ უკანასკნელში, გამოსახულების შექმნისას დიფრაქციული სურათი (ჩვეულებრივ მას ელექტრონოგრაფიას უწოდებენ) თამაშობს სრულიად განსხვავებულ როლს, ვიდრე დიფრაქციული სურათი სინათლის მიკროსკოპიაში. ოპტიკური მიკროსკოპის დიფრაქციულ სურათზე მონახული ყველა რეფლექსი მონაწილეობს გადიდებული გამოსახულების შექმნაში. ამის საწინააღმდეგოდ, ელექტრონულ მიკროსკოპში, გამოსახულების შექმნისას იკარგება ნულოვანზე უფრო მაღალი რიგის დიფრაქციულ მაქსიმუმებში კონცენტრირებული მთელი ენერგია. ეს პრინციპული განსხვავება უნდა მუდამ გავითვალისწინოთ ელექტრონული მიკროფოტოსურათების გაშიფრისას. ამით ასევე აიხსნება ელექტრონოგრაფიის განსაკუთრებული მნიშვნელობა სინათლის მიკროსკოპში შექმნილ დიფრაქციულ სურათთან შედარებით. ელექტრონოგრაფია შეიცავს გაცილებით მეტ ინფორმაციას ვიდრე თვით ელექტრონული მიკროფოტოსურათი. ის გვამღვეს კრისტალური სტრუქტურის გაშიფვრის გასაღებს, ხოლო ელექტრონული მიკროფოტოსურათი – ცნობებს კრისტალების ზომების და ფორმის შესახებ<sup>48</sup>.

სურ. 27-ზე ობიექტად იყო ამორჩეული აბსორბციული მესერი. ბევრ სხვა შემთხვევაში ოპტიკურ მიკროსკოპში გამოკვლეული ობიექტები ასევე წარმოადგენენ აბსორბციულ მესერებს, მაგალითად, ერთფერიანი ბიოლოგიური ან სამედიცინო პრეპარატები. ობიექტები, რომლებიც შეიძლება განიხილოს როგორც ფაზური მესერები ხშირად, ერთ ფერში შეღებვით, აბსორბციულ ობიექტებათ იქცევიან. სუფთა ფაზური ობიექტების კვლევის შემთხვევაში ფაზური კონტრასტის მეთოდით, კონტრასტი მეორად გამოსახულებაში იზრდება პირველად გამოსახულებაზე ზემოქმედების შედეგად. ამასთან, ფაზათა წანაცვლების შედეგად ინტერფერენციის პირობები დიფრაგირებულ და საწყის სხივებს შორის შეიძლება ისეთნაირად შეიცვალოს, რომ ობიექტის მეორად გამოსახულებაზე მეზობლად მყოფი უბნების გარდატეხის კოეფიციენტების სხვაობა გამოვლინდეს კონტრასტის სახით. ბევრი ელექტრონული მიკროსკოპის პრეპარატი უნდა განიხილოს როგორც სუფთა ფაზური ობიექტი. ამ დროს თითქმის ყველა ელექტრონი სრულად გაედინება პრეპერატში და ამიტომ შეიძლება მათი შთანთქმის უგულველყოფა. ელექტრონულ მიკროსკოპში ყველა ლინზას რომ ჰქონოდა თითქმის ერთნაირი აპერტურა, და შესაძლებელი ყოფილიყო მათი შეცდომების შესწორება, რასაც ადგილი აქვს სინათლის მიკროსკოპებში, მაშინ, პრინციპში, შესაძლებელი იქნებოდა გარჩევითი უნარიანობის გაზრდა, მაგრამ ერთდროულად უნდა მიგვეღო განსაკუთრებული ზომები გამოსახულების კონტრასტის გაზრდისათვის.

თანამედროვე ელექტრონულ მიკროსკოპებში ძალზე მცირე აპერტურის მქონე ლინზებით, ასეთი სახის ზომების მიღება საჭირო არ არის ვინაიდან მტკიცებულებიდან რომ კრისტალური ობიექტის რეალური გამოსახულების შექმნისას, ჩვეულებრივ პირობებში, გამოიყენება ნულოვანი რიგის დიფრაქციული მაქსიმუმები არ გამომდინარეობს, რომ უფრო მაღალი რიგის დიფრაქციული მაქსიმუმები არ მოქმედებენ გამოსახულების კონტრასტის განაწილებაში. ობიექტის ყველა წერტილში, რომლებშიც ფიზიკის კანონების თანახმად სივრცულ მესერზე წარმოიქმნება დიფრაქცია, ცენტრალური სხივების კონიდან გამოედინება და შემდეგ აპერტურის დიაფრაგმით კავდება

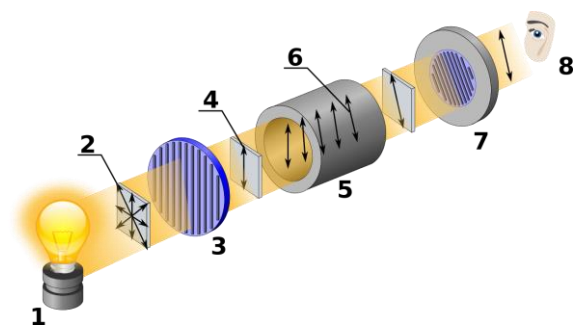
<sup>48</sup> კრისტალების ფორმაზე და ზომებზე ზოგჯერ შეიძლება ვიმსჯელოთ დიფრაქციული მაქსიმუმების ფორმის მიხედვით.

ენერჯის ნაწილი. კრისტალური ობიექტის ელექტრონულმიკროსკოპიულ გამოსახულებების შესაბამის წერტილებში ეს ენერჯია უნდა აკლდეს და შესაბამისად ეს უბნები იქნება უფრო ბნელი, ვიდრე დანარჩენი, ვინაიდან ელექტრონების ნაწილი სხივების პირველადი კონიდან დიფრაქციის გამო გადაიხრება სხვა მიმართულებებით.

გამოსახულების კონტრასტს, რომელიც წარმოიშვება დიფრაქციის შედეგად, დიფრაქციული კონტრასტი ეწოდება. კონტრასტის წარმოქმნის ეს მექანიზმი მოქმედებს არა მხოლოდ კრისტალურ ობიექტებზე. ამორფულ ობიექტებში გაბნეული გამოსხივების ნაწილი ასევე კავდება აპერტურის დიაფრაგმით. კონტრასტის ასეთ ტიპს აბსორბციულს უწოდებენ. პრინციპული სხვაობა კონტრასტის ამ ორი ფორმის შორის არ არსებობს. თვითოეული წარმოადგენს ელექტრონების დრეკადი გაბნევის შედეგს ატომების ბირთვებზე. დიფრაქციული კონტრასტის წარმოშობა, რომელიც საკმაოდ მნიშვნეულია გამოყენებითი ან თეორიული კვლევების ჩატარებისას მიღებული ელექტრონული მიკროფოტოსურათების ინტერპრეტირების დროს, შეუძლებელია გავიგოთ დიფრაქციის კანონების ცოდნის გარეშე, რომლებიც ჯობია განიხილოს რენტგენის სხივების დიფრაქციის თეორიის მაგალითზე.

**პოლარიმეტრი.**

თავის დასასრულს განვიხილოთ *პოლარიმეტრი* (იხ. სურ. 31) და *პოლარიზაციული ანალიზის* პრინციპი.



სურ. 31. ოპტიკური აქტივობის გაზომვა პოლარიმეტრის მეშვეობით:

- 1 – სინათლის წყარო; 2 – არაპოლარიზებული სინათლე;
- 3 – პოლარიზატორი; 4 – პოლარიზებული სინათლე;
- 5 – კიუვეტი ხსნარით; 6 – ოპტიკური დატრიალება 30°;
- 7 – ანალიზატორი; 8 – დამკვირვებელი.

*პოლარიმეტრია* ეს ფიზიკური კვლევების მეთოდია, რომელიც ეფუძნება სინათლის პოლარიზების ხარისხისა და პოლარიზების სიბრტყის დატრიალების კუთხის გაზომვას მისი აქტიურ ნივთიერებაში გავლისას. ოპტიკურად აქტიურად ითვლება ისეთი ნივთიერებები, რომელთა შემადგენლობაში შედის თუნდაც ერთი ასიმეტრიული ნახშირბადის ატომი, და რომლებსაც შეუძლიათ პოლარიზებული სინათლის სხივის პოლარიზაციის სიბრტყის დატრიალება. ოპტიკურად აქტიური ნივთიერებები, რომლებიც ატრიალებენ პოლარიზების სიბრტყეს საათის ისრის მიმართულებით, მარჯვნივ-მბრუნავს მიეკუთვნებიან და აღინიშნებიან (+) ან D-თი. წინააღმდეგ შემთხვევაში ნივთიერებები მარცხნივმბრუნავები არიან და აღინიშნებიან (-) ან L-ით. ხსნარებში დატრიალების კუთხე მათ კონცენტრაციაზე არის დამოკიდებული; ამიტომაც პოლარიმეტრია ფართოდ გამოიყენება ოპტიკურად აქტიური ნივთიერებების კონცენტრაციის გაზომვისას.

გამოსხივების კვლევის მეთოდები ეფუძნება შემდეგ გაზომვებს:

- გამოსხივების პოლარიზების ხარისხის (სინათლის, რადიოტალღების) გაზომვას;
- ნივთიერებების ან მათი ხსნარების ოპტიკური აქტივობის განსაზღვრას.

## 10. ატომური და კვანტური ფიზიკის ელემენტები.

### 10.1. ატომის აგებულება. ბორის თეორია.

როგორც ცნობილია, ატომები ნორმალურ მდგომარეობაში ნეიტრალურები არიან. ეს იმითაა განპირობებული, რომ მათ შემადგენლობაში შედიან დადებითად დამუხტული ბირთვები და უარყოფითად დამუხტული ელექტრონები. ატომის მთელი დადებითი მუხტი თავმოყრილია მის ცენტრალურ უბანში, ატომის ბირთვში, რომელიც შედგება პროტონებისაგან და ნეიტრონებისაგან ანუ ნუკლონებისაგან. პროტონები და ნეიტრონები ატომის ბირთვში ურთიერთგარდაიქმნებიან. პროტონის მუხტი აბსოლუტური სიდიდით ელექტრონის მუხტის ტოლია. ნეიტრონს კი მუხტი არ გააჩნია. ბირთვში პროტონების რიცხვი ელემენტის ატომურ ნომერს ემთხვევა. ბირთვის მუხტის სიდიდე მოცემული ელემენტის ყველა ატომისათვის ერთნაირია. ნუკლონების საერთო რაოდენობა ბირთვში განისაზღვრება მისი მასური რიცხვით – ეს ელემენტის ატომური მასის უახლოესი მთელი რიცხვია, რომელიც გამოისახება ატომურ ერთეულებში. ბირთვის სპინი მისი შემადგენელი ნუკლონების სპინების ჯამის ტოლია. ბირთვის რადიუსი  $10^{-13}$ სმ-ის რიგისაა და ატომის რადიუსზე  $10^5$  ჯერ მცირეა. ასე რომ ატომი პრაქტიკულად ცარიელია და არე ბირთვსა და ელექტრონულ ღრუბელს შორის ელექტრომაგნიტური ველითაა შევსებული.

1913 წელს ბორმა ჩამოაყალიბა ატომების მიერ სინათლის გამოსხივების მექანიზმის თეორია, რომელიც ითვალისწინებდა სინათლის კვანტურ ბუნებას. ეს თეორია ორ პოსტულატს ეფუძნებოდა:

1. ატომის შინაგანი ენერჯია დისკრეტულია; მას მხოლოდ ამ ატომისათვის დამახასიათებელი გარკვეული, დაშვებული მნიშვნელობების (ან დონეების) მიღება შეუძლია. ატომის ამ დონეების შესაბამისი მდგომარეობა სტაციონარულია: ასეთ მდგომარეობაში ატომი არ ასხივებს ელექტრომაგნიტურ ტალღებს, მასში ელექტრონების მოძრაობის მიუხედავად.
2. ატომის ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას ადგილი აქვს მონოქრომატული ელექტრომაგნიტური ტალღის გამოსხივებას ან შთანთქმას. გამოსხივებული ტალღის სიხშირე განპირობებულია იმ დონეების ენერჯიების სხვაობით, რომელთა შორისაც ადგილი აქვს გადასვლას:

$$\nu = \Delta E/h \quad (58)$$

სადაც  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  ჯ.წმ – პლანკის მუდმივაა.

ხშირად გამოიყენება სიდიდე  $\hbar = h/2\pi$  (ე.წ. პლანკის მოყვანილი ან დირაკის მუდმივა).

ბორის თეორიის თანახმად სტაციონარულ მდგომარეობაში ატომებში ელექტრონები მოძრაობენ მკაცრად გარკვეული რადიუსის ორბიტებზე

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{2\pi m e^2} \quad (59)$$

სადაც  $m$  – ელექტრონის მასაა,  $r_n$  – ორბიტის რადიუსი,  $n = 1, 2, 3, \dots$  – მთელი რიცხვი, რომელსაც ატომის კვანტური რიცხვი ეწოდება და რომელიც ემთხვევა ორბიტის რიგით ნომერს,  $e$  – ელექტრონის მუხტი (ელემენტალური მუხტი).

ფორმულა (59) გვიჩვენებს, რომ წყალბადის ატომის სტაციონარული ორბიტების რადიუსები კვანტური რიცხვის ( $n$ ) კვადრატის პროპორციულია.

ელექტრონის სრული ენერჯია

$$E_e = E_k + E_p = \frac{mv_n^2}{2} - \frac{e^2}{r_n}$$

სადაც  $E_k$  – კინეტიკური, ხოლო  $E_p$  – პოტენციალური ენერგია. პოტენციალური ენერგიის მინუსი გვიჩვენებს, რომ ბირთვისა და ელექტრონს შორის არსებობს მიზიდულობის ძალა. მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ რომ ორბიტებზე ელექტრონები კავდება კულონის ძალებით, ანუ  $F_k = e^2/r_n^2$  და რომ ის ცენტრისკენული ძალის ტოლია, მივიღებთ:

$$\frac{e^2}{r_n^2} = \frac{mv_n^2}{r}$$

აქედან

$$\frac{e^2}{r_n} = mv_n^2$$

ამიტომაც

$$E_e = -\frac{mv_n^2}{2}$$

ბირთვთან შეუღლებული ელექტრონის უარყოფითი ენერგია განპირობებულია იმით, რომ თავისუფალ ფორმაში ელექტრონის ენერგია მიღებულია = 0. ელექტრონის წრფიული სიჩქარე  $v_\ell$  იმ შემთხვევაში როდესაც  $n = 1$

$$v_\ell = \frac{2\pi e^2}{nh} = \frac{e^2}{nh} \quad (60)$$

და ამიტომაც საბოლოოდ მივიღებთ:

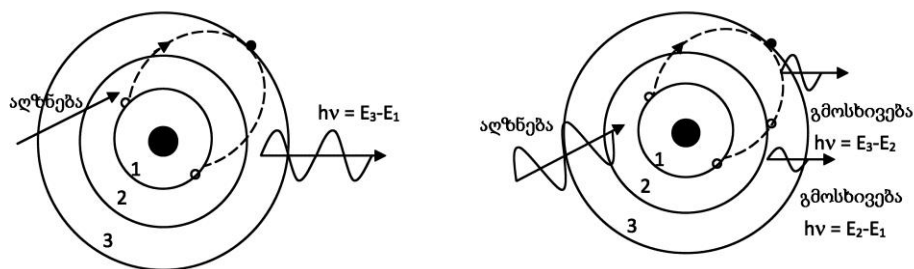
$$E_e = -2m \frac{\pi^2 e^4}{h^2 n^2}$$

აქედან შეიძლება გავეთეს დასკვნა, რომ ატომის ბირთვიდან დაშორებისას ატომის ენერგეტიკული დონეები იზრდება:

$$E_1 < E_2 < E_3 < \dots$$

ე.ი. ბირთვიდან დაშორებულ ენერგეტიკულ დონეებზე გადასვლისას აუცილებლად ადგილი უნდა ჰქონდეს ენერგიის შთანთქმას, ხოლო უფრო დაბალ ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლისას პირიქით გამოსხივებას.

რა თქმა უნდა ენერგიის მიმოცვლა ხდება მცირე პორციების ანუ კვანტების მეშვეობით ( $h\nu$ ). ატომი აღზნებულ მდგომარეობაში არამდგრადია, დაახლოებით  $10^{-8}$  წმ-ის შემდეგ იგი ბრუნდება თავის ძირითად მდგომარეობაში და გამოსხივდება ენერგიის კვანტები იმის და მიხედვით თუ რა ენერგეტიკული დონიდან მოხდა ძირითად სტაციონარულ დონეზე გადმოსვლა. გადასვლა შეიძლება მოხდეს როგორც ერთბაშად ისე შუალედური ეტაპების გავლითაც.



სურ. 32. ატომის გადაყვანა აღზნებულ მდგომარეობაში ენერგიის ორი კვანტით, და ენერგიის ორი კვანტის ერთდროული (a), ან ეტაპობრივი (b) გამოსხივება სტაციონარულ მდგომარეობაში დაბრუნებისას.



ფორმულა (23) საფუძველზე შეიძლება ელექტრონის იმპულსის მომენტის პოვნა

$$L_e = mv_n r_n$$

სადაც,  $v_n$  და  $r_n$  ელექტრონის წრფიული სიჩქარე და ორბიტის რადიუსია რომელიც ხასიათდება  $n$  კვანტური რიცხვით.  $m$  – ელექტრონის მასაა.

აქედან, განტოლება (60) საფუძველზე შეიძლება ჩაიწეროს

$$L_e = \frac{m r_n v_n}{n \hbar} \quad (61)$$

ფორმულა (59) საფუძველზე შეიძლება ჩავეწეროთ:

$$2\pi m e^2 r_n = h^2 n^2$$

ან და თუ შემოვიღებთ პლანკის მუდმივას ნაცვლად დირაკის მუდმივას:

$$m e^2 r_n = 2\pi \hbar^2 n^2$$

ჩავსვათ ეს გამოსახულება (61) განტოლებაში, მაშინ

$$L_e = \frac{2\pi \hbar^2 n^2}{n \hbar} = 2\pi n \hbar = n h \quad (62)$$

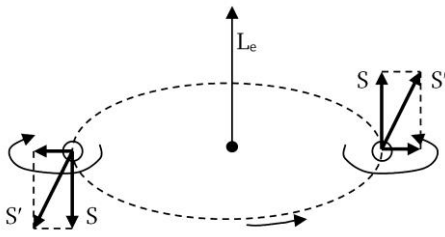
ბორის თეორიამ მნიშვნელოვანი როლი შეასრულა კვანტურ მექანიკის განვითარებაში. ამ თეორიის შემდგომმა განვითარებამ აჩვენა, რომ ატომის სტაციონარული მდგომარეობების ზუსტი დახასიათებისათვის აუცილებელია სხვა დამატებითი ფაქტორების გათვალისწინებაც მათ შორის უმნიშვნელოვანესია ოთხი კვანტური რიცხვი.

## 10.2. კვანტური რიცხვები.

სულ ცნობილია ოთხი კვანტური რიცხვი: მთავარი, ორბიტალური, მაგნიტური და სპინური.

1. მთავარი კვანტური რიცხვი  $n$  განსაზღვრავს ატომის სტაციონარულ ენერგეტიკულ დონეებს. მან შეიძლება მიიღოს მთელი ნატურალური მნიშვნელობები 1, 2, 3, ... სტაციონარული დონეები იყოფიან მახლობელ ქვედონეებად დანარჩენი კვანტური რიცხვების მნიშვნელობის მიხედვით.
2. ორბიტალური კვანტური რიცხვი  $\ell$  განსაზღვრავს ატომის ენერგეტიკულ ქვედონეებს რომლებიც შეესაბამებიან ელექტრონის ორბიტალური იმპულსის მომენტის ( $L_e$ ) დაშვებულ მნიშვნელობებს, რომელიც (62) თანახმად უნდა იყოს პლანკის მუდმივას ჯერადი:  $L_e = (\ell + 1)h$ . აქ  $L_e$  – ელექტრონის იმპულსის ორბიტალური მომენტის ნებადართული მნიშვნელობაა. ორბიტალური კვანტური რიცხვი განაპირობებს ელექტრონების ორბიტების ფორმას, ანუ რა თანაფარდობაში იმყოფებიან ელექტრონის ელიფსური ორბიტის დიდი და მცირე რადიუსები:  $b/a = (\ell + 1)/n$  სადაც  $n$  – მთავარი კვანტური რიცხვია,  $\ell$  – ორბიტალური კვანტურ რიცხვი ხოლო  $a$  და  $b$  ელიფსური ორბიტის დიდი და მცირე რადიუსებია. ორბიტალური კვანტური რიცხვი  $\ell = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ .
3. მაგნიტური კვანტური რიცხვი  $m_\ell$  ახასიათებს ელექტრონის ორბიტის სიბრტყის ცვლილებას გარე მაგნიტური ველის ზეგავლენით. მაგნიტურ კვანტურ რიცხვს შეუძლია თანმიმდევრულად მიიღოს მნიშვნელობები 0 დან  $\ell$ -მდე (ორბიტალურ კვანტურ რიცხვამდე). ე.ი.  $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$  (“ $\pm$ ” ნიშნები შეესაბამება ორბიტის ორ მდგომარეობას მისი სიბრტყის  $180^\circ$  შებრუნებისას).
4. სპინური კვანტური რიცხვი  $m_s$  ახასიათებს ელექტრონის სპინის ორიენტაციას, ანუ მის ნიშანს.

სპექტრალური ხაზების თხელი სტრუქტურის გამოკვლევა აჩვენებს, რომ ატომებში რომლებსაც გააჩნია ერთი გარე ელექტრონი ეს ხაზები გაორმაგებულია (ე.წ. დუბლეტები). ამ ეფექტს უკავშირებენ სპინის ვექტორის სხვადასხვა ორიენტაციას ორბიტალური იმპულსის მომენტის ვექტორის მიმართ. ეს ყველაფერი ზეგავლენას ახდენს ელექტრონის ენერგიაზე რაც განაპირობებს ატომის დამატებით ენერგეტიკული ქვედონების წარმოქმნას. დამატებითი იქნება ორი ორიენტაცია: სპინის ვექტორის ( $S'$ ) პროექცია ( $S$ ) ორბიტალური მომენტის ვექტორის ( $L_e$ ) მიმართულების პარალელურად ან პირიქით ანტიპარალელურად. სურ. 33-ზე ისრებით ნაჩვენებია ელექტრონების მოძრაობის მიმართულება სპინური და ორბიტალური მომენტების შექმნისას. სპინის პროექცია ( $S$ ) განისაზღვრება როგორც სპინური კვანტური რიცხვის ( $m_s$ ) და პლანკის მუდმივას ( $h$ ) ნამრავლი:  $S = m_s h$ .



სურ. 33. სპინის ვექტორის  $S'$  პროექცია  $S$  ორბიტალური მომენტის ვექტორის მიმართულებაზე  $L_e$  მის პარალელურად ან ანტიპარალელურად.

სპინურმა კვანტურმა რიცხვმა შეიძლება მიიღოს მხოლოდ ორი მნიშვნელობა:  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  („+“ პარალელური ორიენტაცია, „-“ კი ანტიპარალელური). ვინაიდან სპინზე საუბრისას გულისხმობენ მის ორბიტალურ მომენტზე პროექციას, ითვლება, რომ ელექტრონის სპინი რიცხობრივად პლანკის მუდმივას ნახევრის ტოლია.

ოთხი კვანტური რიცხვის მიხედვით ბორისებრივ ატომის მოდელში მიმდინარეობს ელექტრონების დაჯგუფება შრეების და ქვეშრეების მიხედვით. უკანასკნელები ჰქმნიან გარკვეულ ენერგეტიკულ დონეებს.

ერთნაირი მთავარი კვანტური რიცხვის ( $n$ ) მქონე ელექტრონები ჰქმნიან ელექტრონულ გარსებს. ერთი და იგივე გარსის ელექტრონები ჰქმნიან ქვეგარსებს მათი ორბიტალური კვანტური რიცხვის ( $l$ ) შესაბამისად.

$n$							$l$					
1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5
K	L	M	N	O	P	Q	s	p	d	f	g	h

ვინაიდან ორბიტალური კვანტური რიცხვი იღებს მნიშვნელობებს 0-დან  $(n-1)$ -მდე, ქვეგარსების რიცხვი გარსის რიგითი ნომრის  $n$ -ის ტოლია. ამრიგად გარსი K შედგება მხოლოდ ერთი (s) ქვეგარსისგან, გარსი L შედგება ორი ქვეგარსისგან (s და p), გარსი M – სამიდან (s, p, d) და ა.შ. ამასთან ელექტრონების რაოდენობა თითოეულ ქვეგარსზე განისაზღვრება მაგნიტური ( $m_l$ ) და სპინური ( $m_s$ ) კვანტური რიცხვებით და ნაჩვენებია როგორც ხარისხის მაჩვენებელი მის (ქვეგარსის) განმსაზღვრავ ასოსთან. გარსების შევსებისას უნდა იქნეს დაცული პაულის პრინციპი: ატომში არ შეიძლება არსებობდეს ორი ისეთი ელექტრონი, რომლებსაც ოთხივე კვანტური რიცხვი ერთნაირი ექნება.

ელექტრონული შრე K წყალბადის ატომში, რომელიც შეიცავს მხოლოდ ერთ ელექტრონს აღინიშნება როგორც 1s და წარმოაჩენს ერთ წრიულ ორბიტას. ჰელიუმში

იგივე შრეზე იმყოფება ორი ელექტრონი, რომლებიც მარტო სპინური რიცხვებით განსხვავდებიან:  $1s^2$ . მენდელეევის ცხრილის მეორე პერიოდის ელემენტებს ემატება მეორე L გარსი, რომელიც შეიძლება შედგებოდეს ორი ქვეგარსისგან (s და p). თავიდან ივსება ქვეგარსი 2s: ლიტიუმში ერთი ელექტრონით ( $1s^22s$ ), ბერილიუმისათვის – ორით ( $1s^22s^2$ ). შემდეგ ივსება ქვეშრე 2p მაგნიტური კვანტური რიცხვების სხვადასხვა მნიშვნელობების მქონე ელექტრონებით: ბორის და ნახშირბადის ატომისათვის  $m_\ell = 0$ , აზოტსა და ჟანგბადისათვის  $m_\ell = +1$ , ფტორსა და ნეონისათვის  $m_\ell = -1$  ამასთან ყოველ მათგანს გააჩნია ორი ელექტრონი საწინააღმდეგო სპინებით. ასე რომ ნეონის p ქვეშრე შევსებულია ექვსი ელექტრონით:  $1s^22s^22p^6$ . ნატრიუმს გამოუჩნდება მესამე M შრე ერთი ელექტრონით:  $1s^22s^22p^63s^1$  და ა.შ.

ზოგადათ ატომში მოცემული ელექტრონის დაკავშირების ენერგიას უწოდებენ ენერგიის იმ რაოდენობას, რომელიც აუცილებელია მისი ატომიდან გამოყოფისათვის. კვანტური რიცხვები დაკავშირების ენერგიებს განსაზღვრავენ. მსგავსი შინაარსი გააჩნია დაკავშირების ენერგიის ცნებას ატომის ბირთვის შემადგენელი ნუკლონების შემთხვევაში. აინშტაინის ფარდობითი თეორიის თანახმად დაკავშირების ენერგიის გამოყოფისას უნდა შემცირდეს ნაწილაკების მოსვენების მასა. ამდენად ბირთვის მასა თავისუფალი ნუკლონების მასათა ჯამზე ნაკლებია. ეს ეფექტი ცნობილია მასების დეფექტის (Dm) სახელით და ის ბირთვის მდგომარეობის სტაბილურობაზე მეტყველობს.

### 10.3. რადიაქტივობა.

ატომების ცნობილი ბირთვების (~2500) თითქმის 90% არასტაბილურია. არასტაბილური ბირთვი თვითნებურად გარდაიქმნება სხვა ბირთვებათ ნაწილაკების გამოსხივებით. ბირთვების ამ თვისებას რადიაქტივობას უწოდებენ. დიდ ბირთვებში არასტაბილურობას იწვევს კონკურენცია ბირთვული ძალებით გამოწვეული ნუკლონების მიზიდულობის და პროტონების კულონური განზიდვის ძალებს შორის. არ არსებობენ სტაბილური ბირთვები მუხტური რიცხვით (პროტონების რაოდენობა)  $Z > 83$ , და მასური რიცხვით (პროტონების + ნეიტრონების რიცხვი)  $A > 209$ <sup>49</sup>. მაგრამ რადიაქტიურები შეიძლება აღმოჩნდნენ ბირთვები Z და A-ს გაცილებით უფრო მცირე მნიშვნელობებით. თუ ბირთვი შეიცავს ნეიტრონებზე გაცილებით მეტ პროტონებს, არასტაბილურობას განაპირობებს კულონური ურთიერთობის ენერგიის სიჭარბე. ბირთვები ნეიტრონების ჭარბი რაოდენობით აღმოჩნდებიან არასტაბილურები იმის გამო, რომ ნეიტრონის მასა აღემატება პროტონის მასას. ბირთვის მასის გაზრდა კი იწვევს მის ენერგიის ზრდას.

რადიაქტივობა აღმოაჩინა ფრანგმა ფიზიკოსმა ა.ბეკერელმა 1896 წ. ბეკერელი იკვლევდა კავშირს ლუმინისცენციის და იმ დროისათვის ახლად აღმოჩენილ რენტგენის სხივებს შორის.

ბეკერელს მოუვიდა თავში აზრი: ხომ არ ახლავს ყველა ლუმინისცენციას რენტგენის გამოსხივება? თავის მოსაზრების შესამოწმებლად მან აიღო რამდენიმე შენაერთი, მათ შორის იყო ურანის მარილების ნაერთიც, რომელიც ფოსფორისცირებდა მომწვანო-მოყვითალო ნათებით. მან დააშუქა ეს მარილი მზის სხივებით, შეახვია შავ ქაღალდში და მოათავსა ბნელ კარადაში ფოტოფირზე, რომელიც ასევე იყო შავ ქაღალდში გახვეული. რამოდენიმე ხანში, ფოტოფირის გამჟღავნების შემდეგ, ბეკერელმა მართლაც დაინახა ფირზე აღბეჭდილი მარილის ნატეხის გამოსახულება. მაგრამ ლუმინისცენტური გამოს-

<sup>49</sup> მიღებულია ელემენტების (El) ჩაწერის შემდეგი ფორმა:  $\frac{A}{Z}El$ .

ხივება ვერ გააღწევდა შავ ქაღალდში, მხოლოდ რენტგენის სხივებს შეეძლო ამ პირობებში ფოტოფირის დაშუქება. ბეკერელმა რამდენჯერმე გაიმეორა ცდა იგივე შედეგით.

1896 წ 24 თებერვალს, ფრანგული მეცნიერებათა აკადემიის სხდომაზე მან გააკეთა მოხსენება: „ფოსფორისცენციით გამოწვეული გამოსხივება“. მაგრამ უკვე რამდენიმე დღეში საჭირო გახდა მიღებული შედეგებში კორექტივების შეტანა. 26 და 27 თებერვალს ბეკერელის ლაბორატორიაში ეპირებოდნენ უმნიშვნელო ცვლილებებით მორიგი ცდის ჩატარებას, მაგრამ ცუდი ამინდის გამო ცდა გადაიდო. ბეკერელი ვერ დაელოდა კარგ ამინდს და 1 მარტს გაამჟღავნა ფოტოფირი, რომელზეც იდო მზით გაუშუქებული ურანის მარილი. ბუნებრივია ის არ ფოსფორისცირებდა, მაგრამ ანაფექტი ფირზე მაინც გამოვლინდა. უკვე 2 მარტს ბეკერელმა მოახსენა ეს აღმოჩენა პარიზის მეცნიერებათა აკადემიის სხდომას. მან დაარქვა თავის ნაშრომს: „ფოსფორისცირებადი სხეულებით წარმოქმნილი უხილავი რადიაციის შესახებ“.

შემდგომში ბეკერელმა სცადა ურანის სხვა შენაერთები და მინერალები (მათ შორის ისეთიც, რომლებსაც არ ახასიათებდათ ფოსფორისცენცია), და აგრეთვე ლითონური ურანი. ფოტოფირი ყოველთვის იმუქებოდა. ერთხელ ბეკერელმა მარილსა და ფირს შორის მოათავსა მეტალის ჯვარი და მიიღო ფირფიტაზე მისი სუსტი კონტურები. მაშინ ნათელი გახდა, რომ აღმოჩენილია ახალი სხივები, რომლებიც გადიან გაუმჭვირვალ საგნებში მაგრამ არ წარმოადგენენ რენტგენის სხივებს.

ბეკერელმა დაადგინა, რომ გამოსხივების ინტენსივობა განისაზღვრება მხოლოდ ურანის რაოდენობით პრეპერატში და სულაც არ არის დამოკიდებული იმაზე თუ რა შენაერთებში იმყოფება. ამრიგად ეს თვისება მიეკუთვნებოდა არა შენაერთებს, არამედ ქიმიურ ელემენტს – ურანს.

თავის აღმოჩენას ბეკერელი უზიარებს მეცნიერებს რომლებთანაც ის თანამშრომლობდა. ორი წლის თავზე ფრანგმა მეცნიერებმა მარი და პოლ კიურიებმა დაადგინეს ტორიუმის რადიაქტივობა და აღმოაჩინეს ორი ახალი რადიაქტიური ელემენტი – პოლონიუმი  ${}^{210}_{84}Po$  და რადიუმი  ${}^{226}_{88}Ra$ .

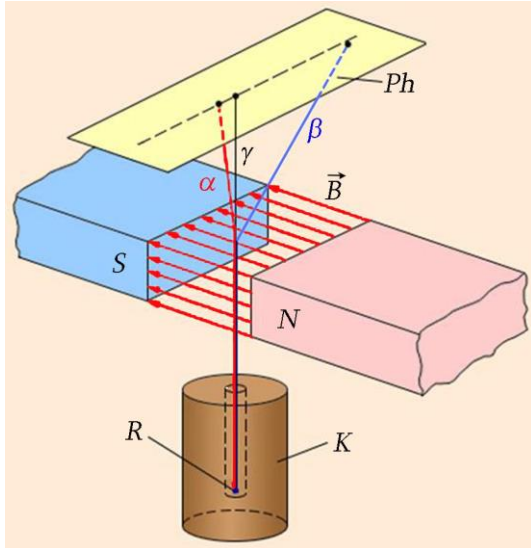
მათ დაადგინეს, რომ ბუნებრივი რადიაციის თვისება გააჩნია ურანის ყველა ნაერთს და უმეტესად თვით ურანს. ბეკერელი კი დაუბრუნდა მისთვის საინტერესო ლუმინოფორებს. მართალია მან გააკეთა კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი აღმოჩენა, რომელიც ეხებოდა რადიაქტივობას. ერთხელ, ბეკერელს ლექციისათვის დასჭირდა რადიაქტიური ნივთიერება, მან გამოართვა ის კიურის მეუღლეებს, ხოლო სინჯარა ნივთიერებით ჩაიღო ჟილეტის ჯიბეში. ლექციის შემდეგ მან დაუბრუნა ნივთიერება პატრონებს, მაგრამ მეორე დღეს აღმოაჩინა თავის სხეულზე, ჟილეტის ჯიბის ქვეშ, სინჯარის ფორმის დაწითლება. ბეკერელმა უამბო ამის შესახებ პიერ კიურის, რომელმაც დააყენა თავის თავზე ცდა: ათი საათის განმავლობაში ის ატარებდა წინა მხარზე მიმაგრებულ სინჯარას რაიუმით. რამოდენიმე დღეში მანაც შენიშნა დაწითლება, რომელიც შემდგომში გადაიზარდა მძიმე წყლულში და აწუხებდა მას ორი თვის განმავლობაში. ასე პირველად აღმოაჩინეს რადიაქტივობის ბიოლოგიური მოქმედება.

მაგრამ ამის შემდეგაც მეუღლე კიურიები მამაცურად აკეთებდნენ თავის საქმეს. საკმარისია ითქვას, რომ მარია კიური გარდაიცვალა სხივური დაავადებით (მიუხედავად იმისა, რომ 66 წლამდე იცოცხლა).

1955 წ გამოიკვლიეს მარი კიურის უბის წიგნაკები. ისინი დღემდე გამოასხივებენ მათი შევსების დროს შეტანილი რადიაქტიური დაბინძურების გამო. საინტერესოა, რომ ერთერთ ფურცელზე იყო აღმოჩენილი პიერ კიურის რადიაქტიური თითის ანაბეჭდი.

მომდევნო წლებში რადიაქტიური გამოსხივების ბუნებას მრავალი ფიზიკოსი იკვლევდა, მათ შორის ერნესტ რეზერფორდი იმყოფებოდა თავის მოწაფეებთან ერთად.

დადგინდა, რომ რადიაქტიური ბირთვები გამოასხივებენ სამი სახის ნაწილაკებს: დადებითად და უარყოფითად დამუხტულებს და ნეიტრალურებს. გამოსხივების ამ სამ სახეს დაარქვეს  $\alpha$ -,  $\beta$ - და  $\gamma$ -გამოსხივებები. სურ. 34-ზე მოყვანილია ექსპერიმენტის სქემა, რომელმაც დაადგინა რადიაქტიური გამოსხივების რთული შემადგენლობა. მაგნიტურ ველში  $\alpha$ - და  $\beta$ -სხივები განიცდიან გადახრას საწინააღმდეგო მიმართულებებით, თანაც  $\beta$ -სხივების გადახრის ხარისხი გაცილებით უფრო მეტია.  $\gamma$ -სხივები მაგნიტურ ველში საერთოდ არ გადაიხრებიან.



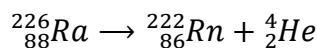
სურ. 34. ცდის სქემა, რომელშიც აღმოაჩინეს  $\alpha$ -,  $\beta$ - და  $\gamma$ -გამოსხივებები. K – ტყვიის კონტეინერი, R – რადიაქტიური პრეპარატი, Ph – ფოტოფირი,  $\vec{B}$  – მაგნიტური ველი.

რადიაქტიული გამოსხივების ეს სამი სახე ნივთიერების ატომების იონიზაციის უნარის მიხედვით ერთმანეთისაგან ძლიერ განსხვავდება და, აქედან გამომდინარე, განჭოლვის უნართაც. უმცირესი განჭოლვის უნარი  $\alpha$ -სხივებს ახასიათებს. ჰაერში ნორმალურ პირობებში  $\alpha$ -სხივები რამდენიმე სანტიმეტრიან გზას გაივლიან.  $\beta$ -სხივები გაცილებით ნაკლებად შთაინთქმება ნივთიერების მიერ. მათ შეუძლიათ რამდენიმე მილიმეტრიან ალუმინის ფენაში გავლა. ყველაზე დიდი განჭოლვის უნარი  $\gamma$ -სხივებს გააჩნია, რომლებიც 5-10 სმ სისქის ტყვიის ფენაში გადიან.

მე XX-ე საუკუნის მეორე ათწლეულში, რეზერფორდის მიერ ატომის ბირთვული აგებულობის აღმოჩენის შემდეგ, მტკიცედ დადგინდა, რომ რადიაქტივობა – ეს ბირთვების თვისებაა. კვლევებმა უჩვენა, რომ  $\alpha$ -სხივები წარმოადგენენ  $\alpha$ -ნაწილაკების – ჰელიუმის  ${}^4_2\text{He}$  ბირთვების ნაკადს.  $\beta$ -სხივები – ეს ელექტრონების ნაკადია, ხოლო  $\gamma$ -სხივები წარმოადგენენ მოკლევადიანი ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას ძალზე მცირე ტალღის სიგრძით  $\lambda < 10^{-10} \text{ მ} = 0,1 \text{ ნმ}$ , და გამომდინარე აქედან ნათლად გამოხატული კორპუსკულარული თვისებებით, ანუ წარმოადგენენ ნაწილაკების –  $\gamma$ -კვანტების ნაკადს.

**ალფა-დაშლა.**

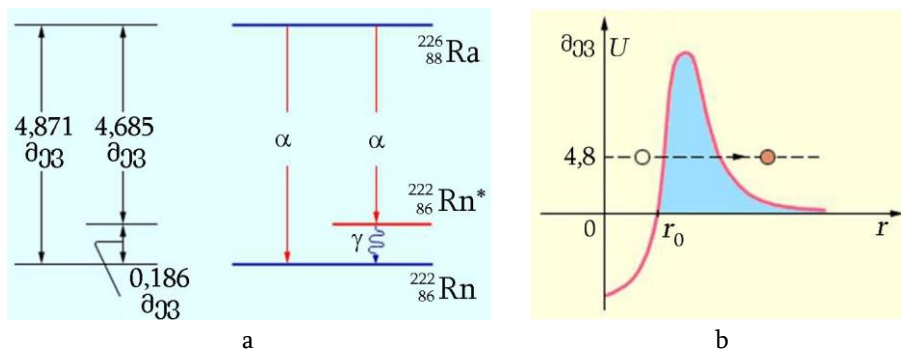
ალფა-დაშლას უწოდებენ  $Z$  პროტონების და  $N$  ნეიტრონების მქონე ბირთვის, თვითნებურ გარდაქმნას სხვა,  $Z - 2$  პროტონებისა და  $N - 2$  ნეიტრონების მქონე (შვილობილ) ბირთვში. ამ დროს გამოიყოფა  $\alpha$ -ნაწილაკი – ჰელიუმის ატომის ბირთვი  ${}^4_2\text{He}$ . ასეთი პროცესის მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ რადიუმის  $\alpha$ -დაშლა:



რეზერფორდი იყენებოდა რადიუმის ატომების მიერ გამოსხივებულ  $\alpha$ -ნაწილაკებს მძიმე ელემენტების ბირთვებზე გაბნევის ცდებში. რადიუმის ბირთვების  $\alpha$ -დაშლის შედეგად გამოყოფილი  $\alpha$ -ნაწილაკების სიჩქარე, რომელიც იზომებოდა მაგნიტურ ველში

ტრაექტორიის სიმრუდის მიხედვით, შეადგენდა დაახლოვებით  $1,5 \cdot 10^7$  მ/წმ, ხოლო შესაბამისი კინეტიკური ენერჯია –  $7,5 \cdot 10^{-13}$  ჯ ( $\sim 4,8$  მევ). ეს სიდიდე ადვილად განისაზღვრება მშობლიური და შვილობილი და აგრეთვე ჰელიუმის ბირთვების მასების ცნობილი მნიშვნელობების მიხედვით. მიუხედავად იმისა, რომ გამოსხივებული  $\alpha$ -ნაწილაკის სიჩქარე საკმაოდ დიდია, ის მაინც შეადგენს სინათლის სიჩქარის მხოლოდ 5%, ამიტომაც გათვლების შესრულებისას შეიძლება კინეტიკური ენერჯიის არარელატივისტური გამოსახულებების გამოყენება.

კვლევებმა უჩვენა, რომ რადიაქტიურ ნივთიერებას შეუძლია ენერჯიის რამდენიმე დისკრეტული მნიშვნელობების მქონე  $\alpha$ -ნაწილაკების გამოსხივება. ეს აიხსნება იმით, რომ ბირთვები, ატომების მსგავსად, შეიძლება იმყოფებოდნენ განსხვავებულ აღზნებულ მდგომარეობებში. ერთ-ერთ ასეთ აღზნებულ მდგომარეობაში შეიძლება აღმოჩნდეს შვილობილი ბირთვი  $\alpha$ -დაშლის დროს. ამ ბირთვის ძირითად მდგომარეობაში მომდევნო გადასვლისას, გამოიყოფა  $\gamma$ -კვანტი. რადიუმის  $\alpha$ -დაშლის სქემა ორი მნიშვნელობის კინეტიკური ენერჯიის მქონე  $\alpha$ -ნაწილაკების გამოსხივებით მოყვანილია სურ. 41a-ზე.



სურ. 35 (a) რადიუმის ბირთვების  $\alpha$ -დაშლის ენერგეტიკული დიაგრამა. მოყვანილია რადონის ბირთვის აღზნებული  $^{222}_{86}\text{Rn}^*$  მდგომარეობა. რადონის ბირთვის გადასვლას აღზნებული მდგომარეობიდან ძირითადში თან ახლავს 0,186 მევ ენერჯიის მქონე  $\gamma$ -კვანტის გამოსხივება.

(b) პოტენციალურ ბარიერში  $\alpha$ -ნაწილაკების ტუნელირება.

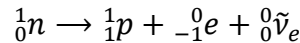
$\alpha$ -დაშლის თეორიაში იგულისხმება, რომ ბირთვების შიგნით შეიძლება წარმოიქმნას ორი პროტონისგან და ორი ნეიტრონისგან შექმნილი ჯგუფები, ანუ  $\alpha$ -ნაწილაკები. მშობლიური ბირთვი  $\alpha$ -ნაწილაკებისათვის *პოტენციალურ ორმოს* წარმოადგენს, რომელიც შემოსაზღვრულია *პოტენციალური ბარიერით*.  $\alpha$ -ნაწილაკის ბირთვში მყოფი ენერჯია არაა საკმარისი ამ ბარიერის გადასალახად (სურ. 41b).  $\alpha$ -ნაწილაკის გამოსვლა ბირთვიდან შესაძლებელი ხდება მხოლოდ კვანტურ-მექანიკური მოვლენის გამო, რომელიც ცნობილია, როგორც ტუნელური ეფექტი (გვირაბის ეფექტი). კვანტური მექანიკის თანახმად, არსებობს განსხვავებული ნულისგან ალბათობა რომ ნაწილაკი ბარიერს ქვემოდან გაივლის. ტუნელირების მოვლენა ატარებს ალბათურ ხასიათს.

### ბეტა-დაშლა.

$\beta$ -დაშლის დროს ბირთვიდან გამოსხივდება ელექტრონი. ბირთვის შიგნით ელექტრონები ვერ იარსებებენ, ისინი იქმნება  $\beta$ -დაშლის დროს ნეიტრონის პროტონში გადაქცევის შედეგად. ეს პროცესი შეიძლება წარმართოს არა მხოლოდ ბირთვის შიგნით, არამედ თავისუფალ ნეიტრონებშიც. სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა თავისუფალი ნეიტრონისათვის დაახლოვებით 15 წუთია. დაშლისას ნეიტრონი  $\frac{1}{2}n$  პროტონად  $\frac{1}{2}p$  და ელექტრონად  ${}^0_{-1}e$  გარდაიქმნება.

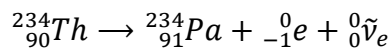
გაზომვებმა უჩვენა, თითქოს ამ პროცესში ირღვევა ენერჯიის შენახვის კანონი, ვინაიდან ნეიტრონის დაშლის შედეგად მიღებული პროტონის და ელექტრონის ჯამური

ენერგია ნაკლებია ნეიტრონის ენერგიაზე. 1931 წელს ვოლფგანგ პაულიმ გამოთქვა მოსაზრება, რომ ნეიტრონის დაშლისას გამოიყოფა კიდევ ერთი ნაწილაკი მასის და მუხტის ნულოვანი მნიშვნელობებით, რომელსაც თან გააქვს ენერგიის ნაწილი. ახალ ნაწილაკს ნეიტრინო (პატარა ნეიტრონი) დაარქვეს. იმის გამო, რომ ნეიტრინოს არ გააჩნია მასა და მუხტი, ის ძალიან სუსტად ურთიერთობს ნივთიერების ატომებთან, და ამიტომაც მისი მონახვა ექსპერიმენტებში ძალზე რთულია. ნეიტრინოს იონიზაციის უნარი იმდენად სუსტია, რომ ჰაერში ერთი იონიზაციის აქტი სრულდება მისი 500 კმ მანძილის გავლისას. ეს ნაწილაკი აღმოაჩინეს მხოლოდ 1953 წ. სადღეისოდ ცნობილია, რომ არსებობს ნეიტრინოს რამდენიმე ნაირსახეობა. ნეიტრონის დაშლის პროცესში წარმოიქმნება ნაწილაკი, რომელსაც დაარქვეს *ელექტრონული ანტინეიტრინო*. ის აღინიშნება სიმბოლოთი –  $\bar{\nu}_e$ . ამიტომაც ნეიტრონის დაშლის რეაქცია ჩაიწერება შემდეგი სახით:

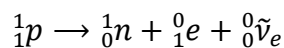


ანალოგიური პროცესი წარმართეება ბირთვის შიგნით  $\beta$ -დაშლის დროს. ელექტრონი, რომელიც წარმოიქმნება ერთ-ერთი ბირთვული ნეიტრონის დაშლისას დაუყოვნებლად ვარდება „მშობლიური სახლიდან“ (ბირთვიდან) უზარმაზარი სიჩქარით, რომელიც პროცენტის წილებით თუ განსხვავდება სინათლის სიჩქარისაგან. იმის გამო, რომ  $\beta$ -დაშლის დროს გამოყოფილი ენერგიის განაწილება ელექტრონსა, ნეიტრინოსა და შვილობილ ბირთვს შორის ატარებს შემთხვევით ხასიათს,  $\beta$ -ელექტრონებს შეიძლება ჰქონდეთ განსხვავებული სიჩქარეები მნიშვნელობათა ფართო ინტერვალში.

$\beta$ -დაშლის დროს მუხტური რიცხვი  $Z$  ერთით იზრდება, ხოლო მასური რიცხვი  $A$  უცვლელი რჩება. შვილობილი ბირთვი ელემენტის ერთ-ერთი იზოტოპის ბირთვით იქცევა, რომლის რიგითი ნომერი პერიოდული სისტემის ტაბულაში ერთით აღემატება საწყისი ბირთვის რიგით ნომერს.  $\beta$ -დაშლის ტიპიურ მაგალითათ შეიძლება მოვიყვანოთ ტორიუმის იზოტოპის  ${}^{234}_{90}\text{Th}$  გარდაქმნა, რომელიც წარმოიქმნება ურანის  ${}^{238}_{92}\text{U}$   $\alpha$ -დაშლის დროს პალადიუმში  ${}^{234}_{91}\text{Pa}$ .



ელექტრონულ  $\beta$ -დაშლასთან ერთად აღმოაჩინეს ეგრე წოდებული პოზიტრონული  $\beta^+$ -დაშლა, რომლის დროსაც ბირთვიდან გამოიფრქვევა პოზიტრონი  ${}^0_1e$  და ნეიტრინო  $\nu_e$ . პოზიტრონი წარმოადგენს ელექტრონის ნაწილაკ-ორეულას (ანტინაწილაკს), რომელიც განსხვავდება მისგან მხოლოდ მუხტის ნიშნით. პოზიტრონის არსებობა იწინასწარმეტყველა გამოჩენილმა ფიზიკოსმა პოლ დირაკმა 1928 წ. რამოდენიმე წელიწადში პოზიტრონი იყო აღმოჩენილი კოსმოსური სხივების შემადგენლობაში. პოზიტრონები წარმოიქმნება პროტონის ნეიტრონში გარდაქმნის რეაქციაში შემდეგი სქემით:



### გამა-დაშლა.

$\alpha$ - და  $\beta$ - რადიაქტივობისაგან განსხვავებით, ბირთვების  $\gamma$ - რადიაქტივობა არაა დაკავშირებული ბირთვის შიდა სტრუქტურის ცვლილებასთან და მას თან არ ახლავს მუხტური ან მასური რიცხვების ცვლილება. როგორც  $\alpha$ -, აგრეთვე  $\beta$ -დაშლის დროს შვილობილი ბირთვი შეიძლება აღმოჩნდეს რომელიღაც აგზნებულ მდგომარეობაში, და ჰქონდეს ჭარბი ენერგია. ბირთვის გადასვლას აგზნებული მდგომარეობიდან ძირითადად თან ახლავს ერთი ან რამდენიმე  $\gamma$ -კვანტის ამოფრქვევა, რომელთა ენერგია შეიძლება რამდენიმე მევ-ს აღწევდეს.

## რადიაქტიური დაშლის კანონი.

ეს კანონი, ექსპერიმენტების საფუძველზე, 1903 წ აღმოაჩინეს ფრედერიკ სოლდიმ და ერნესტ რეზერფორდმა. რადიაქტიური ნივთიერების ნებისმიერ სინჯში იმყოფება რადიაქტიური ატომების უზარმაზარი რაოდენობა. ვინაიდან რადიაქტიური დაშლა ატარებს შემთხვევით ხასიათს, და არაა დამოკიდებული გარა ფაქტორებზე, ამიტომაც დროის მოცემულ  $t$  მომენტისათვის დასაშლელი ბირთვების  $N(t)$  რაოდენობის შემცირების კანონი შეიძლება იყოს მიღებული რადიაქტიური დაშლის მნიშვნელოვან სტატისტიკურ მახასიათებელად.

ვთქვათ მცირე დროის  $\Delta t$  მონაკვეთში დასაშლელი ბირთვების  $N(t)$  რაოდენობა შეიცვალა  $\Delta N$ -ით ( $\Delta N < 0$ ). ვინაიდან თითოეული ბირთვის დაშლის ალბათობა დროში არ იცვლება, ამიტომაც დაშლების რაოდენობა იქნება  $N(t)$  ბირთვების რაოდენობის და  $\Delta t$  დროის ინტერვალის პროპორციული:

$$\Delta N = -\lambda N(t) \Delta t$$

პროპორციულობის კოეფიციენტი  $\lambda$  – დაშლის მუდმივაა, რომელიც ახასიათებს ბირთვის დაშლის ალბათობას  $\Delta t = 1$  წმ დროში, და რომლის განზომილობა წმ<sup>-1</sup>. მინუსის ნიშანი მიუთითებს რადიაქტიური ბირთვების რაოდენობის შემცირებაზე დროის გავლისას. კანონი გამოხატავს ბირთვების რადიაქტიური დაშლის დამოუკიდებლობას ერთმანეთსა და დროზე: მოცემული ბირთვის დაშლის ალბათობა დროის ყოველ მომდევნო ერთეულში არაა დამოკიდებული ექსპერიმენტის დაწყებიდან გასულ დროზე და ნიმუშში დარჩენილი ბირთვების რაოდენობაზე.

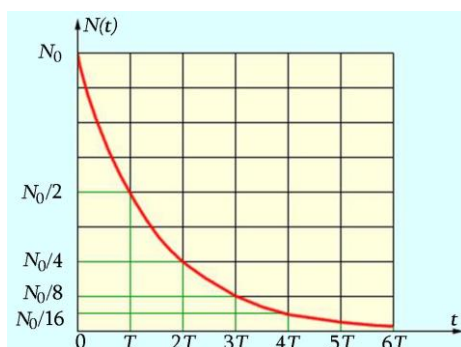
ეს ფორმულა ნიშნავს, რომ  $N(t)$  ფუნქციის ცვლილების სიჩქარე  $\frac{dN}{dt}$  თავად ამ ფუნქციის პირდაპირ პროპორციულია.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

აღნიშნული დამოკიდებულება აღინიშნება ბევრ ფიზიკურ ამოცანაში (მაგალითად, კონდენსატორის რეზისტორზე განმუხტვისას). ამ განტოლების ამოხსნას მივყევართ ექსპონენციალურ კანონამდე (სურ. 36):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

სადაც,  $N_0$  – რადიაქტიური ბირთვების საწყისი რაოდენობა  $t = 0$  შემთხვევაში.



სურ. 36. რადიაქტიური დაშლის კანონი.

$\tau = 1/\lambda$  დროში დაუშლელი ბირთვების რაოდენობა  $e \approx 2,7$  ჯერ შემცირდება. ამ  $\tau$  სიდიდეს რადიაქტიური ბირთვის *სიცოცხლის საშუალო დრო* ეწოდება. პრაქტიკული გამოყენებისათვის რადიაქტიური დაშლის კანონის ჩაწერა სხვა სახითაა უფრო მოხერხებული – ფუძეში  $e$ -ს ნაცვლად 2-ის გამოყენებით:



$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T}$$

სიდიდე  $T$ -ს **ნახევარდაშლის პერიოდი** ეწოდება.  $T$  დროში იშლება რადიაქტიური ბირთვების საწყისი რაოდენობის ნახევარი (სურ. 36). სიდიდეები  $T$  და  $\tau$  უკავშირდებიან ერთმანეთს შემდეგი შეფარდებით:

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln 2 = \tau \ln 2 = 0,693\tau$$

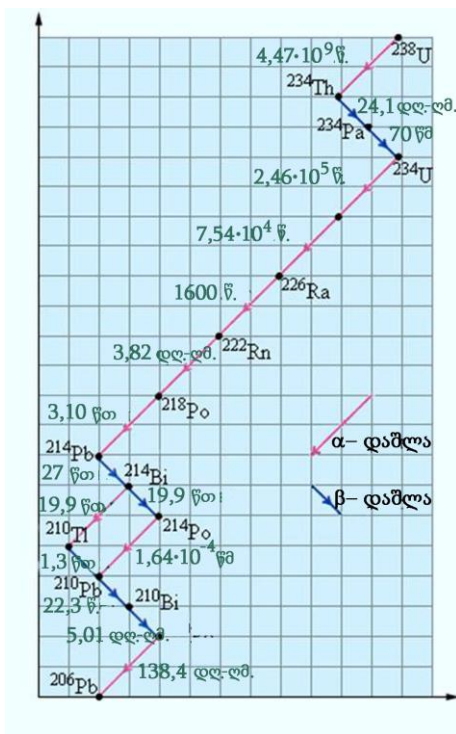
სურ. 36-ზე ილუსტრირებულია რადიაქტიური დაშლის კანონი.

ნახევარდაშლის პერიოდი – ეს არის პროცესის სველელობის სიჩქარის დახასიათების ძირითადი სიდიდე. რაც ნაკლებია ნახევარდაშლის პერიოდი, მით უფრო ინტენსიურია დაშლის მსველელობა. ასე, მაგალითად, ურანისათვის  $T \approx 4,5$  მილიარდი წელი, ხოლო რადიუმისათვის  $T \approx 1600$  წელს. ამიტომ რადიუმის აქტივობა გაცილებით მაღალია ურანის აქტივობაზე. არსებობენ რადიაქტიური ნივთიერებები რომელთა ნახევარდაშლის პერიოდი წამის ნაწილებით იზომება.

რადიაქტიურობის ზომის ერთეულად ბეკერელია (ბკ, Bq) მიჩნეული. ერთი ბეკერელი შეესაბამება ერთ დაშლას ერთ წამში. ხშირად გამოიყენებენ არასისტემურ ერთეულს – კიურის (კი, Ci). ერთი კიური შეესაბამება 1 გრამი რადიუმის დაშლების რიცხვს 1 წამში.  $1 \text{ კი} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ ბკ}$ .

ფართოდ ცნობილია არასისტემური ერთეული რენტგენი (რ, R) რომელიც გამოიყენება ექსპოზიციური დოზის განსაზღვრისას. ერთი რენტგენი შეესაბამება რენტგენის ან  $\gamma$ -გამოსხივების დოზას, რომლისას ჰაერის 1 სმ<sup>3</sup>-ში წარმოიქმნება იონების  $2 \cdot 10^9$  წყვილი (იონების ჯამური მუხტი CGS სისტემაში მუხტის ერთი ერთეულის ტოლია).

$\alpha$ - და  $\beta$ -რადიოაქტიური დაშლისას შვილობილი ბირთვი შეიძლება ასევე არასტაბილური აღმოჩნდეს. ამიტომაც შესაძლებელია რადიოაქტიური დაშლების თანმიმდევრული სერია, რომლებიც სტაბილური ბირთვების წარმოქმნით სრულდებიან. ბუნებაში რამდენიმე ასეთი სერია არსებობს. ყველაზე გრძელია  $^{238}_{92}\text{U}$ -ს სერია, რომელიც 14 თანმიმდევრული დაშლისგან შედგება (8  $\alpha$ - და 6  $\beta$ -დაშლისგან). ეს სერია სრულდება ტყვიის სტაბილური იზოტოპის  $^{206}_{82}\text{Pb}$  წარმოქმნით (სურ. 37).



სურ. 37. რადიოაქტიური  $^{238}_{92}\text{U}$  დაშლის სერიის სქემა. მითითებულია ნახევარდაშლის პერიოდები

ბუნებაში არსებობს  $^{238}_{92}U$ -ის ანალოგიური კიდევ რამდენიმე რადიოაქტიული სერია. ცნობილია აგრეთვე სერია, რომელიც იწყება ნეპტუნიუმიდან  $^{237}_{93}Np$  რომელიც ბუნებრივ პირობებში არ მუდავნდება, და მთავრდება ბისმუტზე  $^{209}_{83}Bi$  რადიოაქტიური დაშლისა ეს სერია წარმოიქმნება ბირთვულ რეაქტორებში.

რადიოაქტივობის საინტერესო გამოყენება არის არქეოლოგიური და გეოლოგიური მონაპოვრების დათარიღების მეთოდი რადიოაქტიური იზოტოპების კონცენტრაციის მიხედვით. ყველაზე ხშირად გამოიყენება დათარიღების რადიონახშირბადის მეთოდი.  $^{14}C$  ნახშირბადის არასტაბილური იზოტოპი წარმოიქმნება ატმოსფეროში ბირთვული რეაქციების შედეგად, რაც კოსმოსური სხივებით არის გამოწვეული. ამ იზოტოპის მცირე პროცენტი იმყოფება ჰაერში ჩვეულებრივ სტაბილურ  $^{12}C$  იზოტოპთან ერთად. მცენარეები და სხვა ორგანიზმები მოიხმარენ ნახშირბადს ჰაერიდან და მათში გროვდება ორივე იზოტოპი იმავე პროპორციით, რაც ჰაერშია. მცენარეების სიკვდილის შემდეგ ისინი ატოვებენ ნახშირბადის მოხმარებას და არასტაბილური იზოტოპი თანდათან აზოტად  $^{14}N$  გარდაიქმნება 5730 წლიანი ნახევარდაშლის პერიოდით. უძველესი ორგანიზმების ნაშთებში  $^{14}C$  რადიოაქტიული ნახშირბადის ფარდობითი კონცენტრაციის ზუსტი გაზომვით შეიძლება დადგინდეს მათი სიკვდილის დრო.

ყველა სახის რადიოაქტიული გამოსხივება (ალფა, ბეტა, გამა, ნეიტრონო), ასევე ელექტრომაგნიტური რადიაცია (რენტგენის გამოსხივება) ახდენენ ძალიან ძლიერ ბიოლოგიურ ზემოქმედებას ცოცხალ ორგანიზმებზე, რაც მდგომარეობს ცოცხალი უჯრედების შემადგენლობაში არსებული ატომებისა და მოლეკულების აგზნებასა და იონიზაციაში. მაიონიზირებელი რადიაციის ზემოქმედებით ირღვევა რთული მოლეკულები და უჯრედული სტრუქტურები, რაც იწვევს **ორგანიზმის სხივურ დაზიანებას**. ამიტომ ნებისმიერ რადიაციასთან მუშაობისას უნდა მიღებული იქნას რადიაციული დაცვის ყველა ზომა.

თუმცა ადამიანი შეიძლება დაექვემდებაროს მაიონიზირებელ რადიაციას საყოფაცხოვრებო პირობებშიც. ადამიანის ჯანმრთელობისთვის სერიოზულ საფრთხეს შეიძლება წარმოადგენდეს ინერტული, უფერო, რადიოაქტიული აირი რადონი  $^{222}_{86}Rn$  როგორც სურ. 37-ზე მოყვანილ სქემიდან ჩანს, რადონი არის რადიუმის  $\alpha$ -დაშლის პროდუქტი და მისი ნახევარდაშლის პერიოდია  $T = 3,82$  დღეს შეადგენს. რადიუმი, მცირე ოდენობით არის ნიადაგში, ქვებში, სხვადასხვა სამშენებლო კონსტრუქციებში. მცირე სიცოცხლის ხანგრძლივობის მიუხედავად, რადონის კონცენტრაცია უწყვეტად ივსება რადიუმის ბირთვების ახალი დაშლებით, ამიტომ რადონი შეიძლება დაგროვდეს დახურულ ნაგებობებში. ფილტვებში მოხვედრისას რადონი ასხივებს  $\alpha$ -ნაწილაკებს და გარდაიქმნება პოლონიუმად  $^{218}_{84}Po$  რომელიც არ არის ქიმიურად ინერტული ნივთიერება. შემდეგ მოსდევს ურანის სერიის რადიოაქტიული გარდაქმნების ჯაჭვი (სურ. 37). ამერიკის რადიაციული უსაფრთხოებისა და კონტროლის კომისიის მონაცემებით, ადამიანი საშუალოდ ღებულობს მაიონიზირებელი რადიაციის 55%-ს რადონისგან და მხოლოდ 11%-ს სამედიცინო პროცედურებიდან. კოსმოსური სხივების წვლილი შეადგენს დაახლოებით 8 %-ს. სიცოცხლის განმავლობაში ადამიანის მიერ მიღებული სრული დოზა მრავალჯერ ნაკლებია **ზღვრულად დასაშვებ დოზაზე** (ზდდ), რომელიც დგინდება ზოგიერთი პროფესიის ადამიანებისთვის, რომლებიც დამატებით მაიონიზირებელ გამოსხივებას განიცდიან.

### რადიაციის რეგისტრირების მოწყობილობები.

ჩვენ ვნახეთ, რომ რადიაცია ცოცხალ სისტემებისათვის ძალზე სახიფათოა, ამიტომ საჭიროა ამ გამოსხივების რაღაცნაირი რეგისტრირება, რათა დადგინდეს უსაფრთხო ე.წ.

ფონური გამოსხივება. იყო შექმნილი რადიაციის სპეციალური მრიცხველები, რომლებსაც ჩვენ განვიხილავთ გეიგერის მრიცხველის მაგალითზე. გეიგერის, ან გეიგერ-მიულერის მრიცხველი წარმოადგენს აირგანმუხტავ ხელსაწყოს, რომელიც გამოიყენება მასში მოხვედრილი მაიონიზირებელი ნაწილაკების ავტომატური აღრიცხვისათვის.

პრინციპი შემოთავაზებული იყო 1908 წელს ჰანს გეიგერის მიერ; 1928 წელს კი ვალტერ მიულერმა, გეიგერის ხელმძღვანელობით ხელსაწყოს რამდენიმე ვერსიის პრაქტიკული რეალიზება მოახდინა. ეს ვერსიები კონსტრუქტიულად განსხვავდებოდნენ იმის მიხედვით, თუ გამოსხივების რა ტიპი უნდა დაერეგისტრირებინათ.

ხელსაწყო წარმოადგენს აირშევსებულ კონდენსატორს, რომელიც გაირღვევა აირის მოცულობაში მაიონიზირებადი ნაწილაკის გავლისას. დამატებითი ელექტრონული სქემა უზრუნველყოფს მრიცხველს კვებით (როგორც წესი, არანაკლებ 300 ვ). აუცილებლობისას უზრუნველყოფს განმუხტვის ქრობას და თვლის მრიცხველში გასული განმუხტვების რაოდენობას. გეიგერ-მიულერის მრიცხველის ფართო გამოყენება აიხსნება მისი მაღალი მგრძობიარობით, შესაძლებლობით დარეგისტრირდეს სხვადასხვა სახის გამოსხივებები, და დაყენების შედარებითი სიმარტივის და იაფასიანობის გამო.

გეიგერ-მიულერის ცილინდრული მრიცხველი შედგება მეტალის ან შიგნიდან მეტალიზირებული მინის მილისა და ცილინდრის ღერძზე გაჭიმულ მეტალის წვრილ ძაფისგან. ძაფი წარმოადგენს ანოდს, მილი კი – კათოდს. მილი შეივსება გაუხშობელი აირით, უმეტეს შემთხვევებში გამოიყენება კეთილშობილი აირები – არგონი და ნეონი. კათოდსა და ანოდს შორის იქმნება მაღალი ძაბვა (ასეულიდან ათასეულ ვოლტამდე) ელექტროდების გეომეტრიული ზომებისა და მრიცხველში მყოფი აიროვანი გარემოზე დამოკიდებულებით. უმეტეს შემთხვევებში ფართო გამოიყენება ჰპოვეს გეიგერის მრიცხველებმა, რომლებსაც ესაჭიროვება 400 ვ ძაბვა.

მრიცხველის მოქმედება ეფუძნება დარტყმით იონიზაციის მოვლენას. რადიაქტიული იზოტოპის მიერ გამოსხივებული  $\gamma$ -კვანტები მრიცხველის კედლებზე მოხვედრისას გააგდებინებენ მათ ელექტრონებს. ელექტრონები აირში მოძრაობისას და მის ატომებთან შეჯახებისას გააგდებინებენ მათ ელექტრონებს რი შედეგადაც იქმნება დადებითი იონები და თავისუფალი ელექტრონები. კათოდსა და ანოდს შორის მყოფი ელექტრონული ველი აჩქარებს ელექტრონებს ენერგიებამდე რომლებზეც იწყება დარტყმითი იონიზაცია. წარმოიქმნება იონების ზვავისებრივი ნაკადი, რომელიც იწვევს პირველადი მატარებლების გამრავლებას. ველის საკმაოდ დიდი დამაბულობის შემთხვევაში ამ იონების ენერგია საკმარისი ხდება რათა გაგრძელდეს ნაწილაკების მეორადი დაზვავება, რომელსაც შეუძლია დამოუკიდებელი განმუხტვის უზრუნველყოფა, რის შედეგადაც დენი მრიცხველში მკვეთრად იზრდება. იმისათვის, რომ მრიცხველს შეეძლოს მასში მოხვედრილი შემდეგი ნაწილაკის რეგისტრირება, ზვავისებრი განმუხტვა უნდა იყოს ჩახშობილი. ეს კი ავტომატურად ხორციელდება. ჩახშობის დასაჩქარებლად შეიძლება გამოიყენებოდეს სპეციალური სქემები, რომლებიც იძულებით შეამცირებენ მრიცხველზე ძაბვას, რაც ასევე იძლევა ანოდური წინაღობის შემცირებას და სიგნალის დონის გაზრდას. მაგრამ უფრო ხშირად მრიცხველის აირის ნარევი უმატებენ მცირე რაოდენობის ჰალოგენს (ბრომი ან იოდი) ან და შედარებით დიდი მოლეკულური მასის ორგანულ ნაერთებს (ჩვეულებრივ რაიმე სპირტს) – ეს მოლეკულები ურთიერთობენ დადებით იონებთან, რის გამოც წარმოიქმნება უფრო დიდი მასის და ნაკლები მოქნილობის მქონე იონები. გარდა ამისა ისინი ინტენსიურად შთანქვავენ განმუხტვის ულტრაიისფერ გამოსხივებას – ამ ორ ფაქტორს მივყევართ განმუხტვის სწრაფ და თვითნებურ ქრობამდე მცირე ანოდური წინაღობის შემთხვევაშიც კი. ასეთ მრიცხველებს თვითმქრობადებს უწოდებენ. ჩასაქრობ დანამატად სპირტის გამოყენების შემთხვევაში ყოველი იმპულსის

დროს მისი გარკვეული რაოდენობა იშლება, ამიტომაც ეს დანამატი იხარჯება და მრიცხველს რეგისტრირებული ნაწილაკების რაოდენობის გარკვეული (თუმცა საკმაოდ დიდი) რესურსი გააჩნია. რესურსის ამოწურისას მრიცხველი იწყებს „წვას“ – გამოსხივების არ არსებობის შემთხვევაშიც კი იწყება თვლის სიჩქარის თვითნებური ზრდა, შემდეგ კი მასში იწყება განუწყვეტელი განმუხტვები. ჰალოგენურ მრიცხველებში, ჰალოგენის დაშლილი მოლეკულები კვლავ ერთიანდებიან, ამიტომაც ამ მრიცხველების რესურსი მნიშვნელოვნად აღემატება სპირტის მრიცხველების რესურსს ( $10^{10}$  იმპულსი და მეტი).

სიგნალის ხანგრძლივობა გეიგერის მრიცხველიდან შედარებით დიდია ( $\sim 10^{-4}$  წმ). სწორედ ასეთი დროა საჭირო იმისათვის, რომ ანოდის ძაფის მახლობლად მყოფი ნელი დადებითი იონები ნაწილაკის და ელექტრონული ზვავის გავლის შემდეგ, წავიდნენ კათოდისაკენ, რითიც აღდგება დეტექტორის გრძნობიერება.

მრიცხველის მნიშვნელოვანი მაჩვენებელი ეს მისი ეფექტურობაა. სულაც არაა სავალდებულო, რომ მრიცხველში მოხვედრილმა ყველა  $\gamma$ -ფოტონმა მოგვეცეს მეორადი ელექტრონები და იქნეს რეგისტრირებული. ამის მიზეზი იმაშია, რომ  $\gamma$ -სხივების და ნივთიერების ურთიერთობის აქტები შედარებით იშვიათია, შედეგად კი მეორადი ელექტრონების ნაწილი შთაინთქმევა ხელსაწყოს კედლებით და არ აღწევს აირის მოცულობას.

გეიგერის მრიცხველის მიერ ნაწილაკების რეგისტრირების ეფექტურობა მათ ბუნებაზეა დამოკიდებული. დამუხტული ნაწილაკები (მაგალითად,  $\alpha$ - და  $\beta$ -სხივები) თითქმის ყოველთვის იწვევენ განმუხტვას მრიცხველში, მაგრამ მათი ნაწილი იკარგება მრიცხველის კედლების მასალაში. განსაკუთრებით ეს აქტუალურია  $\alpha$ -ნაწილაკებისათვის და რბილ  $\beta$ -გამოსხივებისათვის. მათი რეგისტრირებისათვის მრიცხველში აკეთებენ თხელ (2–7 მკმ  $\alpha$ -გამოსხივების რეგისტრაციისათვის და 10–15 მკმ რბილი  $\beta$ -გამოსხივებისათვის) ქარსის, ალუმინის ან ბერილიუმის ფოლგის ან და პოლიმერული აპკის ფანჯარას. რენტგენული და  $\gamma$ -გამოსხივებების მრიცხველის ეფექტურობა დამოკიდებულია მრიცხველის კედლების სისქეზე, მათ მასალაზე და თავად  $\gamma$ -გამოსხივებების ენერგიაზე. ვინაიდან  $\gamma$ -გამოსხივება სუსტად ურთიერთობს ნივთიერებასთან, ჩვეულებრივი  $\gamma$ -მრიცხველების ეფექტურობა მცირეა და შეადგენს სულ 1–2%. ყველაზე დიდი ეფექტურობა გააჩნია მრიცხველებს რომელთა კედლები გაკეთებულია დიდი ატომური ნომრის (Z) მქონე მასალისაგან, ვინაიდან ამ შემთხვევაში იზრდება მეორადი ელექტრონების წარმოქმნის შესაძლებლობა. გარდა ამისა მრიცხველის კედლები უნდა იყოს საკმაოდ სქელი. მრიცხველის კედლის სისქე ირჩევა მის მასალაში მეორადი ელექტრონების თავისუფალი გარბენის სიგრძესთან ტოლობის პირობიდან. კედლის დიდი სისქის შემთხვევაში მეორადი ელექტრონები ვერ გავლენ მრიცხველის მუშა მოცულობაში, და დენის იმპულსი ვერ წარმოიქმნება. ამას მივყევართ თვლის სიჩქარის დამახასიათებელ დამოკიდებულებამდე  $\gamma$ -კვანტის ენერგიაზე (ე.წ. „სვლა სიხისტით“) მკვეთრად გამოხატული მაქსიმუმით, რომელიც გეიგერის მრიცხველების უმეტესობისათვის იმყოფება რბილი  $\gamma$ -გამოსხივების მახლობლად. გეიგერის მრიცხველის გამოყენებისას დოზიმეტრულ აპარატურაში, „სვლას სიხისტით“ ნაწილობრივ ასწორებენ დამატებითი ეკრანის მეშვეობით (მაგალითად, ფოლადის ან ტყვიის გამოყენებით), რომელიც შთანთქამს რბილ  $\gamma$ -გამოსხივებას გრძნობიერების მაქსიმუმთან მახლობლად და ამასთან ერთად, მეორადი ელექტრონების გენერირების შედეგად და ეკრანის მასალაში კომპტონის გამოსხივების გამო, რამდენადმე ამაღლებს ხისტი  $\gamma$ -კვანტების რეგისტრირების ეფექტურობას. ამის შედეგად თვლის სიჩქარის დამოკიდებულება დოზის სიმძლავრეზე მნიშვნელოვნად სწორდება. აღნიშნულ ეკრანს ხშირად მოსახსნელს აკეთებენ, რათა შესაძლებლობა ჰქონდეთ ცალ-ცალკე  $\beta$ - და  $\gamma$ -გამოსხივებების გამოვლენა. რენტგენის გამოსხივების

რეგისტრირებისათვის კი გამოიყენება თხელ ეკრანიანი მრიცხველები ისეთები, როგორც  $\alpha$ - და რბილი  $\beta$ -გამოსხივებების დეტექტორებში.

ნეიტრონები პირდაპირი გზით ამ ტიპის მრიცხველებით ვერ რეგისტრირდებიან. მაგრამ, მრიცხველის აირის გარემოში ჰელიუმ-3 გამოყენებით ან და ბორის შეყვანით მისი კედლების შემადგენლობაში, საშუალებას იძლევა ნეიტრონების რეგისტრირება მოხდეს ბირთვული რეაქციების დამუხტული პროდუქტების მეშვეობით. დაბალი და ენერგიაზე ძალზე დამოკიდებული ეფექტურობის გარდა, გეიგერ-მიულერის მრიცხველის ნაკლი იმაშია, რომ ის ვერ ახდენს ნაწილაკების იდენტიფიცირებას და მათი ენერგიების განსაზღვრას. ეს ნაკლოვანებები დაძლეულია სცინტილაციურ მრიცხველებში.

გეიგერის მრიცხველით იონიზირებადი გამოსხივებების სუსტი ნაკადების გაზომვის დროს აუცილებელია მისი საკუთარი ფონის გათვალისწინება. სქელ ტყვიის დამცავ ფენებშიც კი თვლის სიჩქარე არასოდეს არ უტოლდება ნულს. ამ სპონტანური აქტივობის ერთ-ერთ მიზეზს წარმოადგენს კოსმოსური გამოსხივების ხისტი კომპონენტი, რომელიც მნიშვნელოვანი შესუსტების გარეშე აღწევს ტყვიის ათეულ სანტიმეტრებში კი და რომელიც ძირითადად მიუონებისაგან შედგება. დედამიწის ზედაპირის ყოველ კვადრატულ სანტიმეტრში საშუალოდ გაედინება ~1 მიუონი წუთში, ამასთან ერთად, გეიგერის მრიცხველით მათი რეგისტრირების ეფექტურობა შეადგენს 100%. ფონის სხვა წყარო – ესაა თვით მრიცხველის მასალის რადიაქტიური „დაბინძურება“. გარდა ამისა, საკუთარ ფონში მნიშვნელოვანი წვლილი მრიცხველის კათოდიდან გამოსულ ელექტრონების სპონტანურ ემისიას შეაქვს.

### ძირითადი ცნებები.

მაშ ასე, რადიაქტივობას უწოდებენ ზოგიერთი ელემენტების ბირთვის თვისებას თავისთავად (გარე ზემოქმედებების გარეშე) გარდაიქმნან სხვა ელემენტების ბირთვებად განსაკუთრებული ტიპის რადიაქტიური გამოსხივებით. თვით მოვლენას ეწოდება რადიაქტიური დაშლა და ხასიათდება მცირე რაოდენობის სითბოს გამოყოფით. რადიაქტიურობა შეიძლება იყოს ბუნებრივი და ხელოვნური, თუმცა ორივე ეს ტიპი ერთსა და იგივე კანონებს ემორჩილება.

რადიაქტიური გამოსხივებაზე საუბრისას გულისხმობენ გამოსხივების შემდეგ სამ სახეს:  $\alpha$ -,  $\beta$ - და  $\gamma$ -, რომლებიც საკმაოდ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან.

- **$\alpha$ -გამოსხივება** – ესაა მაღალი კინეტიკური ენერგიის მქონე (+) ნაწილაკების (ჰელიუმის ბირთვების) ნაკადი.
- **$\beta$ -გამოსხივება** – ესაა მაღალი კინეტიკური ენერგიის მქონე ელექტრონებისა (-) ან პოზიტრონების (+) ნაკადი.
- **$\gamma$ -გამოსხივება** ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა და წარმოადგენს მაღალი ენერგიის ფოტონების ნაკადს. მისი ტალღის სიგრძე 1 Å-ზე ნაკლებია.

რადიაქტიური დაშლის ძირითადი კანონი მდგომარეობს იმაში, რომ დროის ტოლ შუალედებში იშლება რადიაქტიური ნივთიერების არსებული (ჯერ კიდევ დაუშლელი რაოდენობის) ერთი და იგივე წილი. რადიაქტიური ნივთიერების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელია **დაშლის ნახევარპერიოდი** – ესაა დროის ის მონაკვეთი რომლის განმავლობაში დაიშლება რადიაქტიური ბირთვების ნახევარი. ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებისას მაღალი ენერგიის მქონე  $\alpha$ - და  $\beta$ -ნაწილაკები ისევე როგორც  $\gamma$ -ფოტონები, იწვევენ ნივთიერების იონიზაციას.

რადიაქტიური ნაწილაკის ნივთიერებაში შეღწევის მაქსიმალურ სიღრმეს, **გარბენს** უწოდებენ. მაიონიზირებელი უნარი ხასიათდება იონების წყვილების რაოდენობით,

რომელსაც წარმოქმნის ნაწილაკი 1 სმ გარბენზე ჰაერში. იმის გამო, რომ  $\alpha$ -ნაწილაკები წარმოადგენენ მაღალი ენერგიის დადებითად დამუხტული ნაწილაკების ნაკადს, ისინი იწვევენ ძლიერ იონიზაციას და ადამიანის ორგანიზმში შედარებით მცირე სიღრმეზე (0,1 მმ) შეაღწევენ. ამიტომაც ამ ნაწილაკებისაგან დასაცავად გამოდგება ნებისმიერი ნივთიერების თხელი ფენა.  $\alpha$ -ნაწილაკები საფრთხეს უქმნიან ორგანიზმს სუნთქვისა და საჭმლის მომნელებელი სისტემების ლორწოვან გარსზე მოხვედრისას.  $\beta$ -ნაწილაკები გაცილებით უფრო მცირე იონიზაციას იწვევენ და შესაბამისად ნივთიერებაში უფრო ღრმად აღწევენ. ორგანიზმში მათი შეღწევის სიღრმე რამდენიმე სანტიმეტრს აღწევს. ამ ტიპის გამოსხივებისაგან დასაცავად იყენებენ 1-2 სმ-ის სისქის ნებისმიერი ნივთიერების ფენას.  $\gamma$ -ფოტონები გამოირჩევიან მაღალი შეღწევადობით. ადამიანის ორგანიზმს ისინი განსჭვალავენ. ამავე დროს მათი მაიონიზებელი უნარი მცირეა, რაც იმითაა განპირობებული, რომ  $\gamma$ -ფოტონებს არ გააჩნიათ ელექტრული მუხტი. ამ გამოსხივებისაგან დასაცავად მხოლოდ წყლის, მიწის ან ბეტონის სქელი ფენა ან მძიმე მეტალების რამდენიმე სანტიმეტრის სისქის ფირფიტები გამოდგება.

მედიცინასა და ბიოლოგიაში ფართო გავრცელება ჰპოვა რადიოავტოგრაფიის მეთოდმა. მისი არსი იმაში მდგომარეობს რომ რადიოაქტიური ნივთიერების შემცველ სხეულს მოათავსებენ ფოტოფირზე, რის შედეგადაც მიიღება ანაბეჭდები. ფოტოფირის გაშავების ინტენსივობის მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ ობიექტში რადიოაქტიური ნივთიერების შემცველობა და განაწილება.

#### 10.4. ბირთვული-მაგნიტური რეზონანსი

იმის შემდეგ რაც ჩვენ მეტ-ნაკლებად გავერკვიეთ ატომის ბირთვის სტრუქტურაში, შეიძლება კვლავ დაუბრუნდეთ ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსის (ბმრ) მოვლენას, რომლის განხილვაც ჩვენ დავიწყეთ თავში „მაგნიტობიოლოგია და ბიომაგნეტიზმი“ და გავერკვიოთ მის ფიზიკურ საფუძვლებში.

ბმრ-ის მოვლენას საფუძვლად უდევს ატომის ნახევრადმთელი სპინის მქონე ( $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ ) ნუკლონებისაგან შემდგარი ბირთვების მაგნიტური თვისებები. ლუწი მასური და მუხტის რიცხვების მქონე ბირთვებს (ლუწ-ლუწი ბირთვები) მაგნიტური მომენტი არ გააჩნია. ყველა ბირთვი მუხტის მატარებელია. ზოგიერთ ბირთვში ეს მუხტი „ბრუნავს“ თავის ღერძის მიმართ. ამის შედეგად კი ბირთვში მაგნიტური დიპოლი გენერირდება.

ბირთვებს იმპულსის მომენტი გააჩნია (იხ. (23))

$$\ell = mvr = \omega mr^2$$

ან და, როგორც ხშირად იძახიან კუთხური მომენტი  $J = \hbar s$ , რომელიც უკავშირდება  $\mu$  მაგნიტურ მომენტს შემდეგი შეფარდებით:

$$\mu = \gamma J$$

სადაც,  $\hbar$  – პლანკის მოყვანილი მუდმივაა (დირაკის მუდმივა),  $s$  – სპინური კვანტური რიცხვი,  $\gamma$  – გირომაგნიტური შეფარდება (ელემენტარული ნაწილაკის დიპოლური მომენტის და მისი მექანიკური მომენტის, ანუ სპინის შეფარდება).

ბირთვის კუთხური და მაგნიტური მომენტები დაკვანტულია და თვითნებურად არჩეულ კოორდინატა სისტემაში მათი  $z$  ღერძზე პროექციების საკუთარი მნიშვნელობები განისაზღვრება შემდეგი შეფარდებით:

$$J_z = \hbar m_s \quad \mu_z = \gamma \hbar m_s$$

სადაც,  $m_s$  – ბირთვის საკუთარი მომენტის მაგნიტური კვანტური რიცხვია, რომლის მნიშვნელობები განისაზღვრება ბირთვის სპინური კვანტური რიცხვით

$$m_s = s, s - 1, s - 2, \dots, -s,$$

ანუ ბირთვი შეიძლება იმყოფებოდეს  $2s + 1$  სპინურ მდგომარეობაში:

- $s = 1/2$  შემთხვევაში შესაძლებელია 2 სპინური მდგომარეობა (+1/2 და -1/2);
- $s = 1$  შემთხვევაში — 3 სპინური მდგომარეობა (-1, 0, +1);
- $s = 3/2$  შემთხვევაში — 4 სპინური მდგომარეობა (-3/2, -1/2, +1/2 და +3/2).

ყველა კენტი მასური რიცხვის მქონე ბირთვს, და აგრეთვე პროტონების და ნეიტრონების კენტი რაოდენობის მქონე ბირთვებს გააჩნიათ მაგნიტური მომენტი ( $s \neq 0$ ). პირველ შემთხვევაში  $s$  იღებს ნახევრადმთელ მნიშვნელობებს (1/2, 3/2, 5/2...), მეორეში კი — მთელს (1, 2, 3...). პრაქტიკულად მნიშვნელოვან ელემენტებში სპინი 1/2 გააჩნია შემდეგ ბირთვებს:  $^1H$ ,  $^{13}C$ ,  $^{19}F$ ,  $^{31}P$ ,  $^{15}N$ . ბირთვებს  $^2H$  და  $^{14}N$  ახასიათებს 1-ის ტოლი სპინური რიცხვი; ბირთვებს  $^{11}B$ ,  $^{35}Cl$ ,  $^{37}Cl$ ,  $^{79}Br$ ,  $^{81}Br$  — 3/2. ფართო პრაქტიკაში გამოყენებული ბირთვების სპექტროსკოპიაში უდიდესი მნიშვნელობა გააჩნია  $s = 1/2$ -ის მქონე ბირთვებს (თანაც სპექტრების დიდი უმრავლესობა რეგისტრირდება  $^1H$  და  $^{13}C$  ბირთვებზე). ბირთვებში რომლებშიც  $s = 1$  მნიშვნელოვანია  $^2H$ -ის ბირთვები (ძირითადად დეიტერიუმული გამხსნელების გამო).

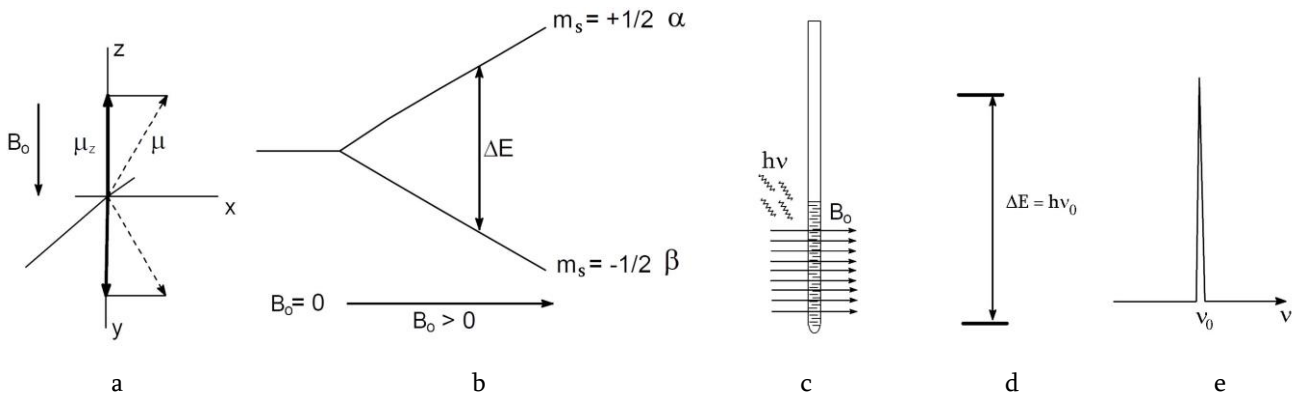
ასე რომ, მაგნიტური მომენტის პროექციის მნიშვნელობა:

$$\mu_z = \gamma \hbar m_s$$

პროტონებისათვის (ან და ნებისმიერი  $s = 1/2$  ბირთვისათვის —  $^{13}C$ ,  $^{19}F$ ,  $^{31}P$ ) ეს მნიშვნელობა შეადგენს:

$$\mu_z = \pm \gamma \hbar / 2 \quad (63)$$

ასეთი ბირთვი შეიძლება წარმოვიდგინოთ მაგნიტური დიპოლის სახით, რომლის z-კომპონენტი შეიძლება იყოს ორიენტირებული ან პარალელურად ან და ანტიპარალელურად z ღერძის დადებითი მიმართულების მიმართ თვითნებურად არჩეულ კოორდინატთა სისტემაში.



სურ. 38. (a)  $B_0$  მაგნიტურ ველში წარმოიქმნება ბირთვები ველის მიმართულების და ველის საწინააღმდეგო მიმართულების მაგნიტური მომენტებით ( $\mu$ ) და მათი z ღერძზე პროექციებით ( $\mu_z$ ). (b)  $s = 1/2$  ბირთვის ენერგეტიკული დონეების მაგნიტურ ველში ( $m_s = \pm 1/2$ ) გახლეჩა. (c) ამპულა გამოსაკვლევი შენაერთით თავსდება მაგნიტურ ველში და სხივდება  $\nu$  სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივებით. (d) სხვაობა ( $\Delta E$ ) ენერგეტიკულ დონეებს შორის განისაზღვრება  $\nu_0$  სიხშირით ( $\Delta E = h\nu_0$ ). (e) შთანთქმის სიხშირეზე დამოკიდებულების სპექტრი ( $\nu_0$  სიხშირის შემთხვევაში ადგილი აქვს შთანთქმას).

უნდა აღინიშნოს, რომ გარე მაგნიტური ველის არარსებობის შემთხვევაში, განსხვავებული  $\mu_z$ -ის მქონე ყველა მდგომარეობას გააჩნია ერთი და იგივე ენერგია, ანუ ენერგი-

ით გადაგვარებულები<sup>50</sup> არიან. გადაგვარება იხსნება გარე მაგნიტურ ველში (იხ. სურ. 38a) (ველის მიმართულების და მისი საწინააღმდეგო მიმართულების მაგნიტური მომენტების მქონე ბირთვებს გააჩნია სხვადასხვა ენერგია). ამ დროს ენერგიების გახლეჩა გადაგვარებული მდგომარეობის მიმართ გარე მაგნიტური ველის მნიშვნელობის (იხ. სურ. 38b) და მდგომარეობის მაგნიტური მომენტის პროპორციულია:

$$E = \mu_z B_0 \quad (64)$$

და  $s$  სპინური კვანტური რიცხვის მქონე ბირთვისათვის გარე მაგნიტურ ველში წარმოიქმნება  $2s + 1$  ემერგეტიკული დონეების მქონე სისტემა:

$$-\mu_z B_0, \quad -\frac{s-1}{s}\mu_z B_0, \quad \dots, \quad \frac{s-1}{s}\mu_z B_0, \quad \mu_z B_0 \quad (65)$$

ეს ნიშნავს, რომ იქმნება დონიდან დონეზე ენერგეტიკული გადასვლის შესაძლებლობა. სწორედ ეს გადასვლა წარმოადგენს *ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსის სპექტროსკოპიის* ფიზიკურ საწყისებს, რომელიც ეფუძნება მაგნიტურ ველში მოთავსებული ნიმუშის ბირთვების მიერ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შთანთქმას.

საერთო შემთხვევაში, ენერგეტიკული დონეების გახლეჩას მაგნიტურ ველში ეწოდება ზეემანის ეფექტი. ამრიგად, გამარტივებულ ფორმაში **ზმრ** სპექტროსკოპიის ექსპერიმენტი წარმოგვიდგება შემდეგნაირად: ამჟღავნებს გამოსაკვლევი შენაერთის ნიმუშით თავსდება მაგნიტურ ველში და დასხივდება  $\nu$  სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ტალღებით (იხ. სურ. 38c). გარკვეულ  $\nu_0$  სიხშირეზე, რომელიც შეესაბამება  $\Delta E = h\nu_0$  ენერგიას (იხ. სურ. 38d), აღინიშნება ენერგიის შთანთქმა. გრაფიკულად მას წარმოაჩინებენ შთანთქმის სიხშირეზე დამოკიდებულების სპექტრის სახით (იხ. სურ. 38e).

ვინაიდან სპექტრების დიდი უმრავლესობა რეგისტრირდება  $^1H$  და  $^{13}C$  ბირთვებზე, რომლებისთვისაც  $s = 1/2$  და შესაძლებელია 2 სპინური მდგომარეობა ( $+1/2$  და  $-1/2$ ), (65)-დან გამომდინარე შეიძლება ჩაიწეროს:

$$\delta E = \pm \mu_z B_0$$

ხოლო სპინური მდგომარეობების სხვაობა წარმოვადგინოთ როგორც:

$$\Delta E = \mu_z B_0 - (-\mu_z B_0) = 2\mu_z B_0 \quad (66)$$

გამოსახულება (66) ამტკიცებს, რომ ენერგიების სხვაობა  $\Delta E$  მაგნიტური ინდუქციის ( $B_0$ ) პროპორციულია (იხ. სურ. 38b), ვინაიდან დანარჩენი სიდიდეები – კონსტანტებია. სიდიდე  $B_0$  აზასიათებს მაგნიტური ველის დამაბულობას<sup>51</sup>. გავიხსენოთ, რომ მაგნიტური მომენტის პროექცია  $s = 1/2$  შემთხვევაში განისაზღვრება შეფარდებით (63), ხოლო ენერგიების სხვაობა (58)-ის საფუძველზე როგორც:

$$\Delta E = h\nu_0 = 2\pi\hbar\nu_0 \quad (67)$$

სადაც,  $\nu_0$  – ოსცილაციის სიხშირე მოცემული ენერგეტიკული დონისათვის.

ამიტომაც (66) და (63) საფუძველზე მივიღებთ:

<sup>50</sup> **გადაგვარება** – მოვლენა, რომლის დროსაც კვანტური ფიზიკური სისტემისათვის დამახასიათებელი ზოგიერთი ფიზიკური სიდიდე (მაგალითად, ენერგია, იმპულსი და ა.შ.) იღებს ერთსა და იგივე მნიშვნელობას აღნიშნული სისტემის განსხვავებული მდგომარეობებისათვის. გადაგვარების ჯერადობას უწოდებენ კვანტური ფიზიკური სისტემის განსხვავებული მდგომარეობების რაოდენობას, გარკვეული ფიზიკური სიდიდის ერთი და იგივე მნიშვნელობისას.

<sup>51</sup> აღნიშნავს  $B$  (მაგნიტური ინდუქცია ან მაგნიტური ნაკადის სიმკვრივე) შენაცვლება  $H$  სიდიდეს (მაგნიტური ველის დამაბულობა). ერთეულების SI სისტემაში საზომი ერთეული ტესლა (ტ) ენაცვლება ერთეულს გაუსი (გს):  $1 \text{ ტ} = 10^4 \text{ გს}$ . სიხშირის ერთეული ჰერცი (ჰც) შეცვლის ციკლების რაოდენობას ერთ წამში.



$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \quad (68)$$

გამოსახულება (67) გამოყენებით შეიძლება განისაზღვროს ბირთვის ოსცილაციის საკუთარი სიხშირე ( $\nu_0$ ):

$$\nu_0 = (\gamma/2\pi)B_0$$

როგორც კი წარმოიქმნება ორი დონის მქონე სისტემა, შეიძლება შევიტანოთ ენერგია რადიოსიხშირის გამოსხივების სახით  $\nu_1$  სიხშირით, რათა აღიძვრას გადასვლები ამ ენერგეტიკულ დონეებს შორის  $B_0$  მაგნიტურ ველში. **ზმრ-ის ფუნდამენტური განტოლება**, რომელიც აკავშირებს მიღებულ სიხშირეს ( $\nu$ ) მაგნიტური ველის დამაბულობასთან ჩაიწერება შემდეგნაირად:

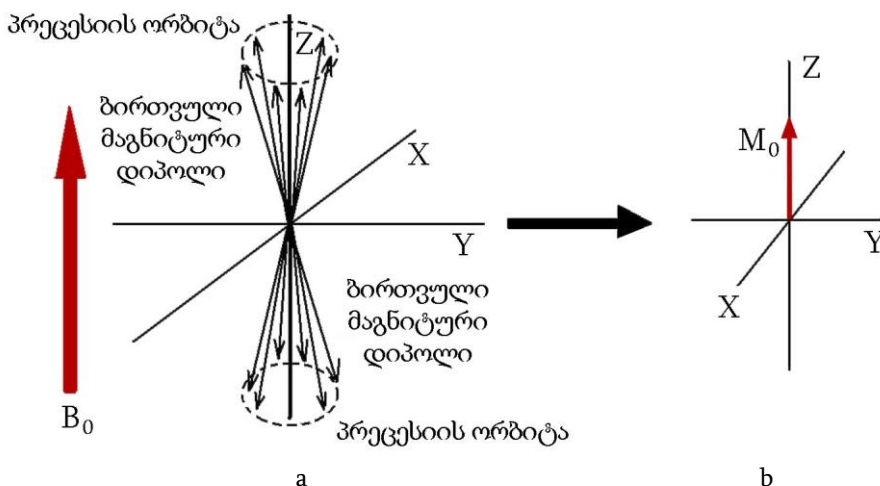
$$\nu_1 = (\gamma/2\pi)B_0 \quad (69)$$

სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, მიღებული სიხშირე უნდა იყოს ოსცილაციის საკუთარი სიხშირის ტოლი ( $\nu_1 = \nu_0$ ), რის შედეგადაც აღინიშნება რეზონანსული მოვლენები.

დასხივების სიხშირე  $\nu_1$  იმყოფება მეგაჰერცულ (რადიოსიხშირულ) დიაპაზონში (მგჰც). პროტონებისათვის  $B_0 = 2,35$ ტ მაგნიტური ველის პირობებში, დასხივების სიხშირე 100 მგჰც-ის ტოლია. ველის  $n$  ჯერ გაზრდის შემთხვევაში, ამდენჯერვე იზრდება რეზონანსის სიხშირე. სიხშირის და ველის ( $\gamma/2\pi$ ) ოდენობის შეფარდების შემთხვევაში სისტემა იმყოფება რეზონანსში; პროტონი შთანთქავს ენერგიას, გადაინაცვლება უფრო მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე, და შესაძლებელი ხდება სპექტრის ჩაწერა. სწორედ აქედან წარმოიქმნა **ზმრ** სპექტროსკოპიის სახელი. როგორც უკვე აღინიშნა  $\gamma$ -ს გირომაგნიტური შეფარდება ეწოდება, ის ფუნდამენტური ბირთვული მუდმივაა, და წარმოადგენს პროპორციულობის კოეფიციენტს ბირთვის მაგნიტურ მომენტსა ( $\mu$ ) და მის სპინს ( $s$ ) შორის:

$$\gamma = 2\pi\mu/\hbar s = \mu/\hbar s$$

რადიოსიხშირის ენერგია შეიძლება იყოს შეყვანილი ან უწყვეტი განფენის რეჟიმში სიხშირეების გარკვეულ დიაპაზონში (continuous-wave (CW) ანუ უწყვეტი რეჟიმი), ან და სიხშირეების სრული ნაკრების მქონე რადიოსიხშირის მოკლე იმპულსით (იმპულსური რეჟიმი). ეს ორი ხერხი შეესაბამება **ზმრ** სპექტრომეტრების ორ განსხვავებულ ტიპს. ამ დროს აღინიშნება ეკვივალენტური პროტონების ანსამბლი, რომლებიც შემთხვევითი ფაზით პრეცესირებენ z ღერძის ირგვლივ (ე.ი. მუდმივი მაგნიტური ველის  $B_0$  მიმართულების ირგვლივ) (იხ. სურ. 39), რითიც წარმოქმნიან ჯამურ მაკროსკოპულ დამაგნიტებას z ღერძის მიმართულებით, მაგრამ არა xy სიბრტყეში.



სურ. 39. (a) პრეცესირებადი ბირთვების ანსამბლი გამოიწვევს (b) მაკროსკოპულ დამაგნიტებას  $M_0$  მუდმივი მაგნიტური ველის ( $B_0$ ) მიმართულებით.

ამოცანა მდგომარეობს იმაში, თუ რა ხერხით მიეწოდოს მუდმივ მაგნიტურ ველში ორიენტირებულ პროტონებს ელექტრომაგნიტური ენერგია რადიოსიხშირის დიაპაზონში, შემდეგ კი როგორ გაიზომოს პროტონების მიერ შთანთქმული ენერგია უფრო მაღალ სპინურ მდგომარეობაში გადასვლისას. ამის გამორკვევა შეიძლება კლასიკური მექანიკის ტერმინებში, თუ წარმოვიდგინეთ პროტონი როგორც გარე მაგნიტურ ველში მბრუნავი ნაწილაკი. პროტონის მაგნიტური ღერძი პრეცესირებს მუდმივი მაგნიტური ველის ( $B_0$ )  $z$  ღერძის ირგვლივ (სურ. 39a) მსგავსად იმისა, თუ როგორ პრეცესირებს გრავიტაციის ძალის გამო ბზრიალა მისი ღერძის ვერტიკალური მდგომარეობიდან გადახრის შემთხვევაში.

როდესაც მიღებული მაღალსიხშირიანი ველის სიხშირე ( $\nu_1$ ) უტოლდება ეკვივალენტური პროტონების პრეცესიის სიხშირეს (კლასიკურ ფიზიკაში მას ლარმორის სიხშირეს ( $\nu_L$ ) უწოდებენ და მგჰც-ში ზომავენ), სისტემა აღწევს ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსის მდგომარეობას და ბმრ-ის ძირითადი განტოლება (69) შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\nu_L = \nu_1 = (\gamma/2\pi)B_0$$

ეს განტოლება გამოიყენება იზოლირებული პროტონების ანსამბლისათვის.

ცხრილი 9-ში მოყვანილია ზოგიერთი ატომის ბირთვის ლარმორის სიხშირეები მაგნიტური ინდუქციის სამი განსხვავებული მნიშვნელობისათვის. შეიძლება შევნიშნოთ, რომ რეზონანსული სიხშირის  $\nu_L$  დამოკიდებულება მაგნიტური ველის სიძლიერეზე ( $B_0$ ) პრაქტიკულად წრფიულია.

ბმრ-ზე თვალყური ადვილება იმით, რომ უმეტეს ნივთიერებებში ატომებს თავისი ელექტრონული გარსებისათვის არ გააჩნია მუდმივი მაგნიტური მომენტები **ორბიტალური მომენტის გაყინვის** მოვლენის გამო (ინგლ. *Orbital-Moment Quenching*). ეს მოვლენა წარმოადგენს კვანტური მექანიკის პარადოქსს. კლასიკური მექანიკის კანონების თანახმად ატომებში  $p, d, \dots$  მდგომარეობებში მყოფ ელექტრონებმა უნდა შექმნან ბირთვის მიდამოებში მაგნიტური ველები:

$$H = \frac{e}{mc} \frac{L}{r^3}$$

სადაც,  $L$  – ორბიტალური იმპულსის მომენტია.

ასე, მაგალითად, ფტორის ატომური ბირთვის მახლობლად უნდა იქმნებოდეს მაგნიტური ველი ინდუქციით  $6 \cdot 10^5$  ჰს. სინამდვილეში კი ატომებში ეს მაგნიტური ველები არ აღინიშნება.

### ზოგიერთი ატომის ბირთვის ლარმორის სიხშირეები

ცხრილი 9

ბირთვი	ლარმორის სიხშირე $\nu_L$ (მგჰც), $B_0 =$		
	0,5 ტ	1 ტ	7,05 ტ
$^1\text{H}$ (წყალბადი)	21,29	42,58	300.18
$^2\text{D}$ (დეიტერიუმი)	3,27	6,53	46,08
$^{13}\text{C}$ (ნახშირბადი)	5,36	10,71	75,51
$^{23}\text{Na}$ (ნატრიუმი)	5,63	11,26	79.40
$^{39}\text{K}$ (კალიუმი)	1,00	1,99	

ფიზიკურად ელექტრონის ორბიტალური მომენტის გაყინვის მოვლენა აიხსნება იმით, რომ ელექტრონის ორბიტა გარე მუხტების ზეგავლენით იწყებს პრეცესირებას და აღარ იმყოფება ერთ სიბრტყეში.

მეტალებში **ბმრ**-ის რეზონანსული სიხშირეები უფრო მაღალია ვიდრე დიელექტრიკებში. ეს ეგრე წოდებული ნაიტის წანაცვლება ( $\Delta\omega$  ნაიტის წანაცვლება (ინგლ. *Knight Shift*)), რომელიც მდგომარეობს **ბმრ**-ის რეზონანსული სიხშირის გაზრდაში მეტალებში ( $\omega_m$ ) დიელექტრიკებში აღნიშნული რეზონანსული სიხშირესთან ( $\omega_d$ ) შედარებით.

$$\omega_d : \omega_m = \omega_d + \Delta\omega$$

ბირთვების ზეთხელი ურთიერთობის გამო მეტალების გამტარობის ელექტრონებთან.

ზოგიერთი ქიმიური რეაქციის დინებისას მაგნიტურ ველში, რეაქციის პროდუქტების **ბმრ**-ის სპექტრებში აღინიშნება ან ანომალურად მაღალი შთანთქმა, ან რადიოგამოსხივება. ეს ფაქტი მოწმობს რეაქციის პროდუქტების მოლეკულებში ბირთვული ზეემანის დონეების არაწონასწორულ დასახლებაზე. ქვედა დონის ჭარბ დასახლებას თან ახლავს ანომალური შთანთქმა. ინვერსულ დასახლებას კი (ზედა დონე ქვედაზე მეტადაა დასახლებული) მივყევართ რადიოგამოსხივებამდე. მოყვანილ მოვლენას **ბირთვების ქიმიური პოლარიზაცია** ეწოდება.

უნდა აღინიშნოს, რომ ენერგეტიკული დონეების დასახლება, რომელიც შეესაბამება  $m_s = +1/2$  და  $m_s = -1/2$  მნიშვნელობებს, ბოლცმანის განაწილებით აღიწერება:

$$N_\alpha / N_\beta = \exp(-\Delta E / kT)$$

და თუ გავიხსენებთ (68) განტოლებას, შეიძლება დავწეროთ:

$$N_\alpha / N_\beta = \exp(-\gamma h B_0 / 2\pi kT) \approx 1 - (\gamma h B_0 / 2\pi kT)$$

ეს გამოსახულება ცხადყოფს, რომ სხვაობა ენერგეტიკული დონეების დასახლებაში  $N_\alpha$  და  $N_\beta$ , რომელიც განსაზღვრავს გადასვლის ალბათობას და მამასადამე სპექტრში სიგნალის ინტენსივობას, უშუალოდ ტემპერატურასთანაა დაკავშირებული – ტემპერატურის შემცირებისას **ბმრ** სპექტროსკოპიის მგრძნობიარობა იზრდება.

**ბმრ** მეთოდის მგრძნობიარობა გარკვეული ბირთვის გამოკვლევისას დამოკიდებულია მისი მაგნიტური მომენტის ( $\mu$ ) მნიშვნელობაზე, რომელიც განსაზღვრავს ენერგიების სხვაობას ბირთვული სპინური მდგომარეობებს შორის, და ზემოდმოყვანილი განტოლების თანახმად ქვედა დონის დასახლების სიჭარბეს. ნაჩვენები იყო, რომ ბირთვის სიგნალის *ინტენსივობა* პროპორციულია:

$$[(s + 1)/s^2] \mu^3 B_0^2$$

### სპექტროსკოპია.

**ბმრ** სპექტრომეტრის გულს წარმოადგენს ძლიერი მაგნიტი. ექსპერიმენტში, რომელიც პირველმა პრაქტიკაში განახორციელა პარსელმა, 5 მმ დიამეტრის მინის ამპულაში მყოფი ნიმუში თავსდება ძლიერი ელექტრომაგნიტის პოლუსებს შორის. შემდეგ, მაგნიტური ველის ერთგვაროვნობის გაუმჯობესების მიზნით, ამპულა იწყებს ტრიალს, ხოლო მასზე მოქმედი მაგნიტური ველი თანდათანობით იზრდება. გამოსხივების წყაროდ გამოიყენებენ მაღალი ვარგისიანობის<sup>52</sup> მქონე რადიოსიხშირის გენერატორს.

<sup>52</sup> **ვარგისიანობა** – რხევითი სისტემის პარამეტრი, რომელიც განსაზღვრავს რეზონანსის სიგანეს და ახასიათებს თუ რამდენად აღემატება სისტემის ენერგიის მარაგი მის კარგვას ფაზის 1 რადიანით შეცვლის დროში. აღინიშნება  $Q$  სიმბოლოთი (ინგლ. quality factor).  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ , სადაც  $R, L, C$  – შესაბამისად რხევითი სისტემის წინაღობა, ინდუქტიურობა და ტევადობაა.

მზარდი მაგნიტური ველის ქმედების შედეგად, ბირთვები, რომლებზეც აწყოილია სპექტრომეტრი იწყებენ რეზონირებას. ამ დროს, ეკრანირებული ბირთვები რეზონირებენ ოდნავ უფრო დაბალ სიხშირეზე ვიდრე ელექტრონულ გარსებს მოკლებული ბირთვები. ენერჯის შთანთქმა ფიქსირდება რადიოსიხშირის ხიდის მეშვეობით შემდეგ კი იწერება თვითმწერის მიერ. სიხშირეს ზრდიან სანამ არ მიაღწევენ გარკვეულ ზღვარს, რომლის გადალახვისას რეზონანსი შეუძლებელია.

ვინაიდან ხიდიდან საკმაოდ მცირე დენები მოედინება, ერთი სპექტრის გადაღებით არ შემოიფარგლებიან და აკეთებენ რამდენიმე ათეულ გასვლებს. ყველა მიღებული სიგნალი იკრიფება შენაჯამებ გრაფიკზე, რომლის ხარისხს განაპირობებს კონკრეტული ხელსაწყოათვის დამახასიათებელი სიგნალ/ხმაურის შეფარდება.

აღწერილ მეთოდში ნიმუში განიცდის უცვლელი სიხშირის მქონე რადიოსიხშირის დასხივებას, იმ დროს, როდესაც მაგნიტური ველის სიძლიერე ცვლადია. ამიტომაც ამ მეთოდს კიდევ უწყვეტი დასხივების მეთოდს უწოდებენ (CW, continuous wave).

**ბმრ** სპექტროსკოპიის ტრადიციულ მეთოდს ბევრი ნაკლი გააჩნია:

1. მას ესაჭიროება დიდი დრო ყოველი სპექტრის ასაგებად;
2. ის ძალზე მომთხოვნია გარე დაბრკოლებების არ არსებობის მიმართ, და, როგორც წესი, მიღებულ სპექტრებს გააჩნია მნიშვნელოვანი ხმაურები;
3. ის გამოუსადეგია მაღალი სიხშირის სპექტრომეტრების შექმნისათვის (300, 400, 500 და მეტი მგჰც).

ამიტომაც თანამედროვე **ბმრ**-ის ხელსაწყოებში გამოიყენება ე.წ. იმპულსური სპექტროსკოპიის მეთოდი (PW), რომელიც ეფუძნება მიღებული სიგნალის ფურიე-გარდაქმნებს. სადღეისოდ ყველა **ბმრ**-სპექტრომეტრი აგებულია მძლავრი ზეგამტარი მაგნიტების საფუძველზე, მაგნიტური ველის მუდმივი სიდიდით.

CW-მეთოდისაგან განსხვავებით, იმპულსურ ვარიანტში ბირთვების აგზნება ხორციელდება არა „მუდმივი ტალღით“, არამედ რამდენიმე მიკროწამის ხანგრძლივობის მოკლე იმპულსის მეშვეობით. იმპულსის სიხშირეთა კომპონენტების ამპლიტუდები მცირდება  $\nu_0$ -დან მანძილის გაზრდისას. მაგრამ, ვინაიდან სასურველია, რომ ყველა ბირთვი ერთნაირად დასხივდეს, აუცილებელია „ხისტი იმპულსების“, ანუ მოკლე და დიდი სიმძლავრის იმპულსების გამოყენება. იმპულსის ხანგრძლივობას ირჩევენ ისე, რომ სიხშირეთა ზოლის სიგანე იყოს სპექტრის სიგანეზე ერთი-ორი რიგით მეტი. სიმძლავრე აღწევს რამდენიმე ათას ვატს.

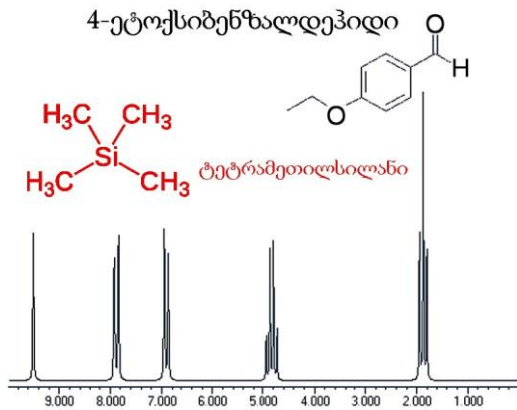
იმპულსური სპექტროსკოპიის შედეგად მიიღება არა ჩვეულებრივი სპექტრი რეზონანსის ხილვადი პიკებით, არამედ მიღევადი რეზონანსული რხევების გამოსახულება, რომელშიც ყველა რეზონირებადი ბირთვის სიგნალია არეული – ე.წ. „თავისუფალი ინდუქციის ვარდნა“ (FID, Free Induction Decay). ამ სპექტრის გარდაქმნისათვის გამოიყენებენ მათემატიკურ მეთოდებს, ე.წ. ფურიე-გარდაქმნას, რომლითაც ნებისმიერი ფუნქცია შეიძლება იყოს წარმოდგენილი სხვადასხვა ჰარმონიული რხევების ჯამის სახით.

უნდა აღინიშნოს, რომ ფურიე-გარდაქმნები წარმოადგენენ საკმაოდ გამოყენებად მათემატიკურ მიდგომას სხვადასხვა სახის მათემატიკური ანალიზების (სპექტრების, დიაგრამების და ა.შ.) ჩატარებისას, კერძოდ კი ობიექტების სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის ჩატარებისას. ამ თემას ჩვენ კიდევ დაუბრუნდებით მაკრომოლეკულების სამგანზომილებიანი გამოსახულების აღდგენის მეთოდების განხილვისას მათი პროექციების მიხედვით. აქ კი მხოლოდ ავლნიშნავთ, რომ როგორც ეხლა, ასევე მომავალ განხილვებშიც საუბარი მიდის ფაქტიურად ტომოგრაფიაზე.

## ბმრ სპექტრები.

ობიექტების ხარისხიანი ანალიზის ჩასატარებლად ბმრ-ის მეშვეობით გამოიყენებენ სპექტრების ანალიზს, რომელიც ეფუძნება აღნიშნული მეთოდის შემდეგ თვისებებზე:

- გარკვეულ ფუნქციონალურ ჯგუფებში შემაჯავალი ატომების ბირთვების სიგნალები, მდებარეობენ სპექტრის მკაცრად განსაზღვრულ უბნებში;
- გრაფიკის პიკით შემოფარგლული ინტეგრალური ფართი, რეზონირებადი ატომების რაოდენობის მკაცრად პროპორციულია;
- ბირთვები, რომლებიც მდებარეობენ 1 – 4 კავშირის შემდეგ შეუძლიათ მულტიპლეტური სიგნალების გაცემა ერთმანეთზე ეგრე წოდებული გახლეჩის შედეგად.



სურ. 40.  $^1\text{H}$  სპექტრი 4-ეტოქსიბენზალდეჰიდის (სურათის ქვედა ნაწილი). სუსტ ველში (სინგლეტი ~9,25 მ.ნ.) ალდეჰიდური ჯგუფის პროტონის სიგნალი, ძლიერში (ტრიპლეტი ~1,85 – 2 მ.ნ.)<sup>53</sup> – ეტოქსილური ჯგუფის მეთილის პროტონები.

სიგნალის მდებარეობა ბმრ-ის სპექტრში ხასიათდება მათი ქიმიური წანაცვლებით ეტალონური სიგნალის მიმართ. უკანასკნელის ხარისხში  $^1\text{H}$  და  $^{13}\text{C}$  ბმრ-ში გამოიყენებენ ტეტრამეთილსილანს  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  (TMS). ქიმიური წანაცვლების ერთეულად გამოიყენებენ ხელსაწყოს სიხშირის მემილიონედ ნაწილს (მ.ნ.). თუ TMS-ს სიგნალი ნულად მივიღეთ, ხოლო სიგნალის გადანაცვლება სუსტ ველში ჩავთვალოთ როგორც დადებითი ქიმიური წანაცვლება, მაშინ ჩვენ მივიღებთ ე.წ.  $\delta$  სკალას (სურ. 40). თუ ტეტრამეთილსილანის რეზონანსი მივატოლოთ 10 მ.ნ. და შევაბრუნებთ ნიშნებს საწინააღმდეგოზე, მაშინ მივიღებთ  $\tau$  სკალას, რომელიც სადღეისოდ პრაქტიკულად არ გამოიყენება. თუ ნივთიერების სპექტრი ინტერპრეტირებისათვის მეტისმეტად რთულია, შეიძლება გამოიყენოს ეკრანირების კონსტანტების გამოთვლის კვანტურმექანიკური მეთოდები და ამ კონსტანტების საფუძველზე შეიფარდოს სიგნალები.

## ბმრ-ინტროსკოპია.

ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსის მოვლენის გამოყენება შეიძლება არა მხოლოდ ფიზიკაში და ქიმიაში, არამედ მედიცინაშიც: ადამიანის ორგანიზმი – ეს იგივე ორგანული და არაორგანული მოლეკულების ერთობლიობაა.

ამ მოვლენაზე დაკვირვებისასთვის ობიექტი თავსდება მუდმივ მაგნიტურ ველში და მოექცევა რადიოსიხშირის და გრადიენტული მაგნიტური ველის ზეგავლენის ქვეშ. ინდუქტივობის კოჭაში, რომელიც გარშემორტყავს ობიექტს წარმოიქმნება ცვლადი ელექტრომაგნიტური ველი (ემვ), რომლის ამპლიტუდურ-სიხშიროვანი სპექტრი და დროში ცვლადი სხვა დამახასიათებელი პარამეტრები შეიცავენ ინფორმაციას რეზონირებადი ატომური ბირთვების სივრცული სიმკვრივის შესახებ, და აგრეთვე ინფორმაციას სხვა პარამეტრების შესახებ, რომელიც სპეციფიურია მხოლოდ ბირთვულ-მაგნიტურ

<sup>53</sup> 1/2 სპინის მქონე ნაწილაკების წყვილების კომბინირებით, ჩვენ შეგვიძლია მივიღოთ სამი საკუთარი მდგომარეობა 1-ის ტოლი ჯამური სპინით (ტრიპლეტი) და ერთი მდგომარეობა 0-ის ტოლი ჯამური სპინით (სინგლეტი).

რეზონანსისათვის. ამ ინფორმაციის კომპიუტერული დამუშავების შედეგად ფორმირდება სივრცული გამოსახულება, რომელიც ახასიათებს ქიმიურად ეკვივალენტური ბირთვების სიმკვრივეს, **ბმრ**-ის რელაქსაციის დროებს, სითხის ნაკადის სიჩქარის განაწილებას, მოლეკულების დიფუზიას და ნივთიერებათა ცვლის ბიოქიმიურ პროცესებს ცოცხალ ქსოვილებში.

**ბმრ**-ინტროსკოპიის (ანუ მაგნიტო-რეზონანსული ტომოგრაფიის) არსი საბოლოო ჯამში მდგომარეობს ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსის სიგნალის ამპლიტუდის მიხედვით განსაკუთრებული სახის რაოდენობრივი ანალიზის რეალიზებაში. ჩვეულებრივ **ბმრ**-სპექტროსკოპიაში მისი წრაფვიან შეძლებისდაგვარად სპექტრალური ხაზების საუკეთესო გარჩევადობის რეალიზებას. ამისათვის მაგნიტური სისტემები რეგულირდება ისეთნაირად, რომ მაგნიტური ველი ნიმუშის ფარგლებში იყოს მაქსიმალურად ერთგვაროვანი. **ბმრ**-ინტროსკოპიის შემთხვევაში კი პირიქით – იქმნება მიზნობრივად არაერთგვაროვანი მაგნიტური ველი. ამ შემთხვევაში არსებობს საფუძველი ველოდოთ, რომ ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსის სიხშირეს ნიმუშის ყოველ წერტილში თავისი საკუთარი, სხვა წერტილებისაგან განსხვავებული მნიშვნელობა გააჩნია. ამიტომაც, **ბმრ**-სიგნალების ამპლიტუდის გრადაციების რაიმე კოდის შეყვანით (მონიტორის ეკრანზე მიღებული გამოსახულების განათებისათვის ან ფერისათვის), შეიძლება მივიღოთ ობიექტის შიდა სტრუქტურის ანათლების პირობითი გამოსახულება (ტომოგრამა).

### 10.5. კვანტური თეორიის ძირითადი დებულებები.

კვანტური თეორია სათავეს იღებს პლანკის ჰიპოთეზიდან იმის თაობაზე, რომ მოლეკულების ოსცილაცია იკვანტება, ანუ არაა უწყვეტი, როგორც ადრე ითვლებოდა, არამედ წყვეტილია (დისკრეტული) და ენერჯიის გამოსხივებისას ის გამოიყოფა პორციებით, ანუ კვანტებით. ეს ენერჯია ( $E$ ) პროპორციულია გამოსხივების სიხშირის და პლანკის მუდგვივად წოდებული, გარკვეულ  $h$  სიდიდის ჯერადია. სწორედ ამაში მდგომარეობს პლანკის კვანტური ჰიპოთეზა (დაკვანტური ნიშნავს ფიქსირებული მინიმუმის მქონე). კვანტური ჰიპოთეზის თანახმად ენერჯია არ არის უწყვეტი სიდიდე, როგორც ამას კლასიკური ფიზიკა მიიჩნევდა. ისტორიულად ეს შეხედულება საკმაოდ ძნელად იკიდებდა ფეხს, მიუხედავად იმისა, რომ დაკვანტვის პრინციპი მთლად ახალი არ იყო. მაგალითად, რაიმე ნივთიერების რაოდენობა არის ჯერადი მასში შემავალი მოლეკულების მთელი, და არა წილადი რაოდენობისა (შეუძლებელია ნივთიერების აგება მოლეკულების წილადი რაოდენობისგან), ან კიდევ ელექტრული მუხტი ყოველთვისაა ელემენტარული ( $e$ ) მუხტის ჯერადი (არ არსებობს ელემენტარულ მუხტზე მცირე მუხტი), ანუ ასევე კვანტური სიდიდეებია (იკვანტება).

მიუხედავად ამისა ენერჯიის დაკვანტვის იდეა მაინც ძნელად აღიქმებოდა სანამ აინშტაინმა არ უჩვენა, რომ მასა და ენერჯია ეკვივალენტურები არიან  $E = mc^2$ , და ვინაიდან მასა დაკვანტულია, ენერჯიაც უნდა იკვანტებოდეს.

საბოლოო სახით კვანტური თეორიის ძირითადი საფუძვლები შემუშავებული იქნა XX საუკუნის 20-იან წლებში დე ბროილის, შრედინგერის და ჰაიზენბერგის შრომებში.

ძალზე ზოგადად შეიძლება ითქვას, რომ კვანტური თეორია სწავლობს მიკრონაწილაკების (ელექტრონების, ნუკლონების და ა.შ.) და ფოტონების მოძრაობისა და ურთიერთქმედების კანონებს მათი კორპუსკულარულ-ტალღური თვისებების გათვალისწინებით. ამ თეორიის ერთ-ერთი ძირითადი დებულება ეფუძნება იმ მოსაზრებას, რომ ნაწილაკების ტალღური თვისებების გამო, შეუძლებელია მოძრავი ნაწილაკის ლოკალიზების ზუსტი ადგილმდებარეობის დადგენა. ამის გამო მოძრავი ნაწილაკების მდებარეობასა და ტრაექტორიის დადგენის საკითხს კვანტურ მექანიკაში ალბათური

ხასიათი გააჩნია. თუმცა კვანტურ თეორიაში თავის მნიშვნელობას ინარჩუნებენ ისეთი ცნებები როგორცაა ნაწილაკის მასა, იმპულსი და იმპულსის მომენტი.

მიკრონაწილაკის მოძრაობა კვანტურ მექანიკაში აღიწერება ტალღური ფუნქციის ( $\Psi$ ) მეშვეობით (კოორდინატებისა და დროის ფუნქციით). ტალღურ ფუნქციას, კონკრეტული სიტუაციიდან გამომდინარე, შეიძლება სხვადასხვაგვარი სახე მიეცეს. განტოლებას, რომელიც ტალღურ ფუნქციას ზოგადი სახით განსაზღვრავს ტალღური ან შრედიנגერის განტოლება ეწოდება. ამ განტოლებას კვანტურ მექანიკაში ისეთივე მნიშვნელობა ენიჭება, როგორც ნიუტონის განტოლებას კლასიკურ მექანიკაში.

$$\Delta\Psi - 8\pi^2m(E - E_p)\Psi/h^2 = 0 \quad (70)$$

აქ  $\Delta$  არის ლაპლასის ოპერატორი, და:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

იგულისხმება, რომ  $m$  მასის ნაწილაკი მოძრაობს გარკვეულ ველში და მისი სრული ენერგია  $E = E_k + E_p$ . სადაც  $E_k$  - კინეტიკური, ხოლო  $E_p$  - პოტენციალური ენერგებია.  $h$  - პლანკის მუდმივაა.

ტალღური ფუნქცია არ განსაზღვრავს სივრცეში ნაწილაკების განლაგებას, ის მხოლოდ მათი განაწილების ალბათურ ხასიათზე მიუთითებს, ანუ გვიჩვენებს იმ ალბათობას, რომლითაც შეიძლება იქნას აღმოჩენილი ნაწილაკები საკმაოდ მცირე მოცულობაში იმ წერტილის მახლობლად, რომლის კოორდინატებია  $x, y, z$ . უფრო ზუსტად ტალღური ფუნქციის ფიზიკური არსი იმაში მდგომარეობს, რომ მისი მოდულის კვადრატი შეესაბამება ელემენტარულ მოცულობაში ნაწილაკის აღმოჩენის ალბათობას. კვანტური ფიზიკის ფუძემდებელ კანონს წარმოადგენს ჰაიზენბერგის განუსაზღვრელობის პრინციპი, რომელიც იმაში მდგომარეობს, რომ რაც უფრო ზუსტადაა განსაზღვრული ნაწილაკის რომელიმე კოორდინატი, მით უფრო ნაკლები სიზუსტით განისაზღვრება იმპულსის შესაბამისი მდგენელი (ან იგივე შეიძლება ითქვას სიჩქარეზეც):

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta p_x &\geq \hbar \\ \Delta x \Delta v_x &\geq \hbar/m \end{aligned} \quad (71)$$

მოყვანილ (71) ფორმულებში  $\Delta$  ნიშნავს შესაბამისი პარამეტრის გაზნევას. მაგალითად,  $\Delta x$  - კოორდინატი  $x$  მნიშვნელობის გაზნევა, ხოლო  $\Delta p_x$  - იმპულსის მნიშვნელობის (ამ კოორდინატი) გაზნევა. ის რომ ამ სიდიდეების ნამრავლი  $\geq \hbar$  (ამ გადახაზული - დირაკის ან პლანკის მოყვანილი მუდმივა) ნიშნავს რომ არც  $\Delta x$  და არც  $\Delta p_x$  არ შეიძლება იყოს ნულის ტოლი, ანუ უნდა იყვნენ თავიდანვე მოცემული გარკვეული  $\hbar$  განუსაზღვრელობით. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ არ შეიძლება იყვნენ გაზომილნი ნულოვანი გაზნევით, ანუ აბსოლუტური სიზუსტით. თავის მხრივ ეს ნიშნავს, რომ თუ კი ცნობილია ( $x$ ) სიდიდე გარკვეული განუსაზღვრელობით, მაშინ ამ პრინციპის საფუძველზე შეიძლება წინასწარ გავსაზღვროთ თუ როგორია სხვა სიდიდის ( $p_x$ ) განუსაზღვრელობა.

### 10.6. ატომის კვანტურმექანიკური მოდელი.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ელექტრონის პოტენციალური ენერგია ატომში ტოლია  $E_p = -e^2/r$ , ტალღური განტოლება შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\Delta\Psi - 8\pi^2m(E + e^2/r)\Psi/h^2 = 0$$

ან

$$\Delta\Psi - 2m(E - E_p)\Psi/\hbar^2 = 0$$

ამ განტოლებას ეწოდება ელექტრონის ორბიტალური ტალღური განტოლება. ბორის თეორიაში შემოყვანილი ოთხი კვანტური რიცხვი თავის მნიშვნელობას იტოვებენ, თუმცა ნაწილობრივ შეცვლილი სახით. მაგალითად ელექტრონის იმპულსის ორბიტალური მომენტი ბირთვის მიმართ განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$L_e = \hbar\sqrt{\lambda(\lambda + 1)}$$

სადაც  $\lambda$  – ორბიტალური კვანტური რიცხვია.

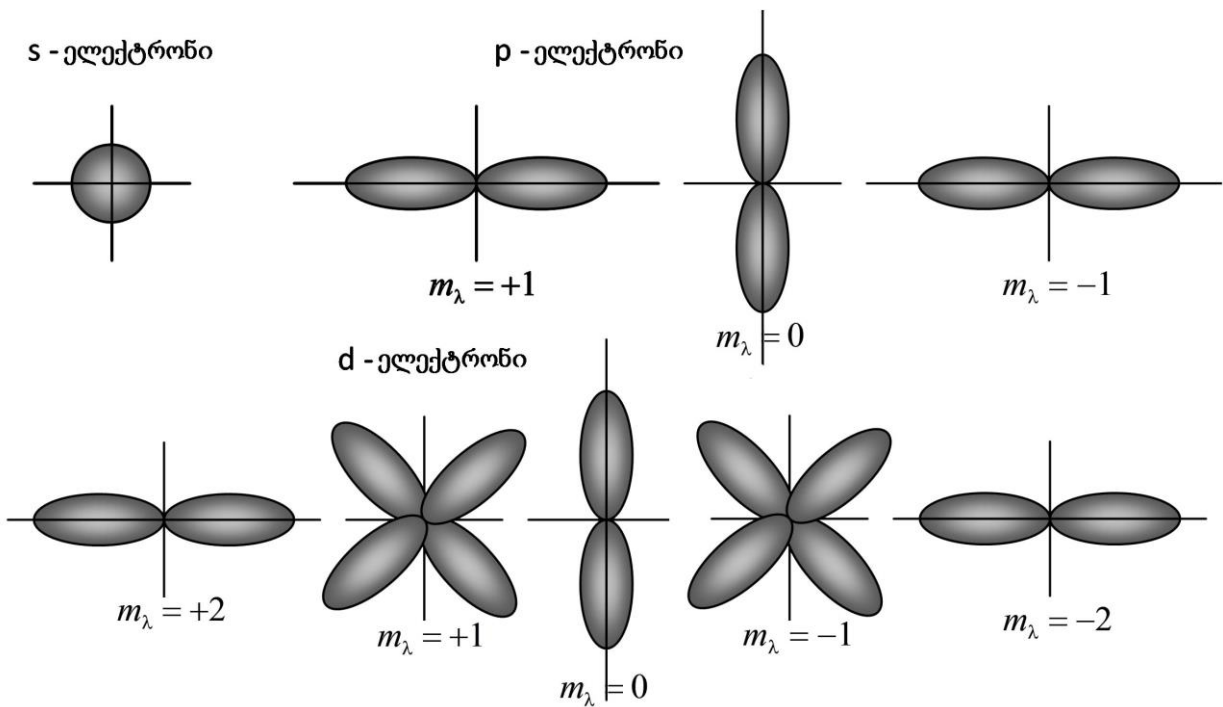
ასევე სპინისათვის:

$$M_s = \hbar\sqrt{s(s + 1)}$$

სადაც  $s$  – სპინური კვანტური რიცხვია.

წყალბადის ატომში ელექტრონი თავისი ტალღური ბუნების გამო შეიძლება აღმოჩნდეს ბირთვის ახლომდებარე სივრცის ნებისმიერ წერტილში, მაგრამ სხვადასხვა ალბათობით, რომელიც განსაზღვრება ტალღური ფუნქციის მოდულის კვადრატის მეშვეობით. ელექტრონის შესაძლო მდებარეობის წერტილების ერთობას **ორბიტალი** ეწოდება.

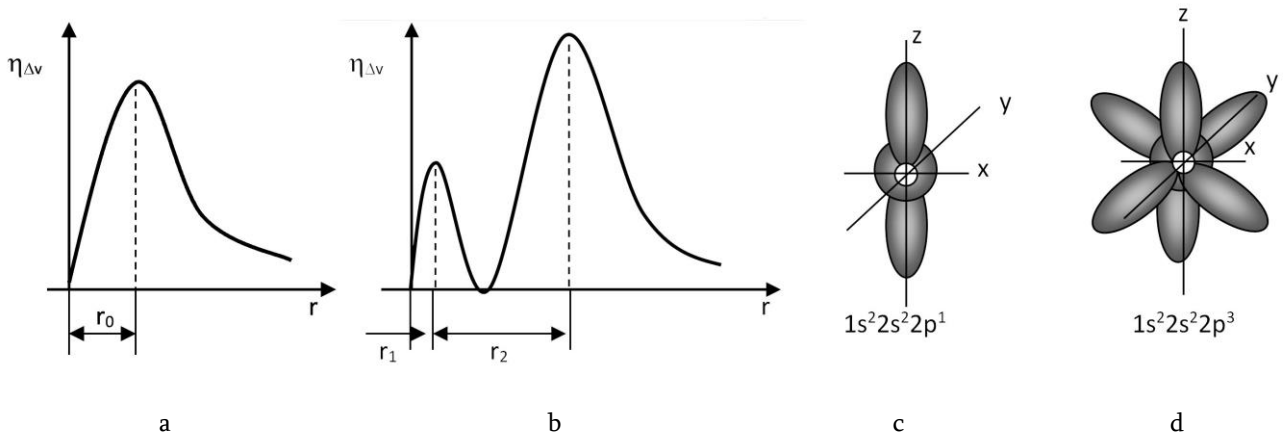
მთავარი კვანტური რიცხვი  $n$  განსაზღვრავს ორბიტალის (ელექტრონული ღრუბლის) ზომას. ორბიტალური  $\lambda$  და მაგნიტური  $m_\lambda$  კვანტური რიცხვები განსაზღვრავენ შესაბამისად ორბიტალის (ელექტრონული ღრუბლის) ფორმას და ორიენტაციას. სპინური კვანტური რიცხვი ახასიათებს ერთ ორბიტალზე მდებარე ორი ელექტრონის მდგომარეობის განსხვავებას მათი სპინების ორიენტაციის მიხედვით (იხ. სურ. 41).



სურ. 41. ორბიტალების განსხვავებული ფორმები და მათი დამოკიდებულება კვანტურ რიცხვებზე.

ძირითად 1s მდგომარეობაში წყალბადის ატომის ელექტრონის ორბიტალს სფეროს ფორმა გააჩნია. ამ სფეროში ელექტრონის ადგილმდებარეობის ალბათობის განაწილება არათანაბარია. მაქსიმალური ალბათობით ელექტრონი იმყოფება ცენტრიდან  $r_0$  მანძილზე (სურ. 42a). შემდგომში ამ მანძილის გაზრდისას ან შემცირებისას ელექტრონული ღრუბლის სიმკვრივე (ელექტრონის ადგილმდებარეობის ალბათობა) მკვეთრად მცირდება.



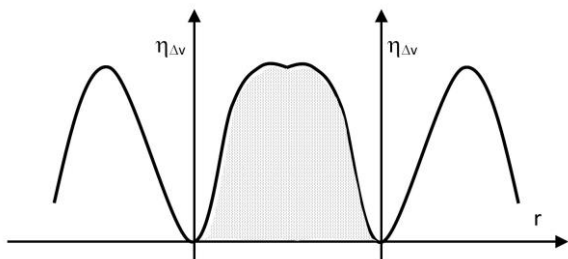


სურ. 42. (a) ელექტრონის მდებარეობის ალბათობის სიმკვრივის განაწილება ( $\eta_{\Delta\nu}$ ) ატომის ცენტრამდე მანძილის მიხედვით. (b) ლითიუმის  $1s^2 2s^1$  და ბერილიუმის  $1s^2 2s^2$  ატომების ორბიტალებს ახასიათებს სფერული ფორმა, მაგრამ მათ გააჩნიათ ელექტრონების განაწილების ორი განსხვავებული სიმკვრივე ( $r_1$  და  $r_2$ ). ატომებს გააჩნია რამდენიმე ელექტრონი სხვადასხვა მდგომარეობაში: ბორის  $1s^2 2s^2 2p^1$  (c) და აზოტის  $1s^2 2s^2 2p^3$  (d) ატომები.

მოყვანილ ნახატზე ნაჩვენებია ელექტრონის მდებარეობის ალბათობის სიმკვრივის განაწილება ( $\eta_{\Delta\nu}$ ) ატომის ცენტრამდე მანძილის მიხედვით. აქ მანძილი  $r_0$  ნულიდან მაქსიმალურ სიმკვრივემდე შეესაბამება ძირითად ბორისეულ ელექტრონის ორბიტის რადიუსს. თუ ატომს გააჩნია ორი ელექტრონი და ისინი განსხვავდებიან მხოლოდ სპინით, როგორც ეს ჰელიუმის ატომშია ( $1s^2$ ), მათი ორბიტალები სივრცეში ერთიანდებიან.

ლითიუმის ( $1s^2 2s^1$ ) და ბერილიუმის ( $1s^2 2s^2$ ) ატომებში ორბიტალები ასევე სფერული ფორმისანი არიან, მაგრამ მათ ახასიათებთ სიმკვრივის ორი განსხვავებული მაქსიმუმი ( $r_1$  და  $r_2$ ) (სურ. 42b). ელექტრონის ორბიტალი p მდგომარეობაში ხასიათდება განტელი-სებრივი ფორმით. ამ ბრუნვითი სხეულის ღერძის მდებარეობა მაგნიტურ კვანტურ რიცხვზეა დამოკიდებული. სულ სამი შესაძლო ვარიანტია ( $m_l = 0, m_l = \pm 1$ ). ელექტრონის ორბიტალი d მდგომარეობაში უფრო რთული ფორმისაა და ვარიანტების რაოდენობა ხუთამდე ადის ( $m_l = 0, m_l = \pm 1, m_l = \pm 2$ ) (იხ. სურ. 41).

ატომები, რომლებსაც სხვადასხვა მდგომარეობაში მყოფი რამდენიმე ელექტრონი გააჩნიათ წარმოქმნიან ე.წ. **ჰიბრიდულ ორბიტალებს**. დაწვრილებით ამ საკითხს შევხებით ბიოფიზიკის ნაწილში, აქ კი მხოლოდ ავლენიშნავთ რომ ნახატზე (სურ. 42c,d) მოყვანილი ბორის ( $1s^2 2s^2 2p^1$ ) და აზოტის ( $1s^2 2s^2 2p^3$ ) ატომური ორბიტალები ჰიბრიდიზაციის დროს იძლევიან განსხვავებული ტიპის ჰიბრიდულ ორბიტალებს. ბორის ატომს შეუძლია იმყოფებოდეს  $sp$  (წრფიული) და  $sp^2$  (სამკუთხედის) ჰიბრიდულ მდგომარეობებში. რაც შეეხება აზოტის ატომს, აქ შესაძლებელია ასევე  $sp^3$  (ტეტრაედრის) ჰიბრიდიზაცია.



სურ. 43. წყალბადის მოლეკულის შექმნისას, ატომების ბირთვებს შორის წარმოიქმნება მიდამო (ნახაზზე მონიშნულია მუქი ტონით) რომელშიც ელექტრონის აღმოჩენის ალბათობა იზრდება, რაც განაპირობებს ატომების გაერთიანებას მოლეკულაში.

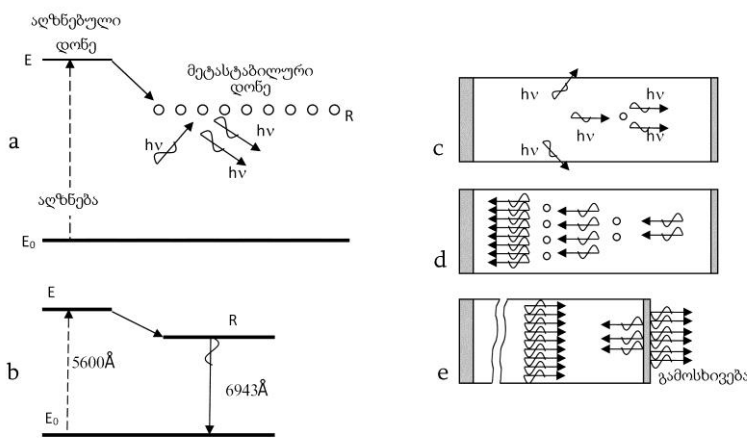
მოლეკულების წარმოქმნის დროს ხდება ვალენტური ელექტრონების ორბიტალების ნაწილობრივი გაერთიანება. სურ. 43–ზე მოყვანილია წყალბადის მოლეკულის შემთხვევა.

ნახატიდან ჩანს, რომ ორ ბირთვს შორის შეიქმნება მიდამო, რომელშიც ელექტრონების აღმოჩენის ალბათობა გაზრდილია, რაც განაპირობებს ატომების გაერთიანებას მოლეკულაში. ნახატზე ეს არე მუქად არის მონიშნული.

### 10.7. ინდუცირებული გამოსხივება. ლაზერები.

ზოგიერთ ნივთიერებას ისეთი ენერგეტიკული დონეები გააჩნია, რომლებიდანაც გადმოსვლა ძირითად დონეზე დაბალი ალბათობით ხასიათდება. ეს ნიშნავს, რომ ამ ატომებს შეუძლიათ იმყოფებოდნენ აღზნებულ მდგომარეობაში საკმაოდ ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ( $10^{-3}$  წმ-დე) (შედარებისათვის, აღზნებულიდან სტაციონარულ მდგომარეობაში გადასვლისათვის საჭიროა  $10^{-8}$  წმ). ასეთ დონეებს მეტასტაბილურებს უწოდებენ. აღზნებისას მასზე შეიძლება დაგროვდეს აღზნებული ატომების საკმაოდ დიდი რაოდენობა. ეს მოვლენა ლუმინესცენციისათვისაა დამახასიათებელი და მას დონეების ინვერსული დასახლებულობა ეწოდება (იხ. სურ. 44a).

მეტასტაბილურ დონეზე მყოფი ატომის გამოსხივება შეიძლება გამოიწვიოს მასზე გარე ფოტონის ზემოქმედებამ, რომლის ენერგია უტოლდება ამ დონიდან სპონტანურად გამოსხივებული ფოტონების ენერგიას ( $h\nu$ ). ასეთი სახის გამოსხივებას ინდუცირებული ან იძულებითი ეწოდება, თავად მოვლენას კი იძულებითი ლუმინესცენცია.



სურ. 44. (a) დონეების ინვერსული დასახლებულობა (ინდუცირებული ან იძულებითი გამოსხივება). (b) აღზნებისას ქრომის იონები ძირითადი ენერგეტიკული დონიდან ( $E_0$ ) გადადიან აღზნებულ ( $E$ ) დონეზე. ამ დონიდან ისინი სპონტანურად გადადიან მეტასტაბილურ ( $R$ ) დონეზე, რომელზედაც მიმდინარეობს მათი დაგროვება. ატომების მეტასტაბილური დონიდან ძირითადად გადასვლისას გამოსხივება ფოტონები  $6943 \text{ \AA}$  ტალღის სიგრძით. (c,d,e) კვანტური ოპტიკური გენერატორის (ლაზერის) მოქმედების ილუსტრირება.

აგზნებული ატომის იძულებითი გამოსხივება შეიძლება გამოიწვიოს არა მარტო გარე ფოტონმა, არამედ ასევე ნივთიერების მეტასტაბილურ დონეზე მყოფ სპონტანურად გამოსხივებულმა ფოტონმაც. ამრიგად, ერთი ფოტონის მაგიერ მიიღება ორი (სურ. 44c), შემდეგ ორის ნაცვლად ოთხი და ა.შ., ანუ ფოტონების რაოდენობა ზვავისებრივ იზრდება. აღწერილი იდეა პრაქტიკულად იქნა განხორციელებული სპეციალურ ხელსაწყოებში, რომლებსაც დაერქვა ოპტიკური კვანტური გენერატორი ანუ ლაზერი (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – სინათლის გაძლიერება იძულებითი გამოსხივების დახმარებით).

ლაზერის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს ე.წ. მუშა სხეული, რომელსაც ახასიათებს მეტასტაბილური ენერგეტიკული დონეები, რომლებზედაც აგზნების დროს იქმნება ინვერსული დასახლებულობა. ამ სხეულიდან მიღებული გამოსხივება ხასიათდება: მკაცრი მონოქრომატულობით და კოჰერენტულობით, სრული პოლარიზებით და წარმოქმნის პარალელური სხივების კონას, რომელსაც გააჩნია ძალზე მცირე გაშლის კუთხე. მუშა სხეულად შეიძლება იყოს ადებული როგორც მყარი სხეული (ლალის კრისტალი), ასევე აირი ან მათი ნარევი (მაგ. ჰელიუმ ნეონის ლაზერი წითელი ფერის გამოსხივებით).

განვიხილოთ მყარი სხეულის ლაზერის მოქმედება. მუშა სხეულად გამოყენებულია წაგრძელებული ცილინდრული ფორმის ლალის კრისტალი ( $Al_2O_3$ ) ხრომის  $Cr_2O_3 \rightarrow Cr^{3+}$  მინარევით, რომლის ტორსები მკაცრად პარალელური და მოვეცხლილია. ამრიგად ლალის კრისტალი წარმოადგენს სარკისებრივ რეზონატორს ნახევრადგამჭვირვალე წინა ტორსით. მუშა სხეულს ასხივებენ ქსენონის ნათურის იმპულსით, რომლის ტალღის სიგრძეა  $5600\text{\AA}$ . ამის შედეგად ხრომის იონები  $E_0$  დონიდან გადადიან  $E$  დონეზე (სურ. 44b), რომლიდანაც სპონტანურად, გამოსხივების გარეშე, გადადიან მეტასტაბილურ  $R$  დონეზე, სადაც ხდება მათი დაგროვება. შემდეგ იწყება ატომის მეტასტაბილურიდან ძირითად დონეზე გადმოსვლა. ამას მოყვება  $6943\text{\AA}$  ტალღის სიგრძის მქონე ფოტონების გამოსხივება. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ეს პროცესი ზვავისებრივში გადადის. ფოტონების ნაკადი რამდენჯერმე ირეკლება ლალის კრისტალის ტორსებიდან და მიაღწევს რა გარკვეულ დონეს, გამოსხივდება წინა ნახევრადგამჭვირვალე ტორსიდან. შედეგად მიიღება  $10^{-3}$  წმ ხანგრძლივობის სინათლის იმპულსი.

ანალოგიურად მოქმედებენ კვანტური გენერატორები ულტრამოკლე რადიოტალღების დიაპაზონში – ე.წ. მაზერები (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – მიკროტალღების გაძლიერება ინდუცირებული გამოსხივების მეშვეობით).

ბოლო წლებში ოპტიკური კვანტური გენერატორების (ლაზერების) გამოსხივების სამედიცინო გამოყენება სულ უფრო ფართო ხასიათს იღებს. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ახალი კვლევების შედეგად გამოაშკარავდა ის ზემოქმედება, რომელსაც ახდენს ცოცხალ ქსოვილებზე ლაზერული გამოსხივება. გამოვლინდა ასეთი ტიპის გამოსხივების და ქსოვილების ურთიერთობის კვანტური მექანიზმები. სადღეისოდ ამ ურთიერთობის ზუსტი დეტალები ბოლომდე არ არის გამოკვლეული, თუმცა გამოყოფენ ეფექტის რამდენიმე დონეს ზედაპირულიდან დაწყებული, ღრმა კვანტურ ქიმიური გარდაქმნების ჩათვლით. ლაზერული გამოსხივება (აირის ლაზერები) ყველაზე ფართოდ გამოიყენება თერაპიაში, როგორც შინაგანი ორგანოების და სისხლის დასხივებისას (გინეკოლოგია, სისხლის დაავადებები და ა.შ.), ასევე გარე ზემოქმედებისათვის (მაგ. ტროფული წყლულების დამუშავება). ქირურგიულ პრაქტიკაში იყენებენ მყარი სხეულის ლაზერს, რათგან მათ გააჩნიათ გაცილებით უფრო დიდი ენერჯის სხივი.

# ბიოფიზიკის ელემენტები

## 11. თერმოდინამიკა და ბიოლოგია.

### 11.1. ალბათობის თეორიის ელემენტები.

თვითმყოფი სხეულები მიისწრაფიან წონასწორობისაკენ. ასეთი სხეულების ბუნებრივი მდგომარეობა – მათი მექანიკური და სითბური წონასწორობაა. ამ მოვლენის მექანიზმებში გარკვევისათვის საჭიროა ალბათობის თეორიის ელემენტების განხილვა.

ალბათობის თეორიის თანახმად მოვლენები შეიძლება იყვნენ ნაკლებად ან მეტად ალბათური. მოვლენის ალბათობა დამოკიდებულია იმ შესაძლებლობების რაოდენობაზე რომელთა მეშვეობითაც მოვლენა შეიძლება განხორციელდეს. რაც მეტი იქნება ამ შესაძლებლობების რაოდენობა, მით უფრო ხშირად განხორციელდება ასეთი მოვლენა.

უფრო ზუსტად მოცემული მოვლენის ალბათობა ეწოდება მისი განხორციელების შესაძლო წესების რიცხვის შეფარდება ყველა შესაძლო მოვლენების საერთო რიცხვთან.

$$W = \frac{N_1}{N}$$

სადაც  $W$  – მოცემული მოვლენის წარმოჩენის ალბათობაა,  $N_1$  – განხორციელებული კონკრეტული მოვლენების რიცხვი,  $N$  – ყველა შესაძლო მოვლენის რიცხვი.

რაც უფრო მეტია  $N_1$ , მით უფრო მეტია  $W$  და პირიქით  $N$ -ის გაზრდა იწვევს  $W$ -ს შემცირებას. ანუ შეიძლება დაიწეროს რომ თუ  $N \rightarrow \infty$  მაშინ  $W \rightarrow 0$ .

განვიხილოთ ყველაზე გავრცელებული და მარტივი მაგალითი მონეტის ამა თუ იმ გვერდის გამოსვლის ალბათობების განაწილება მისი აგდების დროს. დავიწყით იქიდან, რომ აგდებების შეზღუდული რაოდენობის შემთხვევაში ერთ-ერთი გვერდის გამოსვლის ალბათობა  $1/2$ -ის ტოლია. მაშინ იმის ალბათობა, რომ გამოვარდება ნებისმიერი გვერდი იქნება  $1$ -ის ტოლი. მაგრამ უნდა გვახსოვდეს, რომ არ არსებობენ აბსოლუტურად არაალბათური, შეუძლებელი ( $W = 0$ ) ან და პირიქით აბსოლუტურად ალბათური, გარდაუვალი ( $W = 1$ ) მოვლენები. მოვლენები შეიძლება განხორციელდნენ მეტ ნაკლები ალბათობით, ანუ  $W \rightarrow 0$  (მინიმალური ალბათობა), ან და  $W \rightarrow 1$  (მაქსიმალური ალბათობა). როგორ უნდა შეუფარდოთ ალბათობების ასეთი განაწილება მონეტის აგდებას? რატომ არის რომ ნებისმიერი გვერდის გამოვარდნა არ შეიძლება იყოს  $1$ -ის ტოლი? საქმე იმაშია, რომ მონეტას გააჩნია გარკვეული სისქე, ამიტომაც არსებობს იმის ალბათობა, რომ მონეტა გვერდზე დადგება. მაგრამ ასეთი შედეგის ალბათობა მონეტის სისქის შემცირებისას (ანუ მისი სისქის ნულისკენ სწრაფვისას) მიისწრაფის ნულისკენ. ამიტომაც შეიძლება გაკეთეს დასკვნა რომ ნებისმიერი გვერდის გამოვარდნის ალბათობა მიისწრაფის ერთისკენ მონეტის სისქის ნულისკენ სწრაფვისას.

მონეტის აგდებას შეიძლება დაუკავშიროთ ალბათობების განაწილების კიდევ ერთი საინტერესო შემთხვევა, სახელდობრ „ლიდერის“ შეცვლის ალბათობა. ვთქვათ ორი მოთამაშე (A და B) აგდებს მონეტას. თანაც, შანსების გათანაბრების თავიდან ასაცილებლად თამაშში შედგება ტურების მცირე რაოდენობისაგან (დაუშვათ 5), ხოლო ყაიმების თავიდან ასაცილებლად ყოველ ტურში აგდებების კენტი რაოდენობაა (დაუშვათ 11). ცხადია, რომ გაიმარჯვებს ის მოთამაშე, რომელიც სამ ტურს მოიგებს. დაუშვათ პირველი ტურის მერე ლიდერობს A მოთამაშე. ისმევა კითხვა, რომელ მოთამაშეს აქვს მოგების მეტი შანსი, თუ ეს შანსები თანაბარია? სწორედ ასე, თუ პირველი ტურის შემდეგ ლიდერობს A მოთამაშე, მაშინ თამაშის თეორიის თანახმად, ტურების შეზღუდული

რაოდენობის შემთხვევაში, ლიდერის შეცვლა ნაკლებად ალბათურია, ვიდრე მისი შენარჩუნება. ამიტომაც A მოთამაშის მოგების ალბათობა მეტია. ინტუიციის დონეზე ამის ახსნა შეიძლება შემდეგნაირად. პირველ ტურში მოგების შემდეგ A მოთამაშემ ოთხი დარჩენილი თამაშიდან უნდა მოიგოს ორი, მაშინ როდესაც B მოთამაშემ ოთხიდან სამში უნდა დარჩეს მოგებული. ნათელია რომ საბოლოო მოგების ალბათობა A მოთამაშეს მეტი აქვს, და მომდევნო ტურებში ყოველი ახალი მოგებით, ეს ალბათობა იზრდება.

განვიხილოთ ეს მაგალითი უფრო დაწვრილებით. ტურის მოგება ავლნიშნოთ როგორც „ა“, ხოლო წაგება როგორც „ბ“, და ვთქვათ  $a = 1$ , ხოლო  $b = 0$ . ესე იგი საწყისში ჩვენ ვსვავთ ბინარულ პირობას: თანაბარალბათური მოვლენების განაწილება (მოგება – a, ხოლო წაგება – b). მაშინ, „ა“ და „ბ“-ს ყველანაირი კომბინაციების რიცხვი 5 ტურიდან შემდგარ თამაშში, პირველი ტურის შემდეგ იქნება  $2^5 = 32$ . მეორის შემდეგ –  $2^4 = 16$ , ხოლო მესამეს შემდეგ –  $2^3 = 8$ . ჩვენ აღნიშვნებში ეს იქნება  $N_1$  – შემდგარი კონკრეტული მოვლენების რაოდენობა. კომბინატორიკიდან ცნობილია, რომ ასეთი შეთავსებების რაოდენობა განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$N_n^m = \frac{n!}{(n-m)! \cdot m!}$$

ქვემოთ მოყვანილია ცხრილი მიღებული შედეგებით მოგების ალბათობის განსაზღვრისათვის:

$$N_1 = N_5^3 = \frac{5!}{(5-3)! \cdot 3!} = 10$$

პირველი ტურის შემდეგ A მოთამაშისათვის:

$$N_1 = N_4^2 = \frac{4!}{(4-2)! \cdot 2!} = 6$$

B მოთამაშისათვის:

$$N_1 = N_4^3 = \frac{4!}{(4-3)! \cdot 3!} = 4$$

და ა.შ.

ტური	მოთამაშე	N	$N_1$	W
0	A	32	10	$10/32 = 5/16$
	B		10	
1	A	16	6	$6/16$
	B		4	$4/16$
2	A	8	3	$3/8 = 6/16$
	B		1	$1/8 = 2/16$

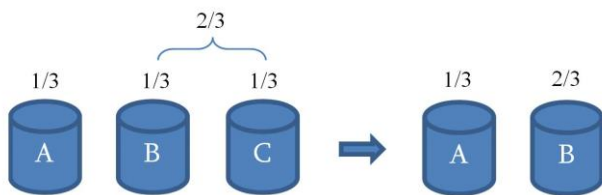
ნული პირველ სვეტში (ტური) შეესაბამება თამაშის შედეგის საწყის თანაბარალბათურ განაწილებას.

როგორც ვხედავთ B მოთამაშის მოგების ალბათობა ყოველ მომდევნო ტურში მცირდება, მაგრამ, ნიშანდობრივია ის, რომ იზრდება მოგების ალბათობა არა რომელიმე კონკრეტული მოთამაშისა, არამედ მოგების ალბათობა სათამაშო მაგიდის გარკვეულ ადგილისათვის. ამ ადგილს სპეციალური სახელიც კი მიუჩინეს: „ცხელი დასტა“.

განვიხილოთ გარკვეული ქულების მოსვლის ალბათობა კამათლის გაგორებისას. ვინაიდან კამათელს 6 წიბო გააჩნია, გარკვეული წიბოს (დაუშვათ ექვსიანის) გამოსვლის

ალბათობა იქნება  $1/6$ , ხოლო ორი კამათლის შემთხვევაში გარკვეული კომბინაციის მოსვლის ალბათობა (ვთქვათ ორი ექვსიანის) იქნება  $1/32$ . სამი კამათლის შემთხვევაში ალბათობა უკვე  $1/216$  იქნება და ა.შ., ესე იგი გაერთიანებული მოვლენის ალბათობის მისაღებად ცალკეული მოვლენების ალბათობები უნდა გამრავლდეს ერთმანეთზე.

განვიხილოთ ალბათობის თეორიის ერთ-ერთი ცნობილი ამოცანა, რომლის ამოხსნა ერთი შეხედვით სად აზრს მოკლებულია – მონტი ჰოლის პარადოქსი (იხ. სურ. 45). წამყვანი, სამიდან ერთ ერთ ჭიქის ქვეშ ათავსებს მონეტას (ანუ მისთვის ცნობილია მონეტის ადგილმდებარეობა) და სთხოვს აუდიტორიის წარმომადგენელს (შემდეგში „მოთამაშე“) იპოვოს იგი. ვთქვათ „მოთამაშე“ ირჩევს A ჭიქას, მაშინ წამყვანი ამოატრიალებს ერთ ერთ დარჩენილ ჭიქას, აჩვენებს რომ იქ მონეტა არ არის და კითხულობს – შეცვლის თუ არა „მოთამაშე“ თავის არჩევანს. თითქოს და არჩევნის შეცვლა აზრს მოკლებულია, ვინაიდან როგორც ამბობენ „ბედის შეცვლა არა ღირსო“, მაგრამ ეს ასე არ არის. მოდი ვნახოთ სად იმალება შეცდომა.



სურ. 45. ნტი ჰოლის პარადოქსი

საწყის ეტაპზე A ჭიქას არჩევს „მოთამაშე“ სამი თანაბარალბათური შესაძლებლობიდან ირჩევს ერთს (გამოცნობის ალბათობა  $1/3$ ). მაშინ იმის ალბათობა რომ მონეტა იმყოფება ერთ-ერთი დარჩენილი ჭიქის ქვეშ (B ან C) იქნება უკვე  $2/3$ . ამ მსჯელობებში არსებით ფაქტორს წარმოადგენს ის, რომ წამყვანმა იცის სად იმყოფება მონეტა, და ატრიალებს მისთვის ცნობილ ცარიეკ ჭიქას B, C ჯგუფიდან, რომელშიც მონეტის ყოფნის ალბათობა  $2/3$ . მაშასადამე საჭიროა თავდაპირველი არჩევანის შეცვლა, რათა გადავიდეთ ნაკლებ ალბათური ჯგუფიდან ( $1/3$ ) მეტ ალბათურში ( $2/3$ ).

ეხლა გადავიდეთ ამოცანებზე ბურთულების „მონაწილეობით“.

ჩავყაროთ ყუთში შავი და თეთრი ბურთულები. არევის შემდეგ ისინი ძალიან მალე თანაბრად განაწილდებიან ყუთის მთელ სივრცეში, და შემდგომში რამდენიც არ უნდა ურიოთ ეს თანაფარდობა არ შეიცვლება. ამ არეულ ბურთულებში ცალკეული ბურთულას (თეთრი ან შავის) მდგომარეობა არაა განსაზღვრული ამიტომაც  $N_1 \rightarrow N$  და  $W \rightarrow 1$ . და პირიქით ისეთი მდგომარეობა, როდესაც ყველა ერთი ფერის ბურთულა მოქცეულია ყუთის ერთ მხარეს მხოლოდ ერთია ( $N_1 = 1$ , ანუ  $N_1 \ll N$ ) და ამიტომაც ასეთი განაწილების ალბათობა ძალზე მცირეა  $W \rightarrow 0$ .

ბურთულების განაწილებიდან შეიძლება გადავიდეთ მოლეკულებზე. ყველაზე მეტად ალბათურია მოლეკულების ისეთი მდგომარეობა, რომელიც განხორციელდება საშუალებათა უმეტესი რიცხვით ესე იგი ქაოსური. მოვლენები, რომლებიც დაკავშირებულია არევისთან და ქაოსური მდგომარეობის შექმნასთან, ანუ დალაგებული სტრუქტურის დაშლასთან, ზრდის ამ მდგომარეობის ალბათობას. ესე იგი გადასვლა:

წესრიგი  $\rightarrow$  უწესრიგობა (არეულობა)

ზრდის მდგომარეობის ალბათობას.

ფიზიკაში გამოიყენება დამხმარე სიდიდე (მდგომარეობის ფუნქცია), რომელსაც ენტროპია ეწოდება ( $S$ ). ეს სიდიდე შემდეგნაირად უკავშირდება თერმოდინამიკური მდგომარეობის ალბათობას ( $W$ ). რაც მეტია თერმოდინამიკური მდგომარეობის ალბათობის

თობა, მით მეტია სისტემის ენტროპია და პირიქით. ენტროპია ახასიათებს მოლეკულების დალაგების ხარისხს და მდგომარეობის ალბათობასთან შემდეგნაირ კავშირში იმყოფება:

$$S = k \ln W \quad (72)$$

სადაც  $k$  – ბოლცმანის უნივერსალური მუდმივა ( $k$  ან  $k_B$ ) – ფიზიკური მუდმივა რომელიც განსაზღვრავს კავშირს ტემპერატურასა და ენერგიას შორის. დაერქვა ავსტრიული ფიზიკოსის ლუდვიგ ბოლცმანის საპატივსაცემოდ, რომელმაც დიდი ღვაწლი მიუძღვის სტატისტიკური ფიზიკის განვითარებაში, სადაც ამ მუდმივას საკვანძო როლი უკავია. მისი ექსპერიმენტული მნიშვნელობა საერთაშორისო SI სისტემაში შემდეგია:

$$k_B = 1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23} \text{ჯ/კ} \text{ (ჯოული/კელვინის გრად)}$$

მოყვანილი ფორმულის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ვინაიდან ლოგარითმი  $(0, +\infty)$ <sup>54</sup> ინტერვალშია განსაზღვრული, ხოლო ლოგარითმის არგუმენტი (ალბათობა)  $(0, 1)$  ინტერვალში, ენტროპიის მნიშვნელობა ბოლცმანის მუდმივითაა განსაზღვრული და გააჩნია იგივე განზომილობა.

აბსოლუტური  $T$  ტემპერატურაზე მყოფი ერთგვაროვანი იდეალური აირის ყოველი წინსვლითი თავისუფლების ხარისხზე მოსული ენერგია, მაქსიმალური განაწილებიდან გამომდინარე  $kT/2$  ტოლია. ერთატომიანი იდეალური აირის შემთხვევაში ყოველ ატომს სამი თავისუფლების ხარისხი გააჩნია, რომლებიც შეესაბამება სამ სივრცულ ღერძს, რაც ნიშნავს, რომ ყოველ ატომზე მოდის  $3kT/2$  ენერგია.

## 11.2. ზოგადი პრინციპები და ტერმინები.

კლასიკური გაგებით თერმოდინამიკა ეს მეცნიერებაა, რომელიც სწავლობს სითბოს გარდაქმნის კანონზომიერებს. სადღეისოდ თერმოდინამიკას წარმოადგენენ როგორც მეცნიერებას ენერგიის გარდაქმნის შესახებ – ერთი სახიდან მეორეში. თერმოდინამიკა საშუალებას იძლევა ვიწინასწარმეტყველოდ რა მაქსიმალური მუშაობა შეიძლება იქნეს შესრულებული რაიმე პროცესში. თერმოდინამიკა პასუხობს კითხვაზე წარიმართება თუ არა პროცესი მოცემული მიმართულებით. თერმოდინამიკა იკვლევს სისტემაში მიმდინარე პროცესების ენერგეტიკულ მხარეს და პასუხობს ძირითად კითხვაზე – შესაძლებელია თუ არა მოცემული პროცესების მიმდინარეობა.

თერმოდინამიკული თვალსაზრისით გამოყოფენ სამი სახის სისტემებს, გარემოსთან მათი ურთიერთობის აღმავალი ინტენსივობის მიხედვით: იზოლირებული, ჩაკეტილი და ღია სისტემები.

1. იზოლირებული სისტემა და გარემო ერთმანეთზე გავლენას ვერ ახდენენ.
2. ჩაკეტილი სისტემა და გარემო ერთმანეთზე ენერგეტიკულ ზეგავლენას ახდენენ, თუმცა ნივთიერების მიმოცვლა არ ხდება.
3. ღია სისტემა მთლიანად გარემოზეა დამოკიდებული.

ყველა სისტემა ხასიათდება გარკვეული თვისებებით, თერმოდინამიკური (ანუ მდგომარეობის) პარამეტრებით. სწორედ რომ მათი ერთობლიობა განსაზღვრავს თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობას. ამ მდგომარეობის პარამეტრებია ყველა ის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ახასიათებს სისტემის მაკროსკოპულ თვისებებს (სიმკვრივე, ენერგია, სიბლანტე და ა.შ.). სისტემის ორი მდგომარეობა ითვლება განსხვავებულად, თუ მათი თერმოდინამიკური პარამეტრებიდან ერთი მაინც განსხვავდება. სისტემის მდგომარეობა სტაციონარულია, თუ მისი პარამეტრები არ იცვლება დროის განმავლობაში.

<sup>54</sup> მრგვალი ფრჩხილი ნიშნავს რომ არგუმენტის მოცემული მნიშვნელობა ფუნქციისათვის მიუღებელია.

სტაციონარულ მდგომარეობას ეწოდება წონასწორული, თუ მისი დროში უცვლელობა არაა განპირობებული რომელიმე გარე პროცესით. პარამეტრებს შორის სისტემის მდგომარეობის დასახასიათებლად გამოყოფენ ე.წ. მდგომარეობის ფუნქციებს, რომელთა ცვლილებაც სხვა პარამეტრებისაგან განსხვავებით სისტემის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის დროს, არის დამოკიდებული ამ გადასვლის შესაბამისი თერმოდინამიკურ პროცესებზე და მთლიანად განისაზღვრება პარამეტრების საწყის და საბოლოო მნიშვნელობით.

**მდგომარეობის ფუნქციებია:** შინაგანი ენერგია –  $U$ , ენტალპია –  $H$ , ენტროპია –  $S$ , იზოქორულ-იზობარული პოტენციალი –  $f$ , იზობარულ-იზოთერმული პოტენციალი –  $\Phi$ , და ა.შ. ეს ე.წ. **ექსტენსიური**, ანუ სისტემის მასაზე დამოკიდებული სიდიდეებია. ამ სიდიდეებს ასევე **ადიტიურებს**<sup>55</sup> უწოდებენ, რაც ნიშნავს, რომ სიდიდე, რომელიც აღწერს სისტემას მთლიანობაში მისი შემადგენელი ნაწილების აღწერისათვის გამოყენებული სიდიდეების ჯამის ტოლია. მათ საპირისპიროდ არსებული **ინტენსიური** სიდიდეები (მაგ. ტემპერატურა –  $T$ , სიმკვრივე –  $\rho$ , სიბლანტე –  $\eta$  და ა.შ.) მასაზე დამოკიდებულები არ არიან.

სისტემაში მიმდინარე პროცესები, რომლებიც ცვლიან მის მდგომარეობას, შეიძლება იყვნენ წონასწორული ან არაწონასწორული.

- **წონასწორული**, ანუ შექცევად პროცესები სისტემაში იმგვარად მიედინებიან, რომ მათ მიერ სისტემის მდგომარეობაში გამოწვეული ცვლილებები შეიძლება მოხვდნენ საწინააღმდეგო თანმიმდევრობითაც გარემოში დამატებითი ცვლილებების გარეშე.
- **არაწონასწორული**, ანუ შეუქცევადი პროცესები ე.ი. ბუნებაში მიმდინარე ყველა რეალური პროცესი საწინააღმდეგო მიმართულებით არ მიედინებიან, ან ამისათვის მოითხოვენ გარემოში მნიშვნელოვან ცვლილებებს.

ზოგად შეთხვევაში კლასიკურ თერმოდინამიკას საქმე აქვს ძირითადად წონასწორულ სისტემებთან. მათი პარამეტრები სისტემის ყოველ წერტილში ერთნაირია და დროის მიხედვით თავისთავად არ იცვლებიან.

განვიხილოთ კიდევ რამდენიმე ტერმინი, რომლებიც საჭიროა თერმოდინამიკის საკითხების გაღრმავებული განხილვისათვის.

1. **ენერგია** – ესაა მატერიის მოძრაობის რაოდენობის ზომა, მისი ერთი სახეობიდან მეორეში გადასვლისას. ენერგია განსაზღვრავს სისტემის მიერ მუშაობის შესრულების უნარს. განასხვავებენ ენერგიის რამდენიმე ფორმას: მექანიკური, ელექტრული, ქიმიური და ა.შ.
2. **მუშაობა** – ენერგიის გადაცემის ხერხი. ესაა ერთი ფორმიდან მეორეში ენერგიის გარდაქმნის ზომა. არსებობს მუშაობის სხვადასხვა სახეები:
  - 2.1. **ქიმიური მუშაობა** – სრულდება მაღალმოლეკულური ნაერთების სინთეზის დროს ქიმიურ რეაქციებში.
  - 2.2. **მექანიკური მუშაობა** – სრულდება სხეულის გადაადგილებისას მექანიკური წინააღმდეგობის ძალების გადალახვით.
  - 2.3. **ოსმოსური მუშაობა** – სრულდება სხვადასხვა ნივთიერებების გადატანისას მემბრანებში მათი დაბალი კონცენტრაციის არედან მაღალი კონცენტრაციის არეში. გადატანა სრულდება ე.წ. აქტიური ტრანსპორტის მექანიზმების გამოყენებით.

<sup>55</sup> **ადიტიურობა** (ლათ. *additivus* – მატებადი) – სიდიდეების თვისება, გამოიხატული იმაში, რომ მათი მნიშვნელობა, რომელიც ახასიათებს მთლიან ობიექტს, ამ ობიექტის შესაძლო დანაწილების გარკვეულ კლასში, მისი შემადგენელი ნაწილების ამსახავი სიდიდეების ჯამის ტოლია. მაგალითად, მოცულობის ადიტიურობა ნიშნავს, რომ სხეულის სრული მოცულობა მასში შემავალი ნაწილების მოცულობების ჯამის ტოლია.



2.4. ელექტრული მუშაობა – სრულდება ელექტრულ ველში დამუხტული ნაწილაკების (იონების) გადატანისას.

კლასიკური თერმოდინამიკის საფუძველს წარმოადგენენ მისი პირველი და მეორე კანონები, ხოლო  $T = 0$  პირობებში მათ ემატება მესამე კანონი (ნერნსტის თეორემა).

### 11.3. თერმოდინამიკის პირველი კანონი.

თერმოდინამიკის პირველი კანონი წარმოადგენს ენერჯიის შენახვის კანონს, თერმოდინამიკური პროცესებთან მიმართებაში. მისი ფორმულირება შეიძლება შემდეგი სახით. ენერჯია არა ქრება და არც წარმოიშვება არაფრისაგან, მხოლოდ გადადის ერთი სახიდან მეორეში ეკვივალენტურ რაოდენობებში. მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ სითბოს (სითბური ენერჯიის) გარდაქმნა მექანიკურ ენერჯიაში და პირიქით.

თუ  $M$  კგ აირს, რომელიც იკავებს  $V$  ( $m^3$ ) მოცულობას და გააჩნია  $T$  ტემპერატურა მუდმივი წნევის პირობებში მიუყვანოთ სითბოს გარკვეულ  $dQ$  რაოდენობას, მაშინ ამის შედეგად აირის ტემპერატურა აიწევა  $dT$ -თი, ხოლო მოცულობა  $dV$ -თი გაიზრდება. ტემპერატურის გაზრდა დაკავშირებულია მოლეკულების მოძრაობის კინეტიკური ენერჯიის  $dW_K$  ზრდასთან. მოცულობის გაზრდას თან ახლავს მოლეკულების შორის მანძილის გაზრდა და როგორც შედეგი მათი ურთიერთობის პოტენციური ენერჯიის  $dW_P$  შემცირება. გარდა ამისა მოცულობის ზრდისას აირი ასრულებს მუშაობას  $dA$  გარე ძალების საწინააღმდეგოდ. თუ კი, მითითებულის გარდა მუშა სხეულში არანაირი სხვა პროცესი არ წარმართება, ენერჯიის შენახვის კანონის საფუძველზე შეიძლება ჩავწეროთ:

$$dQ = dW_K + dW_P + dA$$

ჯამი  $dW_K + dW_P$  წარმოადგენს სისტემის მოლეკულების შინაგანი ენერჯიის  $dU$  ცვლილებას სისტემაში სითბოს მიყვანის შედეგად.

მაშინ ენერჯიის შენახვის ფორმულა თერმოდინამიკური პროცესისთვის შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$dQ = dU + dA$$

ან და, ვინაიდან:  $dA = Fdx = PSdx = PdV$ ; სადაც  $P$  – სისტემაში წნევას წარმოადგენს

$$dQ = dU + PdV \quad (73)$$

განტოლება (73) წარმოადგენს თერმოდინამიკის პირველი კანონის მათემატიკურ გამოსახვას: სისტემაში მოყვანილი  $dQ$  სითბოს რაოდენობა, იხარჯება მისი შინაგანი ენერჯიის  $dU$  ცვლილებაზე და გარე მუშაობის  $dA$  შესრულებაზე.

პირობითად თვლიან, რომ: თუ  $dQ > 0$  სითბო მიენიჭება მუშა სხეულს, ხოლო თუ  $dQ < 0$  მუშა სხეულს სითბო წაერთმევა; თუ  $dA > 0$  სისტემა ასრულებს მუშაობას (აირი ფართოვდება), ხოლო თუ  $dA < 0$  მუშაობა სრულდება სისტემის მიმართ (აირი იკუმშება).

იდეალური აირის შემთხვევაში, რომლის მოლეკულებს შორის არაა ურთიერთობა, შინაგანი ენერჯიის ცვლილება  $dU$  სრულად განისაზღვრება მოძრაობის კინეტიკური ენერჯიის ცვლილებით (ანუ მოლეკულების სიჩქარის გაზრდით), ხოლო მოცულობის ცვლილება ახასიათებს აირის მუშაობას გარე ძალების დასაძლევად.

თერმოდინამიკის პირველ კანონს გააჩნია კიდევ ერთი ფორმულირება: იზოლირებული თერმოდინამიკური სისტემის ენერჯია რჩება უცვლელი იმის მიუხედავად თუ რა პროცესები წარმართება მასში. შეუძლებელია აიგოს პირველი რიგის მუდმივი ძრავი (ლათ. Perpetuum Mobile), ანუ პერიოდულად მოქმედი მანქანა, რომელიც შეასრულებს მუშაობას ენერჯიის ხარჯვის გარეშე.

ზემომოყვანილი მათემატიკური გამოანგარიშებები სამართლიანია ყველა თერმოდინამიკური სისტემებისათვის, რომლებშიც მიმდინარეობენ ენერგიის გარდაქმნები. მაგრამ ბიოლოგიურ თერმოდინამიკას გარკვეული სპეციფიკა გააჩნია. პირველყოვლისა უჯრედი არ წარმოადგენს სითბურ მანქანას. აქედან კი გამომდინარეობს, რომ სითბო მასში არ ასრულებს მუშაობას, და ენერგეტიკული გარდაქმნები მეტ წილად წარიმართება ქიმიური კავშირების ენერგიის დონეზე. მაგრამ, მხედველობაში მისაღებია ქიმიური ენერგიის გარდაქმნა მექანიკურში, მაგალითად კონტრაკტული სისტემების მუშაობისას. აქედან გამომდინარეობს, რომ უჯრედში მიმდინარე პროცესებს თან ერთვის გარკვეული რაოდენობის სითბოს გამოყოფა. გარდა ამის, იმის გამო რომ უჯრედის ზომები მუდმივია და არაა დამოკიდებული მათში მიმავალ პროცესებზე, ამ სისტემების მოცულობა და წნევა მუდმივი რჩება. ასე რომ, ვინაიდან მუშაობა უჯრედში სრულდება სტრუქტურის ფორმირებისას გარკვეული ენერგიის ხარჯზე ( $dU$ ) რომლის ნაწილიც ამ დროს თავისუფლდება და გამოიყოფა სითბოს სახით ( $dQ$ ), თერმოდინამიკის პირველი კანონი ცოცხალ სისტემებისათვის მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$dU = dA + dQ \quad (74)$$

გამოსახულება (74) განსხვავდება თერმოდინამიკის პირველი კანონის ადრინდელ ფორმულირებისაგან (73) შესრულებული მუშაობის ნიშნით ( $-$ ), ვინაიდან მუშაობა სრულდება სისტემაზე და  $dA < 0$ .

ეხლა კი ვეცადოთ გავერკვიოთ *ენტალპიის* ცნების ფიზიკურ შინაარსში და არსში. ენტალპიის ცნება ფართოდ გამოიყენება თვითქვენივე სხვადასხვა პროცესების დათვლისას და პროგნოზირებისას.

თერმოდინამიკის პირველი კანონის განტოლება, რომელიც გამოხატავს ენერგიის შენახვის კანონს თერმოდინამიკურ პროცესებში, შეიძლება მივიყვანოთ შემდეგ სახემდე:

$$dQ = dU + PdV = dU + PdV + VdP - VdP = d(U + PV) - VdP$$

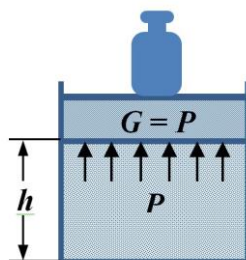
გამოსახულებას ( $U + PV$ ), რომელიც აღნიშნავს შიდა ენერგიის და შესრულებული მუშაობის ელემენტალურ ჯამს, ეწოდება ენტალპია და აღინიშნება  $H$  ასოთი.

$$H = U + PV \quad (75)$$

სიტყვა ენტალპია ბერძნულიდან თარგმნისას ნიშნავს „ვაცხელებ“. ენტალპია ასევე წარმოადგენს მდგომარეობის პარამეტრს, ვინაიდან მასში შემავალ წევრებს  $U$  და  $PV$  სისტემის ყოველ მდგომარეობისათვის სრულად განსაზღვრული მნიშვნელობები გააჩნიათ. მაშინ თერმოდინამიკის პირველი კანონი შეიძლება ასეთი სახით ჩაიწეროს:

$$dQ = dH - VdP \quad (76)$$

იმისათვის, რომ გასაგები გახდეს აირის ენტალპიის პარამეტრი, წარმოვიდგინოთ ცილინდრი მოძრავი დეფუშოთ სურ. 46, სადაც იმყოფება 1 კგ აირი  $P$  წნევის პირობებში. ამ აირის წნევა წონასწორდება დეფუშის  $G$  წონით.



სურ. 46. ენტალპიის პარამეტრის ილუსტრირება.

ვინაიდან  $G = PS$ , სადაც  $S$  – დგუმის ფართობია, სისტემის ენერგია იქნება ტოლი:

$$W = U + Gh = U + PSh$$

სადაც,  $U$  – აირის შიდა ენერგია;  $Gh = PSh$  – წარმოადგენს  $h$  სიმაღლეზე აწეული ტვირთის (დგუმის) პოტენციურ ენერგიას.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ  $Sh = V$  და ზემომოყვანილი ენტალპიის განმარტება, შეიძლება ჩაიწეროს, რომ მოცემულ შემთხვევაში სისტემის ენერგია ენტალპიის ტოლია:

$$W = U + PV = H \quad (77)$$

გავიხსენოთ თბოშემცველობის განმარტება:

**თბოშემცველობა** არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც განისაზღვრება როგორც სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც აუცილებლად უნდა მიუყვანოთ სხეულს მოცემულ პროცესში, რათა მისი ტემპერატურა გაიზარდოს 1 კელვინით:

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

**მოლური თბოშემცველობა** ეწოდება სითბოს იმ რაოდენობას რომელიც აუცილებელია გადაეცეს 1 მოლ ნივთიერებას, რათა მისი ტემპერატურა გაიზარდოს 1 კელვინით:

$$c = \frac{dQ}{V \cdot \Delta T}$$

თერმოდინამიკაში ფართოდ გამოიყენება ცნებები: **მოლური თბოშემცველობა მუდმივი მოცულობის შემთხვევაში**  $c_V$  და **მოლური თბოშემცველობა მუდმივი წნევის პირობებში**  $c_P$ . იდეალურ აირში ისინი აკმაყოფილებენ **მაიერის განტოლებას**:

$$c_P - c_V = R \quad (78)$$

სადაც,  $R$  – არის აირის უნივერსალური მუდმივა – კონსტანტა, რომელიც იზოზარულ<sup>56</sup> პროცესში 1 მოლი იდეალური აირის გაფართოების მუშაობის ტოლია ტემპერატურის 1 კ გაზრდისას.

1874 წ მენდელეევი გამოთვალა კლაპეირონ–მენდელეევის განტოლების (იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება) კონსტანტის მნიშვნელობა 1 მოლი აირისათვის ავოგადროს კანონის გამოყენებით, რომლის თანახმადაც სხვადასხვა აირების 1 მოლი თანაბარი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში იკავებენ ერთ მოცულობას ( $V_\mu$ ).

$$P = \frac{RT}{V_\mu}$$

ერთეულების SI სისტემაში აირის უნივერსალური მუდმივა  $R \approx 8,31$  ჯ/მოლ·კ, და შეიძლება იყოს გამოსახული ბოლცმანის მუდმივას და ავოგადროს რიცხვის ნამრავლის სახით  $R = kN_A$ . აირის უნივერსალური მუდმივა გამოთვლებში უფრო მოსახერხებელია, როდესაც ნაწილაკების რაოდენობა მოცემულია მოლებში. მოლი არის ნივთიერების რაოდენობა სისტემაში რომელიც შეიცავს იმდენივე სტრუქტურულ ელემენტს, რამდენ ატომსაც შეიცავს 0,012 კგ მასის მქონე ნახშირბადი-12 ( $^{12}\text{C}$  — ატომური ნომერი – 6, შეფარდებითი ატომური მასა –12). მოლის გამოყენებისას სტრუქტურული ელემენტები უნდა იყვნენ სპეციფიცირებული და შეიძლება წარმოადგენდნ ატომებს, მოლეკულებს, იონებს, ელექტრონებს და სხვა ნაწილაკებს, ან ნაწილაკების სპეციფიცირებულ ჯგუფებს.

მოლის განმარტებიდან უშუალოდ გამომდინარეობს, რომ  $^{12}\text{C}$ -ის მოლარული მასა არის **ზუსტად** 12 გ/მოლი.

<sup>56</sup> მუდმივი წნევის პირობებში.

სპეციფიური სტრუქტურული ელემენტების რაოდენობას ნივთიერების 1 მოლში ავოგადროს რიცხვი ეწოდება. ასე რომ, 0,012 კგ მასის მქონე  $^{12}\text{C}$  შეიცავს  $N_A$  ატომს. ავოგადროს რიცხვის მნიშვნელობა ტოლია  $N_A = 6,022140857(74) \cdot 10^{23}$  მოლი $^{-1}$ . აქედან,  $^{12}\text{C}$ -ის 1 ატომის მასა –  $0,012/N_A$  კგ =  $12/N_A$  გ.  $^{12}\text{C}$ -ის მასის 1/12 ნაწილს ატომური მასის ერთეული ეწოდება (აღნიშვნა ა.მ.ე. (საერთაშორისო – u)), ან დალტონი (აღნიშვნა და (საერთაშორისო – Da)), და მაშასადამე,  $1\text{Da} = 0,001/N_A$  კგ =  $1/N_A$  გ.

ამრიგად, ერთი მოლი ნივთიერების მასა (მოლური მასა) უდრის ნივთიერების (ატომის ან მოლეკულის) ერთი ნაწილაკის მასას გამოსახულს ა.მ.ე.-ში (Da-ში) და გამრავლებულს  $N_A$ -ზე.

მაგალითად, ლითიუმის 1 მოლის მასა (Li – ატომური ნომერი – 3, შეფარდებითი ატომური მასა – 6,941 ~ 7), რომელსაც ატომალური კრისტალური მესერი გააჩნია, იქნება:

$$7 \text{ ა.მ.ე.} \cdot N_A = 7 \cdot 1/N_A \text{ გ} \cdot N_A \text{ მოლი}^{-1} = 7 \text{ გ/მოლი}$$

ხოლო 1 მოლი ჟანგბადის მასა ( $\text{O}_2$  – ატომური ნომერი – 8, შეფარდებითი ატომური მასა – 15,999 ~ 16), რომელიც ორატომიანი მოლეკულებიდან არის შემდგარი, იქნება:

$$2 \cdot 16 \text{ ა.მ.ე.} \cdot N_A = 2 \cdot 16 \cdot 1/N_A \text{ გ} \cdot N_A \text{ მოლი}^{-1} = 32 \text{ გ/მოლი}$$

ესე იგი, ა.მ.ე.-ის განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ ნივთიერების მოლური მასა რომელიც გამოისახება გრამებში მოლზე, რიცხობრივად უდრის ატომის მასის ერთეულებში გამოსახულ ამ ნივთიერების უმცირესი ნაწილაკის (ატომის ან მოლეკულის) მასას. ნორმალურ პირობებში 1 მოლი იდეალური აირის მოცულობა შეადგენს 22,413996(39) ლ. ესე იგი, ჟანგბადის ერთი მოლი იკავებს 22,413996(39) ლ მოცულობას (რიგითი გამოთვლებისათვის 22,4 ლ) და 32 გ მასა გააჩნია.

ერთატომიანი იდეალური აირის 1 მოლის თბოშემცველობა მუდმივი მოცულობის პირობებში შეადგენს  $\frac{3}{2}R$ , ორატომიანის –  $\frac{5}{2}R$ , მრავალატომიანის –  $3R$ .

იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირ პროპორციულია:

$$U = c_V T$$

აირის მიერ შესრულებული მუშაობა ( $\Delta A$ ), განისაზღვრება აირის წნევით და მისი მოცულობის ცვლილებით:

$$\Delta A = P \cdot \Delta V$$

თუ ჩავსვავთ (77) განტოლებაში  $U$  და  $PV$ -ს მნიშვნელობებს  $T$  ტემპერატურის დროს, ანუ:  $U = c_V T$  და  $PV = RT$ , მივიღებთ:

$$H = c_V T + RT = (c_V + R)T$$

გამოსახულება  $(c_V + R)$  მაიერის განტოლების (78) თანახმად შეიძლება გამოისახოს  $c_P$ -ს მეშვეობით. მაშინ შეიძლება ჩავწეროთ:

$$H = c_P T$$

ანუ, აირის ენტალპია  $T$  ტემპერატურაზე რიცხობრივად მუშა სხეულთან მიყვანილი სითბოს რაოდენობის ტოლია, მისი გათბობისას  $0\text{კ}$  -დან  $T$  ტემპერატურამდე, მუდმივი წნევის პირობებში.

არსებობს ენტალპიის სხვა განმარტებაც – ეს არის სისტემის ან მატერიალური სხეულის ენერჯიის ის რაოდენობა რომელიც მისაწვდომია მისი სითბოში გადასაყვანათ განსაზღვრული ტემპერატურის და წნევის პირობებში.

ნათელია, რომ მატერიალური სხეულების მათ შორის აირების ენერგია სრულად არაა მისაწვდომი სითბოში გადასაცვანათ. ენერგიის რაღაც ნაწილი აუცილებელია მისი მოლეკულური სტრუქტურის შენარჩუნებისათვის.  $m$  მასის მატერიალურ სხეულში არსებული სრული ენერგია აინშტაინის ცნობილი განტოლების თანახმად ტოლია  $E = mc^2$ . ამ ენერგიის მხოლოდ ნაწილი შეიძლება იყოს გარდაქმნილი სითბოში სხეულის აბსოლუტურ ნულამდე გაციებისას, და ზუსტად სრული ენერგიის ამ წილს (*მისაწვდომი სითბოში გადასაცვანათ*) ეწოდება ენტალპია.

**არ უნდა დავივიწყოთ, რომ ენტალპია ახასიათებს კონკრეტულ მდგომარეობაში ხელმისაწვდომ სითბოს რაოდენობას, ანუ წნვისა ( $P$ ) და მოცულობის ( $V$ ) კონკრეტულ მნიშვნელობებისათვის.**

სხვადასხვა მდგომარეობაში მყოფი განსხვავებული ნივთიერებების ენტალპიის მნიშვნელობები მოყვანილია სპეციალურ ცნობარებში.

ენტალპია გამოიყენება ენერგიათა დონეების სხვაობის განსაზღვრისას თერმოდინამიული სისტემის ორ მდგომარეობას შორის.

კვლავ დაუბრუნდეთ თერმოდინამიკის პირველ კანონს დაგავიხსენოთ მისი არსი.

**თერმოდინამიკის პირველი კანონი წარმოადგენს ენერგიის შენახვის კანონს სითბოს გარდაქმნის პროცესებთან მიმართებაში.** შეუძლებელია ამ კანონის დამტკიცება. ცნობილი მათემატიკოსის ანრი პუანკარეს თქმით: “არსებითად არავინ არ აყენებს ექვქვეშ ენერგიის მუდმივობის კანონს იმიტომ რომ მათემატიკოსები მას ექსპერიმენტულ ფაქტად თვლიან, ხოლო ექსპერიმენტატორები – მათემატიკურ თეორემად”. თანამედროვე ფიზიკის პოზიციებიდან, რომლის მიხედვისაც მასა განიხილება როგორც ენერგიის ფორმა, ენერგიის შენახვის კანონს ენერგიის და მასის შენახვის კანონი შეიძლება ეწოდოს. უფრო მეტიც, ბოლო ხანებში სამეცნიერო ლიტერატურაში გამოითქვა მოსაზრება იმის შესახებ, რომ ინფორმაცია ასევე ენერგიის ერთერთი ფორმაა. ასე რომ თერმოდინამიკის I კანონი კიდევ უფრო ღრმა შინაარსს იძენს.

ამგვარად ენერგია არც წარმოიქმნება და არც ქრება, იგი მხოლოდ ერთი სახიდან მეორეში გარდაიქმნება. ვთქვათ გვაქვს ჩაკეტილი სისტემა, რომელიც გარემოსთან მიმოცვლის ენერგიას. მაშინ, ენერგიის შენახვის კანონის თანახმად, თუ ცნობილია სისტემის მიერ გაცემული და გარემოდან მიღებული ენერგიის რაოდენობა, შეიძლება გამოვთვალოთ სისტემის შინაგანი ენერგიის რაოდენობაც.

**შინაგანი ენერგია** ესაა მოცემული სისტემის ყველა ენერგიების ჯამი (მექანიკური, სითბური, ელექტრული და ა.შ.). თუ სისტემასა და გარემოს შორის ენერგიის მიმოცვლის შედეგად შესრულდა მუშაობა, მაშინ შინაგანი ენერგიის ცვლილება ასე გამოისახება:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A$$

ეს არის თერმოდინამიკის პირველი კანონის მათემატიკური ჩანაწერი, და (74) ფორმულის ეკვივალენტურია, მაგრამ ჩაწერილია არა დიფერენციალურ ფორმაში. აქ  $\Delta Q$  – გაცემული სითბოს რაოდენობაა,  $\Delta A$  – მის მიერ შესრულებული მუშაობა. რეალურ პირობებში, მაგალითად ორგანიზმში მიმდინარე ბიოქიმიურ და ბიოფიზიკურ პროცესები, როგორც ითქვა, ყველა მოვლენა შეუქცევადია. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ ამა თუ იმ სახის მუშაობის შესრულებისას სისტემა გამოიყენებს სასარგებლო მუშაობის ( $\Delta A$ ) შესასრულებლად მხოლოდ ენერგიის ნაწილს. მეორე ნაწილი იხარჯება ხახუნის ძალების წინაარმდეგ მუშაობაზე ( $A''$ ) და უსარგებლოდ იფანტება სივრცეში სითბოს სახით. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ეს ნიშნავს რომ პროცესის მ.ქ.კ  $< 1$  (მართქმედების კოეფიციენტი). ამავე დროს ორგანიზმის სხვადასხვა ფუნქციის შესრულებისას, ენერგიის ნაწილი იხარჯება სასარგებლო მუშაობის შესრულებაზე ხოლო მეორე ნაწილი გამოიყოფა გარემოში

სითბოს სახით. ეს ენერგეტიკული (სითბური) დანაკარგები გამოიყენება ორგანიზმის მიერ სითბური ბალანსის შესანარჩუნებლად.

როგორც უკვე აღინიშნა, სითბური ბალანსის დადგენისათვის სასარგებლოა მდგომარეობის ფუნქცია ენტალპია ( $H$ ), ანუ სითბომემცველობა. ბიოლურ სემებში, როეც ოცუობა ა წნევა არ იცვლებიან,  $\Delta H = \Delta U$ . ენტალპიას აქვს ფართო გამოყენება პრაქტიკაში. მისი ცვლილება ( $\Delta H$ ) შეიძლება გამოვიყენოთ ქიმიური კავშირების სიმტკიცის დასახასიათებლად, როცა ამ კავშირების ენტალპიის ჯამური ცვლილება ქიმიურ რეაქციაში გამოვლინდება კალორიმეტრში გამოყოფილი სითბოს სახით.

#### 11.4. თერმოდინამიკის მეორე კანონი.

თერმოდინამიკის მეორე კანონი ისევე კაცობრიობის ზოგად გამოცდილებას ეყრდნობა. კერძოდ იმას, რომ ყველა სისტემა ისეთნაირად იცვლება, რომ მათი უნარი გარდაქმნისაკენ მცირდება. ესე იგი ისინი მიისწრაფიან წონასწორულ მდგომარეობისაკენ. მაგალითად, წყალი მიედინება ზემოდან ქვემოთ, სითბო გადაეცემა თბილიდან ცივ სხეულებს, მუხტი მაღალი პოტენციალიდან დაბლისაკენ გადაეცემა, სითხეში გახსნილი ნივთიერება ვრცელდება ხსნარის მთელ მოცულობაში, ცოცხალი ორგანიზმი იზრდება, ბერდება და კვდება და ა.შ.. ამ რიგად თერმოდინამიკის I კანონი აღწერს ენერგიის გარდაქმნას, მაგრამ არ აღწერს ამ გარდაქმნის მიმართულებას, ეს II კანონის საგანია. არსებობს თერმოდინამიკის II კანონის მრავალგვარი ფორმულირება. მათგან ყველაზე ცხადი და მარტივი ასე შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ: ენერგიის გარდაქმნის ნებისმიერ პროცესში ადგილი აქვს ენერგიის ნაწილის სითბოს სახით გაბნევას. ეს იმითაა განპირობებული, რომ სითბო არ შეიძლება სრულად იყოს გარდაქმნილი ენერგიის სხვა ფორმაში, რომელიც თავის მხრივ მთლიანად შეიძლება იყოს გარდაქმნილი სითბოდ. ეს იმის შედეგია, რომ სითბური ენერგია, როგორც ამბობენ, არის ენერგიის ყველაზე “დეგრადირებული” ფორმა, რადგანაც განპირობებულია სისტემის მიკრონაწილაკების უწყესრიგო მოძრაობით. სხვა ფორმის ენერგიები უკავშირდებიან ნაწილაკების მოწყობილობას.

თერმოდინამიკის II კანონის თანახმად, სისტემის მდგომარეობა შეიძლება აღიწეროს მდგომარეობის განსაკუთრებული ფუნქციის –  $S$  ენტროპიის (72) მეშვეობით. ენერგიის ცვლილება განისაზღვრება სისტემის მიერ შთანთქმული ან გაცემული სითბოს რაოდენობით:

1. ჩაკეტილი სისტემისათვის:  $dS = \frac{Q}{T}$

2. ნებისმიერი სისტემისათვის:  $dS \geq \frac{dQ}{T}$  (ტოლობა შეესაბამება წონასწორულ მდგომარეობას, ხოლო მეტობა არაწონასწორულს).

სისტემაში, რომელშიც გარემოსთან სითბოს მიმოცვლა არ ხდება  $dQ = 0$  და  $dS \geq 0$ . ეს კი ნიშნავს, რომ იზოლირებულ სისტემაში ენტროპია არ იცვლება წონასწორულ და იზრდება არაწონასწორულ პროცესში. სწორედ ამაში მდგომარეობს ენერგიის გარდაქმნის მიმართულების კრიტერიუმი იზოლირებულ სისტემაში. ამრიგად, არაწონასწორული პროცესები იზოლირებულ სისტემაში მიედინებიან ენტროპიის ზრდის მიმართულებით. პროცესის დასრულებისას ენტროპიას გააჩნია მაქსიმალური მნიშვნელობა და მყარდება თერმოდინამიური წონასწორობა.

ეხლა შეიძლება სხვა კუთხით შევხედოთ პროცესების შეუქცევადობის საკითხს.

პროცესი შექცევადია თუ მას თან არ ახლავს ენერგიის გაფანტვა სითბოს სახით, ანუ თავისუფალი ენერგიის ნაწილის დისიპაცია. შესაბამისად, პროცესი იქნება შეუქცევადი, თუ მას თან ახლავს ენერგიის ნაწილის დისპაცია.

## 11.5. თერმოდინამიკის მესამე კანონი

თერმოდინამიკის მესამე კანონი (ნერნსტის თეორემა, ნერნსტის სითბური თეორემა) – წარმოადგენს ფიზიკურ პრინციპს, რომელიც განსაზღვრავს ენტროპიის ქცევას სისტემაში ტემპერატურის აბსოლუტური ნულამდე მიახლოებისას. წარმოადგენს თერმოდინამიკის ერთ ერთ პოსტულატს, რომელიც მიღებულ იქნა გალვანურ ელემენტებზე ჩატარებული თერმოდინამიული ექსპერიმენტების მნიშვნელოვანი რაოდენობის მონაცემების განზოგადების შედეგად. თეორემა ჩამოაყალიბა ვალტერ ნერნსტმა 1906 წელს. ამ თეორემის თანამედროვე ფორმულირება კი მაქს პლანკს ეკუთვნის.

### ნერნსტის ფორმულირება

ნერნსტის თეორემა ამტკიცებს, რომ ფიქსირებულ  $T$  ტემპერატურაზე, ნულთან ნებისმიერად მიახლოებულ არეში ( $T < T_0 \rightarrow 0$ ) მიმდინარე ყოველ თერმოდინამიურ პროცესს თან არ უნდა ახლავდეს ენტროპიის ( $S$ ) ცვლილება, ანუ იზოთერმა  $T = 0$  ემთხვევა ზღვრულ ადიაბატას<sup>57</sup>  $S_0$ .

არსებობს ამ თეორემის ერთმანეთის ეკვივალენტური რამდენიმე ფორმულირება:

- ნებისმიერი სისტემის ენტროპია  $S$  მისი აბსოლუტური ნულის ტემპერატურაზე ყოფნისას ( $T = 0$ ) წარმოადგენს უნივერსალურ მუდმივას  $S_0$ , რომელიც არაა დამოკიდებული სისტემის რაიმე ცვლად პარამეტრზე (წნევაზე, მოცულობაზე და ა.შ.).
- აბსოლუტურ ნულთან მიახლოებისას,  $T \rightarrow 0$ , ენტროპია  $S$  მიისწრაფის გარკვეულ ზღვრულ მნიშვნელობისაკენ  $S_0$ , რომელიც არაა დამოკიდებული სისტემის საბოლოო მდგომარეობაზე.
- აბსოლუტურ ნულთან მიახლოებისას,  $T \rightarrow 0$ , ენტროპიის მატება  $\Delta S$  არაა დამოკიდებული სისტემის მდგომარეობის ამსახავი თერმოდინამიური პარამეტრების კონკრეტულ მნიშვნელობებზე და მიისწრაფის სავსებით გარკვეულ საბოლოო ზღვრულ მნიშვნელობისაკენ.
- პროცესები წონასწორულ მდგომარეობებს შორის გადასვლის დროს აბსოლუტური ნულის პირობებში ( $T = 0$ ) მიმდინარეობენ ენტროპიის ცვლილების გარეშე.

ყოველივე ეს მათემატიკურად შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\lim_{T \rightarrow 0K} [S(T, x_2) - S(T, x_1)] = 0 \quad \text{ანუ} \quad \lim_{T \rightarrow 0K} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_T = 0$$

სადაც  $x_1, x_2, x$  – ნებისმიერი თერმოდინამიკური პარამეტრებია.

თერმოდინამიკის მესამე კანონი მხოლოდ წონასწორულ მდგომარეობებს ასახავს. ნერნსტის თეორემის მართებულობა შეიძლება დამტკიცდეს მხოლოდ მისი შედეგების შემოწმებით ჩატარებული ცდების საფუძველზე.

ვინაიდან თერმოდინამიკის მეორე კანონის საფუძველზე ენტროპიის განსაზღვრა შეიძლება მხოლოდ ნებისმიერი ადიტიური მუდმივის სიზუსტით (ანუ განისაზღვრება არა თავად ენტროპია, არამეტ მისი ცვლილება):

<sup>57</sup> ადიაბატა – (ბერძ. გაუვალი) ხაზი, რომელიც ნებისმიერ თერმოდინამიურ დიაგრამაზე გამოსახავს წონასწორულ ადიაბატურ, ანუ გარემოსთან სითბოს მიმოქცევის გარეშე მიმდინარე პროცესს. თუ კი საერთო შემთხვევაში თერმოდინამიური პროცესი წარმოდგენილია სამი პროცესით – სითბოს მიმოცვლა, სისტემის მიერ (ან სისტემაზე) მუშაობის შესრულება და მისი შინაგანი ენერჯის ცვლილება, მაშინ ადიაბატური პროცესი გარემოსა და სისტემას შორის სითბოს მიმოცვლის არ არსებობის გამო ( $dQ = 0$ ), დაიყვანება მხოლოდ ბოლო ორ პროცესებზე. ამიტომაც თერმოდინამიკის პირველი კანონი (75) ამ შემთხვევაში წარმოგვიდგება შემდეგნაირად:  $dU = dA$  (სადაც,  $dU$  – სხეულის შიდა ენერჯის ცვლილება,  $dA$  – სისტემის მიერ შესრულებული მუშაობა). იმის გამო რომ შექცევად ადიაბატურ პროცესში სისტემის საზღვრებს გარეთ სითბო არ გაიცემა, მისი ენტროპიაც არ იცვლება:  $dS = \delta Q/T = 0$ .

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

თერმოდინამიკის მესამე კანონის გამოყენება შეიძლება ენტროპიის ზუსტი განსაზღვრისათვის. ამასთან, წონასწორული სისტემის ენტროპიას ტემპერატურის აბსოლუტური ნულის პირობებში თვლიან ნულის ტოლად.

თერმოდინამიკის მესამე კანონი ენტროპიის აბსოლუტური მნიშვნელობის პოვნის საშუალებას იძლევა, რაც შეუძლებელია კლასიკური თერმოდინამიკის ფარგლებში (პირველი და მეორე კანონების საფუძველზე). კლასიკურ თერმოდინამიკაში ენტროპიის განსაზღვრა შეიძლება ნებისმიერი ადიტიური  $S_0$  მუდმივის სიზუსტით, რაც ხელს არ უშლის თერმოდინამიურ კვლევებს, ვინაიდან რეალურად იზომება ენტროპიების სხვაობა სხვადასხვა მდგომარეობებში. თერმოდინამიკის მესამე კანონის თანახმად  $T \rightarrow 0$  შემთხვევაში  $\Delta S \rightarrow 0$ .

### პლანკის ფორმულირება.

1911 წელს მანს პლანკმა ჩამოაყალიბა თერმოდინამიკის მესამე კანონი როგორც ყველა სხეულის ენტროპიის ნულად ქცევის პირობა ტემპერატურის აბსოლუტური ნულისკენ სწრაფვისას:

$$\begin{aligned} T &\rightarrow 0 \\ S &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

აქედან კი  $S_0 = 0$ , რაც ენტროპიის და სხვა თერმოდინამიური პოტენციალების აბსოლუტური მნიშვნელობის პოვნის საშუალებას იძლევა. პლანკის ფორმულირება შეესაბამება ენტროპიის განმარტებას სტატისტიკურ ფიზიკაში სისტემის მდგომარეობის თერმოდინამიური ალბათობის ( $W$ ) მეშვეობით:  $S = k \ln W$  (იხ. (72)). ტემპერატურის აბსოლუტური ნულის პირობებში სისტემა იმყოფება ძირითად კვანტურ-მექანიკურ მდგომარეობაში. და თუ ეს მდგომარეობა არაა გადაგვარებული, მაშინ  $W = 1$  (მდგომარეობა რეალიზდება ერთადერთი მიკროგანაწილებით), და  $T \rightarrow 0$  შემთხვევაში ენტროპია  $S$  ნულის ტოლია.

თერმოდინამიკის მესამე კანონიდან გამომდინარეობს, რომ ენტროპიის ცვლილებასთან დაკავშირებულ არც ერთ დასრულებულ პროცესში ტემპერატურის აბსოლუტური ნულის მიღწევა შეუძლებელია, მასთან შეიძლება მხოლოდ ასიმპტოტური მიახლოება. ამიტომაც თერმოდინამიკის მესამე კანონს ზოგჯერ ფორმულირებენ როგორც ტემპერატურის აბსოლუტური ნულის მიუღწევადობის პრინციპს.

ნერნსტის თეორემიდან გამომდინარეობს შემდეგი თერმოდინამიური შედეგები:  $T \rightarrow 0$  შემთხვევაში მუდმივი წნევისა და მოცულობის პირობებში ნულისკენ მიისწრაფიან თბოტევადობები, სითბური გაფართოვების კოეფიციენტები და ზოგიერთი ანალოგიური სიდიდეები.

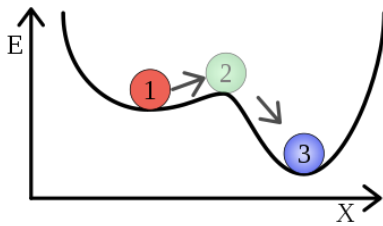
თერმოდინამიკის მესამე კანონის მართებულობას ერთი პერიოდი ეჭვის ქვეშ აყენებდნენ, მაგრამ შემდეგ აღმოჩნდა, რომ ყველა მოჩვენებითი წინააღმდეგობა (ენტროპიის არანულოვანი მნიშვნელობა  $T = 0$  პირობებში) უკავშირდება ნივთიერების მეტასტაბილურ მდგომარეობას, რომელიც არ შეიძლება ჩაითვალოს წონასწორულად.

უნდა აღინიშნოს, რომ მეტასტაბილური მდგომარეობა (ბერძ. μετα – „შემდეგ“ და ლათ. *stabilis* – „მდგრადი“) – ფიზიკური სისტემის კვაზიმდგრადი წონასწორული მდგომარეობა, რომელშიც სისტემა შეიძლება იმყოფებოდეს დიდი ხნის განმავლობაში. თუ რას წარმოადგენს მეტასტაბილური მდგომარეობა ნათელი ხდება სურ. 47-დან. ამ სურათზე ნაჩვენებია ბურთულას სამი მდებარეობა (მდგომარეობა):

1. მეტასტაბილური – მდგომარეობა, რომელსაც ინარჩუნებს სისტემა არც ისე დიდი აღშფოთების შემთხვევაში;



2. **არასტაბილური** – მდგომარეობა, რომლის სტაბილურობა ირღვევა ნებისმიერად მცირე აღშფოთების შემთხვევაში;
3. **სტაბილური** – მდგომარეობა, რომელსაც ინარჩუნებს სისტემა დიდი აღშფოთების შემთხვევაშიც კი.



სურ. 47. მეტასტაბილურობა ილუსტრირება ორმოში მყოფ ბურთულას მაგალითზე.

მეტასტაბილური მდგომარეობები ხშირად გვხვდება ბუნებაში და ფართოდ გამოიყენება მეცნიერებასა და ტექნიკაში. მეტასტაბილური მდგომარეობების არსებობას უკავშირდება, მაგალითად, მაგნიტური, ელექტრული და დრეკადი ჰისტერეზისის<sup>58</sup> მოვლენები, გადამეტნაჯერი ხსნარების შექმნა, ფოლადის წრთვნა, მინის წარმოება და ა.შ.

თერმოდინამიკის მესამე კანონი ხშირად ირღვევა მოდელურ სისტემებში. ასე  $T \rightarrow 0$  შემთხვევაში კლასიკური იდეალური აირის ენტროპია მიისწრაფის მინუს უსასრულობისაკენ. ეს კი იმაზე მეტყველებს, რომ დაბალი ტემპერატურების პირობებში კლაიპერონ-მენდელეევის განტოლება არაადეკვატურად აღწერს რეალური აირების ქცევას. ასე რომ თერმოდინამიკის მესამე კანონი მიუთითებს კლასიკური მექანიკის და სტატისტიკის ნაკლოვანებებზე და წარმოადგენს რეალური სისტემების კვანტური თვისებების მაკროსკოპულ გამოვლენას.

მიუხედავად ამისა კვანტური მექანიკის მოდელურ სისტემებში თერმოდინამიკის მესამე კანონი ასევე შეიძლება ირღვეოდეს. ასეთია ყველა ის შემთხვევა როდესაც გამოიყენება ჯიბსის განაწილება, ხოლო ძირითადი მდგომარეობა გადაგვარებულია. მოდელებში თერმოდინამიკის მესამე კანონის დაუცველობა არ გამორიცხავს იმას, რომ ფიზიკური სიდიდეების ცვლილების რაღაც დიაპაზონში ეს მოდელი შეიძლება აღმოჩნდეს სრულიად ადეკვატური.

### 11.6. სასარგებლო მუშაობა და თავისუფალი ენერგია.

იმისათვის რომ გაეცეს პასუხი კითხვას ამა თუ იმ რეაქციის დინების შესაძლებლობაზე, მის მიმართულებაზე და სიღრმეზე, აუცილებელია კვლავ გამოვიყენოთ თერმოდინამიკის მეორე კანონი, რომელიც შეიძლება შემდეგნაირად ჩამოყალიბდეს:

ნებისმიერი თვითნებურად მიმდინარე პროცესი, და ასევე ქიმიური რეაქცია, მიედინება იმ მიმართულებით, რომელსაც თან ახლავს სისტემის თავისუფალი ენერგიის შემცირება (მუდმივი წნევის და ტემპერატურის პირობებში) ან და ჰელმჰოლცის ენერგიის (მუდმივი მოცულობის და ტემპერატურის პირობებში). მოდი გავერკვიოთ თუ რას წარმოადგენს ეს თავისუფალი ენერგია?

თავდაპირველად გავიხსენოთ ენტროპიის და ენტალპიის განმარტებები.

როგორც უკვე აღინიშნა, ენტროპია (72) გვიჩვენებს სისტემის ორგანიზების ხარისხს და განისაზღვრება როგორც:

<sup>58</sup> **ჰისტერეზისი** (ბერძ. ჩამორჩენა, დაგვიანება) – სისტემების (ფიზიკური, ბიოლოგიური და ა.შ.) თვისება რომელიც განისაზღვრება მათზე ზეგავლენის შემდეგ მიღებული მყისიერი პასუხით სისტემის მიმდინარე მდგომარეობის მიხედვით, ხოლო მათი ქცევა რაიმე დროის ინტერვალში განისაზღვრება ამ სისტემების წინაისტორიით. ეს ცნება არ უნდა აგვერიოს სისტემის ინერციულ ქცევასთან, რომელიც ასახავს სისტემის მიერ მონოტონური წინააღმდეგობის გაწევას მდგომარეობის შეცვლის მიმართ.

$$S = k \ln W$$

სადაც,  $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$  ჯ/კ – ბოლცმანის მუდმივაა, რომელიც განსაზღვრავს კავშირს ტემპერატურასა და ენერგიას შორის, ხოლო  $W$  – სისტემის დალაგების ზომა (თერმოდინამიური მდგომარეობის ალბათობა, რომელიც უგანზომლო სიდეა). ამიტომაც ენტროპიას ბოლცმანის მუდმივას განზომილობა გააჩნია და გვიჩვენებს სისტემის ცვლილების ხარისხს (შემადგენლობას, მდგომარეობას, სტრუქტურას და ა.შ.), მისი ტემპერატურის 1 კ-ნით შეცვლისას. ენტროპიის ცვლილება  $\Delta S$  გვიჩვენებს სისტემის ცვლილებებს რომლებიც წარმართება მისი ტემპერატურის 1 კ-ნით შეცვლისას. თუ კი ჩვენ გვსურს სისტემის საბოლოო მდგომარეობის განსაზღვრა, საჭიროა განიხილოს  $T\Delta S$  სიდიდე, რომელიც გვიჩვენებს სისტემის ცვლილებებს მასზე ტემპერატურული ფაქტორის ( $T$ ) ზეგავლენის შემდეგ.

როგორც აღინიშნებოდა (75) ენტალპია – ეს თერმოდინამიური პარამეტრია, რომელიც განისაზღვრება შიდა ენერგიის და შესრულებული მუშაობის ჯამით:

$$H = U + PV$$

ენტალპიის ცვლილება მუდმივი წნევისა და მოცულობის პირობებში შეიძლება განიმარტოს როგორც სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება.

ქიმიურ პროცესებში ერთდროულად მოქმედებს ორი საპირისპირო ფაქტორი – ენტროპიული ( $T\Delta S$ ) და ენტალპიური ( $\Delta H$ ). ამ საპირისპირო ფაქტორების ჯამური ეფექტი მუდმივი წნევის და ტემპერატურის პირობებში მიმდინარე პროცესებში, განსაზღვრავს **ჯიბსის ენერგიის** ( $G$ ) ცვლილებას:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (79)$$

თვით ჯიბსის ენერგია შეიძლება განისაზღვროს როგორც სისტემის (კრისტალის, სითხის და ა.შ.) სრული პოტენციალური ქიმიური ენერგია.

$$G = U + PV - TS \quad (80)$$

განტოლება (79) გამომდინარეობს, რომ  $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$ , ეს კი ნიშნავს რომ სითბოს რაღაცა რაოდენობა იხარჯება ენტროპიის გაზრდაზე ( $T\Delta S$ ). ენერგიის ეს ნაწილი დაკარგულია სასარგებლო მუშაობის შესრულებისათვის (გაიფანტება გარემოში სითბოს სახით), მას ხშირად **შეზოჭილ ენერგიას** უწოდებენ. სითბოს მეორე ნაწილი  $\Delta G$  შეიძლება იყოს გამოყენებული მუშაობის შესრულებაზე, ამიტომაც ჯიბსის ენერგიას ხშირად ასევე **თავისუფალ ენერგიას** უწოდებენ.

არ უნდა აგვერიოს თავისუფალი ენერგია ქიმიური კავშირის ენერგიაში. ქიმიური კავშირის ენერგიას უწოდებენ იმ ენერგიას, რომელიც გამოიყოფა ქიმიური კავშირის შექმნისას, ან იხარჯება მის გარღვევაზე. ამ დროს მოლეკულა უნდა იმყოფებოდეს ძირითად (არააღზნებულ) მდგომარეობაში. ეს სიდიდე განსაზღვრავს კავშირის სიმყარეს. რაც უფრო მეტია ქიმიური კავშირის გასარღვევად საჭირო ენერგია, მით უფრო მყარია კავშირი. კავშირის ენერგიის ერთეული — კჯ/მოლ, ან კკალ/მოლ<sup>59</sup>. მაგალითად H — H კავშირის ენერგია წყალბადის მოლეკულაში 436 კჯ/მოლ. თუ მოლეკულაში რამდენიმე ერთნაირი კავშირია, მაშინ, ცხადია, თითოეული კავშირის გასარღვევად ყოველ შემდეგს ესაჭიროვება ენერგიის განსხვავებული რაოდენობა და ამ შემთხვევაში საუბრობენ კავშირის საშუალო ენერგიაზე.

უფრო დაწვრილებით ქიმიური კავშირის ენერგია განიხილება მოგვიანებით.

<sup>59</sup> 1 კალ = 4,1868 ჯ

ჯიბსის ენერჯის ცვლილების ხასიათი საშუალებას იძლევა ვიმსჯელოთ პროცესის განხორციელების პრინციპულ შესძლებლობაზე. თუ  $\Delta G < 0$  პროცესი თვითნებურად მიედინება, ხოლო თუ კი  $\Delta G > 0$  პროცესი თვითნებურად ვეღარ წარიმართება. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, თუ სისტემის საწყის მდგომარეობაში ჯიბსის ენერჯია მეტია ვიდრე დასასრულს – თვითნებური რეაქცია შესაძლებელია. თუ კი საწყის მდგომარეობაში ის ნაკლებია ვიდრე დასასრულს, რეაქცია თვითნებურად ვერ ჩაივლის. იმ შემთხვევაში როდესაც  $\Delta G = 0$  სისტემა იმყოფება ქიმიური წონასწორობის მდგომარეობაში.

მაგრამა საჭიროა დავაზუსტოთ, რომ საუბარია რეაქციის მსვლელობის მხოლოდ პრინციპულ შესაძლებლობაზე. რეალურ პირობებში კი, რეაქცია შეიძლება არ დაიწყოს  $\Delta G < 0$  პირობის შესრულებისას (კინეტიკური მიზეზების გამო).

ზოგადად რომ ითქვას, ნებისმიერი რეაქცია შეიძლება განიხილოს როგორც შექცევადი (თუნდაც პრაქტიკულად ის ასეთი არ იყოს). ამ დროს წონასწორობის კონსტანტა განისაზღვრება როგორც

$$K = \frac{k_1}{k_{-1}}$$

სადაც,  $k_1$  – პირდაპირი რეაქციის სიჩქარის კონსტანტა;  $k_{-1}$  – უკუ რეაქციის სიჩქარის კონსტანტა.

თავისუფალი ენერჯის ცნება ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად შემოიღეს ჯიბსმა და ჰელმჰოლცმა. სადღეისოდ თავისუფალი ენერჯია როგორც ჯიბსის ( $G$ ) ასევე ჰელმჰოლცის ( $F$  ან  $A$ ) განმარტებით ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა დარგში. ეს ორი სახის თავისუფალი ენერჯია კონცეპტუალური თვალსაზრისით არ განსხვავდება და ერთმანეთზე დაიყვანება ორგანიზმში არსებული რეალურ პირობებით. ეს კი ნიშნავს, რომ ბიოლოგიურ სისტემებში მიმდინარე გარდაქმნებში, როდესაც მოცულობა და წნევა პრაქტიკულად არ იცვლება  $\Delta G = \Delta F$ . მაგრამ მაინც არსებობს პატარა ნიუანსი თავისუფალი ენერჯის ამ ორ განმარტებაში.

**თავისუფალი, ანუ ჯიბსის ენერჯია ( $G$ )** – ეს სისტემის სრული ენერჯის ის ნაწილია, რომელიც შეიძლება იყოს გამოყენებული მაქსიმალური მუშაობის შესასრულებლად. **ჰელმჰოლცის ენერჯია ( $F$ )** – ეს არის შინაგანი ენერჯის ნაწილი, რომელიც ასევე შეიძლება იყოს გამოყენებული მაქსიმალური მუშაობის შესასრულებლად.

ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობისას ერთდროულად რეალიზდება მათი ორი მიმართულება:

- მარტივი ელემენტების სწრაფვა უფრო რთული სტრუქტურებში გაერთიანებისაკენ;
- რთული სტრუქტურების სწრაფვა უფრო მარტივ ელემენტებზე დაშლისაკენ.

ეს მიმართულებები არ არიან ერთმანეთზე დამოკიდებულები, და პროცესი მიდის იმ რეაქციისკენ, რომელშიც თავისუფალი ენერჯის მნიშვნელობის ცვლილება მეტია. სწორედ ამ სიდიდეებს შორის სხვაობა განსაზღვრავს რეაქციის თავისუფალ ენერჯიას (როდესაც  $P, V = const$ ). მისი ცვლილება რეაქციაში განისაზღვრება ამ რეაქციის საბოლოო პროდუქტების და საწყისი ნივთიერებების ჯიბსის ენერჯიების ჯამის სხვაობით:

$$\Delta G = G_p - G_e$$

სადაც,  $G_p$  – რეაქციის საბოლოო პროდუქტების ჯიბსის ენერჯიების ჯამი;  $G_e$  – საწყისი ნივთიერებების ჯიბსის ენერჯიების ჯამი.

გავარკვიოთ, თუ როგორაა დამოკიდებული მიმდინარე პროცესის თავისუფალი ენერჯია ენტროპიის და ენტალპიის ცვლილებებზე. ამისათვის დაუბრუნდეთ ჯიბსის ენერჯის დამაკავშირებელ გამოსახულებას ენტროპიასთან და ენტალპიასთან:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

ენტროპიული ფაქტორების გარეშე, ყველა ეკზოთერმული<sup>60</sup> რეაქცია ( $\Delta H < 0$ ) უნდა თვითნებური ყოფილიყო. მაგრამ ენტროპიულს ფაქტორს, რომელიც  $T\Delta S$  სიდიდით განისაზღვრება, შეუძლია მიიყვანოს მათი თვითნებური დინების შესაძლებლობის ზრდისკენ ან და პირიქით კლებისკენ.

ასე, თუ  $\Delta S > 0$  მოყვანილი განტოლების  $T\Delta S$  წევრს შეაქვს უარყოფითი წვლილი საერთო  $\Delta G$  სიდიდეში, მაშასადამე ის ზრდის რეაქციის შესაძლებლობას ჩატარდეს თვითნებურად. თუ კი  $\Delta S < 0$ , წევრი  $T\Delta S$  პირიქით ამცირებს რეაქციის თვითნებურად ჩატარების შესაძლებლობას.

თუ  $\Delta H$  და  $T\Delta S$  აქვთ საწინააღმდეგო ნიშნები  $\Delta G$  -ს ნიშანი განისაზღვრება მათი აბსოლუტური მნიშვნელობებით. ესე იგი აუცილებელია გავითვალისწინოთ ტემპერატურული ფაქტორი. ამრიგად, მაღალი ტემპერატურების პირობებში ენტროპიული ფაქტორის როლი მნიშვნელოვანი ხდება.

ქვემოთ მოყვანილი ცხრილი გვიჩვენებს ტემპერატურის გავლენას რეაქციის თვითნებურ სვლელობაზე.

ცხრილი 10

$\Delta H$	$\Delta S$	$\Delta G$	რეაქციის დინება
$< 0$	$> 0$	ყოველთვის $< 0$	რეაქცია თვითნებურია T-ს ნებისმიერ მნიშვნელობისთვის, უკუ რეაქცია ყოველთვის არა თვითნებურია (ეკზოგონული რეაქცია).
$> 0$	$< 0$	ყოველთვის $> 0$	რეაქცია არა თვითნებურია T-ს ნებისმიერ მნიშვნელობისთვის, უკუ რეაქცია თვითნებურია (ენდერგონული რეაქცია).
$< 0$	$< 0$	$< 0$ დაბალი T-სათვის $> 0$ მაღალი T-სათვის	რეაქცია თვითნებურია T-ს დაბალ მნიშვნელობებისათვის, უკუ რეაქცია ხდება თვითნებური მაღალი T-ს პირობებში.
$> 0$	$> 0$	$> 0$ დაბალი T-სათვის $< 0$ მაღალი T-სათვის	რეაქცია არა თვითნებურია T-ს დაბალ მნიშვნელობებისათვის, მაგრამ მაღალი T-ს პირობებში თვითნებური ხდება.

**ჯიბსის ენერჯის ცვლილება.** მოსახერხებლობისათვის მიღებულია  $\Delta G$ -ს მნიშვნელობების შედარება სტანდარტულ პირობების დროს, ანუ – კონცენტრაციები 1 მოლ/ლ, აიროვანი ნივთიერებათა პარციალური წნევა 101,3 კპა, ტემპერატურა 298,15 კ. მაშინ თავისუფალ ენერჯიას აღნიშნავენ  $\Delta G^0$ -ით და იმ მნიშვნელობათა საფუძველზე, რომლებიც შეიძლება იყოს დათვლილი, ქიმიური რეაქციის ჯიბსის ენერჯის ცვლილება განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\Delta G_r^0 = \sum \Delta G_p^0 - \sum \Delta G_e^0$$

სადაც,  $\Delta G_r^0$  – რეაქციის ჯიბსის ენერჯის ცვლილება;  $\Delta G_p^0$  – რეაქციის პროდუქტების ჯიბსის ენერჯის ცვლილება;  $\Delta G_e^0$  – რეაქციის საწყისი კომპონენტების ჯიბსის ენერჯის ცვლილება.

სიდიდე  $\Delta G_r^0$  საშუალებას იძლევა განისაზღვროს სტანდარტულ პირობებში მყოფ მოცემულ რეაქციას ექნება თუ არა თვითნებური მიმდინარეობის საშუალება პირდაპირი და უკუ მიმართულებით.

<sup>60</sup>ეკზოთერმულ რეაქციას ენდოთერმულისგან განსხვავებით, თან ახლავს სითბოს გამოყოფა.

სისტემის **ჰელმჰოლცის ენერგია** განსაზღვრული შინაგანი ( $U$ ) ენერგიით და ( $S$ ) ენტროპიით,  $T$  აბსოლუტური ტემპერატურის მნიშვნელობისას აღიწერება შეფარდებით:

$$F = U - TS \quad (81)$$

ჰელმჰოლცის ენერგიის ცვლილება პროცესებში, რომლებშიც  $T, V = const$ , შეიძლება განისაზღვროს შეფარდებით:

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S \quad (82)$$

$\Delta F$  – ეს არის სიდიდე, რომელიც არაა დამოკიდებული მანძილზე, ის მხოლოდ სისტემის საწყის და საბოლოო მდგომარეობაზეა დამოკიდებული, ესე იგი  $\Delta F$  ისევე როგორც უკვე განხილული თერმოდინამიური სიდიდეები, წარმოადგენს მდგომარეობის ფუნქციას.

**ჰელმჰოლცის ენერგია**, ჯიბსის ენერგიის მაგვარად, უკავშირდება პროცესების თვითნებურ ჩატარებას. თუ დაუშვით, რომ სისტემა იზოლირებულია, ხოლო მოცულობა და ტემპერატურა მუდმივებია, მაშინ თვითნებურად ჩატარდება მხოლოდ ის პროცესები, რომლებშიც  $F$  მცირდება.

ამრიგად, როდესაც  $\Delta F < 0$  პროცესი თვითნებურად წარიმართება პირდაპირი მიმართულებით. როდესაც  $\Delta F > 0$  – უკუ მიმართულებით, ხოლო თუ  $\Delta F = 0$  სისტემა იმყოფება წონასწორულ მდგომარეობაში.

ჰელმჰოლცის და ჯიბსის ენერგიები სტანდარტულ მდგომარეობებში შეიძლება დაუკავშიროთ წონასწორების კონსტანტას:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0 = -RT \ln K \quad (83)$$

სადაც,  $R$  – აირის უნივერსალური მუდმივა,  $K$  – წონასწორობის კონსტანტა,  $T$  – აბსოლუტური ტემპერატურა.

თუ  $K \gg 1$ , ანუ თუ რეაქცია მიედინება პირდაპირი მიმართულებით, მაშინ  $\Delta G^0 \ll 0$ .

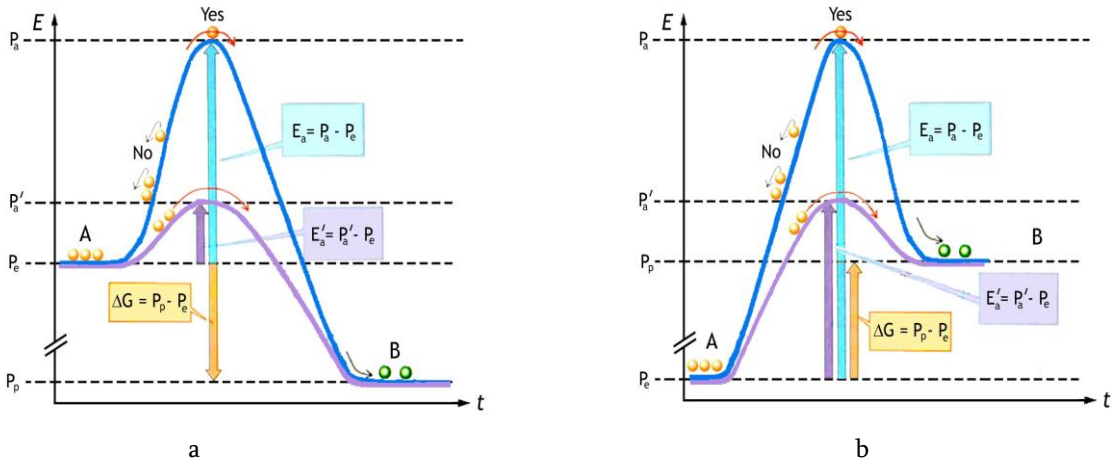
თუ  $K \ll 1$ , ანუ რეაქცია მიედინება უკუ მიმართულებით, მაშინ  $\Delta G^0 \gg 0$ .

თუ  $K = 1$ , მაშინ  $\Delta G^0 = 0$ .

ნივთიერების რეაქციული შესაძლებლობის ზღურბლი უმეტეს რეაქციებში შეადგენს  $\Delta G^0 \approx 41 \text{ კჯ/მოლ}$ . ანუ, თუ კი  $\Delta G^0 < -41 \text{ კჯ/მოლ}$  – პროცესი განხორციელდება, თუ  $\Delta G^0 > +41 \text{ კჯ/მოლ}$  – პროცესი განუხორციელებელია ნებისმიერ რეალურ და სტანდარტულ პირობებში.

ამრიგად, თავისუფალი ენერგიის ცოდნა განსაკუთრებით მიმზიდველია იმის გამო, რომ მისი ცვლილების ხასიათი (დადებითი თუ უარყოფითი მნიშვნელობა) ადვილად გასაზომი სიდიდეების მეშვეობით, იძლევა განსახილავი პროცესის თვითნებური ჩატარების კრიტერიუმს. მართლაც, თერმოდინამიკის მეორე კანონის თანახმად, მოცულობის და წნევის მუდმივი მნიშვნელობების მქონე ყოველი სისტემა თავისთავად მიისწრაფის წონასწორობისაკენ. ეს კი ნიშნავს, რომ სისტემის საწყისი თავისუფალი ენერგია მის საბოლოო მნიშვნელობაზე მეტია, ანუ  $\Delta G < 0$ . პროცესებისათვის რომლებიც თვითნებურად არ მიედინებიან, ანუ ენერგიის ხარჯვაა საჭირო  $\Delta G > 0$ . პირველი ტიპის რეაქციებს ეწოდება **ეკზერგონული**, ხოლო მეორესი – **ენდერგონული**. თუ თავისუფალი ენერგია არ იცვლება  $\Delta G = 0$  ეს ნიშნავს, რომ სისტემა იმყოფება წონასწორობაში, და მას არ შეუძლია თავისუფალი ენერგიის არც მიღება და არც გაცემა.

თავისუფალი ენერგიის თვალსაჩინოებისათვის განვიხილოთ სურ. 48.



სურ. 48. ჯიბსის თავისუფალი ენერჯის ცვლილების გრაფიკული ილუსტრირება ორი შემთხვევისათვის: a – ეგზერგონული ( $\Delta G < 0$ ) და b – ენდერგონული ( $\Delta G > 0$ ) რეაქციები. რეაქციის შედეგად საწყისი ნივთიერება (A) რეაქციის პროდუქტად (B) გარდაიქნება. კატალიზატორის არ არსებობის შემთხვევაში (ცისფერი მრუდი) რეაქციას შეიძლება ჰქონდეს როგორც პირდაპირი (Yes), აგრეთვე უკუ (No) მიმართულებები, მაშინ როცა კატალიზირებულ რეაქციაში (იისფერი მრუდი) – მხოლოდ პირდაპირი. ორდინატს ღერძი ( $E$ ) განსაზღვრავს სისტემის ქიმიურ პოტენციალს, ხოლო აბსცისის ღერძი ( $t$ ) – რეაქციის დროით კოორდინატს. რეაქციის გარდამავალი მდგომარეობა იმყოფება რეაქციის კინეტიკის ამსახავი მრუდის კადაკეცვის წერტილებში.

აღნიშვნები:  $E_a$  – აქტივაციის ენერჯია;  $P_a$  – რეაქციის ჩატარებისათვის აუცილებელი ენერჯია;  $P_e$  – საწყისი ნივთიერების ენერჯეტიკული დონე;  $P_p$  – რეაქციის პროდუქტის ენერჯეტიკული დონე.

ცისფერ მართკუთხედში მოყვანილია აქტივაციის ენერჯის გამოსახულება კატალიზატორის გარეშე.

იისფერში – კატალიზირებადი რეაქციის აქტივაციის ენერჯია. ფოთოხლს ფერში – ჯიბსის ენერჯია.

ნახატზე მოყვანილია სისტემაში მიმდინარე ენერჯეტიკული გარდაქმნების (რეაქციის ქიმიური პოტენციალის) დამოკიდებულება დროით კოორდინატაზე კატალიზატორის არსებობის და არ არსებობის პირობებში. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, ნაჩვენებია რეაქციის დინება როდესაც საწყისი ნივთიერება (A) გარდაიქმნება რეაქციის პროდუქტში (B) ორ საკვანძო შემთხვევისათვის:

1. საწყისი ნივთიერებების ენერჯია მეტია რეაქციის პროდუქტების ენერჯიაზე (სურ. 48a);
2. საწყისი ნივთიერებების ენერჯია ნაკლებია რეაქციის პროდუქტების ენერჯიაზე (სურ. 48b);

ორივე შემთხვევაში საჭიროა გარკვეული ენერჯია რეაქციის გასაშვებათ, რომელიც კატალიზატორის არსებობის შემთხვევაში ( $P'_a$ ) (იისფერი მრუდი) რა თქმა უნდა უფრო დაბალია, ვიდრე მის გარეშე ( $P_a$ ) (ცისფერი მრუდი)  $P_a > P'_a$ . კატალიზატორის არ არსებობის შემთხვევაში შესაძლებელია რეაქციის დინების როგორც პირდაპირი (წარწერა Yes მრუდის თავზე), ასევე უკუ (წარწერა No) მსვლელობა, მაშინ როდესაც კატალიზირებად რეაქციაში – მხოლოდ პირდაპირი. პროცესის გასაშვებად უნდა გადალახოს რაღაც პოტენციური ბარიერი, რისთვისაც საჭიროა ე.წ. აქტივაციის ენერჯია  $E_a = P_a - P_e$  (ეს კატალიზატორის გარეშე) და  $E'_a = P'_a - P_e$  (კატალიზატორის არსებობისას). ორივე ნახატზე (ანუ როგორც პირველი, ასევე მეორე შემთხვევისათვის) აქტივაციის ენერჯია კატალიზატორის გარეშე ცისფერი ისრითაა მონიშნული, ხოლო კატალიზატორით – იისფერით. რაც შეეხება ჯიბსის ენერჯის ცვლილებას ( $\Delta G = P_p - P_e$ ), ორივე ნახატზე ისინი ერთი სიდიდისაა არიან, თუმცა საწინააღმდეგო მიმართულების. ეს იმით აიხსნება, რომ პირველ შემთხვევაში საწყისი ნივთიერებების ენერჯეტიკული დონე რეაქციის პროდუქტების ენერჯეტიკულ დონეზე მაღალია ( $P_e > P_p$ ). მეორე შემთხვევაში

კი პირიქით, საწყისი ნივთიერებების ენერგეტიკული დონე უფრო დაბალია რეაქციის პროდუქტების დონეზე ( $P_e < P_p$ ).

### 11.7. ღია სისტემების შინაგანი ენერგია.

ყველე რეალური სისტემა არაიზოლირებულია; ამ სისტემების დიდი უმეტესობა წარმოადგენს ღია სისტემებს. პროცესის მიმართულების აღწერა ასეთ სისტემებში მხოლოდ ენტროპიით ვერ მოხერხდება. ზუსტად ამისათვის შემოიღეს ზემოდაღწერილი თერმოდინამიური მდგომარეობის ფუნქციები – ჯიბსის და ჰელმჰოლცის თავისუფალი ენერგიები. ამ ფუნქციების მეშვეობით შესაძლებელი ხდება განისაზღვროს თვითნებური და წონასწორული პროცესების პირობები იზოლირებულ სისტემებში. იმისათვის რომ უფრო კარგად გავერკვიოთ შინაგანი ენერგიების ამ ორი სახეობის განსხვავების ნიუანსებში, შემოვიღოთ ისინი ადრინდელიდან ცოტა განსხვავებული მიდგომით და ამასთან ერთად განვიხილოთ ეს ფუნქციები ერთობლიობაში.

უპირველეს ყოვლისა, ავღნიშნოთ, რომ არაიზოლირებულ სისტემებში პროცესის მიმართულების განსაზღვრისათვის აუცილებელია არა მხოლოდ თვით სისტემის განხილვა, არამედ იმ გარემოსიც, რომელშიც ეს სისტემა იმყოფება.

ენტროპია, როგორც თერმოდინამიური მდგომარეობის ფუნქცია, შეიძლება დაუკავშიროთ შექცევადი პროცესის სითბოს მიმოცვლას. ვთქვათ, სისტემას, შექცევადი წესით  $T$  ტემპერატურის პირობებში სითბოს სახით გადაეცემა უსასრულო მცირე ენერგიის რაოდენობა ( $\Delta q$ ), მაშინ სისტემის ენტროპიის ცვლილება შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\Delta S \geq \frac{\Delta q_{bak}}{T} \quad (84)$$

აქ  $\Delta q_{bak}$  – წარმოადგენს ენერგიის უსასრულო მცირე რაოდენობას, რომელიც შექცევადი წესით გადაიცემა. ამასთან, მეტობის ნიშანი შეესაბამება თვითნებურ პროცესებს, ხოლო ტოლობა – სისტემის წონასწორულ მდგომარეობას.

გამოვიყენოთ ეს შეფარდება და განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც სისტემა გასცემს სითბოს გარემოში (ვინაიდან სისტემა მხოლოდ ენერგიას გადასცემს, ის უნდა ჩაითვალოს დახურულათ) მუდმივი მოცულობის პირობებში (იზოქორული პროცესი). მაშინ,  $\Delta q = dU$  ტოლობის საფუძველზე (იზოქორულ-იზოთერმულ პროცესებში პროცესის სითბო შინაგანი ენერგიის ცვლილების ტოლია)  $\Delta q$  შეიძლება გავაიგივოთ  $dU$ -სთან. (84) განტოლებაში  $\Delta q$ -ს შეცვლა  $dU$ -ზე, მიგვიყვანს შემდეგ შედეგებამდე:

$$dS - \frac{dU}{T} \geq 0, \quad TdS \geq dU \quad (85)$$

სითბოს გაცემისას მუდმივი წნევის პირობებში,  $\Delta q = dH$  ტოლობის გათვალისწინებით (იზობარულ-იზოთერმულ პროცესებში პროცესის სითბო ენტალპიის ცვლილების ტოლია) ზემომოყვანილი (84) განტოლებიდან მივიღებთ:

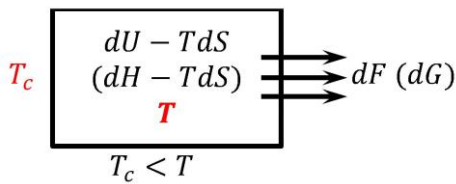
$$dS - \frac{dH}{T} \geq 0, \quad TdS \geq dH \quad (86)$$

პირობები (85) და (86) საშუალებას იძლევიან შემოვიღოთ თერმოდინამიური მდგომარეობის ფუნქციები – ჰელმჰოლცის  $F$  და ჯიბსის  $G$  ენერგიები შემდეგნაირად:

$$dF = dU - TdS \quad \text{ან} \quad \Delta F = \Delta U - T\Delta S \quad (87)$$

$$dG = dH - TdS \quad \text{ან} \quad \Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (88)$$

განტოლებები (87) და (88) ერთმანეთს უკავშირებენ ხუთ დამახასიათებელ მდგომარეობის ფუნქციას და შესაძლებლობას გვაძლევენ განვიხილოთ წონასწორული (იმ შემთხვევაში თუ  $dF = 0$  ან  $dG = 0$ ) და თვითნებური (როდესაც  $dF < 0$  ან  $dG < 0$ ) პროცესების თავისებურებანი. განვიმარტოთ ამ განტოლებების არსი სურ. 49-ის მეშვეობით.



სურ. 49. სისტემა ცივდება და გასცემს გარემოში თავის შინაგანი ენერჯის (ენტალპიის) ნაწილს  $dF$  ან  $dG$  სახით

ვთქვათ არაიზოლირებულ სისტემას, რომელსაც იდეალური აირის თვისებები გააჩნია, აქვს საწყისი  $T$  ტემპერატურა, ხოლო  $T_c$  არის გარემოს ტემპერატურა, რომელიც სისტემის საწყის ტემპერატურაზე დაბალია, ე.ი.  $T_c < T$ . სისტემა ცივდება და გარემოში გასცემს თავის შინაგანი ენერჯის (ენტალპიის) ნაწილს  $dF$  ან  $dG$ -ს სახით. სისტემაში რჩება ენერჯის მარაგი, რომელიც შეესაბამება განტოლებების (87) ან (88) მარჯვენა მხარეს. გარემოს ტემპერატურა რომ აბსოლუტური ნული ყოფილიყო და დარჩენილიყო ასეთი სითბოს გაცემის მთელი პროცესის განმავლობაში, სისტემა თვითონაც უნდა გაციებულიყო გარემოს ტემპერატურამდე, ანუ აბსოლუტურ ნულამდე. ამ დროს სისტემა მთელ თავის შინაგან ენერჯიას გარემოს გასცემდა. მაგრამ გარემოს ტემპერატურა  $T_c > 0$ .

თერმოდინამიკის მეორე კანონის ერთ-ერთი ფორმულირების თანახმად (შეუძლებელია სითბოს თვითნებური გადასვლა ცივი სხეულიდან ცხელზე) სისტემას შეუძლია გაცივება მხოლოდ რაღაც საბოლოო  $T_{end}$  ტემპერატურამდე. ამ პირობებში სისტემა გასცემს გარემოში მხოლოდ თავისი შინაგანი ენერჯის ნაწილს, რომელსაც *თავისუფალ ენერჯიას* უწოდებენ. იზობარულ-იზოთერმულ პროცესში ის მოგვევლინდება ჯიბსის ენერჯის  $dG$  სახით, ხოლო იზოქორულ-იზოთერმულ პროცესებში – ჰელმჰოლცის ენერჯის  $dF$  სახით.

ჯიბსის ენერჯია (ჰელმჰოლცის ენერჯია) – ეს შინაგანი ენერჯის ის ნაწილია, რომლის გაცემაც შეუძლია სისტემას გარემოში. ზუსტად ამიტომ მას „თავისუფალს“ უწოდებენ. სისტემის შინაგანი ენერჯის დანარჩენი ნაწილი, რომელიც აბსოლუტური ნულიდან  $T_k$ -მდე მისი გაცხელების სითბოს ტოლია, რჩება სისტემაში და ვერ გამოიყენება მის გარეთ, მოცემულ შემთხვევაში სისტემიდან გარემოში სითბოს გადასაცემათ. ენერჯის ეს დარჩენილი ნაწილი თითქოს „ჩაკეტილია“ სისტემაში, ამიტომაც მას ხშირად *შეზოჭილ ენერჯიას* უწოდებენ. შეზოჭილი ენერჯია კონტროლირდება სისტემის ენტროპიით და აბსოლუტური ტემპერატურის და ენტროპიის ცვლილების ნამრავლის ტოლია. ენტროპიის ცვლილება განიხილება აბსოლუტური ნულიდან სისტემის  $T$  ტემპერატურამდე (ანუ.  $TdS$  ან  $T\Delta S$ ), რაც შეესაბამება განტოლებების (87) და (88) მარჯვენა მხარეს მყოფ მაკლებს.

**ასე რომ, ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერჯიები განსაზღვრავენ სითბოს (ენერჯიის) იმ ნაწილს, რომელიც შეიძლება იყოს გაცემული სისტემიდან; ეს ნაწილი სისტემის ენერჯიის ჯამური მარაგის ტოლია იმ ენერჯიის გამოკლებით, რომელიც სისტემაში რჩება.**

განტოლებებიდან (87) და (88) გამომდინარე, ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერჯიები განისაზღვრებიან ერთი მხრივ ენტალპიის და შინაგანი ენერჯის მნიშვნელობებით ( $\Delta H$  და  $\Delta U$ ), ხოლო მეორეს მხრივ ენტროპიის მნიშვნელობით, ანუ **ენტალპიური და ენტროპიული ფაქტორებით**. სიდიდე  $\Delta H$  ( $\Delta U$ ), როგორც ენტალპიური ფაქტორი, იზრდება ნაწილაკების აგრეგირებისას, ანუ ის ახასიათებს ნაწილაკების სწრაფვას გაერთიანებისაკენ. პროცესებს, რომლებიც ზრდიან  $\Delta H$  მნიშვნელობას მიეკუთვნებიან: აირის შეკუმშვა,



ორთქლის კონდენსირება, სითხის გამყარება, მოლეკულების ასოცირება, მოლეკულების ატომებიდან სინთეზი და ა.შ. სიდიდე  $\Delta S$ , როგორც ენტროპიული ფაქტორი, ახასიათებს საწინააღმდეგო ტენდენციას – ნაწილაკების სწრაფვას დეზინტეგრაციისაკენ, წესრიგიდან უწესრიგობაში გადასვლა, მცირე არეულობიდან მეტ არეულობისაკენ. პროცესებს, რომლებიც ზრდიან ენტროპიას შეიძლება მივაკუთვნოთ: აირის გაფართოება, სითხის აორთქლება, დნობა, მოლეკულების დისოცირება და ა.შ., და ასევე აირების არევა, სითხეში გახსნა, დიფუზია და ა.შ.

ეხლა კი განვიხილოთ სისტემაში წონასწორული და თვითნებურად მიმდინარე პროცესების კრიტერიუმები.

თერმოდინამიკის მეორე კანონის თანახმად თვითნებური პროცესის კრიტერიუმს ენტროპიის ზრდა წარმოადგენს. თუ თვითნებური პროცესის შესაძლებლობის განმსაზღვრავი ენტროპიული ფაქტორი შეეფარდება ენტალპიურს (იზობარული პროცესის შემთხვევაში), ან ენერგეტიკულ (იზოქორული პროცესის შემთხვევაში) ფაქტორებს შემდეგი სახით:

$$TdS > dH \quad TdS > dU$$

მაშინ (87) და (88) განტოლებებიდან გამომდინარეობს:

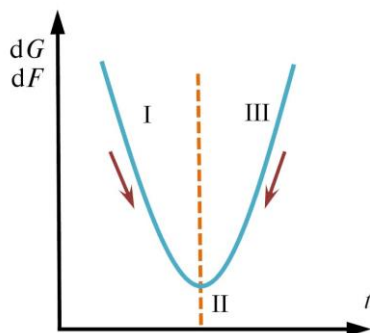
$$dF \leq 0 \text{ ან } \Delta F \leq 0 \quad (89)$$

$$dG \leq 0 \text{ ან } \Delta G \leq 0 \quad (90)$$

ტოლობის ნიშანი ნიშნავს წონასწორულ პროცესს, ნაკლებობის ნიშანი ახასიათებს თვითნებურ პროცესს. შეფარდებები (89) და (90) ფუძემდებლურია არაიზოლირებულ სისტემებში წონასწორული და თვითნებური პროცესების პირობების გამოთვლებისას და განსაზღვრისას.

პრაქტიკულ გამოთვლებში ჯიბსის ენერჯის მნიშვნელობას გამოიყენებენ უფრო ხშირად ვიდრე ჰელმჰოლცის ენერჯიას. პრაქტიკაში ქიმიურ და ფიზიკო-ქიმიურ პროცესებს უფრო ხშირად ატარებენ მუდმივი წნევის და არა მუდმივი მოცულობის პირობებში, ანუ იზობარულ პირობებში, რომლებიც ხასიათდებიან ჯიბსის ენერჯით.

განვიხილოთ თვითნებური პროცესების მიმდინარეობა და წონასწორობის პირობები სურ. 50-ის მეშვეობით.



სურ. 50. ჯიბსის და ჰელმჰოლცის თავისიფალი ენერჯის ცვლილების დამოკიდებულება დროზე: I – თვითნებური; II – წონასწორული და III – არა თვითნებური პროცესებისათვის

- I  $dG < 0$  ( $dF < 0$ )
- II  $dG = 0$  ( $dF = 0$ )
- III  $dG > 0$  ( $dF > 0$ )

ისევე როგორც ენტროპიის ცვლილებისას, განვიხილოთ თვითნებური (I), წონასწორული (II) და არა თვითნებური პროცესები (III). შევაჯეროთ ენტროპიისა და ჯიბსის ენერჯის ცვლილებები. ჯიბსის (ჰელმჰოლცის) ენერჯის ცვლილება პრინციპში წარმოადგენს ენტროპიის ცვლილების სარკისებრივ ანარეკლს. ჯიბსის ენერჯია (შესაბამისას ჰელმჰოლცის) თვითნებურ პროცესში ენტროპიისგან განსხვავებით მცირდება (ენტროპია როგორც გვახსოვს იზრდება).

წონასწორობის პირობებში ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერგიები მინიმუმს აღწევენ, იმ დროს როდესაც ენტროპია აღწევს მაქსიმუმს.

კიდევ ერთხელ გაუსვათ ხაზი, რომ ენტროპია წარმოადგენს პროცესის მიმართულების კრიტერიუმს იზოლირებულ სისტემებში, ხოლო ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერგიები – არაიზოლირებულ სისტემებში.

არათვითნებური პროცესების წარმატებისათვის, როდესაც  $dG > 0$  (ან  $dF > 0$ ), აუცილებელია იმ ენერგიის ხარჯვა, რომელიც სისტემის საზღვრებს გარეთ იმყოფება.

განზოგადებული სახით სხვადასხვა პროცესების ენტროპიის, ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერგიების ცვლილებები იზოლირებული და არაიზოლირებული სისტემების შემთხვევაში, მოყვანილია ცხრილი 11-ში.

ენტროპიის, ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერგიების ცვლილება, სხვადასხვა პროცესებში.

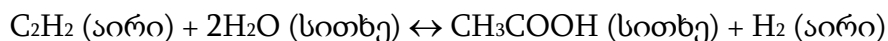
ცხრილი 11

სისტემა	მდგომარეობის ფუნქცია	ფუნქციების ცვლილება პროცესებში		
		თვითნებური	წონასწორული	არა თვითნებური
იზოლირებული	ენტროპია	$dS > 0$	$dS = 0$	$dS < 0$
			$d^2S < 0$	
არაიზოლირებული:				
იზობარ-იზოთერმ. პროცესი	ჯიბსის თავისუფ. ენერგია	$dG < 0$	$dG = 0$	$dG > 0$
			$d^2G > 0$	
იზოქორ-იზოთერმ. პროცესი	ჰელმჰოლცის თავისუფ. ენერგია	$dF < 0$	$dF = 0$	$dG > 0$
			$d^2F > 0$	

ასე რომ, პროცესის მიმართულების დასადგენათ, და ასევე თვითნებური პროცესის არსებობის შესაძლებლობის დადგენისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ ჯიბსის (ჰელმჰოლცის) ენერგიის ცვლილება, ანუ სრულდება თუ არა (89) და (90) პირობები.

ჯიბსის ენერგიის ცვლილების დადგენა შეიძლება ორი ხერხით. პირველი მათგანი ეფუძნება (88) განტოლების გამოყენებას, ხოლო მეორე – ჯიბსის ენერგიის განხილვას მდგომარეობის ფუნქციის როლში. განვიხილოთ ეს ორი ხერხი მაგალითებზე. თავიდან მივმართოთ ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერგიების გამოთვლას (87) და (88) განტოლებების დახმარებით.

დავთვალოთ  $\Delta G$  და  $\Delta F$  რეაქციისათვის:



თუ ცნობილია, რომ ამ რეაქციის სითბური ეფექტი ტოლია  $\Delta H^0 = +142,191$  კჯ/მოლ, ხოლო ენტროპიის ცვლილება  $\Delta S^0 = -50,023$ ჯ/(კ-მოლ);  $T = 298,15$  კ =  $25^\circ C$ <sup>61</sup>.

ფორმულა (88) შესაბამისად, წონასწორული პირობისათვის, შეიძლება ჩაიწეროს:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 = 142,191 - 298,15 (-50,023 \cdot 10^{-3}) = -127,369 \text{ კჯ/მოლ}$$

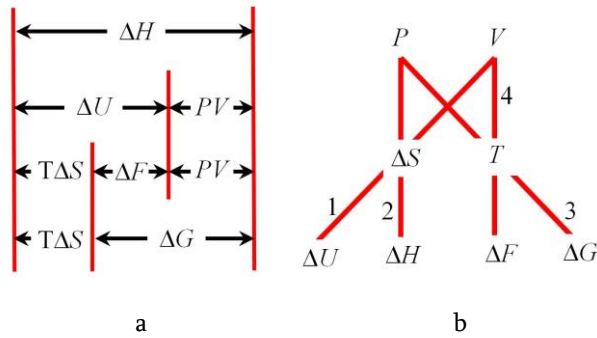
იმასთან დაკავშირებით, რომ აირის ფაზაში მყოფ კომპონენტთა მოლელების რაოდენობის ცვლილება ნულის ტოლია:  $\Delta n = n_{H_2} - n_{C_2H_2} = 0$   $\Delta H^0 = \Delta U^0$ , ხოლო (87) და (88) გათვალისწინებით:

$$\Delta F^0 = \Delta G^0 = -127,369 \text{ კჯ/მოლ}$$

<sup>61</sup>0 კ =  $-273,15^\circ C$

ჯიბსის და ჰელმჰოლცის ენერგიების ცვლილების უარყოფითი მნიშვნელობა ნიშნავს, რომ რეაქცია თვითნებურია, მიედინება მარცხნიდან მარჯვნივ როგორც იზოთერმულ, აგრეთვე იზობარულ პირობებში.

ძალზე მნიშვნელოვანია ავღნიშნოთ კავშირი ხუთი თერმოდინამიური მდგომარეობის ფუნქციებს შორის: შინაგანი ენერგიის  $\Delta U$ , ენტალპიის  $\Delta H$  ენტროპიის  $\Delta S$  ჯიბსის ენერგიის  $\Delta G$  და ჰელმჰოლცის ენერგიის  $\Delta F$ . კავშირი ამ ფუნქციებსა და სისტემის ძირითად პარამეტრებს  $P, V$  და  $T$ -ს შორის მოყვანილია სურ. 51-ზე.



სურ. 51. კავშირი თერმოდინამიური მდგომარეობების ფუნქციებს შორის (a), და ასევე ამ ფუნქციებსა და სისტემის ძირითად პარამეტრებს  $P, V$  და  $T$ -ს შორის (b). აქ, ერთ ხაზზე განლაგებული პარამეტრები რჩებიან უცვლელი. მაგალითად, ხაზი 4 – ეს იზოქორულ-იზოთერმული პროცესია.

სურათის თანახმად, ოთხი მოყვანილიდან ყოველი ცალკეული წრფე ახასიათებს კავშირს სამ სიდიდეს შორის, რომელთაგანაც ორი წარმოადგენს თერმოდინამიურ მდგომარეობის ფუნქციას. ორი სხვა სიდიდის მუდმივობისას მესამე სიდიდე განსაზღვრავს თვითნებური და წონასწორული პროცესის პირობებს. ეს პროცესები შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვიდგინოთ:

ცხრილი 12

წრფეზე მყოფი პროცესები სურ. 51b	მუდმივი სიდიდეები	თვითნებური პროცესის პირობები	წონასწორული პროცესის პირობები
1	$U, V$	$\Delta S > 0$	$\Delta S = 0$ (max $S$ )
1	$S, V$	$\Delta U < 0$	$\Delta U = 0$ (min $U$ )
2	$H, P$	$\Delta S > 0$	$\Delta S = 0$ (max $S$ )
2	$S, P$	$\Delta H < 0$	$\Delta H = 0$ (min $H$ )
3	$T, P$	$\Delta G < 0$	$\Delta G = 0$ (min $G$ )
4	$T, V$	$\Delta F < 0$	$\Delta F = 0$ (min $F$ )

ყველაზე დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა გააჩნიათ იზობარულ-იზოთერმულ პროცესებს, რომელთა პარამეტრებს შორის კავშირი ხასიათდება მე-3 წრფის მეშვეობით.

ხუთივე განხილული თერმოდინამიური ფუნქცია მახასიათებლურია. თერმოდინამიკაში **მახასიათებლურს**, უწოდებენ ფუნქციას თუ კი მისი და მისი სხვადასხვა რიგის წარმოებულთა მნიშვნელობები საკმარისია სისტემის ყველა თერმოდინამიური თვისების ცხად ფორმაში გამოსახვისათვის. მახასიათებლურები არიან ფუნქციები:  $\Delta U$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  და აგრეთვე  $\Delta S$  და  $\Delta F$ .

ამ თავის დასასრულს ჩავწეროთ თერმოდინამიური მდგომარეობის განტოლებები<sup>62</sup>.

ადრე ჩვენ უკვე ავღნიშნეთ, რომ თუ განტოლებებში  $\Delta Q = \partial U + \Delta A$  (აქ,  $A$  – შესრულებული მუშაობა) და  $\Delta Q = \partial U + p\partial V$  ჩავსვათ სითბოს მნიშვნელობებს შექცევადი და

<sup>62</sup> თერმოდინამიური მდგომარეობის განტოლება ეწოდება მახასიათებლური ფუნქციის დიფერენციალურ დამოკიდებულებას მის განმსაზღვრავ პარამეტრებზე.

შეუქცევადი პროცესებისათვის ჩაწერილ თერმოდინამიკის მეორე კანონის განტოლებიდან  $TdS > \Delta Q$ , მივიღებთ თერმოდინამიკის პირველი და მეორე კანონების გაერთიანებულ განტოლებას შექცევადი პროცესებისათვის:

$$\begin{aligned} TdS &= dU + \Delta A \\ TdS &= dU + PdV \end{aligned} \quad (91)$$

**პირველი თერმოდინამიკული მდგომარეობის განტოლების** მისაღებად ჩავწერთ ამ გამოსახულებებიდან ბოლო განტოლება ცხად ფორმაში შინაგანი ენერჯიის მიმართ:

$$dU = TdS - PdV \quad U = f(S, V) \quad (92)$$

**მეორე თერმოდინამიკული მდგომარეობის განტოლების** მისაღებად გამოვიყენოთ შეფარდება:  $H = U + PV$  და ჩავატაროთ მისი დიფერენცირება

$$dH = dU + PdV + VdP$$

ფორმულიდან (91) გამომდინარეობს რომ  $dU + PdV = TdS$ , მაშინ:

$$dH = TdS + VdP \quad H = f(S, P) \quad (93)$$

ფორმულიდან (92) გამომდინარეობს, რომ შინაგანი ენერჯია წარმოადგენს ენტროპიის და მოცულობის ფუნქციას, ხოლო ფორმულიდან (93), რომ ენტალპია წარმოადგენს ენტროპიის და წნევის ფუნქციას.

**მესამე თერმოდინამიკული მდგომარეობის განტოლების** მისაღებად ჩავატაროთ (81) განტოლების ( $F = U - TS$ ) დიფერენცირება, მივიღებთ:

$$dF = dU - TdS - SdT$$

თუ ამ განტოლებაში ჩავსვავთ მნიშვნელობას  $dU - TdS = -PdV$  (91)-დან მივიღებთ:

$$dF = -SdT - PdV \quad F = f(V, T) \quad (94)$$

ანუ ჰელმჰოლცის ენერჯია წარმოადგენს მოცულობის და ტემპერატურის ფუნქციას.

**მეოთხე თერმოდინამიკული მდგომარეობის განტოლების** გამოსაყვანად გამოვიყენოთ ფორმულა (80), ანუ გამოსახულება:  $G = H - TS$ , და ჩავატაროთ მისი დიფერენცირება, მივიღებთ:

$$dG = dH - TdS - SdT$$

მაგრამ ფორმულა (93) საფუძველზე  $dH - TdS = VdP$ , ამიტომ

$$dG = VdP - SdT \quad G = f(P, T) \quad (95)$$

ჯიბსის ენერჯია წარმოადგენს წნევის და ტემპერატურის ფუნქციას.

თუ ჩვენთვის ცნობილია მახასიათებლური ფუნქციები და მათი თერმოდინამიკური მდგომარეობების ფუნქციები, შეიძლება ცხადი სახით სრულად მივიღოთ გამოსაკვლევი სისტემის ყველა თერმოდინამიკური სიდიდე.

## 11.8. ღია სისტემების თერმოდინამიკა.

ყველაფერი რაც ითქვა სამართლიანია ჩაკეტილი თერმოდინამიკური სისტემისათვის. თერმოდინამიკის მეორე კანონის პირდაპირი გადატანა ღია სისტემებზე, რომლებშიც არაწონასწორული პროცესები მიმდინარეობენ, არამართებულია. მართლაც, იზოლირებულ სისტემაში თვითნებური გარდაქმნები მიმართულია ენტროპიის ზრდისკენ, და მათი საბოლოო მდგომარეობა თერმოდინამიკურ წონასწორობაში იმყოფება. ამავდროულად, ღია სისტემები, და პირველ რიგში ბიოსისტემები, წყვეტენ თავის ფუნქციონირებას სწორედ წონასწორობის მდგომარეობის მიღწევისას.

თერმოდინამიური თვალსაზრისით, ღია სისტემები (კერძოდ ბიოლოგიური) შიდა ცვლილების პროცესში გაივლიან გარკვეულ არაწონასწორულ მდგომარეობას, რასაც თავის მხრივ მოყვება ზოგიერთი თერმოდინამიური პარამეტრის ცვლილება. ზოგადად, ღია სისტემაში არაწონასწორული მდგომარეობის შენარჩუნება შესაძლებელია მხოლოდ მათში შესაბამისი ნივთიერების და ენერჯის ნაკადების შექმნით.

ამრიგად, ღია სისტემების დამახასიათებელი მდგომარეობა არაწონასწორულია. ასეთ სისტემებისათვის ენტროპიის ცვლილება შეიძლება იყოს გარემოსთან ნივთიერების (ან ენერჯის) მიმოცვლის ( $dS_e$ ), ან ენტროპიის თვით სისტემაში წარმოქმნის ( $dS_i$ ) შედეგი. ასე რომ, ღია სისტემის ენტროპიის საერთო ცვლილება შედგება ორი დამოუკიდებელი სიდიდისაგან:  $dS = dS_e + dS_i$ . თუ სისტემის შიგნით მიმდინარეობს შექცევადი ცვლილებები, მაშინ ენტროპიის წარმოქმნას არ ექნება ადგილი და მაშასადანე  $dS_i = 0$ . შეუქცევადი ცვლილებებისათვის  $dS_i > 0$ . თუ სისტემა იზოლირებულია და  $dS_e = 0$ , თერმოდინამიკის მეორე კანონი ღია სისტემისათვის მიიღებს ასეთ სახეს:  $dS = dS_i > 0$ .

თავისუფალი ენერჯის (ან სხვა სიტყვებით რომ ითქვას თერმოდინამიური პოტენციალის) ცვლილება, ისევე როგორც ენტროპიის ცვლილება, ორი ფაქტორითაა განპირობებული:

1. ბიოლოგიური სისტემის შიგნით მიმდინარე ბიოქიმიური თუ ბიოფიზიკური პროცესებით ( $dF_i$ ).
2. გარემოსთან ურთიერთქმედებით ( $dF_e$ ).

ასე რომ  $dF = dF_e + dF_i$ .

ცოცხალი ორგანიზმი რომ არ ახდენდეს გარემოსთან ენერჯისა და ნივთიერების მიმოცვლას, ის მიუახლოვდებოდა თერმოდინამიური წონასწორობის მდგომარეობას. ამას ადგილი არა აქვს მხოლოდ იმის გამო, რომ ღია სისტემის თავისუფალი ენერჯია უწყვეტად ივსება გარემოდან, ხოლო სისტემის შიგნით გენერირებული ენტროპია მუდმივად გამოიტანება სისტემიდან. ესე იგი

$$dF_e > 0, \quad dS_e < 0$$

თავისუფალი ენერჯის მარაგის შევსება ხდება ორგანიზმში საკვები ნივთიერების შემოტანით, ხოლო ენტროპიის გატანა – ორგანიზმიდან მიმოცვლის პროდუქტების და სითბოს გამოტანით.

XX საუკუნის 40-იან წლებში შრედინგერის მიერ შემოტანილი იქნა ნეგენტროპიის (უარყოფითი ენტროპიის) ცნება. იგულისხმებოდა, რომ ორგანიზმში მუდმივად მიმდინარეობს დადებითი ენტროპიის პროდუცირება ( $dS > 0$ ), ხოლო გარემოდან შემოდის უარყოფითი ენტროპია, ანუ ნეგენტროპია ( $dS < 0$ ). ნეგენტროპია უნდა გვესმოდეს როგორც საკვების სახით ორგანიზმში შემოტანილი თავისუფალი ენერჯია, რაც საბოლოო ჯამს უზრუნველყოფს კიდევაც ცხოველმოქმედების პროცესებს. ამრიგად, ზემოთ თქმულის გათვალისწინებით შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ ორგანიზმის ენტროპია შეიძლება დარჩეს უცვლელი, იზრდებოდეს ან მცირდებოდეს. მაგრამ იმ სისტემის ენტროპია რომელსაც „ორგანიზმი-გარემო“ ჰქვია, ნებისმიერ შემთხვევაში იზრდება. ამდენად ცოცხალი ორგანიზმის ფუნქციონირება არც თერმოდინამიკის მეორე კანონს ეწინააღმდეგება.

## 11.9. დისიპატიური თეორია.

გამოჩენილი ბელგიელი ფიზიკო-ქიმიკოსი, ნობელის პრემიის ლაურეატი ილია პრიგოჟინი არის ბუნების და საზოგადოების არაწონასწორული შეუქცევადი პროცესების თეორიის ფუძემდებელი.

იმისათვის, რომ ფუნდამენტურად დაესაბუთა ბუნების არაწონასწორობის მოვლენები, პრიგოჟინმა ჩამოაყალიბა დისიპატიური (გამბნევი, სხვა მდგომარეობაში გადასვლელი) სტრუქტურების ახალი თეორია, რითიც პირველმა დაამტკიცა, რომ აუცილებელი პროცესების არაწონასწორობა ორგანიზების (ან თვითორგანიზაციის) და ენტროპიის (უწყესრიგობის საზომის) წყაროს წარმოადგენს, როგორც ბუნებაში, აგრეთვე საზოგადოებაში. ამრიგად, მან დაადგინა ფუნდამენტური კანონი, რომელიც იძახის, რომ ფაუნა და ფლორა სხვა არაფერს წარმოადგენს, თუ არა დისიპატიურ და არადისიპატიურ ბიოლოგიურ სტრუქტურებს.

იმისათვის რომ დაესაბუთა თავისი თეორია 1947 წ. პრიგოჟინმა დაამტკიცა თეორემა არაწონასწორობის პროცესების შესახებ, რომლის მიხედვითაც პროცესში დამყარებულ წონასწორობულ მდგომარეობას შეესაბამება ენტროპიის მინიმუმი. მან უჩვენა, რომ იმ შემთხვევაში, როდესაც გარე პირობები ეწინააღმდეგებიან წონასწორობულ მდგომარეობას, ენტროპია იზრდება, ხოლო დაბრუნების არ არსებობის შემთხვევაში – ენტროპია აღწევს აბსოლუტურ მინიმუმს (ნულს).

პრიგოჟინის მიერ იყო პოსტულირებული, რომ *ღია სისტემის ენტროპიის საერთო ცვლილება  $dS$  შეიძლება წარმართოს დამოუკიდებლად ან გარემოსთან მიმოცვლის პროცესების შედეგად ( $dS_e$ ), ან შიდა შეუქცევადი პროცესების ( $dS_i$ ) გამო:*

$$dS = dS_e + dS_i \quad (96)$$

ყველა რეალურ შემთხვევაში  $dS_i > 0$  და მხოლოდ მაშინ, როდესაც შიდა პროცესები შექცევადი და წონასწორობულია,  $dS_i = 0$ . იზოლირებულ სისტემებისათვის  $dS_e = 0$  და ჩვენ უბრუნდებით მეორე კანონის კლასიკურ განმარტებას:

$$dS = dS_i = 0$$

უჯრედულ მეტაბოლიზმში ყოველთვის შეიძლება გამოიყოს პროცესების ასეთი ორი ჯგუფი. მაგალითად, გარედან გლუკოზის შემოსვლა, მისი ჟანგვის პროდუქტის გარეთ გატანა ( $dS_e$ ) და გლუკოზის ჟანგვა სუნთქვით პროცესებში ( $dS_i$ ).

ფოტოსინთეზის დროს, სინათლის თავისუფალი ენერჯის მოდინება იწვევს უჯრედის ენტროპიის შემცირებას  $dS_e < 0$ , ხოლო უჯრედში მიმდინარე სუნთქვითი, ანუ დისიმილაციის (რთული ნივთიერებების დაშლა) პროცესები – ზრდიან მის ენტროპიას  $dS_i > 0$ . ამ ცვლილებების ( $dS_e$  და  $dS_i$ ) სიჩქარეების შეფარდებიდან გამომდინარე, ღია სისტემის საერთო ენტროპია ( $dS$ ) შეიძლება დროში ან იზრდებოდეს, ან პირიქით მცირდებოდეს.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_i}{dt} \quad (97)$$

თუკი სისტემაში მიმდინარე პროცესების შეუქცევადობის და ენტროპიის ზრდის ერთადერთი მიზეზი მასში მიმდინარე შიდა პროცესებია, მაშინ მათ მიჰყავთ სისტემა თერმოდინამიური პოტენციალის შემცირებისკენ. ამ შემთხვევაში

$$\frac{dS_i}{dt} = -\frac{dG/dt}{T} > 0 \quad (98)$$

სადაც,  $G$  – სრული თერმოდინამიური პოტენციალი (ანუ ჯიბის ენერჯია (იხ.(80))

$$G = U + PV - TS$$

ამჟამად, რომ პროცესების მამოძრავებელ ძალებსა და მათი დინების სიჩქარეებს შორის უნდა არსებობდეს ურთიერთკავშირი. ასეთი კავშირის დროს, მამოძრავებელი

ძალის გაზრდა (კლება) იწვევს პროცესის სიჩქარის შესაბამის ზრდას (კლებას). ეს არა მხოლოდ ქიმიურ რეაქციებს, არამედ სხვა შეუქცევად პროცესებსაც ეხება.

მაგალითად, სითბოს გადატანის და მემბრანაში ერთი ფაზიდან მეორეში ნივთიერების დიფუზიის პროცესები შეიცავენ მამოძრავებელ ძალებს – ტემპერატურის და კონცენტრაციის გრადიენტებს, ხოლო ნაკადები შეესაბამებიან სითბოს ან ნივთიერების გადატანას ორ ფაზას შორის. ყველა ამ შემთხვევაში ენტროპიის ზრდას გააჩნია შემდეგი სახე:

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{XJ}{T} > 0$$

სადაც,  $X$  – მამოძრავებელი ძალაა,  $J$  – ნაკადის სიდიდე

თუ სისტემა იმყოფება წონასწორობის მახლობლად, სადაც მამოძრავებელი ძალების და ნაკადების მნიშვნელობები ძალზე მცირეა, მაშინ მათ შორის არსებობს წრფიული, პირდაპირპროპორციული კავშირი.

$$J = LX$$

სადაც,  $L$  – მუდმივი წრფიული კოეფიციენტი.

თუ კი ღია სისტემაში წონასწორობის მახლობლად ერთდროულად მიმდინარეობს რამდენიმე პროცესი, მაშინ მათ შორის არსებობენ თერმოდინამიური თანაფარდობები, რომლებიც ასახავენ მათ ურთიერთ გავლენას. ორი პროცესის  $(J_1, X_1)$  და  $(J_2, X_2)$  შემთხვევაში, ამ თანაფარდობებს შემდეგი სახე ექნება:

$$\begin{aligned} J_1 &= L_{11}X_1 + L_{12}X_2 \\ J_2 &= L_{21}X_1 + L_{22}X_2 \end{aligned} \quad (99)$$

სადაც, მუდმივი კოეფიციენტები  $L_{11}$ ,  $L_{22}$  ასახავენ ნაკადის დამოკიდებულებას მათ გამომწვევ ძალაზე, ხოლო კოეფიციენტები  $L_{12}$ ,  $L_{21}$  შეესაბამებიან ერთი პროცესის ძალის და მეორე პროცესის ნაკადის ურთიერთ გავლენას. ამ კოეფიციენტებს **ონზაგერის ურთიერთქმედების კოეფიციენტებს** უწოდებენ. წონასწორობის მახლობლად  $L_{12} = L_{21}$ .

ონზაგერის ურთიერთქმედების ეს შეფარდება უჩვენებს, რომ თუ კი პირველი შეუქცევადი პროცესის ნაკადი განიცდის შეუქცევადი მეორე პროცესის  $X_2$  მსგავსობის ზეგავლენას კოეფიციენტი  $L_{12}$  -ის მეშვეობით, მაშინ მეორე პროცესის ნაკადი ასევე განიცდის უკვე  $X_1$  მსგავსობის ზეგავლენას იმავე კოეფიციენტის  $L_{12} = L_{21}$ -ის მეშვეობით.

ეხლა შეიძლება დავადგინოთ რაოდენობრივი კავშირი უჯრედში ერთდროულად მიმდინარე პროცესებს შორის, მათი მოლეკულური მექანიზმებში ჩაწვდომის გარეშე.

განვიხილოთ ნივთიერების აქტიური გადატანის პროცესი ბიოლოგიურ მემბრანაში, რომელიც მიმდინარეობს შეუღლებული მეტაბოლური პროცესის ხარჯზე და ამიტომ შეიძლება წარიმართოს გადასატანი ნივთიერების კონცენტრაციის გრადიენტის საწინააღმდეგოდ. მაშინ

$$\begin{aligned} J_1 &= L_{11}X_1 + L_{12}X_2, \\ J_2 &= L_{21}X_1 + L_{22}X_2, \quad L_{12} = L_{21} \end{aligned}$$

აქ, შეუღლებული გადატანის პროცესი  $(J_1, X_1)$  მიმდინარეობს ძალის გრადიენტის საპირისპიროდ  $X_1$  ( $J_1, X_1 < 0$ ), შეუღლებული პროცესის ენერჯის ხარჯზე  $(J_2, X_2 > 0)$ . შეუღლებულობის არ არსებობის შემთხვევაში  $L_{12} = L_{21} = 0$ , და პროცესები მიედინებიან ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად, მხოლოდ თავისი მამოძრავებელი ძალების ხარჯზე.

$$J_1 = L_{11}X_1, \quad J_2 = L_{22}X_2$$

სისტემის გაშვების საწყის მომენტებში შეუღლებული პროცესის  $J_2$  მაღალი სიჩქარე მცირდება მინიმალურ მნიშვნელობამდე, ამავედროულად იზრდება სიდიდე  $X_1$ . ამ ცვლი-

ლებების შედეგად მყარდება სტაციონარული მდგომარეობა, როდესაც მათგან შემდგარი შეუღლებული ნაკადი იქცევა ნულად:  $J_1 = 0$ . თუ კი სისტემა მთლიანად შეუღლებულია, მაშინ შემუღლებელი ნაკადისათვისაც დგინდება სტაციონარული მდგომარეობა  $J_2 = 0$ . ამ შემთხვევაში სისტემაში ვერ ვნახავთ აშკარა ცვლილებებს და შემუღლებელი ნაკადის მთელი ენერგია იხარჯება  $X_1$  ძალის შენარჩუნებაზე. შეიძლება წარმოვიდგინოთ ტურბინის ბორბალი წყალში ( $X_1$ ), მისი მოძრაობის ( $J_1$ ) და წყლის ნაკადის ( $J_2$ ) სიჩქარე. ეს მოსაზრებები მართებულია არა მხოლოდ აქტიური გადატანისათვის, არამედ სხვა შემთხვევებშიც. ასე მაგალითად, სუბსტრატის ჟანგვის სიჩქარე მიტოქონდრიუმში, ანუ მოძრაობის სიჩქარე ( $J_2$ ) ADF/ATP შეფარდებასთანაა დაკავშირებული, ანუ  $X_1$  მამოძრავებელ ძალასთან. მიტოქონდრიუმის იმ მდგომარეობაში როდესაც ADF-ის კონცენტრაცია ნულის ტოლია და ATP-ის წარმოქმნა არ აღინიშნება ( $J_1 = 0$ ), მთელი ენერგია იხარჯება ATP-ის მაქსიმალური დონის შესანარჩუნებლად. გამთიშველების დამატება ამცირებს  $X_1$ -ის სიდიდეს, მაგრამ მაშინ უკვე  $J_1 > 0$ , რასაც მივყევართ შემუღლებელი ნაკადის აჩქარებასთან.

ენერგიის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი შემუღლებელ პროცესებში =  $JX$

$$|J_1 X_1| > |J_2 X_2|$$

და მიტოქონდრიუმში შეიძლება აღწევდეს 80-90%. ონგაიზერის განტოლების გამოყენება (იხ. (99)) შესაძლებლობას იძლევა მიღებული იყოს მაკრომოლეკულური კომპლექსების მახასიათებლები – ენერგიის ბიოლოგიური ტრანსფორმატორები, მათი ფუნქციონირების მექანიზმების დეტალური ანალიზის ჩატარების გარეშე.

სინერგეტიკის განვითარების გამო გაფართოვდა სტრუქტურის ცნება. სტრუქტურის ცნება ჩვენთვის წესრიგთან ასოცირებს. თვითორგანიზების თეორიაში სტრუქტურაში იგულისხმება მოწესრიგებული მდგომარეობის დაწესება ნებისმიერი სახით არა მხოლოდ სივრცეში, არამედ დროშიც. ამრიგად, არსებობენ სივრცული (სტატიკური) და სივრცულ-დროითი (დინამიური) სტრუქტურები. თანამედროვე თერმოდინამიკაში, რომელიც წარმოადგენს სინერგეტიკის თეორიულ საწყისებს, პრიგოჟინმა შემოიღო „დისიპატიური“ სტრუქტურების ცნება.

**დისიპატიური სტრუქტურები** – ეს არის სივრცულ-დროითი მოწესრიგებული წარმონაქმნები, რომლებიც წარმოიშვება დისიპატიურ სისტემებში არაწონასწორული, შეუქცევადი პროცესების მსვლელობისას და არსებობენ მხოლოდ საკვების (ნივთიერების, ენერგიის) მუდმივი მიწოდების რეჟიმში. გავიხსენოთ, რომ სიტყვა „დისიპაცია“ ნიშნავს „გაფანტვას“.

დღევანდელი მეცნიერების ერთ-ერთი თანამედროვე მიმართულება – **სინერგეტიკა** – წარმოიშვა XX ს. 70-იან წ-ში და პირველყოვლისას უკავშირდება პრიგოჟინის და გერმანელი მეცნიერის გ.ჰაკენის შრომებს. თავის სტატიაში „კოოპერატიული მოვლენები ძლიერ არაწონასწორულ და არაფიზიკურ სისტემებში“ ჰაკენმა მიაქცია ყურადღება იმას, რომ კოოპერატიული მოვლენები ვლინდება სხვადასხვა სახის სისტემებში. ამ დროისათვის იყო გამოვლენილი ისეთი მოვლენების მსგავსობა როგორცაა: ფაზური გადასვლები, ლაზერული გენერირება, ჰიდროდინამიური არამდგრადობა, ატმოსფეროში ციკლონების წარმოქმნა და ა.შ. ყველა ეს მოვლენა წარმოადგენს ერთობლივი სინერგეტიკული ეფექტების მაგალითებს. ამავე დროს, პრიგოჟინიც თვითორგანიზების პროცესების შესწავლით იყო დაკავებული, მაგრამ ის გამოიყენებდა თერმოდინამიურ მიდგომის. თერმოდინამიკა წარმოადგენს საერთო ფენომენოლოგიურ თეორიას, რომელსაც შეუძლია მეცნიერების სხვადასხვა დარგის მოვლენების აღწერა.

თერმოდინამიკა შეიცავს სისტემის სამი მდგომარეობის განხილვას:

1. წონასწორული მდგომარეობა;



2. არაწონასწორული მდგომარეობა წონასწორობის მახლობლად;
3. წონასწორობიდან შორს მყოფი მდგომარეობა.

შესაბამისად თერმოდინამიკა იყოფა სამ განყოფილებად:

1. წონასწორული თერმოდინამიკა, რომლის განვითარებაც ძირითადად მიმდინარეობდა მე-XIX ს.
2. წრფიული, არაწონასწორული თერმოდინამიკა, რომელიც შეიქმნა მე-XX ს 30-50 წწ.
3. არაწრფიული, არაწონასწორული თერმოდინამიკა, რომელიც მოგვევლინა მე-XX ს 70 წწ.

არაწრფიული არაწონასწორული თერმოდინამიკა – ეს არის მეცნიერების რთული დარგი, რომელიც დღეს სწრაფად ვითარდება. არაწრფიული არაწონასწორული თერმოდინამიკის ძირითადი დებულებები განავითარა პრიგოჟინმა (ნობელის პრემია 1977 წ). დღეს დღეობით აღიარებულია, რომ ბუნების ახლინდებურად აღწერას საფუძვლად უდევს ღია სისტემების არაწრფიული, არაწონასწორული თერმოდინამიკა.

ახალ სტრუქტურებს, რომლებიც იქმნება სისტემის თერმოდინამიური წონასწორობიდან დაშორებისას პრიგოჟინმა **დისიპატიური სტრუქტურები** უწოდა. ეს შეიძლება ითარგმნოს, როგორც ენერჯის გაბნევის შედეგად შექმნილი სტრუქტურები.

პრიგოჟინის რევოლუციური აღმოჩენა მდგომარეობდა იმის მტკიცებულებაში, რომ გარკვეულ პირობებში უწესრიგობიდან თვითნებურად წესრიგის შექმნა შესაძლებელია. ეს იყო გაბედული მტკიცებულება, რომელმაც შემდგომში მოიპოვა დამარწმუნებელი მტკიცებები. უწესრიგობიდან მოწესრიგებული სტრუქტურების შექმნის პროცესი თავად წარმოადგენს თვითორგანიზების პროცესს.

თვითორგანიზების თეორია შეიძლება ეფუძნებოდეს განსხვავებულ ფიზიკურ კონცეფციებს (აქ, სიტყვა „კონცეფცია“ ნიშნავს ერთიან განმსაზღვრავ ჩანაფიქრს). მაგალითად, ხაკენმა თვითორგანიზების საერთო ფიზიკური თეორიის შექმნისას ერთიანი მოდელის ფარგლებში მოათავსა ორი განსხვავებული კონცეფცია: ფაზური გადასვლების და ლაზერული გენერირების კონცეფციები. პრიგოჟინი კი, თვითორგანიზების თეორიის შექმნისას, გამომდინარეობდა არაწრფიული, არაწონასწორული თერმოდინამიკის კონცეფციიდან. ნებისმიერ შემთხვევაში თვითორგანიზების პროცესის მნიშვნელოვან თავისებურებას წარმოადგენენ კოლექტიურობა, შეთანხმებულობა, მრავალდონიან სისტემებში (სისტემები რომლებიც შედგებიან დიდი რაოდენობის ელემენტებისაგან) მიმდინარე პროცესების კოოპერატიულობა. თერმოდინამიურ კონცეფციაზე დაფუძნებულ თვითორგანიზების თეორიის განვითარებაში თერმოდინამიკის მეორე კანონი თამაშობს წამყვან როლს.

როგორც გვახსოვს, თერმოდინამიკის მეორე კანონი კლასიკურ ფიზიკაში ცნობილია როგორც ენტროპიის ზრდის კანონი. იზოლირებულ სისტემაში ყველა შეუქცევად პროცესში ენტროპია ყოველთვის იზრდება. ენტროპია წარმოადგენს პროცესების შეუქცევადობის და ასევე უწესრიგობის ზომას. ენტროპიის ცნება შეიძლება დაუკავშიროთ წესრიგს და მოუწესრიგობას. წესრიგში უნდა გვესმოდეს ნაწილაკების ან ენერჯის სივრცის გარკვეულ ადგილას დალაგება, ხოლო მოუწესრიგობაში (**ქაოსი**) – ნაწილაკების (ენერჯის) თანაბარი განაწილება მთელ მოცულობაში. მაშინ ენტროპიის ცვლილება გვიჩვენებს თერმოდინამიური პროცესების წარმართვის მიმართულებას.

სტაციონარულ მდგომარეობაში ღია სისტემაში მართებულია (97) შეფარდება, თანაც მასში მყოფი ყოველი წევრი  $\frac{dS_e}{dt}$  და  $\frac{dS_i}{dt}$  ნულისაგან განსხვავებულია. ისმის კითხვა, შეიძლება თუ არა  $\frac{dS_i}{dt}$  მნიშვნელობის დროში ცვლილების ხასიათის მიხედვით ვიწინას-

წარმეტყველოთ ღია სისტემაში სტაციონარული მდგომარეობის დადგენა. ამ კითხვაზე პასუხს გვაძლევს პრიგოჟინის თეორემა, რომლის მიხედვითაც სტაციონარულ მდგომარეობაში დადებითი ფუნქცია  $\frac{dS_i}{dt}$  იძენს მინიმალურ დადებით მნიშვნელობას. მაშასადამე, სტაციონარულ მდგომარეობასთან მიახლოვებისას ენტროპიის შექმნის სიჩქარე ღია სისტემის შიგნით მონოტონურად მცირდება და თანდათანობით უახლოვდება თავის მინიმალურ დადებით მნიშვნელობას. სწორედ ამაში მდგომარეობს ღია სისტემებში შეუქცევადი პროცესების მიმართულობის კრიტერიუმი. უნდა აღინიშნოს, რომ სისტემები იმყოფებიან წონასწორობასთან მახლობლად, სადაც მართებულია ონზაგერის შეფარდებები ამიტომაც (98) საფუძველზე შეიძლება ჩაიწეროს:

$$T \frac{dS_i}{dt} = -\frac{dG}{dt} \quad \text{ან} \quad TdS_i = -d(G + G^*)$$

გამოსახულების  $T \frac{dS_i}{dt}$  ცვლილების მონოტონური ხასიათიდან გამომდინარეობს, რომ წონასწორობის მახლობლად, სტაციონარული მდგომარეობა არ შეიძლება წარმოადგენდეს ავტორხევად რეჟიმში მყოფ სისტემას. მართლაც, ამ შემთხვევაში სისტემაში ცვლადი კონცენტრაციები (და მაშასადამე,  $J$  და  $X$  სიდიდეები) პერიოდულად იცვლებიან, რაც შეუთავსებადია  $T \frac{dS_i}{dt}$  ერთმიმართულებიან მონოტონურ ცვლილებასთან და სტაციონარულ წერტილში მის მუდმივობასთან. ენტროპიის შექმნის სიჩქარის ექსპერიმენტული გაზომვა სისტემის შიგნით, შეიძლება ჩატარდეს კალორიმეტრებში სითბოს ნაკადების შესწავლისას. სითბოს ეს ნაკადები წარმოიქმნება ენტროპიის შექმნისას სისტემაში მიმდინარე შეუქცევადი ცვლილებების დროს. მაგალითად, ბიოლოგიურ ობიექტებზე ჩატარებულ ცდებზე უჩვენებს, რომ სითბოპროდუქციის სიჩქარე და სუნთქვის ინტენსივობა ნაყოფების განვითარების პროცესში უწყვეტლივ მცირდება, დაწყებული ორგანიზმის განვითარების პირველი სტადიებიდან, და მუდმივ მნიშვნელობებს აღწევენ ზრდის სტაციონალურ ფაზაში. მაგრამ საჭიროა მხედველობაში ვიქონიოთ, რომ თერმოგენეზის დონე შეიძლება იცვლებოდეს ორგანიზმის განვითარებისას არა მხოლოდ მამოძრავებელი ძალების და ნაკადების სიდიდეების ცვლილების გამო. ორგანიზმის თბოპროდუქცია დამოკიდებულია აგრეთვე მემბრანული სტრუქტურების მდგომარეობაზე და ჟანგვითი ფოსფორილირების პროცესების შეუღლების ხარისხზე. და ბოლოს, პრინციპული არის ის, რომ ბიოლოგიური სისტემები, ზოგადად რომ ითქვას, იმყოფებიან წონასწორობიდან შორს, სადაც პროპორციულობა  $J$  და  $X$  შორის ან მათი ურთიერთობის თანაფარდობა ირღვევა. წონასწორობიდან შორს მყოფი სტაციონალურ მდგომარეობებში, პრიგოჟინის თეორემა არამართებულია (ავტორხევეთი რეჟიმი).

იზოლირებულ სისტემისათვის  $dS_e = 0$  და  $dS_i \geq 0$ , ანუ ენტროპია იზრდება გარე ზეგავლენის გარეშე, სისტემა თვითნებურად მიისწრაფის უწყესრიგობისკენ. მაგალითად, ტუმის წვეთი იხსნება სითხის მთელ მოცულობაში, სიგარეტის კვამლის კალიცო იშლება, ცეცხლი კოცონში ქრება, ინგრევა მთები, ქრება ვარსკვლავები და ა.შ. ესე იგი უნდა ითქვას, რომ ენტროპიის ზრდა ასახავს იზოლირებული სისტემების მეტად დალაგებული მდგომარეობიდან ნაკლებად დალაგებულში გადასვლის ბუნებრივ სწრაფვას.

ღია სისტემებში შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ  $dS_e < 0$  და  $dS < 0$ . ეს ნიშნავს, რომ ღია სისტემებში შესაძლებელია თვითორგანიზების პროცესებთან დაკავშირებული მოწესრიგებლობის მიღება.

ამრიგად, ისეთ მდგომარეობას, როდესაც სისტემის პარამეტრები დროთა განმავლობაში არ იცვლებიან, მაგრამ სისტემასა და გარემოს შორის აღინიშნება ნივთიერებათა და ენერჯიის მიმოცვლა, ეწოდება დინამიური ან სტაციონარული წონასწორობა. პირობა (97) სწორედ რომ აღწერს დინამიურ წონასწორობას, რომელიც დამახასიათებელია

ცოცხალ სისტემებისათვის. **სტაციონალურ მდგომარეობაში, ანუ დინამიური წონასწორობის პირობებში, სისტემის მიერ წარმოებული ენტროპია დადებითი სიდიდეა, მაგრამ ყველა შესაძლო მნიშვნელობებიდან მინიმალური.** სწორედ ამაში მდგომარეობს პრიგოჟინის დისიპატიური თეორიის პრინციპი.

პრიგოჟინის იდეებმა ცოცხალი და არაცოცხალი ბუნებას შორის 150 წელზე მეტ ხანს არსებული წინააღმდეგობის აღმოფხვრვის საშუალება მოგვცა.

**ევოლუცია** – ეს არის თანდათანობითი განვითარება. არც თუ ისე დიდი ხნის წინ ითვლებოდა, რომ ევოლუციის კანონები ფიზიკაში და ბიოლოგიაში (ანუ, ცოცხალ და არაცოცხალ ბუნებისათვის) ერთმანეთის გამომრიცხავია.

ევოლუციის თეორია ფიზიკაში, რომელიც ეფუძნება თერმოდინამიკის მეორე კანონს და რომელიც იყო ჩამოყალიბებული გერმანელი მეცნიერის რუდოლფ იულიუს ემმანუილ კლაუზიუსის მიერ 1850 წ, წარმოადგენს ნგრევის თეორიას. მართლაც, თერმოდინამიკის მეორე კანონის თანახმად ენტროპიის ზრდა ჩაკეტილ სისტემაში უკავშირდება მოწესრიგებლობის, არეულობის ზრდას, ანუ ნგრევას.

ბიოლოგიაში კი პირიქით, ცოცხალი ფორმების განვითარება მიდის მარტივიდან რთულისაკენ და უკავშირდება მოწესრიგებლობის ზრდას, ანუ ენტროპიის შემცირებას. ევოლუციური თეორია ბიოლოგიაში ჩამოაყალიბა ინგლისელმა ბუნებისმეტყველმა ჩარლზ დარვინმა 1859 წ.

დარვინის ევოლუციის თეორია შეიცავდა ორ ახალ კონცეფციას:

1. ყველა ცოცხალი არსების საერთო წარმომავლობა: ყოველი ერთი მიმართულების მქონე სახეობა ვითარდება და იცვლება გარემოების ზეგავლენით.
2. ბუნებრივი შერჩევა, რომელიც ორი ეტაპიდან შედგება – ხელსაყრელი ცვალებადობის შექმნისაგან და არსებობისათვის ბრძოლისაგან, რომელშიც უძლიერესი გადარჩება. ბუნებრივი შერჩევის შედეგად წარმოიიშვება მცენარეთა და ცხოველთა ახალი სახეობები.

ამრიგად, ევოლუციის თეორია ბიოლოგიაში – ესაა ახალი სტრუქტურების შექმნის თეორია. ამ სტრუქტურის შექმნას თან უნდა ახლავდეს ენტროპიის შემცირება. მხოლოდ XX ს 70-80 წ-ში ცნობილი გახდა, რომ თერმოდინამიური და ბიოლოგიური ევოლუციები არ გამორიცხავენ ერთმანეთს. ცოცხალის და არაცოცხალის ფიზიკური კანონები ერთია, განსხვავების მონახვა შეიძლება მხოლოდ კონკრეტულ მექანიზმებში.

ცოცხალის და არაცოცხალის თერმოდინამიური ევოლუციის კანონები ერთია. მაგალითად, ცოცხალ ორგანიზმებში მოქმედებს მოწესრიგებლობის შექმნის განსხვავებული მექანიზმი, რომელიც ქმნის „მოწესრიგებლობას არეულობიდან“.

სიცოცხლე შეიძლება წარმოიშვას მხოლოდ ღია სისტემებში. ნებისმიერი უჯრედი არსებობს ენერჯიის და ნივთიერების ნაკადების ხარჯზე. იმისათვის რომ შეინარჩუნოს მოწესრიგებლობა, ცოცხალმა ორგანიზმმა უნდა მიიღოს საკვები, მაღალორგანიზებული მატერიის სახით. ეს პროცესი მიედინება მაღალი დაბალი წესის მქონე ნივთიერთა ნაკადების ხარჯზე, ანუ, ამ ნივთიერებებს გააჩნიათ ენტროპიის დაბალი მნიშვნელობა. ამიტომაც ცხოველები ვერ შეიქმნებოდნენ მცენარეებზე ადრე, ხოლო მცენარეები უმარტივესი ორგანიზმებზე ადრე, რომლებიც იმყოფებიან ცოცხალის და არაცოცხალის ზღვარზე. ცხოველმყოფლობის შედეგად წარმართება შეუქცევადი პროცესები, რომლებსაც თან ახლავს დაბალორგანიზებული მატერიის წარმოქმნა, რაც ენტროპიის ზრდას უკავშირდება, და რომლისგანაც ორგანიზმი უნდა განთავისუფლდეს. ამრიგად, საეთო ბიოლოგიური კანონის თანახმად, ცოცხალი ორგანიზმი უნდა იკვებებოდეს მაღალორგანიზებული მატერიით, რომელსაც გააჩნია უარყოფითი ენტროპია. ამასთან

ორგანიზმი უნდა განთავისუფლდეს დადებით ენტროპიისაგან, რომელიც მან იძულებულია აწარმოოს სანამ ცოცხალია.

სიცოცხლის ფენომენი წარმოადგენს მოწესრიგებლობის შენარჩუნების და ზრდის და მათსადაც ენტროპიის შემცირების მაგალითს. სიცოცხლის ციკლი შეიცავს შემდეგ სტადიებს: დაბადება, განვითარება, სიკვდილი. პირველ ორ სტადიაზე ენტროპია მცირდება, იქმნება და ვითარდება მოწესრიგებული სტრუქტურა. ამ სტადიებზე ცოცხალი ორგანიზმი ინარჩუნებს კავშირს გარემოსთან. მესამე სტადიაზე სისტემა ჩაკეტილი ხდება, ენტროპია იზრდება და მაქსიმუმს აღწევს. ამ გაგებით სიცოცხლე – ესაა ბრძოლა ენტროპიის ზრდის წინააღმდეგ. ადამიანი არსებობს, სანამ ინარჩუნებს აქტიურ კავშირს გარე სამყაროსთან, სანამ მიმოიცივლის მასთან ენერგიას, ნივთიერებას და ინფორმაციას.

სადღეისოდ საყოველთაოდ აღიარებულია, რომ ბიოლოგიური ევოლუცია წარმოადგენს დარვინისებრივი ბუნებრივი შერჩევის, და შეუქცევადი პროცესებით განპირობებულ, თვითორგანიზების კომბინირების შედეგს. ამრიგად იყო დამტკიცებული რომ თერმოდინამიური ევოლუციური კონცეფციები ფიზიკასა და ბიოლოგიაში არ ეწინააღმდეგება ერთმანეთს ელემენტალურ დონეზე მაინც. ასე, ცნება „სიბერე“ ნიშნავს როგორც სისტემის ასაკს, ასევე მისი ცვეთის ხარისხს. სისტემის მდგომარეობა თერმოდინამიკაში ხასიათდება ენტროპიით, რომელიც პროცესების შეუქცევადობის საზომია. ენტროპია საშუალებას იძლევა დავადგინოთ განსხვავება წარსულსა და მომავალს შორის. უფრო „დაბერებული“ იქნება ის მდგომარეობა, რომლის ენტროპიაც უფრო მაღალია. ასე რომ თერმოდინამიკას მივყვართ დროის ახალ კონცეფციამდე, როგორც სისტემისთვის დამახასიათებელ შიდა ცვლად სიდიდეზე, რომელიც გვიჩვენებს ცალკეული მდგომარეობების საშუალო „ასაკს“. შიდა დრო უკავშირდება პროცესების შეუქცევადობას და შემთხვევით ქცევებს, რომელიც გვხვდება არამდგრად სისტემებში.

სტაციონალური მდგომარეობების მდგრადობის თერმოდინამიური ნიშნები ემთხვევა შესაბამის მათემატიკურ ნიშნებს და შეიძლება წარმოგვიდგინოს როგორც მათი დამატებითი მახასიათებელი.

### **11.10. დინამიური მოდელები და მდგომარეობის ალბათობა.**

იქიდან გამომდინარე, რომ ბუნება მისწრაფის ნაკლებ ალბათურიდან მეტ ალბათურ მდგომარეობისაკენ, შეიძლება ითქვას, რომ სისტემის ენტროპია იზრდება. ეს თერმოდინამიკის მეორე კანონია. თუ სისტემის ენტროპია არ იცვლება ( $dS = 0$ ) ის იმყოფება გაყინულ მდგომარეობაში და ამ მდგომარეობიდან გამოსვლისთანავე სისტემის ენტროპია იწყებს ზრდას. ღია სისტემაში შეიძლება ენტროპიის შემცირებაც. ამისთვის საჭიროა რაღაც ენერგიის ხარჯვა ან სისტემაზე მუშაობის შესრულება. მაგრამ ენტროპიის შემცირება შეიძლება მოხდეს დახურულ სისტემაში ფლუქტუაციის გზით. ეს იმას ნიშნავს, რომ ფლუქტუაციის დროს შეიძლება მიღებულ იქნეს ნაკლები თერმოდინამიური ალბათობის მქონე სტრუქტურა, მაგალითად, ენერგიის დაუხარჯავად მივიღოთ ხსნარში რაიმე კრისტალი ( $dS = 0$ ) და ა.შ.

თერმოდინამიკის მეორე კანონის საფუძველზე შეიძლება აიხსნას ცილების დინამიური მოდელი (ანუ მათში მიმავალი კონფორმაციული ცვლილებები). ენტროპიის ზრდის გამო ცილის მე 4-ლი სტრუქტურა დაშლისკენ მიისწრაფის, მაგრამ ამას ეწინააღმდეგება როგორც ბმების სიმტკიცე, ასევე უჯრედში ენერგიის სიჭარბე. შედეგად მივიღებთ სტრუქტურის ცვლილებებს რაღაც საზღვრების ფარგლებში, ანუ „მსუნთქავ“, დინამიურ სტრუქტურას.

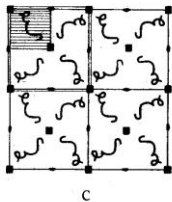
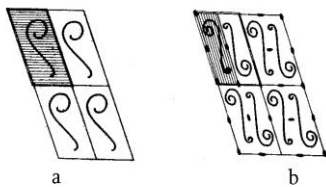
## 12. ცოცხალი სტრუქტურების ფორმირების საწყისები.

### 12.1. სიმეტრიის ოპერაციები.

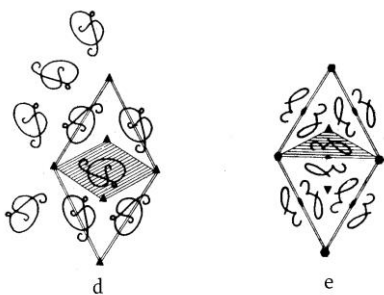
იმისათვის, რომ გავერკვიოთ ცოცხალი სისტემების სტრუქტურული ორგანიზების პრინციპებში, პირველ ყოვლისა საჭიროა მათი აგებულობის პრინციპებში გარკვევა. ეს პრინციპები განისაზღვრება თავისუფალი ენერჯის მინიმუმით და ეფუძნება სტრუქტურების სიმეტრიას. ისმევა კითხვა, სიმეტრიის რა ელემენტებია განსახილავი მაკრომოლეკულების ორგანიზების აღწერისას? მათემატიკური თვალსაზრისით საჭიროა ვიპოვოთ სიმეტრიის ელემენტების ჯგუფი, რომელთა მოქმედებით სტრუქტურის ნებისმიერ წერტილზე ის დაუბრუნდება თავის საწყის მდგომარეობას. სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფის ოპერაციების ამ კონცეფციას მივყევართ სიმეტრიის 32 სახეობასთან.

არსებობს სიმეტრიის ოპერაციების სამი ძირითადი ტიპი:

- სარკისებრივი სიბრტყე ( $m$ ).** სიმეტრიის სიბრტყეში არეკვლა. ვინაიდან ბიოლოგიური ობიექტები აგებულია ენანტიომერული<sup>63</sup> მოლეკულებისაგან (მაგალითად, D-შაქრები და L-ამინომჟავები), სიმეტრიის ოპერაციების ეს ტიპი, რომელსაც გადაჰყავს მარჯვენა მოლეკულა მარცხენაში და პირიქით, არ შეიძლება გვხვდებოდეს ბიოლოგიური ობიექტების კრისტალოებში.



სურ. 52. ბრუნვითი სიმეტრიის ელემენტები: a – 1; b – 2; c – 4; d – 3; e – 6. ერთი ელემენტალური უჯრედი გამოყოფილია ორმაგი ხაზებით, დანარჩენი ელემენტალური უჯრედები – ჩვეულებრივი ხაზებით. უჯრედების დამოუკიდებელი ნაწილები დაშტრიხულია.



- ბრუნვითი ღერძი ( $x$ ).**  $x$  რიგის ბრუნვითი ღერძი ატრიალებს ობიექტს თავის ირგვლივ  $360^\circ/x$  კუთხეზე. ასე, მე 2-ე რიგის ღერძს შეესაბამება  $180^\circ$  კუთხე, მე 3-ე რიგის ღერძს –  $120^\circ$  და ა.შ. კრისტალებში არსებულ ბრუნვითი ღერძის ტიპებს ედება მკაცრი შეზღუდვები. ეს გამოწვეულია კრისტალის უსასრულო პერიოდულობის

<sup>63</sup> ენანტიომერები (საწინააღმდეგო + ნაწილი, ზომა) ეს არის სტერეოიზომერების წყვილი, რომლებიც წარმოადგენენ სივრცეში არათავსებად ერთმანეთის სარკისებრივ ანარეკლს. ორი ენანტიომერის კლასიკურ მაგალითად შეიძლება ავიღოთ მარჯვენა და მარცხენა ხელი, რომლებსაც აქვთ ერთნაირი აგებულება, მაგრამ განსხვავებული სივრცული ორიენტირება.

მოთხოვნით სამ განზომილობაში. თურმე, დატრიალების კუთხე  $\alpha$ -ს შეიძლება ჰქონდეს მხოლოდ გარკვეული მნიშვნელობები, რომლებისთვისაც  $\cos \alpha = M/2$ , სადაც  $M$  – დადებითი ან უარყოფითი მთელი რიცხვი ხოლო  $\alpha = 360/x$ . ამრიგად,  $x$  შეიძლება იყოს ტოლი მხოლოდ 1 (იდენტობის ოპერაცია), 2, 3, 4 ან 6 და არ შეიძლება ჰქონდეს არანაირი სხვა მნიშვნობა.

ამ ტიპების ბრუნვითი ღერძების მაგალითები მოყვანილია სურ. 52-ზე. ეს სურათი ასევე გვიჩვენებს უჯრედის სიმეტრიულად დამოუკიდებელი ნაწილის და მთელი უჯრედის ურთიერთობას.

მიუხედავად იმისა, რომ ბრუნვითი ღერძების რიგები კრისტალში შემოფარგლურია 1, 2, 3, 4 და 6 მნიშვნელობებით, ეს არ ნიშნავს, რომ ბუნებაში ობიექტებს არ შეიძლება ჰქონდეთ სხვა რიგის ბრუნვითი ღერძები, რომლებიც, უნდა ითქვას, არ წარმოქმნიან განმეორებადობას კრისტალურ მესერში. მაგალითად, ბევრი ყვავილის ფურცლის განლაგება ემორჩილება მე 5-ე რიგის ბრუნვითი ღერძის მქონე სიმეტრიას, სფერულ ვირუსებს და ზოგიერთ რადიოლარიას გააჩნია იკოსაედრული სიმეტრია, ხოლო DNA-ს ფუძეების წყვილები ლაგდებიან ხრახნისებრივი სიმეტრიის მე-10-ე რიგის ღერძის ირგვლივ. ბრუნვითი ღერძების შეზღუდვები უბრალოდ ნიშნავს რომ ვერც ერთი ასეთი ობიექტი ვერ კრისტალდება მესერში, რომელშიც ყვავილის ფურცლები, ვირუსის სუბერთეულები და DNA-ს ფუძეების წყვილები წარმოადგენდენ სიმეტრიულად დამოუკიდებელ უჯრედის ნაწილებს. მეორეს მხრივ, თუ კი რაიმე ობიექტი შეიცავს კრისტალისათვის დამკვიდრებულ ბრუნვითი სიმეტრიის ელემენტს (მაგალითად, მე 2-ე და მე 3-ე რიგის ღერძებს), მაშინ მას შეუძლია კრისტალირება ისე, რომ მისი სუბერთეული შეადგენს სიმეტრიულად დამოუკიდებელი უჯრედის ნაწილს. ცილის კრისტალოგრაფიაში ასეთი სახის კრისტალირება აღინიშნება საკმაოდ ხშირად, თუ თვითონ ცილა წარმოადგენს ოლიგომერს.

- c. **ინვერსიული ღერძი** ათავსებს გარკვეულ კუთხეზე შემობრუნებას ინვერსიასთან წერტილში. აღინიშნება დატრიალების ღერძის მიხედვით როგორც  $\bar{1}$ ,  $\bar{2}$ ,  $\bar{3}$ ,  $\bar{4}$  და  $\bar{6}$ . ასე, ღერძი  $\bar{1}$  სიმეტრიის ცენტრის, ხოლო ღერძი  $\bar{2}$  – სარკისებრივი სიმეტრიის სიბრტყის ეკვივალენტურია. ვინაიდან ბიოლოგიური მოლეკულები ენანტიომერულები არიან, სიმეტრიის ეს სახე არა გვხვდება მათ კრისტალებში.

აღწერილი სიმეტრიის ელემენტების გარდა შესაძლებელია მათი ყველანაირი კომბინაციები, რომლებიც ექვემდებარებიან წერტილოვანი ჯგუფის განსაზღვრას. ოპერაციების სრული ნუსხა ასეთია:

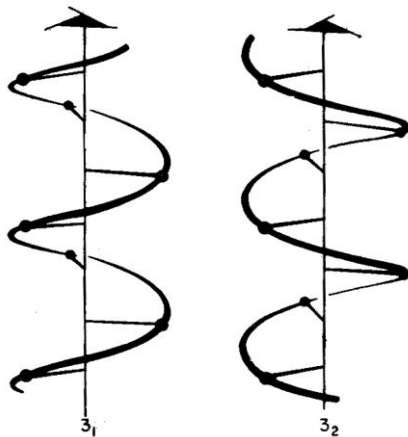
$x$	ბრუნვითი ღერძი
$\bar{x}$	ინვერსიული ღერძი ( $\bar{2} = m$ )
$x/m$	სიმეტრიის სიბრტყის პერპენდიკულარული ბრუნვითი ღერძი
$xm$	ბრუნვითი ღერძი სიმეტრიის ვერტიკალური სიბრტყით
$\bar{x}m$	ინვერსიული ღერძი სიმეტრიის ვერტიკალური სიბრტყით
$x^2$	ბრუნვითი ღერძი მის პერპენდიკულარული მეორეული ღერძით
$x/mm$	ბრუნვითი ღერძი ვერტიკალური სიმეტრიის სიბრტყით და მის პერპენდიკულარულ სიმეტრიის სიბრტყით

კონკრეტული რიგის ბრუნვითი ღერძების ჩასმით, მივიღებთ სიმეტრიის 32 სახეობას. ავლნიშნოთ, რომ ერთადერთი ოპერაცია რომელსაც გამოიყენებენ ცილის კრისტალოგრაფიაში ესაა  $x$  და  $x^2$ , ე.წ. ციკლური და დიედრული სიმეტრიები.

## 12.2. შიდა სიმეტრიის ელემენტები.

წერტილოვანი ჯგუფის ოპერაცია იმაში მდგომარეობს, რომ სიმეტრიის ელემენტების ყველა შესაძლო კომბინაცია აბრუნებს სტრუქტურის ნებისმიერ წერტილს საწყის მდგომარეობაში. შიდა სიმეტრიის ცნებაში ესმით ასეთი თვითშეთანხმებული სიმეტრიის ოპერაციების კრებული. მაგალითად კრისტალში, რომელზეც ნებისმიერი ოპერაციის მოქმედებისას ან უჯრედის ტრანსლაციის შედეგად მივიღებთ ყველა დანარჩენი სიმეტრიის ოპერაციის დამთხვევას. გარდა ამისა, არსებობს სიმეტრიის ორი ტრანსლაციური ოპერაცია:

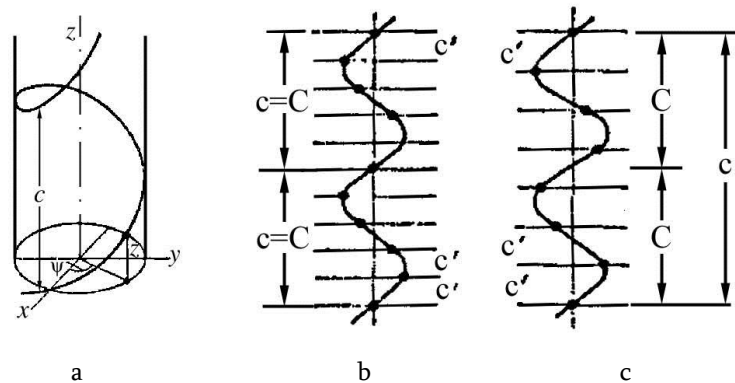
- a. **დასრიალების სიბრტყე.** სტრუქტურა აირეკლება სიბრტყეში და გადაიტანება ამ სიბრტყის პარალელურად. გადატანა სრულდება ელემენტარული უჯრედის წიბოს სიგრძის ნახევრის მანძილზე. ამრიგად, ორი თანმიმდევრობითი ოპერაცია არეკვლა და გადატანა ელემენტარული უჯრედის ერთი ტრანსლაციის ეკვივალენტურია. ცილების ენანტიომორფულ<sup>64</sup> კრისტალებში სრიალის სიბრტყეები არ აღინიშნება.
- b. **ხრახნისებრივი ღერძები.** სტრუქტურა ტრიალდება ღერძის რიგის შესაბამის კუთხეზე და გადაიტანება ბრუნვის ღერძის პარალელურად. მე 2-რე რიგის ხრახნისებრივი ღერძისათვის, გადატანა შეადგებს ელემენტარული უჯრედის ბრუნვის ღერძის პარალელური წიბოს სიგრძის ნახევარს. ასე რომ, აქაც, ორი თანმიმდევრულად შესრულებული სიმეტრიის ოპერაცია გამოიწვევს მეორე ელემენტარულ უჯრედთან დამთხვევას. ხრახნისებრივ მე2-რე რიგის ღერძი აღინიშნება როგორც 2<sub>1</sub>.



სურ. 53. ხრახნისებრივი ღერძები 3<sub>1</sub> და 3<sub>2</sub>.

მე 3-ე რიგის ხრახნისებრივ ღერძისათვის გადატანა შეიძლება ელემენტარული უჯრედის წიბოს ან ერთ მესამედზე (3<sub>1</sub>), ან ორ მესამედზე (3<sub>2</sub>). სტრუქტურა ემთხვევა თავის თავს შემდეგ უჯრედში სამი ასეთი თანმიმდევრობითი ოპერაციის ჩატარების შემდეგ. ეს ოპერაციები ნაჩვენებია სურ. 53-ზე. ამ ოპერაციებს მივყევართ გამეორებული მოტივების ორ შესაძლო განლაგებასთან ბრუნვის ღერძის მიმართ: საათის ისრის მიმართულებით, და მის საწინააღმდეგოთ. მე 4-ე რიგის ხრახნისებრივ ღერძისათვის არსებობს სამი შესაძლებლობა 4<sub>1</sub>, 4<sub>2</sub> და 4<sub>3</sub> გადატანით შესაბამისად ელემენტარული უჯრედის ერთ მეოთხედზე, ორ მეოთხედზე და სამ მეოთხედზე. შესაძლებელია შემდეგი მე 6-ე რიგის ხრახნისებრივი ღერძები: 6<sub>1</sub>, 6<sub>2</sub>, 6<sub>3</sub>, 6<sub>4</sub> და 6<sub>5</sub>, გადატანით ერთ მეექვსედზე, ორ მეექვსედზე, სამ მეექვსედზე, ოთხ მეექვსედზე და ხუთ მეექვსედზე შესაბამისად.

<sup>64</sup> კრისტალოგრაფიაში ენანტიომორფულს უწოდებენ ისეთ მრავალწახნაგებს, რომელთა სიმეტრია და ფორმები სრულიად ერთნაირია, მაგრამ მათი ერთმანეთთან დამთხვევა შეიძლება მხოლოდ სიმეტრიის სიბრტყეში არეკვლით. მიღებულია, რომ ერთ ერთ ასეთ ობიექტს ეწოდოს მარჯვენა, ხოლო მეორეს მარცხენა (მარჯვენა და მარცხენა ხელის ანალოგიურად).



სურ. 54. სპირალური სტრუქტურების მაგალითები; (a) უწყვეტი სპირალი (ცილინდრული კოორდინატები); დისკრეტული სპირალი მთელრიცხოვანი  $M = 5$  (b) და არამთელრიცხოვანი  $M = 7/2$  (c).

აქ საჭიროა აღინიშნოს, რომ სპირალები შეიძლება იყოს უწყვეტი და წყვეტილი (დისკრეტული), რომლებიც წარმოადგენენ უწყვეტი სპირალის გასწვრივ განლაგებულ წერტილების გარკვეულ სიმრავლეს (სისტემას). ბუნებრივია, სპირალური მაკრომოლეკულების აღწერისას საჭიროა დისკრეტული სპირალების გამოყენება.

დისკრეტული სპირალის დახასიათება შეიძლება ვაწარმოოთ შემდეგი პერიოდული კომპონენტებით მთავარი ღერძის გასწვრივ: მეზობელ წერტილებს შორის მანძილის პროექცია ( $c'$ ) მთავარ  $z$  ღერძზე, უწყვეტი სპირალის პერიოდით  $C$  (მისი ბიჯით) და დისკრეტული სპირალის ჭეშმარიტი პერიოდით  $c$  (ძირითადი სპირალის პერიოდი) (იხ. სურ. 54). ავლნიშნოთ, რომ სიმეტრიის ოპერაცია რომელსაც მივყევართ წერტილების სპირალურ განლაგებასთან არის ხრახნისებრივი გადაადგილება  $s_M$  რომელიც შედგება  $\Psi = 2\pi/M$  კუთხეზე დატრიალებისაგან და  $c'$  მანძილზე გადატანისაგან ღერძის გასწვრივ. მთელი  $M = p$  შემთხვევაში ერთ პერიოდზე მოდის  $M$  წერტილი, ანუ  $c' = C/p$ , და უწყვეტი სპირალის პერიოდი  $C$  უდრის დისკრეტული სპირალის  $c$  პერიოდს. შესაძლებელია სხვა შემთხვევაც, როდესაც  $p$  წერტილი მოდის არა ერთ, არამედ  $q$  ხვიაზე ( $M = p/q$ ). ამ შემთხვევაში ძირითადი სპირალის პერიოდი  $c$ , ანუ მანძილი მისი ტრანსლაციურად იდენტურ წერტილებს შორის, განისაზღვრება შემდეგი შეფარდებით:

$$c = qC = pc', \quad C/c' = p/q = M$$

ანუ, ის უწყვეტი სპირალის პერიოდზე  $q$  ჯერ მეტია (სურ. 54c). მაგალითად  $\alpha$ -სპირალი-სათვის  $C = 5,4\text{\AA}$ ,  $c' = 1,5\text{\AA}$ , ანუ  $M = 18/5$ , და ძირითადი სპირალის პერიოდი  $c = 27\text{\AA}$ . უფრო დაწვრილებით, დისკრეტული სპირალების თავისებურებების საკითხებს რეალური სტრუქტურების აღწერისას, ჩვენ დაუბრუნდებით მომდევნო თავებში.

### 12.3. სიმეტრიის პრინციპების განზოგადება

თუ ვცდებით მონაკვეთის გაყოფას ორ არათანაბარ ნაწილად, ჰარმონიის ცნებებთან შესაბამისობაში, აღმოვაჩინოთ, რომ დიდი და პატარა მონაკვეთების სიგრძეთა შეფარდება უდრის მთელი მონაკვეთის სიგრძის შეფარდებას დიდი მონაკვეთის სიგრძესთან და დაახლოებით 1,62-ის ტოლია. ეს რიცხვი, რომელსაც „ოქროს კვეთი“ ეწოდება  $\pi$  და  $e$  რიცხვებთან ერთად შედის ყველაზე ცნობილი ირაციონალური რიცხვების სამეულში. და მიუხედავად იმისა, რომ „ოქროს კვეთი“ არაა გავრცელებული მათემატიკაში ისე როგორც დანარჩენი ორი რიცხვი, ის ძალზე მნიშვნელოვანია ჩვენს მიერ სამყაროს აღქმისას, ვინაიდან პროპორციებს, რომლებიც პასუხობენ „ოქროს კვეთას“ ჩვენ აღვიქვამთ როგორც ჰარმონიულს.



„ოქროს კვეთი“ ჯერ კიდევ ძველი ბერძნებისთვის იყო ცნობილი. ეჭვს არ იწვევს ის მოსაზრება, რომ ზოგიერთი ძველი ბერძენი არქიტექტორი თუ მოქანდაკე შეგნებულად გამოიყენებდა „ოქროს კვეთს“ თავის ქმნილებებში. მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ თუნდაც პარფენონი. სწორედ ამიტომ იყო შემოთავაზებული „ოქროს კვეთის“ წარმოქმნილი ორი მონაკვეთის შეფარდების აღნიშვნა  $\Phi$  რიცხვითს მეშვეობით.

ცნობილია  $\Phi$  რიცხვის ბევრი შესანიშნავი თვისება, რომელიც გამოიხატება სხვადასხვა ბრტყელ თუ სივრცულ ფიგურაში. მაგალითად, წრეწირის რადიუსის და მასში ჩახაზული სწორი ათკუთხედის გვერდის შეფარდება  $\Phi$ -ის ტოლია. შემდეგ, სამი „ოქროს“ მართკუთხედის (მართკუთხედები, რომელთა გვერდები „ოქროს კვეთაშია“ ერთმანეთთან) განლაგებისას ისე, რომ ყოველმა მათგანმა სიმეტრიულად გადაკვეთოს ორი სხვა მართკუთხედი (მართი კუთხით ყოველი მათგანის მიმართ), დავინახავთ, რომ „ოქროს“ მართკუთხედების წვეროები ემთხვევა სწორი იკოსაედრის 12 წვერს და ამავდროულად მიუთითებს სწორი დოდეკაედრის 12 წახნაგის ცენტრების მდებარეობას.

„ოქროს“ მართკუთხედს გააჩნია ბევრი არაჩვეულებრივი თვისება. ოქროს მართკუთხედიდან კვადრატის მოჭრისას, კვლავ ვიღებთ „ოქროს“, მაგრამ უფრო მცირე ზომის მართკუთხედს. თუ გავაგრძელებთ კვადრატების მოჭრას, მივიღებთ სულ უფრო მცირე და მცირე „ოქროს“ მართკუთხედებს.

ეხლა კი გავვერკვიოთ თუ რას უდრის  $\Phi$ ? გავიხსენოთ განმარტება: დიდი ნაწილი შეეფარდება მცირეს, როგორც მთელი დიდ ნაწილს. თუ კი მცირე მონაკვეთი მივიღეთ 1-ის ტოლად, ხოლო დიდი  $x$ -ის, მაშინ შეიძლება შემდეგი პროპორციის ჩაწერა:

$$\frac{x+1}{x} = \frac{x}{1}$$

რომელიც დაიყვანება ჩვეულებრივ კვადრატულ განტოლებამდე:  $x^2 - x - 1 = 0$ , რომლის დადებითი ფესვი არის  $x = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ . ეს რიცხვი ერთდროულად გამოსახავს  $x$  მონაკვეთის სიგრძეს და  $\Phi$ -ის მნიშვნელობას. მისი ათწილადი ჩანაწერი გამოიყურება ასეთნაირად:

$$\Phi = 1,61803398 \dots$$

თუ კი ერთიანით ავღნიშნავთ დიდ მონაკვეთს, მაშინ  $x$ -ის სიგრძე გამოისახება  $\Phi$ -ის შებრუნებული მნიშვნელობით, ანუ  $1/\Phi$ . საინტერესოა, რომ  $1/\Phi = 0,61803398 \dots$  რიცხვი  $\Phi$  – ერთადერთი დადებითი რიცხვია, რომელიც გადაიქცევა თავის უკუ სიდიდეში ერთიანის გამოკლებისას. აგრეთვე ეს რიცხვი მჭიდროთ უკავშირდება ზოგიერთი სწორი მრავალკუთხედის და მრავალწახნაგის მეტრიკულ თვისებას – ხუთკუთხედის, ათკუთხედის, დოდეკაედრის, იკოსაედრის – ვინაიდან ის უდრის  $2 \cos(\pi/5)$ .

$\pi$  რიცხვის მაგვარად  $\Phi$  შეიძლება წარმოვიდგინოთ უსასრულო რიგის ჯამის სახით ბევრი სხვადასხვა ხერხის გამოყენებით. მაგალითად

$$\Phi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\varphi(n)}{\varphi(n-1)}$$

სადაც  $\varphi(n) = \varphi(n-1) + \varphi(n-2)$  წარმოადგენს რეკურენტულ შეფარდებას, რომელიც განისაზღვრება ფიბონაჩის რიცხვებით  $\varphi(n)$ .

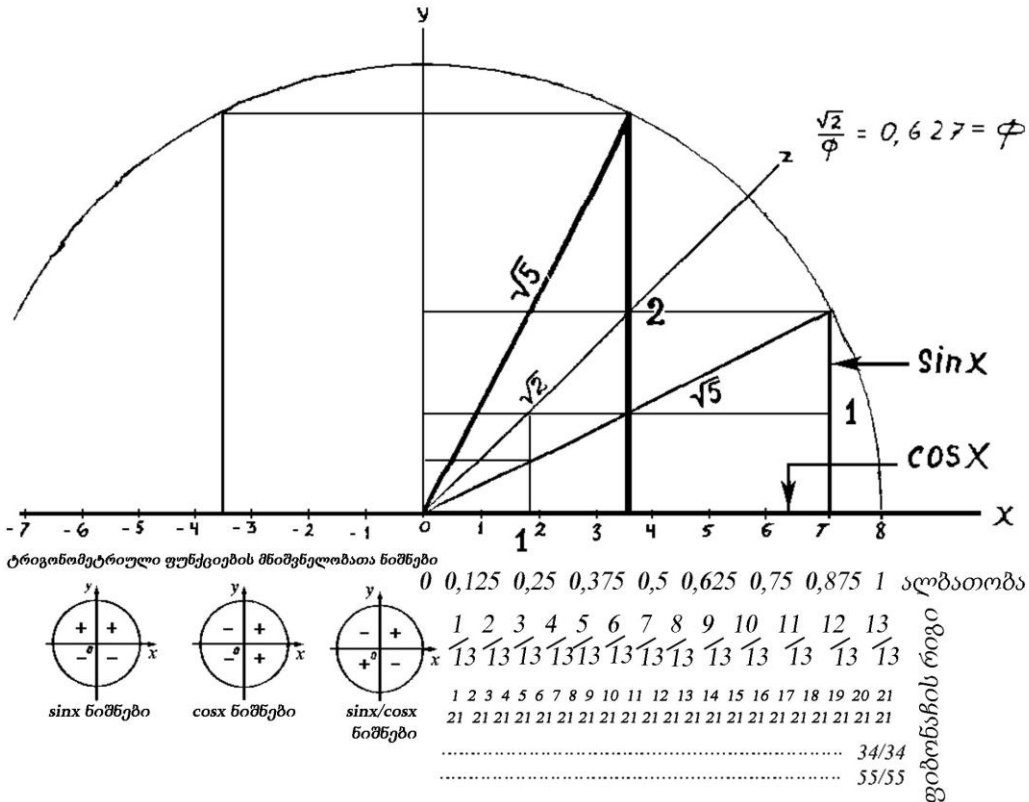
რიცხვი  $\Phi$  ირაციონალურია, არ წარმოისახება მარტივი წილადების სახით. მაგრამ თუ კი გამოვიყენებთ მოყვანილ ფორმულას, და შევწყვიტავთ წილადს პირველ, მეორე,

<sup>65</sup> ასო  $\Phi$  – დიდი ფიდიუმის სახელის პირველი ასოა. ფიდიუმი, თქმულებების მიხედვით, ხშირად გამოიყენებდა „ოქროს კვეთას“ თავის ქანდაკებებში. ერთერთი მიზეზი იმისა რომ პითაგორელებმა აირჩიეს პენტაგრამა (ხუთქიმიანი ვარსკვლავი) თავისი საიდუმლო ორდენის სიმბოლად, არის ის, რომ ამ ფიგურის ნებისმიერი მონაკვეთი იმყოფება ოქროს კვეთაში თავის მეზობელ უმცირეს მონაკვეთთან.

მესამე და ა.შ. რიგის წევრზე, მაშინ მივიღებთ რიგ წილადს, რომლებიც თანდათანობით, ხან ზემოდან, ხან ქვემოდან მიუახლოვდება  $\phi$ -ს:

$$\frac{1}{1}; \frac{2}{1}; \frac{3}{2}; \frac{5}{3}; \frac{8}{5}; \frac{13}{8}; \dots$$

მნიშვნელოვანია, რომ ოქროს კვეთის შემცავი რიცხვები ინარჩუნებენ თავის თვისებას როგორც გაორმაგების ოპერაციის შესრულებისას ( $2^n$ -ის ჩათვლით), ასევე 2-ის ფუძით ლოგარითმირებისას. სურ. 55-ზე მოყვანილია გეომეტრული აგებები, რომლებიც შეიძლება გაკეთდეს ოქროს კვეთის პრინციპების გამოყენებით, და რომლებიც თვალსაჩინოდ აღწერს ოქროს კვეთის და ფიბონაჩის რიცხვების წარმოქმნას.



სურ. 55. გეომეტრული აგება, რომელიც თვალსაჩინოდ აღწერს „ოქროს კვეთის“ წარმოქმნას. მიღებული „ოქროს“ სამკუთხედები თავის თავში შეიცავენ „ოქროს პროპორციას“ (იხ. ტექსტი). დემონსტრირებულია ფიბონაჩის რიგის წარმოქმნა.

მოყვანილი სამკუთხედების ტრიგონომეტრიული შეფარდებები, საიდანაც ჩანს მათი „ოქროს კვეთასთან“ კავშირი აღიწერება შეფარდებებით:

$$\begin{aligned} \sin 18^\circ &= \sin \frac{\pi}{10} = \frac{\sqrt{5} - 1}{4} = \cos 72^\circ \\ \sin 30^\circ &= \sin \frac{\pi}{6} = \frac{1}{2} = \cos 60^\circ \\ \sin 36^\circ &= \sin \frac{\pi}{5} = \frac{\sqrt{5} - \sqrt{5}}{2\sqrt{2}} = \cos 54^\circ \\ \sin 45^\circ &= \sin \frac{\pi}{4} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \cos 45^\circ \\ \sin 54^\circ &= \sin \frac{3\pi}{10} = \frac{\sqrt{5} + 1}{4} = \cos 36^\circ = \cos \frac{2\pi}{10} = \frac{\phi}{2} \end{aligned}$$

## 12.4. მოლეკულური სტრუქტურების ფორმირების პრინციპები

**ქიმიური კავშირი** – ქიმიის უმნიშვნელოვანესი ცნება, რომელიც შესაძლებლობას იძლევა უფრო დეტალურად აღიწეროს შენაერთებების ქიმიური თვისებები, და ასევე მათი აგებულება და ფიზიკური თვისებები. ქიმიური კავშირი – ეს ატომების ურთიერთობაა, რომელიც ემსახურება ქიმიური ნაწილაკის ან კრისტალის მდგრადობას. ქიმიური კავშირი ყალიბდება დამუხტულ ნაწილაკებს შორის ელექტროსტატიკური ურთიერთობის გამო: კათიონები და ანიონები, ბირთვები და ელექტრონები. ატომების ერთმანეთთან მიახლოებისას ერთი ატომის ბირთვისა და მეორე ატომის ელექტრონებს შორის იწყებენ მოქმედებას მიზიდულობის ძალები. აგრეთვე იწყება განზიდვის ძალების ამოქმედება მეზობელი ატომების ბირთვებსა და ელექტრონებს შორის. რაღაც მანძილზე ეს ძალები აწონასწორებენ ერთმანეთს, და წარმოიქმნება მდგრადი ქიმიური კავშირი.

ქიმიურ კავშირს გააჩნია შემდეგი ძირითადი მახასიათებლები:

1. როგორც უკვე აღინიშნა **კავშირის ენერჯიას** უწოდებენ იმ ენერჯიას, რომელიც უნდა დაიხარჯოს მის გაწყვეტად. ეს სიდიდე განაპირობებს კავშირის სიმყარეს. რაც მეტი ენერჯია იხარჯება კავშირის გაწყვეტაზე, მით უფრო მეტია მისი სიმყარე. კავშირის ენერჯია იზომება კჯ/მოლზე ან კკალ/მოლზე. მაგალითად, H — H კავშირის ენერჯია წყალბადის მოლეკულაში 436 კჯ/მოლ-ის ტოლია. თუ მოლეკულას რამდენიმე ერთნაირი კავშირი გააჩნია, მაშინ ყოველი შემდეგი კავშირის გასარღვევად საჭირო იქნება განსხვავებული ენერჯიის რაოდენობა. ამ შემთხვევაში საუბრობენ კავშირის საშუალო ენერჯიაზე.
2. **კავშირის სიგრძე** – მანძილი შენაერთის ატომებს შორის (ნმ, Å)<sup>66</sup>.
3. **კავშირის პოლარულობა** – ელექტრონული ღრუბლის წანაცვლება შედარებით ელექტროუარყოფითი ატომისაკენ.
4. **ვალენტური კუთხეები** – ეს არის კუთხეები მოლეკულის კავშირებს შორის. სტერეოტურად ისინი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც კუთხეები იმ წრფეებს შორის რომლებიც აერთებენ მოლეკულაში შემავალი ატომების ბირთვებს. ორ ბირთვებზე გატარებულ ამ წარმოსახვით სწორ ხაზებს, **კავშირის წრფეებს** უწოდებენ. ვალენტური კუთხეების სიდიდე ატომის ბუნებაზე და კავშირის ხასიათზეა დამოკიდებული. მარტივ ორატომიან მოლეკულებს ყოველთვის გააჩნიათ წრფიული სტრუქტურა. სამატომიან და უფრო რთულ მოლეკულებს შეიძლება ჰქონდეთ განსხვავებული კონფორმაციები. მაგალითად, წყლის მოლეკულაში კუთხე H — O კავშირების წრფეებს შორის შეადგენს 104,5°, ხოლო მსგავს გოგირთწყალბადის მოლეკულაში ვალენტური კუთხე კავშირებს შორის შეადგენს 92°. კავშირების სიგრძეების და ვალენტური კუთხეების ერთობლიობა განსაზღვრავს ქიმიური ნაერთების სივრცულ აგებულობას.
5. **გაჯერება** – ატომის თვისება შექმნას სხვა ატომებთან კავშირების არა ნებისმიერი, არამედ გარკვეული რაოდენობა.
6. **მიმართულობა** – თვისება, რომელიც დამოკიდებულია ატომური ორბიტალების (AO) გადაფარვის მიმართულებაზე. σ-კავშირები (სიგმა-კავშირები) წარმოიქმნება AO გადაფარვისას ატომების ბირთვების გამაერთიანებელი კავშირების წრფეების გასწვრივ; π-კავშირი (პი-კავშირი) წარმოიქმნება AO გადაფარვისას კავშირების წრფეების გარეთ.
7. **კავშირების ჯერადობა** – კავშირთა რაოდენობა ორი ელემენტის ატომთა შორის. რაც მეტია კავშირის ჯერადობა, მით მეტია მისი ენერჯია და ნაკლებია კავშირის სიგრძე.

<sup>66</sup> 1Å = 0,158 = 10<sup>-10</sup>მ

ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში (ცხრილი 13) წარმოდგენილია კოვალენტური კავშირების ძირითადი ტიპები (ძირითადად ნახშირბადის ატომებისათვის).

ცხრილი 13

კავშირი	C ატომის ჰიბრიდიზაცია	კავშირის ენერგია		კავშირის სიგრძე Å	დიპოლური მომენტი P
		კჯ/მოლ	კკალ/მოლ		
C — C	sp <sup>3</sup>	348	83	1.54	0
C = C	sp <sup>2</sup>	620	148	1.33	0
C ≡ C	sp	814	194	1.2	0
C — H	sp <sup>3</sup>	414	100	1.1	0.2
C — H	sp	435	104	1.07	1.1
C — O	sp <sup>3</sup>	344	82	1.43	1.1
C = O	sp <sup>2</sup>	708	170	1.21	2.4
C — Cl	sp <sup>3</sup>	331	79	1.76	2.05
C — Br	sp <sup>3</sup>	277	66	1.94	2.04
C — N	sp <sup>3</sup>	293	70	1.47	0.4
O — H	-	460	110	0.96	1.51
N — H	-	390	93	1.01	1.4

განვსაზღვროთ უფრო დაწვრილებით კოვალენტური კავშირი (CB – Covalent Bond). მისი შექმნის პირობები და მექანიზმები, მისი თვისებები, სიმყარის კრიტერიუმი. CB – ეს კავშირია, რომელიც ხორციელდება ორივე ატომის ელექტრონულ წყვილთა მეშვეობით.

**CB-ის შექმნის პირობები**

CB იქმნება მაღალი ელექტროუაყოფითობის<sup>67</sup> მქონე ატომებს შორის.  $\Delta X$  – ორი ატომის ელექტროუაყოფითობის სხვაობაა, თუ  $\Delta X \leq 1,4$ , კავშირი პოლარულია.

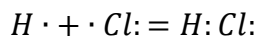
კოვალენტური კავშირი წარმოიშობება:

1. არამეტალების ნებისმიერ ატომებს შორის (ვინაიდან ყველა არამეტალს ახასიათებს მაღალი ელექტროუაყოფითობის მნიშვნელობები). მაგალითად, HCl-ის; ელექტროუაყოფითობის მნიშვნელობები ცხრილების მიხედვით:  $H = 2,1$ , ხოლო  $Cl = 3,1$ , ამიტომაც  $\Delta X = 3,1 - 2,1 = 1 \leq 1,4$  ეს კოვალენტური და პოლარული კავშირია.
2. არამეტალის და მეტალის ატომებს შორის, თუ კი მეტალი ჟანგვის მაღალ ხარისხში იმყოფება. მაგალითად, CrCl<sub>6</sub> – ქრომის ელექტროუაყოფითობა  $Cr = 2,4$ , მაშინ  $\Delta X = 3,1 - 2,4 = 0,7 \leq 1,4$

ეს კოვალენტური და პოლარული კავშირია.

**CB-ის შექმნის მექანიზმები**

1. **გაცვლითი მექანიზმი** – 2 ატომი მიმოიცვლიან ელექტრონებს, რითიც იქმნება საერთო ელექტრონული წყვილი, რომელიც ორივე ატომს ეკუთვნის და რომელსაც „გაყოფილი“ ჰქვია. მაგალითისათვის გამოდგება აორთქლადი არაორგანული შენაერთები: HCl, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> და სხვა. HCl მოლეკულის შექმნა შეიძლება გამოისახოს სქემაში

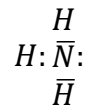


ელექტრონული წყვილი წანაცვლებულია ქლორის ატომისკენ, ვინაიდან ქლორის ატომის შეფარდებითი ელექტროუაყოფითობა (2,83) წყალბათისაზე (2,1) მეტია.

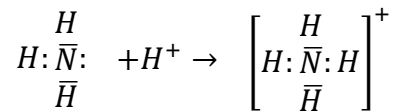
2. **დონორულ-აქცეპტორული მექანიზმი** – მდგომარეობს იმაში, რომ ერთი ატომის (დონორის) ელექტრონების წყვილი იკავებს მეორე ატომის (აქცეპტორის) თავისუფალ ორბიტალს. მაგალითისათვის განვიხილოთ ამონიუმის იონის NH<sub>4</sub><sup>+</sup> შექმნის

<sup>67</sup> ელექტროუაყოფითობა – არის ატომების უნარი მიიზიდონ ელექტრონები.

მექანიზმი. ამიაკის მოლეკულაში აზოტის ატომს გააჩნია ელექტრონების გაუზიარებელი წყვილი (ორ ელექტრონიანი ღრუბელი).



წყალბადის იონს გააჩნია თავისუფალი (შეუვსებელი) 1s-ორბიტალი, რაც შეიძლება აღინიშნოს როგორც  $H^+$ . ამონიუმის იონის წარმოქმნისას აზოტის ორელექტრონიანი ღრუბელი მისთვის და წყალბადისათვის საერთო ხდება, ანუ ის მოლეკულურ ელექტრონულ ღრუბლად იქცევა. ეს კი ნიშნავს, რომ წარმოიქმნება მეოთხე კოვალენტური კავშირი. ამონიუმის იონის წარმოქმნის პროცესი შეიძლება წარმოვადგინოთ სქემით:



წყალბადის იონის მუხტი საერთო ხდება (ის დელოკალიზებულია, ანუ განთავსებულია ყველა ატომებს შორის), ხოლო ორელექტრონიანი ღრუბელი (ელექტრონების გაუზიარებელი წყვილი), რომელიც აზოტს ეკუთვნის, წყალბადთან საერთო ხდება.

კოვალენტური კავშირი შეიძლება იყოს პოლარული (რთული მოლეკულები) და არაპოლარული (მარტივი მოლეკულები).

### კოვალენტური კავშირის თვისებები

კოვალენტურ კავშირს გააჩნია რიგი მნიშვნელოვანი თვისებებისა. მათ შორის არიან: გაჯერება და მიმართულობა.

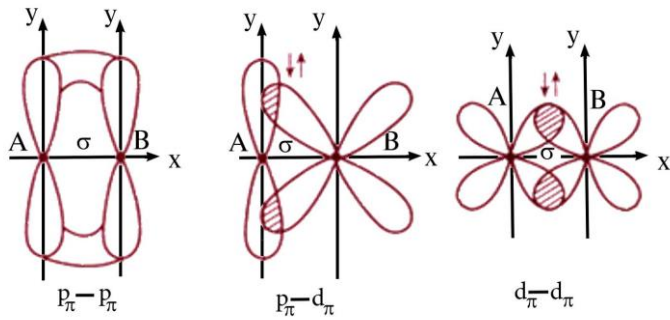
**გაჯერება** – კოვალენტური კავშირის თავისებური თვისება. ეს თვისება ვლინდება ატომების უნარში წარმოქმნან კოვალენტური კავშირების შეზღუდული რაოდენობა. ეს იმითაა განპირობებული, რომ ატომის ერთ ორბიტალს შეუძლია მიიღოს მონაწილეობა მხოლოდ ერთი კოვალენტური ქიმიური კავშირის შექმნაში. მოცემული თვისება განაპირობებს ქიმიური შენაერთების მოლეკულურ შემადგენლობას. ასე მაგალითად, წყალბადის ატომების ურთიერთობისას წარმოიქმნება  $H_2$ , და არა  $H_3$  მოლეკულა. წყალბადის მესამე ატომი ვერ მიუერთდება მოლეკულას, ვინაიდან მისი ელექტრონის სპინი აღმოჩნდება მოლეკულის ერთ-ერთი შეწყვილებული ელექტრონის სპინის პარალელური. ამა თუ იმ რაოდენობის კოვალენტური კავშირების შექმნის უნარი სხვადასხმა ელემენტების ატომებში, შეზღუდულია მაქსიმალური რაოდენობის შეუწყვილებული ვალენტური ელექტრონის მიღებით.

**მიმართულობა** – ესაა კოვალენტური კავშირის თვისება, რომელიც განაპირობებს მოლეკულის გეომეტრიულ სტრუქტურას. კავშირის მიმართულობის მიზეზი მდგომარეობს იმაში, რომ ელექტრონული ორბიტალების გადაფარვა შესაძლებელია მხოლოდ გარკვეული ურთიერთ ორიენტაციის შემთხვევაში, რომელიც უზრუნველყოფს ელექტრონული სიმკვრივის მაქსიმუმს მათი გადაფარვის მიდამოში. ამ შემთხვევაში წარმოიქმნება ყველაზე მტკიცე ქიმიური კავშირი.

### ატომური ორბიტალების გადაფარვა, როგორც კავშირის წარმოქმნის პირობა.

ქიმიური კავშირები ატომებს შორის განისაზღვრება ელექტრონული ღრუბლების გადაფარვით. ატომური ორბიტალების გადაფარვას მათი ბირთვების დამაკავშირებელი წრფის გასწვრივ, მივყვართ  $\sigma$ -კავშირების წარმოქმნასთან. ქიმიური შენაერთის ორ ატომს შორის შესაძლებელია მხოლოდ ერთი  $\sigma$ -კავშირი. ყველა  $\sigma$ -კავშირს გააჩნია ღერძული სიმეტრია ბირთვთაშორისი ღერძის მიმართ. მიმართული, სივრცეში მკაცრად ორიენტირებული  $\sigma$ -კავშირების ერთობლიობა ქმნის ქიმიური შენაერთის სტრუქტურას.

კავშირის წრფის პერპენდიკულარული ატომური ორბიტალების დამატებითი გადაფარვით წარმოიქმნება  $\pi$ -კავშირები (იხ. სურ. 56).



სურ. 56.  $\pi$ -კავშირების წარმოქმნა

ორი ატომის კავშირი შეიძლება განხორციელდეს ელექტრონების ორზე მეტი წყვილით. შედეგად, ატომებს შორის წარმოიქმნება ჯერადი კავშირები:

ერთმაგი ( $\sigma$ )	ორმაგი ( $\sigma + \pi$ )	სამმაგი ( $\sigma + \pi + \pi$ )
F - F	O = O	N $\equiv$ N

რაოდენობრივად, კვანტური მექანიკის კანონების საფუძველზე, კოვალენტური კავშირების აღწერა შეიძლება შემდეგი პარამეტრების მეშვეობით:  $E_{bind}$  (კავშირის ენერგია),  $r_{bind}$  (კავშირის რადიუსი),  $\angle_{ABC}$  (კუთხე კავშირებს შორის). ამ კავშირის ანალიზისათვის საჭიროა შრედიინგერის განტოლების ამოხსნა, ანუ საჭიროა ტალღური  $\Psi$  ფუნქციების პოვნა მოლეკულის იმ ვალენტური ელექტრონებისათვის, რომლებიც კავშირის შექმნაში მონაწილეობენ. მიიღება ინფორმაცია სივრცეში ელექტრონული სიმკვრივის განაწილების შესახებ და განისაზღვრება  $E_{bind}$ -ის მნიშვნელობა. ამისათვის გამოიყენება მიახლოებითი გამოთვლების მეთოდი, ეგრე წოდებული ვარიაციული მეთოდი. ეს მეთოდი შემდეგში მდგომარეობს:

აიღება ნებისმიერი ტალღურ ფუნქცია  $\Psi_{first}$  (პირველი მიახლოების ფუნქცია) და გამოითვლება სისტემის ენერგია  $E$  შემდეგ შეიცვლება ტალღური ფუნქცია და კვლავ ითვლება სისტემის ენერგია  $E$  (ტარდება ენერგიის მინიმიზირება  $\Psi$ -ფუნქციის ცვლილების საფუძველზე):

$$E \rightarrow E_{min} \quad (\Psi_{first} \rightarrow \Psi_{mol}) \quad E_{min} \equiv E_{bind} \Rightarrow E_{mol}$$

$\Psi_{mol}$  - ელექტრონების „ჭეშმარიტი“ ტალღური ფუნქცია მოლეკულაში.

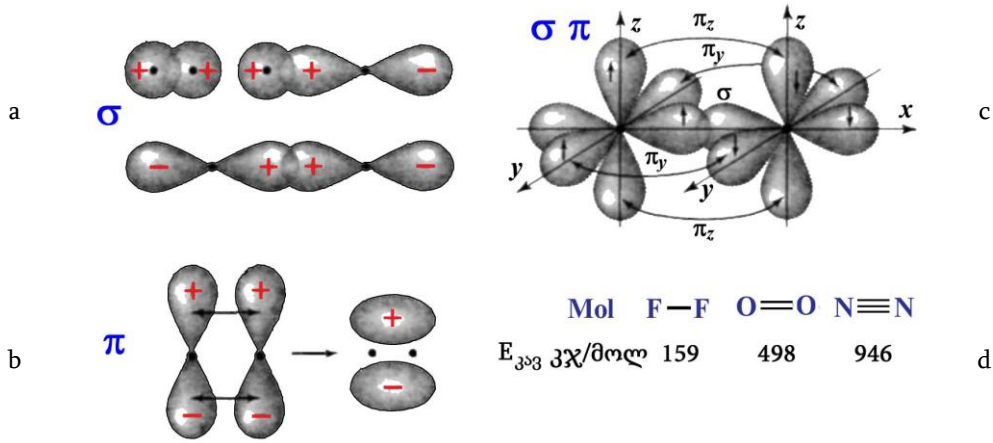
პირველი მიახლოების ტალღური ფუნქციის ( $\Psi_{first}$ ) აღების (ამორჩევის) წესის მიხედვით კოვალენტური კავშირის აღწერა შეიძლება ორი მეთოდით:

1. ვალენტური კავშირების მეთოდი (ვკმ)
2. მოლეკულური ორბიტალების მეთოდი (მომ)

განვიხილოთ უფრო დაწვრილებით მოლეკულაში ერთმაგი, ორმაგი და სამმაგი კოვალენტური ბმების წარმოქმნა  $\sigma$  და  $\pi$ -მოლეკულური ორბიტალების გამოყენებით.

### $\sigma$ და $\pi$ -მოლეკულური ორბიტალების წარმოქმნა.

ქიმიური კავშირი წყალბადის მოლეკულაში ხორციელდება ელექტრონული წყვილით, რომლის ღრუბელი კონცენტრირებულია ატომების ბირთვებს შორის. ასეთი ტიპის კავშირებს  $\sigma$ -კავშირებს უწოდებენ (სურ. 57a,b,c).



სურ. 57. (a)  $\sigma$ -კავშირებს სახეობები: 1 – s-ორბიტალების გადახურვა ( $H_2$ ); 2 – s- და p-ორბიტალების გადახურვა ( $HCl$ ); 3 – p-ორბიტალების გადახურვა ( $Cl_2$ ). (b)  $\pi$ -მოლეკულური ორბიტალის წარმოქმნა. (c) ატომური ორბიტალების გადაფარვის მოდეული  $N_2$  მოლეკულაში. (d) ერთმაგი, ორმაგი და სამმაგი კოვალენტური კავშირის ენერგიები.

კიდევ ერთი ელექტრონული წყვილისათვის ადგილი ატომებს შორის აღარ რჩება. როგორ და წარმოიშვება ორმაგი და მითუმეტეს სამმაგი კავშირები? თურმე შესაძლოა ატომის ცენტრებზე გასული ღერძის პერპენდიკულარულად ორიენტირებული ელექტრონული ღრუბლების გადაფარვა (სურ. 57d). თუ მოლეკულის ღერძს დავამთხვევთ x კოორდინატასთან მაშინ მის პერპენდიკულარულად მოხდება  $p_y$  და  $p_z$  ორბიტალების ორიენტირება. ორი ატომის  $p_y$  და  $p_z$  ორბიტალების წყვილ წყვილად გადაფარვა, გვაძლევს მოლეკულურ ორბიტალებს, რომლებიც მოლეკულის ღერძის ორივე მხრიდან სიმეტრიულად განლაგებული ორი ნაწილისაგან შედგება. მათ  $\pi$ -*ორბიტალები* ეწოდება.

თუ კი ატომებს  $p_y$  და/ან  $p_z$  ორბიტალებზე არაშეუღლებული ელექტრონები გააჩნიათ, მაშინ წარმოიქმნება ერთი ან ორი  $\pi$ -კავშირი. სწორედ ამით აიხსნება ორმაგი ( $\sigma+\pi$ ) და სამმაგი ( $\sigma+\pi+\pi$ ) კავშირების არსებობა. სურ. 57c-ზე მოყვანილია ორბიტალების გადაფარვის მოდეული აზოტის მოლეკულაში  $N_2$ , რომელსაც გააჩნია სამმაგი კავშირი ატომებს შორის. ელექტრონული წყვილები აზოტის s-ორბიტალზე ნაჩვენებია არ არის.

$\pi$ -კავშირების შექმნისას მოლეკულის სიმყარე მატულობს. შევადაროთ ფტორის, ჟანგბადის და აზოტის მოლეკულები (სურ. 57d).

სამმაგი კავშირის მქონე აზოტის მოლეკულა ყველაზე მყარია. ამის გამო აზოტი დიდი გაჭირვებით შედის ქიმიურ რეაქციებში. მცენარეების საკვებად აუცილებელია აზოტი (როგორც ქიმიური ელემენტი), მაგრამ მცენარეებს არ შეუძლიათ მისი ატმოსფეროდან ათვისება. ამას კი მოსდევს აზოტის სასუქების გამოყენების აუცილებლობა. ჟანგბადს გააჩნია ნაკლებად მყარი ორმაგი კავშირი, ამიტომაც ის გაცილებით უფრო ადვილად შედის ქიმიურ რეაქციებში, მაგრამ უნდა გავიხსენოთ, რომ არც ისე აქტიურია, რომ მის თანხლებით (ჰაერში) თავისით ააღდეს ხის ნაგებულობები, და ყველანაირი ორგანული ნაერთ. ჟანგბადი საკმაოდ აქტიურია სიცოცხლის შენარჩუნებისათვის და ზომიერად ინერტულია იმისათვის, რომ ყელა ცოცხალი ობიექტი ნახშირორჟანგში და წყალში არ გადააქციოს. ფტორის და აგრეთვე სხვა ჰალოგენების მოლეკულებში ქიმიური კავშირები ერთმაგია. ეს კავშირები ადვილად ირღვევა გარე ზეგავლენის დროს. ამის გამო, ჰალოგენები ამჟღავნებენ ძალზე მაღალ ქიმიურ აქტივობას. ჰაერში მოხვედრისას ისინა მალევე რეაგირებენ ორგანულ ნივთიერებებთან. ამიტომაც ჰალოგენების გარემოცვაში ზიანდებიან და იღუპებიან მცენარეები. მძიმე მოწამლეულობა შეიძლება მიიღოს

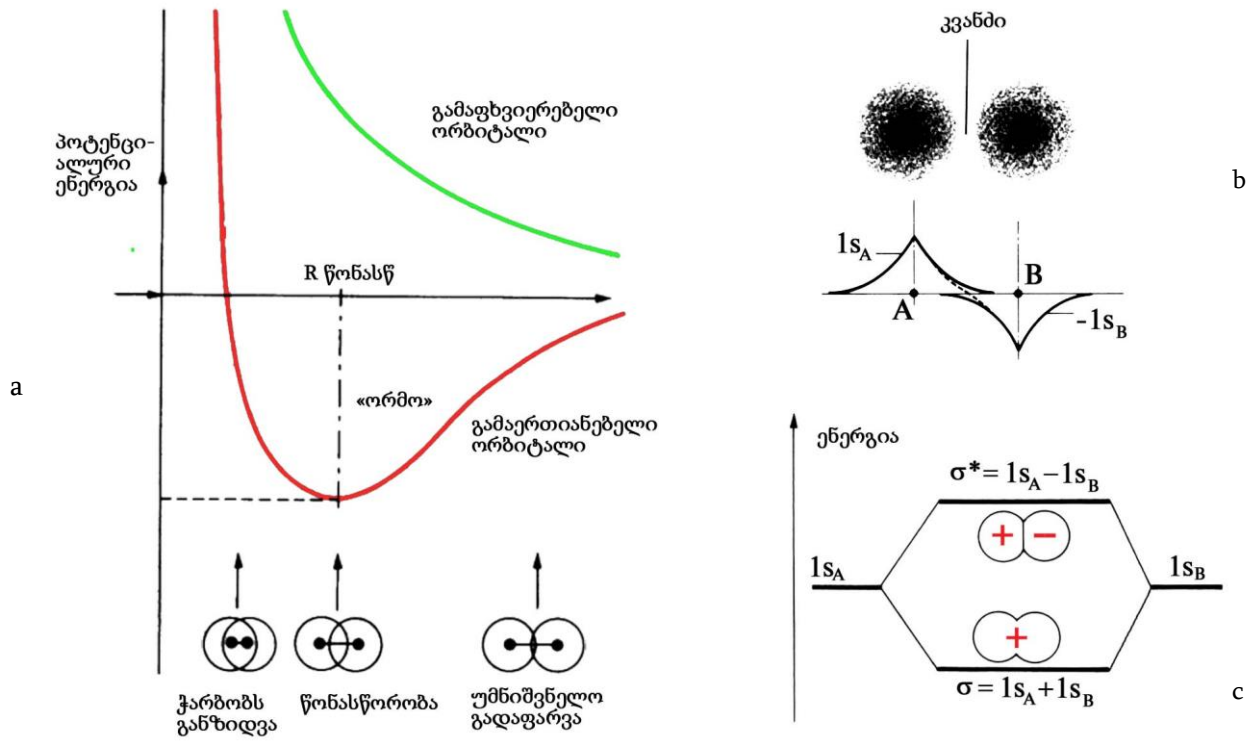
ადამიანმაც, თუ შეისუნთქავს ჰალოგენების შემცავ ჰაერს მაშინაც, როდესაც მათი კონცენტრაცია შეადგენს გრამების წილებს კუბურ მეტრში. ამ მაგალითებიდან აშკარად ჩანს დამოკიდებულება ნივთიერებების კავშირების სიმყარისა და მათი ქიმიური აქტივობის შორის.

**შემაკავშირებელი და გამაფხვიერებელი ორბიტალები.**

მოლეკულური ( $1s_A + 1s_B$ )-ორბიტალის შექმნისას, ორი ატომური ორბიტალი იმყოფება დადებით (კონსტრუქტიულ) ინტერფერენციაში, ანუ მათი ურთიერთობა წარიმართება ფაზაში. ელექტრონი, რომელიც იკავებს ამ ორბიტალს აერთიანებს ორ ბირთვს ერთიან სისტემაში, მაგრამ ერთმანეთთან მჭიდრო კონტაქტში შესვლა ბირთვებს არ შეუძლიათ. ეს განპირობებულია ორი მიზეზით:

**პირველი** – ძალზე მცირე ბირთვთაშორისი მანძილის შემთხვევაში, ელექტრონს უბრალოდ არ ჰყოფნის ადგილი რომ მოთავსდეს ორ ბირთვს შორის, და მისი დამაკავშირებელი ეფექტი მცირდრბა.

**მეორე** – მანძილის შემცირებისას იზრდება ბირთვების განზიდვის ძალა, რომელმაც ბოლო ბოლო უნდა გადააჭარბოს ელექტრონების დამაკავშირებელ მოქმედებას.



სურ. 58. (a)  $H_2^+$  იონის პოტენციალური ენერჯიის მრუდები. (b) ანტიდამაკავშირებელი (გამაფხვიერებელი) მოლეკულური ორბიტალის შექმნა. (c)  $1s$ -ორბიტალიდან შექმნილი მოლეკულური ორბიტალების ენერგეტიკული დონეების დიაგრამა.

ნებისმიერი ბირთვთაშორისი მანძილისათვის შეიძლება გამოითვალოს მოლეკულის საერთო ენერჯია; მიღებული დამოკიდებულება ცნობილია როგორც მოლეკულის *პოტენციალური ენერჯიის მრუდი* (სურ. 58a). ამ მრუდზე აღინიშნება მინიმუმი („ორმო“), რომელიც შეესაბამება მოლეკულის სტაბილურ მდგომარეობას ბირთვთაშორისი მანძილით  $R_{წონასწო}$ , რომელსაც *კავშირის წონასწორული სიგრძე* ეწოდება (ან უბრალოდ *კავშირის სიგრძე*;  $H_2^+$  იონში  $R_{წონასწო} = 1,06 \text{ \AA}$ ). შესაბამისად განმარტებისა: მოლეკულურ ორბიტალს ეწოდება დამაკავშირებელი, თუ კი მისი ელექტრონებით დასახლებას მოლე-



კულის საერთო ენერჯის შემცირება მოყვება,  $(1s_A + 1s_B)$  -ორბიტალი წარმოადგენს დამაკავშირებელ მოლეკულურ ორბიტალს.

შეიძლება  $H_2^+$  იონის სხვა მოლეკულური ორბიტალის მოდელირებაც. ეს ორბიტალი წარმოადგენს შრედიანგერის განტოლების შემდეგ ზუსტ ამონახსენს. მოდელირება შეიძლება საწინააღმდეგო ფაზაში  $1s_A$  და  $1s_B$  ორბიტალების კომბინირებით (სურ. 58a). ეს კომბინაცია ჩაიწერება როგორც  $1s_A - 1s_B$ , რაც სრულიად ეკვივალენტურია ჩანაწერისა  $1s_B - 1s_A$ , ვინაიდან ტალღური ფუნქციის ნიშნის ამორჩევა ნებისმიერია. ამ შემთხვევაში გადაფარვის მიდამოში შეინიშნება ორი ატომის ორბიტალების უარყოფითი (დესტრუქტიული) ინტერფერენცია, რის გამოც ელექტრონი, რომელიც  $1s_A - 1s_B$  ორბიტალზე იმყოფება, არ იკავებს ადგილს ბირთვებს შორის. ელექტრონის განაწილების ალბათობა გამოსახება შემდეგნაირად:

$$(1s_A - 1s_B)^2 d\tau = (1s_A)^2 d\tau + (1s_B)^2 d\tau - 2(1s_A)(1s_B) d\tau$$

პრინციპული განსხვავება ამ და შემაკავშირებელ ორბიტალებს შორის იმაში მდგომარეობს, რომ მასში, მოყვანილი ფორმულის მესამე წევრი უარყოფითია, ანუ ელექტრონული სიმკვრივე ბირთვთაშორის სივრცეში მცირდება (სურ. 58b). კავშირის შუაწერტილზე გავლილ სიბრტყეში, სადაც  $1s_A$  და  $1s_B$  ორბიტალებს ერთნაირი ამპლიტუდები გააჩნიათ, მაქსიმალურად ვლინდება უარყოფითი ინტერფერენცია და ამიტომაც ორბიტალში წარმოიქმნება კვანძი. ელექტრონი, რომელსაც უკავია  $(1s_A - 1s_B)$ -ორბიტალი ცდილობს „მისწი-მოსწიოს“ ბირთვები. ნაწილობრივ ეს იმითაა განპირობებული, რომ თითქმის აღარ არსებობს ბირთვთაშორისი სივრცე, და ელექტრონი ძირითადად იმყოფება ატომების გარედ, და ამიტომაც ცდილობს გაწელოს კავშირი, რათა შეაღწიოს ატომების შიგნითაც. ამის შედეგად  $(1s_A - 1s_B)$ -ორბიტალი ანტიდამაკავშირებელია (სხვა სახელი – გამაფხვიერებელი ორბიტალი).

**მოლეკულურ ორბიტალს ანტიდამაკავშირებელი (გამაფხვიერებელი) ჰქვია, თუ მისი ელექტრონებით დასახლება იწვევს მოლეკულის საერთო ენერჯის ზრდას.** ამ ორბიტალის ენერჯის დამოკიდებულება ბირთვთაშორის მანძილზე მოყვანილია სურ. 58a-ზე (მწვანე ფერის მრუდი).

სურ. 58c-ზე მოყვანილია დამაკავშირებელი და გამაფხვიერებელი ორბიტალების ენერჯები ბირთვთაშორის  $R_{წონასწო}$  მანძილის შემთხვევაში. ეს მოლეკულური ორბიტალების ენერჯეტიკული დონეების ტიპიური დიაგრამაა.  $\sigma$  სიმბოლოთი აღნიშნავენ ბირთვთაშორისი ღერძის მიმართ ცილინდრული სიმეტრიის მქონე ორბიტალებს ( $s$ -ატომური ორბიტალის ანალოგიურად); ვარსკვლავით ( $\sigma^*$ ) აღნიშნავენ გამაფხვიერებელ  $\sigma$ -ორბიტალებს.

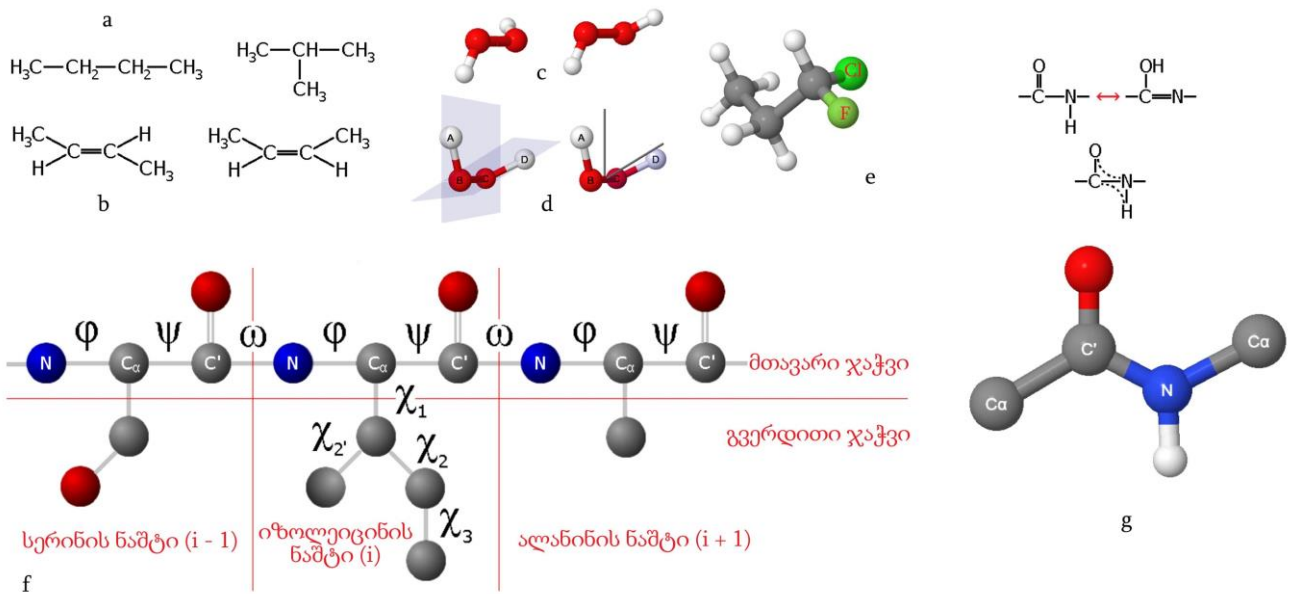
ორი ატომური ორბიტალის ურთიერთობის შემთხვევაში, მიიღება ორი ახალი მოლეკულური ორბიტალი: ქვედა, დამაკავშირებელი მოლეკულური ორბიტალი წარმოიქმნება ფაზაში მყოფი ატომური ორბიტალების გადაფარვით, ხოლო ზედა, ანტიდამაკავშირებელი მოლეკულური ორბიტალი – საწინააღმდეგო ფაზაში მყოფი ატომური ორბიტალების გადაფარვით. ამრიგად, ანტიდამაკავშირებელ მოლეკულურ ორბიტალს გააჩნია ერთი კვანძით მეტი, ვიდრე დამაკავშირებელს, ანუ მისი ენერჯია უფრო მაღალია.

უნდა გვახსოვდეს, რომ მოლეკულური სტრუქტურების და რათქმაუნდა მაკრომოლეკულების ფორმირებისას, ატომის თავისუფლების ხარისხების რაოდენობა განისაზღვრება კავშირის ხასიათით. თუ ეს ორმაგი ან სამმაგი კავშირებია, მაშინ ატომებს არ ექნებათ თავისუფლების ხარისხის ბრუნვითი ღერძი. თუ კი კავშირი ერთმაგია, მაშინ ატომებს შეუძლიათ მის გარშემო ბრუნვა და ამით მიიღება მაკრომოლეკულების სტრუქტურის განმსაზღვრავი დამატებითი პარამეტრი. განვიხილოთ უფრო დაწვრი-

ლებით ატომის ბრუნვასთან დაკავშირებული რთული მოლეკულური სისტემების ფორმირების შესაძლებლობები.

**ტორსიონული კუთხეები და რამაჩანდრანის რუკები.**

მოლეკულების სტრუქტურის აღწერისას გამოიყენება „კონფიგურაციის“ და „კონფორმაციის“ ცნებები. **კონფიგურაცია** განისაზღვრება ატომთა ნაკრებით (ანუ რა ატომები შედიან სტრუქტურაში) და მათი ამ სტრუქტურაში ჩართვის თანმიმდევრობით. ასე, მაგალითად, სურ. 59a-ზე მოყვანილ ბუტანს და იზობუტანს გააჩნიათ განსხვავებული კონფიგურაცია (ვინაიდან, ატომთა ნაკრები ერთია, მაგრამ სტრუქტურაში ჩართვის თანმიმდევრობა – განსხვავებული). **კონფორმაცია** განისაზღვრება ატომების ურთიერთ განლაგებით სივრცეში. სურ. 59b-ზე მოყვანილ ცის-ბუტილენს და ტრანს-ბუტილენს გააჩნიათ ერთნაირი კონფიგურაცია, მაგრამ განსხვავებული კონფორმაცია.



სურ. 59. მოლეკულის კონფორმაცია და ტორსიონული კუთხეები.

კონფორმაციის აღწერის ერთ ერთ პარამეტრს წარმოადგენენ ვალენტური კუთხეები. ვალენტური კუთხე – კუთხე ერთსა და იმავე ატომზე მიბმულ ორ კავშირს შორის. ვალენტური კუთხე – ესაა ე.წ. ბრტყელი კუთხე; მისი განმსაზღვრავი კავშირები ერთ სიბრტყეში იმყოფებიან. მოლეკულების უმეტესობა შედგება ატომებისაგან, რომლებიც არ არიან ერთ სიბრტყეში. ამ შემთხვევაში ვალენტური კუთხეები არ გვამდლევენ მოლეკულის კონფორმაციის ცალსახა აღწერის საშუალებას. სურ. 59c-ზე მოყვანილ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> მოლეკულაში ყველა ვალენტური კუთხე 120°-ის ტოლია. მამასადამე, ამ მოლეკულებს გააჩნია ერთნაირი კონფიგურაცია და ერთნაირი ვალენტური კუთხეები, მაგრამ ამასთან, მათ ახასიათებთ განსხვავებული კონფორმაციები. როგორც არ უნდა ვატრიალოთ ეს მოლეკულები, ყველა ატომის ერთნაირი განლაგება სივრცეში ვერ მოხერხდება. არც თუ ისე რთულია განსხვავების ერთადერთი მიზეზის შემჩნევა: ორივე შემთხვევაში მოლეკულის ერთი ნახევარი თითქოს და დატრიალებულია მეორე ნახევრის მიმართ (კავშირი O – O-ბრუნვის ღერძია), და ორ მოლეკულაში ამ დახვევის მიმართულება განსხვავდება.

მოლეკულის კონფორმაციის ცალსახად განსაზღვრისათვის **ტორსიონულ კუთხეებს** გამოიყენებენ. ტორსიონული კუთხე (რაიმე კავშირის ირგვლივ) – ესაა ორწახნაგა კუთხე, რომელიც განსაზღვრავს კავშირის სხვადასხვა მხარეს მყოფ მოლეკულის ნაწილების

ურთიერთ შებრუნებას. ტორსიონული კუბების აღწერის მოსახერხებელ მოდელს წარმოადგენს ოთხატომიანი პირობითი სისტემა (A–B–C–D), როგორც ეს სურ. 59d-ზეა ნაჩვენები. ტორსიონული კუბზე B–C კავშირის ირგვლივ – ესაა ორწახნაგა კუთხე იმ სიბრტყეებს შორის რომლებშიც იმყოფებიან A,B,C და B,C,D ატომები. იგივე კუთხე შეიძლება განიმარტოს როგორც, კუთხე A–B და C–D კავშირების პროექციებს შორის, რომლებიც იმყოფებიან B–C-ს პერპენდიკულარულ სიბრტყეში.

კუთხის მნიშვნელობის ათვლას იწყებენ დამკვირვებლისადმი უახლოვეს კავშირიდან, მისთვის მოშორებულ კავშირამდე. თუ კი გონებრივი გადაადგილება უმოკლესი მანძილით უახლოვესი კავშირიდან მოშორებულ კავშირამდე სრულდება საათის ისრის მიმართულებით, კუთხე ითვლება დადებითად; თუ გადაადგილება საწინააღმდეგო მიმართულებისაა – უარყოფითად. ტორსიონული კუთხე არაა დამოკიდებული დამკვირვებლის „ცქერის“ მიმართულებაზე: ატომ „B“-ს, თუ ატომ „C“-ს მხრიდან. ამრიგად, ტორსიონულმა კუთხემ შეიძლება მიიღოს მნიშვნელობები  $-180^\circ$ -დან  $+180^\circ$ -მდე. ბუნებრივია, კიდური მნიშვნელობები:  $-180^\circ$  და  $+180^\circ$  — შეესაბამება ერთსა და იმავე კონფორმაციას.

იმ სიტუაციაში, როდესაც „B“ ან „C“ ატომიდან გამოდის რამოდენიმე კავშირი, კუთხის ათვლისათვის აირჩევენ იმ კავშირებს, რომლებიც უფრო მასიურ ატომთან ან ქიმიურ ჯგუფთან არიან დაკავშირებულნი. მაგალითად, სურ. 59e-ზე მოყვანილ მოლეკულისათვის, ათვლის დაწყება საჭიროა დავიწყით Cl-ის ატომიდან.

ცილის მოლეკულის კონფორმაციის აღწერისას მიღებულია ე.წ. მთავარი ჯაჭვის (ატომების, რომლებიც ჰქმნიან პოლიპეპტიდური ჯაჭვის „ჩონჩხს“ — ამინომჟავების ნაშტების  $N$ ,  $C_\alpha$  და  $C'$  ატომები) და გვერდითი ჯაჭვების (ამინომჟავების ნაშტების რადიკალები) გამოყოფა (იხ. სურ. 59f).

ტორსიონული კუთხეების (ისევე როგორც „ჩვეულებრივი“ კუთხეების) აღნიშვნა მიღებულია ბერძნული ასოებით. კუთხეები განისაზღვრება სურათზე შესაბამისი ასოებით აღნიშნული კავშირების ირგვლივ. კუთხეები მთავარი ჯაჭვის შემქმნელი კავშირების ირგვლივ აღინიშნება ასოებით:  $\phi$ ,  $\psi$  და  $\omega$ ; კუთხეები რადიკალების კავშირების ირგვლივ კი  $\chi$  ასოთი ციფრული ინდექსებით, რომლებიც აითვლება  $C_\alpha$  ატომიდან.

განვიხილოთ უფრო დაწვრილებით მთავარი ჯაჭვი (იხ. სურ. 59f). მე  $i$ -ე ამინომჟავის ნარჩენის  $\phi$  კუთხე ( $N - C_\alpha$ -ს ირგვლივ) გამოითვლება როგორც კუთხე  $C'_{i-1} - N_i$  და  $C'_{ai} - C'_i$  კავშირებს შორის;  $\psi$  კუთხე ( $C_\alpha - C'$ -ს ირგვლივ) —  $N_i - C_{ai}$  და  $C'_i - N_{i+1}$ -ს შორის. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, ტორსიონული კუთხის  $\phi$  ან  $\psi$ -ს განმსაზღვრავი ოთხივე ატომი, ეკუთვნის პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ჩონჩხს. ასეთი პრინციპი მართებულია არა მხოლოდ „ინტუიტიურად“, არამედ ფორმალურადაც – კუთხის დათვლისას ჩვენ ხომ უმსხვილეს ატომებს ან ატომების ჯგუფებს ვირჩევთ. ხო და მოცემულ შემთხვევაში, ჩვენი კუთხის ორივე მხარეს განლაგებული პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ორი ნაწილი შეიძლება განიხილოს როგორც გიგანტური „ქიმიური ჯგუფები“.

მიუხედავად იმისა, რომ კუთხე  $\omega$  ემორჩილება იმავე წესებს, ის შემთხვევით არ იყო იგნორირებული. საქმე იმაშია, რომ  $\omega$  – პრაქტიკულად კონსტანტაა. პეპტიდური ჯგუფის ტაუტომერიის<sup>68</sup> გამო, ბრუნვა პეპტიდური კავშირის ირგვლივ გართულებულია; პეპტიდური ჯგუფის ატომები ( $C = O$ ,  $N - H$ ) ერთ სიბრტყეში იმყოფებიან, იმავე სიბრტყეში იმყოფებიან მათთან დაკავშირებული ერთი მხრიდან  $C_\alpha$ , ხოლო მეორედან  $N$ -ის ატომები, და მაშასადამე  $\omega = 180^\circ$ .

<sup>68</sup> ტაუტომერია (ბერძ: იგივე და ზომა) – შექცევადი იზომერიის მოვლენა, რომლისას ორი ან მეტი იზომერი ადვილად გადადიან ერთმანეთში. ამასთან მყარდება ტაუტომერული წონასწორობა, და ნივთიერება ერთდროულად გარკვეულ თანაფარდობაში შეიცავს ყველა იზომერის მოლეკულას (ტაუტომერებს).

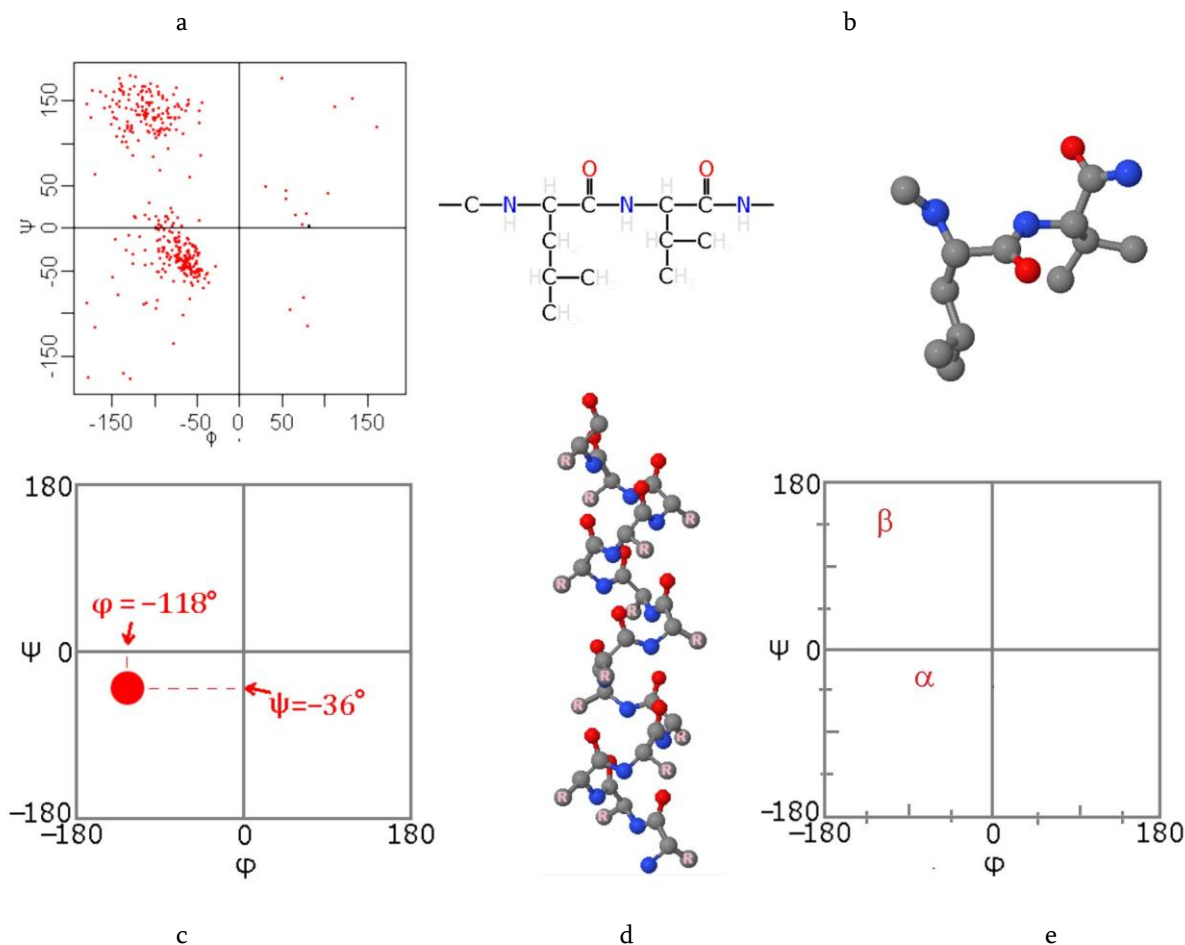
ტატომერია და პეპტიდური ჯგუფის ბრტყელი სტრუქტურა სურ. 59გ ნაჩვენები.

საკმაოდ აშკარაა, რომ ცილოვანი მოლეკულის სივრცული სტრუქტურა მთლიანობაში შეიძლება იყოს განსაზღვრული როგორც მთავარი ჯაჭვის კონფორმაცია. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, პოლიპეპტიდის სრული შესაძლო მოქნილობა უზრუნველყოფილია ქიმიური ჯგუფების ბრუნვით  $N-C_{\alpha}$  და  $C_{\alpha}-C'$  კავშირების ირგვლივ. ესე იგი, პოლიპეპტიდის კონფორმაციის აღწერა შეიძლება, როგორც  $\phi$  და  $\psi$  ტორსიონული კუთხეების ერთობლიობა ჯაჭვის ყველა ამინომჟავისათვის.

იმისათვის რომ ხაზი გაუსვათ ამ აზრის მნიშვნელობას, გავიმეოროთ ის ცილების სტრუქტურასთან მიმართებაში: ცილის მესამეული სტრუქტურა – ანუ გლობულის კონფორმაცია – შეიძლება განისაზღვროს, როგორც  $\phi$  და  $\psi$  ტორსიონული კუთხეების ერთობლიობა მის შემცავ ყველა ამინომჟავისათვის ნაშტისათვის.

პოლიპეპტიდური ჯაჭვის  $\phi$  და  $\psi$  კუთხეების მნიშვნელობების აღწერისათვის გამოიყენება განსაკუთრებული დიაგრამები – რამაჩანდრანის რუკები. როგორც წესი, რამაჩანდრანის რუკები აღწერენ ცილის მთელი მოლეკულების კონფორმაციას; რუკის ყოველი წერტილით აღინიშნება ერთი ამინომჟავის ნაშტი. წერტილის მდებარეობა ჰორიზონტალური მიმართულებით უჩვენებს  $\phi$  კუთხეს, ხოლო ვერტიკალურით –  $\psi$ . სურ. 60a-ზე მოყვანილია რამაჩანდრანის რუკა ფოსფორიბოზილტრანსფერაზასთვის.

მასალის უკეთესი ათვისებისთვის, ავაგოთ რამაჩანდრანის რუკა სურ. 60b-ზე მოყვანილ დიპეპტიდისათვის (ლეიცინალინი). სურ. 60c-ზე გამოსახულია ჩვენი „რუკის“ ნაშაბდი, რომელზეც მონიშნულია ლეიცინის ტორსიონული კუთხეების მნიშვნელობები  $\phi = -118^{\circ}$ ,  $\psi = -36^{\circ}$ .



სურ. 60. რამაჩანდრანის რუკის აგება.

ასეთი წესით განისაზღვრება  $\varphi$  და  $\psi$  კუთხეები ცილის ყველა ამინომჟავის ნაშტისათვის და მიიღება ზემოდ უკვე განხილული სახის რუკები. უნდა აღინიშნოს, რომ რამაჩანდრანის რუკები ცალსახად არ განსაზღვრავენ ცილის მესამეულ სტრუქტურას, ვინაიდან არ გვიჩვენებენ ამინომჟავების ურთიერთმიერთების თანმიმდევრობას. ის მხოლოდ საშუალებას იძლევა დავინახოთ თუ ამინომჟავების რომელი კონფორმაცია ჭარბოს ცილაში. პრაქტიკაში რამაჩანდრანის რუკები გამოიყენება ცილაში ამა თუ იმ მეორეული და ზემეორეული (ანუ სტრუქტურული მოტივების) სტრუქტურების არსებობის დემონსტრირებისთვის. მოკლედ რომ ითქვას, რამაჩანდრანის რუკები საშუალებას იძლევა მოიძებნოს ე.წ. **რეგულარული სტრუქტურები**.

რეგულარული სტრუქტურები ცილებში – ეს პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ის უბნებია, რომლებშიც ამინომჟავების ნაშტებს გააჩნია მსგავსი კონფორმაცია (იმ გაგებით, რომ მათი  $\varphi$  და  $\psi$  კუთხეები თითქმის ტოლია; რადიკალების კონფორმაცია არ განიხილება). რეგულარული სტრუქტურები – ეს მეორეული სტრუქტურების ნაირსახეობაა. რეგულარული სტრუქტურების მაგალითს წარმოადგენენ  $\alpha$ -სპირალები და  $\beta$ -შრები.

სურ. 60d-ზე მოყვანილია  $\alpha$ -სპირალის გამარტივებული სტრუქტურა. თუ კი შევეცდებით მისი ამინომჟავების ნაშტების  $\varphi$  და  $\psi$  კუთხეების მოძებნას, დავინახავთ, რომ მათი მნიშვნელობები სხვადასხვა ამინომჟავების ნაშტებისათვის თითქმის ერთნაირია და ეს მნიშვნელობები  $-40^\circ$ -დან  $-60^\circ$ -ის ფარგლებში იმყოფებიან.

შესაბამისად, მოცემული სტრუქტურის რამაჩანდრანის რუკაზე (იხ. სურ. 60e) მოხტება წერტილების კონცენტრირება გარკვეულ უბანში. წერტილების მნიშვნელოვანი რაოდენობის არსებობა ამა თუ იმ მეორეული სტრუქტურისათვის დამახასიათებელ უბანში, შესაძლებლობას იძლევა ვიმსჯელოთ ამ სტრუქტურის სიჭარბეზე ცილაში.

ქვემოთ მოყვანილია კუთხეების სტანდარტული მნიშვნელობები ცილების მეორეული სტრუქტურებისათვის:

ცხრილი 14

	$\varphi$	$\psi$
მარჯვნივმავლიანი $\alpha$ -სპირალი	$-57^\circ$	$-47^\circ$
პარალელური $\beta$ -შრე	$-119^\circ$	$+113^\circ$
ანტიპარალელური $\beta$ -შრე	$-139^\circ$	$+136^\circ$
მარცხნივმავლიანი $\alpha$ -სპირალი	$+57^\circ$	$+47^\circ$
სპირალი $\beta_{10}$	$-49^\circ$	$-26^\circ$
$\pi$ -სპირალი	$-57^\circ$	$-80^\circ$
პოლიპროლინის სპირალი	$-79^\circ$	$+150^\circ$
კოლაგენის სპირალი	$-51^\circ$	$+153^\circ$

ამრიგად, რამაჩანდრანის რუკები საშუალებას იძლევა საკმაოდ ნათლად გავნსაზღვროთ  $\alpha$ -სპირალების,  $\beta$ -შრების და სხვა რეგულარული სტრუქტურების არსებობა ცილაში.

**ატომური ორბიტალების ჰიბრიდიზაცია.**

ქიმიური შენაერთების გეომეტრიული ფორმის დადგენისას უნდა გავითვალისწინოთ, რომ გარე ელექტრონების წყვილები, მათ შორის იმ ელექტრონების, რომლებიც არ ჰქმნიან ქიმიურ კავშირს, განლაგდებიან სივრცეში რაც შეიძლება შორს ერთმანეთისაგან.

სხვადასხვა ტიპის მოლეკულური სტრუქტურების ფორმირებისას წარმოქმნილი წინააღმდეგობების ასახსნელად, 1928 წ ამერიკელმა ქიმიკოსმა, ნობელის პრემიის ლაურეატმა, ლაინუს პოლინგმა, ჩამოაყალიბა თავისი ჰიბრიდიზაციის თეორია (რეზონანსის

თეორია). პოლინგის მიერ შემოთავაზებული იდეა იმაში მდგომარეობდა, რომ მოლეკულა წარმოადგენს რეზონანსის, ანუ რამდენიმე სტრუქტურის ერთმანეთზე ზედების შედეგს. ამასთან, ყოველი ცალკეული სტრუქტურა აღწერს ქიმიური თვისებების და მოლეკულის აგების სხვადასხვა თავისებურებას. 1939 წ. გამოვიდა მისი შრომა „ქიმიური კავშირის ბუნება“. სხვადასხვა მეცნიერების წინ მდგარი პრობლემების გადასაწყვეტად პოლინგმა გამოიყენა კვანტური თეორია. ამან საშუალება მისცა აეხსნა ბევრი ფაქტი ერთიანი თეორიული პოზიციებიდან გამომდინარე.

ატომური ორბიტალების ჰიბრიდიზაციის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ჩართული ატომის ბირთვის მახლობლად მყოფი ელექტრონი ხასიათდება არა ცალკეული ატომური ორბიტალით, არამედ ატომური ორბიტალების კომბინაციით ერთიანი მთავარი კვანტური რიცხვით. ასეთ კომბინაციას ეწოდება ჰიბრიდული (ჰიბრიდიზირებული) ორბიტალი. როგორც წესი, ჰიბრიდიზაცია ეხება მხოლოდ ზედა და დაახლოებით ერთი ენეგის მქონე ელექტრონებით დაკავებულ ატომურ ორბიტალებს.

ჰიბრიდიზაციის შედეგად წარმოიქმნება ახალი ჰიბრიდული ორბიტალები, რომლებიც ისეა ორიენტირებული სივრცეში, რომ მათზე განლაგებული ელექტრონული წყვილები (ან დაუწყვილებელი ელექტრონები) აღმოჩნდნენ მაქსიმალურად შორს ერთმანეთისაგან, რაც შეესაბამება ელექტრონთაშორისი განზიდვის ენერჯის მინიმუმს. ამიტომაც ჰიბრიდიზაციის ტიპი განსაზღვრავს მოლეკულის ან იონის გეომეტრიას.

### ჰიბრიდიზაციის ტიპები

ცხრილი 15

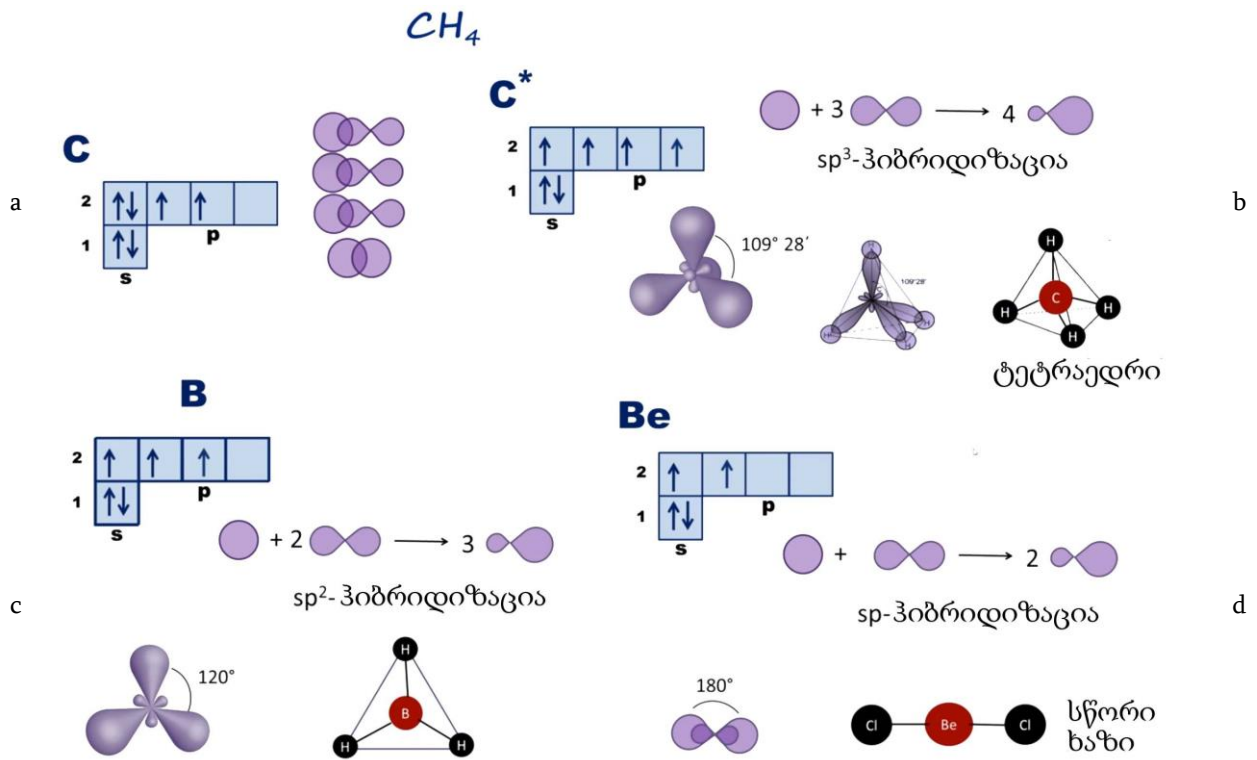
ჰიბრიდიზაციის ტიპი	გეომეტრიული ფორმა	კუთხე კავშირებს შორის	მაგალითები
sp	წრფიული	180°	BeCl <sub>2</sub>
sp <sup>2</sup>	სამკუთხედური	120°	BCl <sub>3</sub>
sp <sup>3</sup>	ტეტრაედრიული	109,5°	CH <sub>4</sub>
sp <sup>3</sup> d	ტრიგონალურ-ბიპირამიდალური	90°; 120°	PCl <sub>5</sub>
sp <sup>3</sup> d <sup>2</sup>	ოკტაედრული	90°	SF <sub>6</sub>

ასე რომ, ორბიტალების ჰიბრიდიზაცია – ეს არის მრავალატომიანი მოლეკულის ცენტრალური ატომის სხვადასხვა ორბიტალების (s, p, d, f) შერევის ჰიპოთეზური პროცესი, რომელსაც თან ახლავს ერთნაირი, თავისი მახასიათებლებით ეკვივალენტური ორბიტალების წარმოქმნა.

განვიხილოთ ჰიბრიდიზაციის მეთოდის საფუძვლები მარტივი მოდელების მაგალითებზე.

დავიწყოთ ყველაზე მარტივი ორგანული შენაერთით – მეთანის მოლეკულით (CH<sub>4</sub>). როგორც ცნობილია, ნახშირბადის ატომს (C) გააჩნია 6 ელექტრონი და მისი ელექტრონული ფორმულაა 1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>2p<sup>2</sup>. ეს კი ნიშნავს, რომ მას გააჩნია ორი შეწყვილებული ელექტრონი 1s ორბიტალზე, ორი შეწყვილებული ელექტრონი 2s ორბიტალზე და ორი შეუწყვილებული ელექტრონი p ორბიტალზე, ანუ ის ორვალენტია (იხ. სურ. 61a). აღზნებულ მდგომარეობაში (C\*) მის გადაყვანის შემდეგ 2s ორბიტალზე დარჩება ერთი ელექტრონი, ხოლო p ორბიტალზე აღმოჩნდება უკვე სამი შეუწყვილებული ელექტრონი (იხ. სურ. 61b) და ის ოთხვალენტია ხდება. ეს ნიშნავს, რომ ნახშირბადის ატომი წყალბადის ატომთან ჰქმნის ოთხ განსხვავებულ კავშირს: ერთი s-s კავშირი და სამი s-p (სურ. 61b). მაგრამ ექსპერიმენტული მონაცემებით ყველა კავშირი ერთნაირია თავის ენერჯით, სიგრძით

და სიმეტრიულად არიან განლაგებული, ეს კი ნიშნავს, რომ ოთხივე კავშირი უნდა იყოს ერთი ტიპისა. როგორაა ეს შესაძლებელი?



სურ. 61. ჰიბრიდიზაციის ძირითადი ტიპების ფორმირება ატომებში: ნახშირბადის, ცნობილი შენაერთების მაგალითზე. (a,b) ყველაზე მარტივი ორგანული შენაერთის — მეთანის (CH<sub>4</sub>). (c) ბორის. ბორანის მაგალითზე, რომელიც ხასიათდება წვის სითბოს მაღალი მნიშვნელობით, და საინტერესოა ჩვენთვის როგორც რაკეტის საწვავი (BH<sub>3</sub>). (d) ბერილიუმის, ბერილიუმის ქლორიდის მაგალითზე (BeCl<sub>2</sub>). აქ C\* – აღნიშნება ნახშირბადის ატომი აღზნებულ მდგომარეობაში.

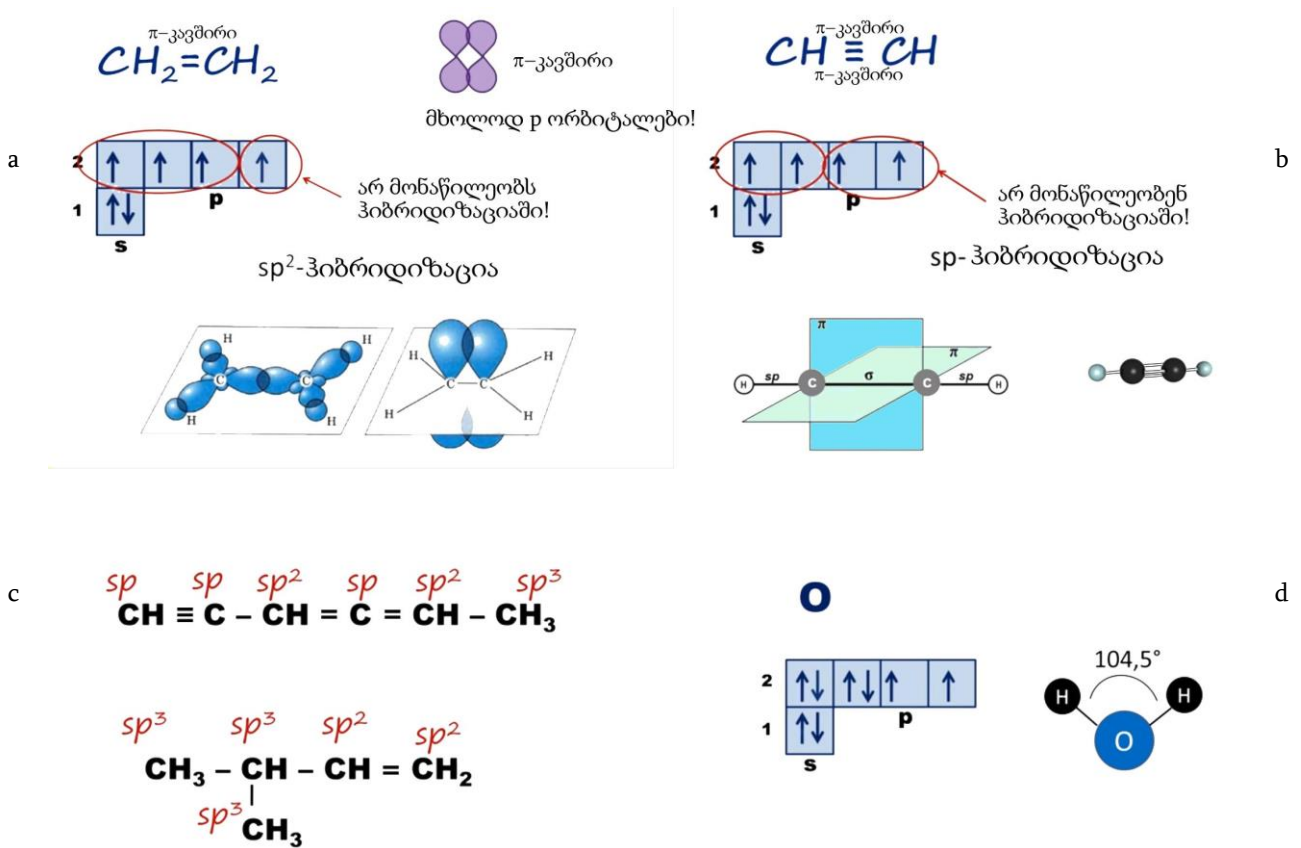
ჰიბრიდიზაციის თეორიის თანახმად, ორბიტალები, რომლებზეც იმყოფებიან ვალენტური ელექტრონები გასაშუალებებიან (ჰიბრიდიზირდებიან). ერთი s და სამი p ორბიტალები ჰქმნიან ოთხ ერთნაირ sp<sup>3</sup> ორბიტალს. ამ პროცესს **sp<sup>3</sup>-ჰიბრიდიზაცია** ეწოდება – s იმიტომ რომ მონაწილეობს ერთი s ორბიტალი, ხოლო p<sup>3</sup> იმიტომ რომ მონაწილეობენ სამი p ორბიტალები (იხ. სურ. 61b). ასეთი წესით მიღებული ჰიბრიდული ორბიტალები უნდა განლაგდნენ სიმეტრიულად და იყვნენ ერთმანეთისაგან მაქსიმალურად დაშორებულნი, ანუ ჰქმნიდნენ მინიმალური თავისუფალი ენერჯის მქონე სტრუქტურას. ამ მოთხოვნებს პასუხობს ტეტრაედრის სტრუქტურა, რომლის ცენტრში იმყოფება ნახშირბადის ატომი, ხოლო მის ოთხ წვეროში წყალბადის ატომები. ამიტომაც მეთანის მოლეკულაში კუთხეები კავშირებს შორის შეადგენენ 108°28'.

განვიხილოთ ჰიბრიდიზაციის სხვა ფორმები.

ბორის ატომს აღზნებულ მდგომარეობაში გააჩნია სამი შეუწყვილებელი ელექტრონი – ერთი s, ხოლო ორი p ორბიტალებზე, შედეგად მიიღება სამი ერთნაირი ჰიბრიდული ორბიტალი. ეს უკვე იქნება **sp<sup>2</sup>-ჰიბრიდიზაცია** (იხ. სურ. 61c). სამი ასეთი ორბიტალი მოთავსებულია 120° კუთხით ერთმანეთის მიმართ, მაგრამ უკვე ერთ სიბრტყეში, ტოლგვერდა სამკუთხედის კუთხეებში. მაგალითისათვის სურ. 61c-ზე მოყვანილია ბორანის მოლეკულა (BH<sub>3</sub>), რომელიც ხასიათდება წვის სითბოს მაღალი მნიშვნელობით, და საინტერესოა ჩვენთვის როგორც რაკეტის საწვავი.

ბერილიუმის ატომს (სურ. 61d) გააჩნია ორი შეუწყვილებული ელექტრონი – ერთი s და ერთი p ორბიტალებზე. მამასადამე, ჰიბრიდიზაციაში მონაწილეობენ ერთი s და ერთი p ორბიტალები, რის შედეგადაც მიიღება ორი ერთნაირი ჰიბრიდული ორბიტალი (*sp*-ჰიბრიდიზაცია). ამ შემთხვევაში კუთხე ჰიბრიდულ ორბიტალებს შორის შეადგენს უკვე 180°, ანუ მიღებული მოლეკულა იქნება წრფიული.

ვნახოთ, შეიძლება თუ არა  $sp^2$  და  $sp$  ჰიბრიდიზაციის პოვნა ორგანულ მოლეკულებში. ავიღოთ ეთილენის მოლეკულა ( $CH_2 = CH_2$ ), მას გააჩნია ორმაგი კავშირი (სურ. 62a) ერთი  $\sigma$ -, ხოლო მეორე  $\pi$ - (იხ. სურ. 56). მაგრამ  $\pi$ -კავშირების შექმნა შეუძლიათ მხოლოდ p ორბიტალებს, s ორბიტალები, მათ შორის s-ის შემცავ ჰიბრიდულ ორბიტალებს, არ შეუძლიათ მონაწილეობის მიღება  $\pi$ -კავშირების შექმნაში. აქედან კი გამომდინარეობს, რომ p ორბიტალებიდან ერთი უნდა დარჩეს არაჰიბრიდული, ანუ არ მიიღოს მონაწილეობა ჰიბრიდიზაციის პროცესში. ამ რიგად რჩება მხოლოდ სამი ორბიტალი რომლებსაც შეუძლიათ ჰიბრიდიზაციის პროცესში მონაწილეობის მიღება – ერთი s და ორი p, ეს კი ნიშნავს, რომ ჩვენ საქმე გვაქვს  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციასთან. მამასადამე, ეთილენის მოლეკულაში ნახშირბადის ორივე ატომი იმყოფება  $sp^2$  ჰიბრიდულ მდგომარეობაში, ეს კი ნიშნავს, რომ მოლეკულა მთლიანად სიბრტყეში იმყოფება. ის წარმოადგენს ორ ერთმანეთზე მიბმულ სამკუთხედს – ნახშირბადის ყოველი ატომი უკავშირდება ორ წყალადის და ერთ ნახშირბადის ატომს. არაჰიბრიდული p ორბიტალები ჰქმნიან  $\pi$ -კავშირს, რომელიც განლაგდება მოლეკულის სიბრტყის პერპენდიკულარულად.



სურ. 62. ჰიბრიდული მოლეკულური კავშირების წარმოქმნა: (a) ეთილენის მოლეკულაში ( $CH_2 = CH_2$ ); (b) აცეტილენის მოლეკულაში ( $CH \equiv CH$ ). ჰიბრიდული კავშირების ტიპები ნახშირწყალბადებში (c). ორბიტალების ჰიბრიდიზაცია წყლის მოლეკულაში (d).

განვიხილოთ აცეტილენის მოლეკულა (სურ. 62b), რომელშიც ნახშირბადის ატომებს შორის აღინიშნება სამმაგი კავშირი ( $CH \equiv CH$ ). ამ მოლეკულაში ორი  $\pi$ -კავშირია, ჩვენ კი



გვახსოვს, რომ  $\pi$ -კავშირი შეიძლება შეიქმნას მხოლოდ არაჰიბრიდული  $p$  ორბიტალებით. ამიტომაც, ამ მოლეკულაში ორმა  $p$  ორბიტალმა არ უნდა მიიღოს მონაწილეობა ჰიბრიდიზაციის პროცესში. მაშინ ჰიბრიდიზაციაში მონაწილეობენ ერთი  $s$  და ერთი  $p$  ორბიტალები. ამრიგად, ჩვენ საქმე გვაქვს  $sp$  ჰიბრიდიზაციასთან. ამ დროს წარმოიქმნება  $180^\circ$  კუთხით განლაგებული ორი ჰიბრიდული ორბიტალი. ეს ნიშნავს, რომ აცეტილენის მოლეკულა წარმოადგენს წრფეს.  $\pi$ -კავშირის შემქმნელი ორი  $p$  ორბიტალი მოთავსდება ურთიერთპერპენდიკულარულ სიბრტყეებში. მწვანე სიბრტყეში ერთმანეთს გადაფარავს ორი  $p$  ორბიტალი და მის პერპენდიკულარულ ცისფერ სიბრტყეში ასევე მოხდება ორი  $p$  ორბიტალის გადაფარვა (იხ. სურ. 62b-ზე მოყვანილი ქვემო ნახაზი).

მოვნახოთ ჰიბრიდიზაციის სახეობა ნახშირბადის ნებისმიერი ატომისათვის (იხ. სურ. 62c).

პირველ მაგალითში ნახშირბადის ატომს გააჩნია სამმაგი კავშირი, ეს კი ნიშნავს, რომ ის ჰქმნის ორ  $\pi$ -კავშირს. მაშასადამე, ოთხი ორბიტალიდან ორი არ იღებს მონაწილეობას ჰიბრიდიზაციაში. რჩება მხოლოდ ორი ორბიტალი რომლითგანაც ერთი აუცილებელი იქნება  $s$ . ესე იგი, ნახშირბადის ეს ატომი იმყოფება  $sp$  ჰიბრიდიზაციის მდგომარეობაში. ნახშირბადის მეორე ატომში იგივეს ვხედავთ – ორი  $\pi$ -კავშირი, ესე იგი ჰიბრიდიზირდება მხოლოდ ორი ორბიტალი – ეს  $sp$  ჰიბრიდიზაციაა. ნახშირბადის მესამე ატომი. მას გააჩნია ორმაგი კავშირი, ესე იგი მხოლოდ ერთი  $\pi$ -კავშირი. მაშასადამე, სამი ორბიტალი მონაწილეობს ჰიბრიდიზაციაში, შესაბამისად ეს  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციაა. ნახშირბადის მეოთხე ატომი – ორი  $\pi$ -კავშირი –  $sp$  ჰიბრიდიზაცია. ნახშირბადის შემდეგი ატომი – მხოლოდ ერთი  $\pi$ -კავშირი, მაშასადამე სამი ორბიტალი ჰიბრიდულია – ეს  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციაა. ნახშირბადის ბოლო ატომს – არა აქვს  $\pi$ -კავშირები, მაშასადამე ოთხივე ორბიტალი მონაწილეობენ ჰიბრიდიზაციის პროცესში – ეს  $sp^3$  ჰიბრიდიზაციაა.

მეორე მაგალითში ნახშირბადის პირველი ატომი –  $sp^3$  ჰიბრიდიზაცია; მეორე –  $sp^3$  ჰიბრიდიზაცია; მესამეს – გააჩნია 1  $\pi$ -კავშირი – მაშასადამე,  $sp^2$  ჰიბრიდიზაცია; აგრეთვე მეოთხე –  $sp^2$  ჰიბრიდიზაცია. ნახშირბადის ბოლო ატომს  $\pi$ -კავშირები არ გააჩნია, ესე იგი ეს  $sp^3$  ჰიბრიდიზაციაა.

მაგრამ ცნობილია ნახშირბადის ატომის ჰიბრიდიზაციის მონახვის ძალზე მარტივი ხერხი – უნდა  $C$  ატომის მეზობლების რაოდენობას გამოვაკლოთ ერთიანი. ასე რომ:

- თუ ნახშირბადის ატომს 4 მეზობელი ჰყავს – იმყოფება  $sp^3$  ჰიბრიდიზაციაში;
- თუ ნახშირბადის ატომს 3 მეზობელი ჰყავს – იმყოფება  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციაში;
- თუ ნახშირბადის ატომს 2 მეზობელი ჰყავს – იმყოფება  $sp$  ჰიბრიდიზაციაში;

ასე რომ სურ. 62c-ზე მოყვანილ პირველ მაგალითში, ნახშირბადის პირველ ატომს ჰყავს ორი მეზობელი (1 წყალბადის ატომი და 1 ნახშირბადის), მაშასადამე ადგილი აქვს  $sp$  ჰიბრიდიზაციას. ნახშირბადის მეორე ატომს ასევე ორი მეზობელი გააჩნია (ნახშირბადის 2 ატომი) – ისევე  $sp$  ჰიბრიდიზაცია. ნახშირბადის მესამე ატომს უკვე სამი მეზობელი ჰყავს (1 წყალბადის ატომი და 2 ნახშირბადის), მაშასადამე ადგილი აქვს  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციას. მეოთხეს, კვლავ ორი მეზობელი (2 ნახშირბადის ატომი), ამიტომაც ადგილი აქვს  $sp$  ჰიბრიდიზაციას. მეხუთე ატომს სამი მეზობელი ჰყავს (1 წყალბადის ატომი და 2 ნახშირბადის), მაშასადამე, ადგილი აქვს  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციას. რაც შეეხება ბოლო ატომს, მას ოთხი მეზობელი ჰყავს (3 წყალბადის ატომი და 1 ნახშირბადის) –  $sp^3$  ჰიბრიდიზაცია.

საჭიროა გვახსოვდეს, რომ ჰიბრიდიზაციის პროცესში მონაწილეობენ არა ელექტრონები, არამედ ელექტრონული ორბიტალები. ესე იგი საუბარია ელექტრონის მდებარეობის ალბათობაზე მისი ორბიტალით განპირობებულ ადგილას.

იხლა კი ყურადღება მივაქციოთ წყლის მოლეკულის აგებულებას (იხ. სურ. 62d). კავშირები რომ არაჰიბრიდული p ორბიტალებით შექმნილიყო, მაშინ კუთხე მათ შორის შეადგენდა  $90^\circ$ , სინამდვილეში კი ეს კუთხე  $104,5^\circ$ . საქმე იმაშია, რომ აქაც საქმე გვაქვს ჰიბრიდიზაციის პროცესთან. მიუხედავად იმისა, რომ s და ერთ p ორბიტალზე იმყოფება ორ ორი შეწყვილებული ელექტრონი, ისინი ერთნაირად მონაწილეობენ ჰიბრიდიზაციის პროცესში და ეს კვლავ  $sp^3$  ჰიბრიდიზაციაა. ამრიგად, წყლის მოლეკულას გააჩნია ჟანგბადის ატომი  $sp^3$  ჰიბრიდულ მდგომარეობაში.

## 12.5. წყლის სტრუქტურა.

ყველა სასიცოცხლო პროცესს საფუძვლად უდევს ჩვეულებრივი, ყველასთვის ცნობილი წყალი, რომელიც არც თუ ისე ჩვეულებრივია, როგორც შეიძლება მოგვეჩვენოს მისი შემადგენლობიდან გამომდინარე. მივმართოთ წყლის საერთო დამახასიათებელ თვისებებს, რომლებიც აქცევენ მას ყველაზე საოცარ ობიექტად დედამიწის ზურგზე.

წყლის პირველი, და ყველაზე გამაოცებელი თვისება მდგომარეობს იმაში, რომ ის მიეკუთვნება ერთად ერთ ნივთიერებას ჩვენს პლანეტაზე, რომელსაც ჩვეულებრივ პირობებში შეუძლია სამ ფაზაში, ანუ სამ აგრეგატულ მდგომარეობაში ყოფნა: მყარ (ყინული), სითხისებრივ მდგომარეობაში და აირის სახით.

როგორც კარგად არის ცნობილი, წყალი მიღებულია საზომ ნიმუშად – ყველა სხვა ნივთიერებების ეტალონად. თითქოს და ფიზიკური კონსტანტების ეტალონად უნდა აეღოთ ისეთი ნივთიერება, რომელიც იქცევა ყველაზე ნორმალური და ჩვეულებრივი წესით, მაგრამ ყველაფერი სულ პირიქით მოხდა.

### წყალი – ყველაზე ანომალური ნივთიერებაა ბუნებაში.

პირველყოვლისა, წყალი, სხვა სითხეებთან და მყარ სხეულებთან შედარებით, ხასიათდება განსაკუთრებულად მაღალი თბოშემცველობით. თუ წყლის თბოშემცველობა ავიღეთ 1-ის ტოლი, მაშინ სპირტის და გლიცერინისათვის ის შეადგენს მხოლოდ 0,3; დაფქვილი ქვის მარილისათვის – 0,2; ვერცხლისწყალისა და პლატინისათვის – 0,03; ხისათვის (მუხა, ნაძვი, ფიჭვი) – 0,6; რკინისათვის – 0,1 და ა.შ.

ამრიგად, წყალი ტბაში ჰაერის ერთნაირი ტემპერატურის და მზისგან მიღებული სითბოს ერთნაირი რაოდენობის პირობებში, გაცხელდება 5 ჯერ ნაკლებად, ვიდრე მის გარშემო მყოფი მშრალი ქვიშის ნიადაგი. მაგრამ, ნიადაგზე ამდენჯერვე უფრო დიდხანს წყალი ინარჩუნებს მიღებულ სითბოს.

წყლის სხვა ანომალია – არაჩვეულებრივად მაღალი აორთქლების და დნობის ფარული სითბო, ანუ სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც აუცილებელია სითხის ორთქლად, ან ყინულის სითხედ გადასაქცევად (სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, შთანთქმული ან გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა). მაგალითად, იმისათვის რომ 1კგ ყინული სითხედ იქცეს, საჭიროა 330 კჯ (80 კკალ ფარგლებში) ენერგიის დახარჯვა, იმ დროს, როდესაც მცირე რაოდენობითაც კი არ აიწევა თვითონ ყინული-წყალის სახით მყოფი ნივთიერების ტემპერატურა. როგორც ცნობილია, ლღობადი ყინულის ტემპერატურა უცვლელად ერთნაირია და შეადგენს  $0^\circ\text{C}$ . ამავე დროს ლღობადი ყინულის წყალი გარემოდან შთანთქამს შეფარდებით უზარმაზარ სითბოს რაოდენობას (80 კკალ/კგ). ამრიგად, იმისათვის რომ გააღვეს 1 კგ ყინული ან თოვლი საჭიროა იმდენივე სითბოს რაოდენობა, რამდენიც სჭირდება 1 ლ წყლის  $80^\circ\text{C}$ -ით გაცხელებას. შედარებისათვის ავლნიშნოთ, რომ რკინის დნობის კუთრი სითბო 270 კჯ/კგ-ის ტოლია.

მდგომარეობის ასეთივე ნახტომისებურ ცვლილებას ჩვენ ვაკვირდებით წყლის ორთქლად ქცევისას. წყლის დუღილისას, რომელიც მიმდინარეობს მუდმივ ტემპერატურ-

რაზე (100°C 1ატმ წნევისას), თვითონ წყალი გარემოდან შთანთქამს თითქმის 7 ჯერ მეტ სითბოს, ვიდრე ყინულის ლღობისას, და ამ სითბოს რაოდენობაა 539 კკალ/კგ.

თუ ორთქლი წყლად იქცევა ან წყალი იქცევა ყინულად, სითბოს იგივე რაოდენობა კალორიებში (539 და 80) უნდა გამოიყოს წყლიდან და გაათბოს წყლის ირგვლივ მყოფი გარემო. წყლის ეს სიდიდეები არაჩვეულებრივად მაღალია. მაგალითად, წყლისთვის აორთქლების ფარული სითბო თითქმის 8 ჯერ, ხოლო დნობის ფარული სითბო 27 ჯერ მეტია ვიდრე სპირტისათვის.

გასაოცარ და სრულიად მოულოდნელ წყლის ანომალურ თვისებას წარმოადგენენ მისი გაყინვის და დუდილის ტემპერატურები. თუ განვიხილავთ წყალბადის რიგ შენაერთს სხვა ელემენტებთან, მაგალითად გოგირდთან, სელენთან, ტელურთან, შეიძლება შევნიშნოთ, რომ არსებობს კანონზომიერება მათ მოლეკულურ მასებსა და გაყინვის და დუდილის ტემპერატურებს შორის: რაც უფრო მეტია მოლეკულური მასა, მით მეტია ტემპერატურული მარჯვენებლები.

წყალბადის ზოგიერთი შენაერთის გაყინვის და დუდილის ტემპერატურის დამოკიდებულება მათ მოლეკულურ მასაზე

ცხრილი 16

წყალბადის შენაერთები	მოლეკულური მასა	ტემპერატურა, °C	
		გაყინვის	დუდილის
H <sub>2</sub> Te	130	-51	-4
H <sub>2</sub> Se	81	-64	-42
H <sub>2</sub> S	34	-82	-61
H <sub>2</sub> O	18	0	+100

კიდევ უფრო საოცარი და არანაკლებად მოულოდნელი წყლის თვისება – ეს მისი სიმკვრივის ცვლილებაა ტემპერატურის ცვლილების მიხედვით. ტემპერატურის აწევისას ყველა ნივთიერების (ბისმუთის გარდა) მოცულობა იზრდება, სიმკვრივე კი პირიქით, მცირდება. ტემპერატურულ ინტერვალში +4°C და ზევით, როგორც სხვა ნივთიერებებშიც წყლის მოცულობა იზრდება, სიმკვრივე კი მცირდება, მაგრამ +4°C დან ქვევით, წყლის გაყინვის წერტილამდე, მისი სიმკვრივე კვლავ იწყებს შემცირებას, ხოლო მოცულობა ფართოვდება. გაყინვის მომენტში ვიღებთ ნახტომისებრივ მოცულობის ზრდას მისი თხევადი მოცულობის 1/11 ნაწილით.

ამ ანომალიის ახსნა შეიძლება აჟურული კრისტალური სტრუქტურით, რომელიც გამოწვეულია წყალში და შესაბამისად I<sub>h</sub> ყინულში (იხ. ცხრილი14) არსებული წყალბადური ბმებით. ასეთი ყინულის აჟურული კრისტალური სტრუქტურის გამო მისი სიმკვრივე (916,7 კგ/მ<sup>3</sup> 0°C ტემპერატურაზე) იმავე ტემპერატურაზე მყოფ წყლის სიმკვრივეზე (999,8 კგ/მ<sup>3</sup>) ნაკლებია. ამიტომაც, ყინულად ქცევისას წყალი იზრდება მოცულობაში დაახლოებით 9%-ით. ვინაიდან ყინული გამოდის წყალზე მსუბუქი, ის წარმოიქმნება წყალსაცავების ზედაპირზე, რითიც ხელს უშლის წყლის შემდგომ გაყინვას. ეს ანომალია რომ არ ყოფილიყო, ყინული ვერ იცურავებდა და წყალსაცავები ზამთარში ბოლომდე გაიყინებოდა, რაც კატასტროფა იქნებოდა წყლის ყველა მობინადრესათვის. წყლის გაფართოვებას ადგილი არა აქვს მისი უეცარი გაყინვის შემთხვევაში, როდესაც წარმოიქმნება ყინულის ამორფული ფორმები (მინათქცეული წყალი). ყინულის სტრუქტურას ჩვენ დაუბრუნდებით წყლის სტრუქტურის დეტალური ანალიზის შემდეგ.

არსებობს წყლის ბევრი სხვა ანომალია, მაგალითად, მისი გაფართოვების ტემპერატურული კოეფიციენტი 0 დან 45°C ინტერვალში წნევის გაზრდისას მატულობს,

სხვა სხეულებში კი ჩვეულებრივად პირიქით ხდება. ანომალურია აგრეთვე სითბოგამტარობა, დიელექტრული შეღწევადობის დამოკიდებულება წნევაზე, თვითდიფუზიის კოეფიციენტი და ბევრი სხვა თვისება.

ისმება კითხვა, თუ რითია ეს ყველაფერი განპირობებული?

ამ ანომალიების ახსნა შესაძლოა მოინახოს წყლის მოლეკულების სტრუქტურის თავისებურებების გამოვლენაში მისი სხვადასხვა აგრეგატულ (ფაზურ) მდგომარეობაში ყოფნისას, რომელიც ტემპერატურით, წნევით და სხვა პირობებითაა განპირობებული. სამწუხაროდ, ამ საკითხზე ერთიანი აზრი ჯერ არ არსებობს. თანამედროვე მკვლევარების უმეტესობა ემხრობა წყლის ორსტრუქტურულ მოდელს, რომლის თანახმად წყალი წარმოადგენს ფხვიერი ყინულისმაგვარი და მკვრივად ჩალაგებული სტრუქტურების ნარეგს.

ყინულის კრისტალები ჰექსაგონალურ სინგონიას მიეკუთვნებიან, ანუ მათ ექვსწახნაგიანი პრიზმების (ჰექსაგონების) ფორმა გააჩნიათ. ყინულის სტრუქტურაში წყლის ყოველი მოლეკულა გარშემორტყმულია ოთხი უახლოვესი მოლეკულით, რომლებიც მისგან ერთნაირ მანძილზე იმყოფებიან. ამრიგად, წყლის ყოველი მოლეკულა ხასიათდება კოორდინაციული რიცხვით.

წყლის მოლეკულები ისეა განლაგებული, რომ ეხებიან ერთმანეთს განსხვავებული (დადებითად და უარყოფითად დამუხტული) პოლუსებით. ტრიდიმიტის<sup>69</sup> ტიპის წყლის სტრუქტურაში მოლეკულებს შორის მანძილი 4,5Å, ხოლო კვარცის ტიპის სტრუქტურაში – 4,2Å. პირველ შემთხვევაში ეს ღვობადი ყინულის წყალია ტემპერატურით 0°C ფარგლებში. მეორე შემთხვევაში, წყლის მოლეკულების უფრო მკვრივი მოთავსება, რომლის ტემპერატურა ივარაუდება +4°C ფარგლებში.

წყლის ბურუსით მოფენილი დაახლოებით 10%-იანი გაფართოვება გაყინვის დროს, აიხსნება მკვრივად ჩალაგებული სტრუქტურიდან აჟურულ, გაფაშვებულ სტრუქტურაში მისი სწრაფი გადასვლით. წყლის სტრუქტურაში, დაბალი საკოორდინაციო რიცხვის გამო, აღინიშნება ბევრი სიცარიელე, რომელთა რაოდენობა თვით წყლის მოლეკულაზე მეტია. ყოველი ასეთი სიცარიელე შემოფარგლულია წყლის 6 მოლეკულით, ამავდროულად, წყლის ყოველი მოლეკულის ირგვლივ, ყინულის სტრუქტურაში, აღინიშნება სიცარიელის 6 ცენტრი.

დაახლოებით +4°C ტემპერატურის პირობებში, ეს სიცარიელები წყლის „თავისუფალი“ მოლეკულებით ივსება, და მისი სიმკვრივე მაქსიმალური ხდება. ტემპერატურის შემდგომი გაზრდისას კვლავ, თანათან წარმოიქმნება სულ უფრო მეტად გაფაშვებული, აჟურული სტრუქტურა. მოლეკულების სითბური მოძრაობის ზრდის გამო (ტემპერატურის მატებისას) წყლის სტრუქტურა თანდათან „იდლაბნება“, სუსტდება წყალბადური ბმები, წყლის სიმკვრივე მცირდება, ხოლო მოცულობა, შესაბამისად, იზრდება.

აუცილებელია კიდევ ერთხელ აღინიშნოს, რომ საერთოდ სითხეების და განსაკუთრებით წყლის შინაგანი სტრუქტურა, გაცილებით უფრო რთულია ვიდრე მყარი სხეულების და აირების სტრუქტურა. წყლის ბუნება ძალზე რთულია, და დღესაც არაა ბოლომდე გამორკვეული.

წინა საუკუნის სამოციან წლებში იყო აღმოჩენილი ქიმიურად სუფთა წყლის ახალი ნაირსახეობა (მისი იზოტოპური ნაირსახეობების გარდა). ეს არის ეგრედ წოდებული ანომალური („მოდინფიცირებული“) წყალი, რომელიც ჩვეულებრივიდან წარმოიქმნება, მისი კვარცის კაპილარებში, ან კვარცის ფირფიტებზე მოთავსებისას. კაპილარებში წარმოიქმნება ახალი, მაღალი სიბლანტის მქონე, ანომალური წყლის დამოუკიდებელი,

<sup>69</sup> ტრიდიმიტი (ბერძ. – სამმაგი) დაერქვა კრისტალების გაორმაგების და სამკვეცა სტრუქტურების შექმნის გამო.

შვილობრივი სვეტები. ამ წყალს, ჩვეულებერთან შედარებით, ახასიათებს ორთქლის ნაკლები წნევა, რამდენჯერმე უფრო მეტი სიბლანტე და სითბური გაფართოვების კოეფიციენტი, და 40%-ით მეტი სიმკვრივე.

ჯერჯერობით ანომალური წყლის მიღება შეიძლება მხოლოდ კვარცის ზედაპირზე ჩვეულებრივი წყლის ორთქლის კონდენსირებისას. სუფთა ანომალური წყალი წარმოადგენს ამორფლ მინისებრივ არაკრისტალურ მასას ვაზელინის კონსისტენციით.

ამ მოდიფიცირებულ წყალს ახასიათებს მაღალი მდგრადობა და კაპილარების გარედ ისეთივე ქცევა გააჩნია, როგორც თვით კაპილარებში. ის არ იყინება და  $-50^{\circ}\text{C}$ -ზეც კი თხევადი რჩება. წყლის ახალი სახეობა არ ირევა ჩვეულებრივ წყალში და ქმნის მასთან ემულსიას. მოდიფიცირებული წყალი არ კრისტალირდება და მინის მსგავსად ამორფულ მასას წარმოადგენს. მისი წარმოშობის საიდუმლო დღესაც გამოუცნობია და მთელი მსოფლიოს მეცნიერები ამ მიმართულებით საკმაოდ ინტესიურად მუშაობენ. ნებისმიერ შემთხვევაში ანომალური წყლის წარმოშობა არ შეიძლება აიხსნას მისი სტრუქტურული თავისებურებებით. ამ წყალს „ზეწყალი“ დაარქვეს.

წყალს აღმოაჩნდა „მეხსიერება“, ან შესაძლებელია „წრთობის“ უნარი: იღებდნენ მრავალჯერადი გამოხდებით საგულდაგულოდ გასუფთავებულ წყალს და აცხელებდნენ  $200, 300, 400$  და  $500^{\circ}\text{C}$ -მდე  $1, 88, 390$  და  $800$  ატმ. წნევის პირობებში. ის რომ ტემპერატურა და წნევა ცვლიან წყლის თვისებებს, უკვე დიდი ხანი იყო ცნობილი. მაგრამ აი რა აღმოჩნდა – რაღაც ახალ თვისებებს წყალი ინარჩუნებდა მაღალი ტემპერატურის და წნევის მოხსნისას. მაგალითად, 4-ჯერ იზრდებოდა გარკვეული მარილების გახსნის უნარი.

უკვე დიდი ხანია შენიშნეს წყლის რიგი თვისებების ცვლილება მასზე მაგნიტური ველის მოქმედებისას. რაც მეტია ველის სიმძლიერე, მით მეტი ცვლილებები აღინიშნება წყალში. ასე მაგალითად, ძლიერი მაგნიტური ველის დამაბულობის ცვლილებისას წყალბადის იონების ( $\text{H}^+$ ) კონცენტრაცია იზრდრბა ორჯერ, ხოლო წყლის ზედაპირული დაჭიმულობა – სამ ჯერ.

მაგნიტური ველი აგრეთვე მოქმედებს წყალში, გახსნილ მდგომარეობაში მყოფი მარილების კრისტალიზების ხასიათზე და სიჩქარეზე. წყლის მაგნიტური დამუშავების შედეგად მცირდება ნადულის წარმოქმნა წყლის გამაცხელებელ ქვაბებში, მცირდება მყარი სხეულების ზედაპირების წყლით სველადობა, იცვლება დუდილის ტემპერატურა, სიბლანტის ხარისხი, იზრდება სუსპენზიების შესქელების სიჩქარე და ა.შ.

მაგრამ მაგნიტური ველი არანაირად არა ცვლის სუფთა წყალს, ანუ წყალს, რომლის შემადგენლობაში არ აღინიშნება ელექტროლიტები. წყლის დამაგნიტებისას იცვლება ბირთვული სპინის ორიენტაცია (რომელიც მჭიდროდ უკავშირდება მაგნიტურ მომენტს) წყლის მოლეკულაში.

მაგნიტური წყალი, ისევე როგორც ახლადდამდნარი, ხასიათდება „მეხსიერებით“. მის ახალ თვისებებს გააჩნია დღეღამის ხანგრძლივობის „ნახევარდაშლის პერიოდი“. მდნარ წყალს, როგორც ეს აღინიშნება მრავალრიცხოვან დაკვირვებებში, ახასიათებს გაზრდილი ბიოლოგიური აქტივობა, რომელსაც წყალი ინარჩუნებს გარკვეული დროის განმავლობაში ყინულის ლღვობის შემდეგ. ზოგიერთი მკვლევარის მონაცემებით როგორც მაგნიტური, ასევე მდნარი წყლის ახალი თვისებები აიხსნება წყალბადის ბირთვში მიმდინარე ცვლილებებით.

თხევადი ფაზიდან მყარში გადასვლის წერტილი  $1$  ატმ. წნევისას  $0^{\circ}\text{C}$ . წნევის გაზრდისას წყლის ყინულში გადასვლის წერტილი მცირდება  $600$  ატმ. პირობებში  $-5^{\circ}\text{C}$ -მდე,  $2200$  ატმ. პირობებში  $-22^{\circ}\text{C}$ -მდე. მაგრამ შემდეგ წყალი საოცრათ იქცევა:  $3500$  ატმ. პირობებში ის ყინულად იქცევა  $-17^{\circ}\text{C}$ -ზე,  $6382$  ატმ. პირობებში  $+16^{\circ}\text{C}$  -ზე, და  $20\ 676$  ატმ. პირობებში  $+76^{\circ}\text{C}$ -ზე – ცხელი ყინული, რომელსაც სხეულის დაწვა შეუძლია.

სადღეისოდ ცნობილია ყინულის სამი ამორფული ნაირსახეობა და 17 კრისტალური მოდიფიკაცია, რომელთა ძირითადი ნაწილი მოყვანილია ცხრილში.

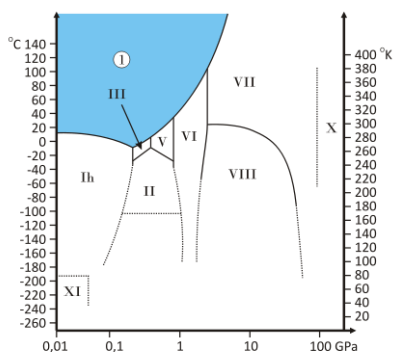
ცხრილი 17

ფაზა	დახასიათება
ამორფული ყინული	ამორფულ ყინულს არ ახასიათებს კრისტალური სტრუქტურა. იგი სამ ფორმაში არსებობს: დაბალი სიმკვრივის ამორფული ყინული (LDA), რომელიც წარმოიქმნება ატმოსფერულ წნევაზე და ქვემოთ, მაღალი სიმკვრივის ამორფული ყინული (HDA) და ძალზე მაღალი სიმკვრივის ამორფული ყინული (VHDA), რომელიც წარმოიქმნება მაღალი წნევისას. LDA ყინულს დებულობენ თხევადი წყლის ძალზე სწრაფი გაციების დროს („ზეგაციებული მინისებრივი წყალი“, HGW), ან წყლის ორთქლის კონდენსაციით ძალიან ცივ ზედაპირზე („ამორფული მყარი წყალი“, ASW), ან და მაღალი სიმკვრივის მქონე ყინულის ფორმების გაცხელებით ნორმალური წნევის პირობებში („LDA“).
ყინული I <sub>h</sub>	ჩვეულებრივი ჰექსაგონალური კრისტალური ყინული. პრაქტიკულად დედამიწაზე არსებული მთელი ყინულის მარაგი I <sub>h</sub> ყინულს მიეკუთვნება და მხოლოდ ძალზე მცირე ნაწილი – I <sub>c</sub> -ს.
ყინული I <sub>c</sub>	მეტასტაბილური კუბური კრისტალური ყინული. ჟანგბადის ატომების განლაგება ალმასის კრისტალური მესერის მაგვარია. მას იღებენ –133°C-დან –123°C-მდე. ის მდგრადი რჩება –73°C-მდე, ხოლო შემდგომი გაციებისას გადადის I <sub>h</sub> ყინულში. იშვიათად გვხვდება ატმოსფეროს ზედა ფენებში.
ყინული II	ტრიგონალური კრისტალური ყინული მაღალმოწესრიგებული სტრუქტურით. წარმოიქმნება I <sub>h</sub> ყინულიდან მისი შეკუმშვისას –83°C-დან –63°C-მდე ტემპერატურულ ინტერვალში. გაციებისას გარდაიქმნება ყინულ III-ში.
ყინული III	ტეტრაგონალური კრისტალური ყინული, რომელიც წარმოიქმნება წყლის გაციებისას –23°C-მდე და 300 მპა <sup>70</sup> -ის წნევის პირობებში. მისი სიმკვრივე წყლის სიმკვრივეზე მეტია, მაგრამ ის მაღალი წნევის ზონაში მყოფი ყინულთა მრავალსახეობებიდან ყველაზე ნაკლებ მკვრივია.
ყინული IV	მეტასტაბილური ტრიგონალური ყინული. მისი მიღება საკმაოდ რთულია
ყინული V	მონოკლინური კრისტალური ყინული. წარმოიქმნება წყლის –20°C-მდე გაციებისას 500 მპა-ის წნევის პირობებში. მას გააჩნია ყველაზე რთული სტრუქტურა ყინულის ყველა სხვა მოდიფიკაციებთან შედარებით.
ყინული VI	ტეტრაგონალური კრისტალური ყინული. წარმოიქმნება წყლის –3°C-მდე გაციებისას 1,1 გპა წნევის პირობებში. მასში ვლინდება დეზაის რალაქსაცია.
ყინული VII	კუბური მოდიფიცირება. დარღვეულია წყალბადის ატომების განლაგება; ნივთიერებაში ვლინდება დეზაის რელაქსაცია. წყალბადური ბმები ჰქმნიან ორ ურთიერთშემავალ მესერს.
ყინული VIII	ყინული VII-ის უფრო დალაგებული ვარიანტი, რომელშიც წყალბადის ატომები იკავებენ ფიქსირებულ პოზიციებს. წარმოიქმნება ყინული VII-დან მისი გაციებისას 5°C-ზე ქვემოთ.

<sup>70</sup> პა – წნევის ერთეული SI სისტემაში — 1პა = 10<sup>-6</sup>მპა = 10<sup>-9</sup>გპა ≈ 10<sup>-5</sup>ატმ ≈ 10<sup>-5</sup>ბარ

ყინული IX	ტეტრაგონალური მეტასტაბილური მოდიფიკაცია. წარმოიქმნება თანდათან ყინული III-დან მისი გაციებისას $-65^{\circ}\text{C}$ -დან $-108^{\circ}\text{C}$ -მდე, სტაბილურია $-133^{\circ}\text{C}$ -ზე დაბალ ტემპერატურაზე 200-დან 400 მპა-მდე წნევის პირობებში. მისი სიმკვრივე $1,16 \text{ გ/სმ}^3$ , ანუ ჩვეულებრივ ყინულზე მაღალი.
ყინული X	სიმეტრიული ყინული პროტონების მოწესრიგებული განლაგებით. წარმოიქმნება დაახლოებით 70 გპა წნევისას.
ყინული XI	გეკსაგონალური ყინულის რომბიული, დაბალტემპერატურაიანი წონასწორული ფორმა. არის სეგნეტოელექტრიკი.
ყინული XII	ტეტრაგონალური მეტასტაბილური მკვრივი კრისტალური მოდიფიკაცია. მოიძებნება ყინული V და ყინული VI ფაზურ სივრცეში. შეიძლება მიღებულ იქნას მაღალი სიმკვრივის ამორფული ყინულის გაცხელებით $-196^{\circ}\text{C}$ -დან დაახლოებით $-90^{\circ}\text{C}$ -მდე 810 მპა წნევის პირობებში.
ყინული XIII	მონოკლინური კრისტალური ნაირსახეობა. მიიღება წყლის გაციებისას $-143^{\circ}\text{C}$ -ზე დაბალ ტემპერატურამდე 500 მპა წნევის პირობებში. მოწესრიგებული პროტონების განლაგების მქონე ყინული V-ის ნაირსახეობა.
ყინული XIV	რომბული კრისტალური ნაირსახეობა. მიიღება $-155^{\circ}\text{C}$ -ზე დაბალ ტემპერატურაზე 1,2 გპა წნევის პირობებში. ყინული XII-ის ნაირსახეობა პროტონების მოწესრიგებული განლაგებით.
ყინული XV	ყინული VI-ის ფსევდორომბული კრისტალური ნაირსახეობა პროტონების მოწესრიგებული განლაგებით. შეიძლება მივიღოთ ყინული VI-ის ნელი გაციებით დაახლოებით $-143^{\circ}\text{C}$ -მდე 0,8–1,5 გპა წნევის პირობებში.
ყინული XVI	ყველა ექსპერიმენტალურად მიღებულებული ყინულების ფორმებიდან უმცირესი სიმკვრივის მქონე ( $0,81 \text{ გ/სმ}^3$ ) მისი კრისტალური ნაირსახეობა. გააჩნია ღრუებიანი სტრუქტურის ტოპოლოგიურად ეკვივალენტური აგებულება.
ყინული XVII	სხვებთან შედარებით მცირე სიმკვრივის მქონე ( $0,85 \text{ გ/სმ}^3$ ) ყინულის კრისტალური ნაირსახეობა. მისი სტრუქტურა, როგორც ყინული XVI-ს, აირების ჰიდრატების კლატრატული სტრუქტურის მსგავსია. მიიღება $7^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე და $\sim 400$ მპა წნევისას. მისი ნომინალური შემადგენლობა $(\text{H}_2\text{O})_2\text{H}_2$ სამი ფორმულური ელემენტით ელემენტარული მესერის ერთ უჯრედზე.

სურ. 63-ზე მოყვანილი ფაზური დიაგრამა გვიჩვენებს თუ რა ტემპერატურების და წნევების პირობებში არსებობენ ყინულების ზემოდმოყვანილი მოდიფიკაციები.



სურ. 63. ყინულის ფაზური დიაგრამა. წნევა (გპა) მოყვანილია ლოგარითმული მასშტაბით. ტემპერატურა მარცხნივ  $^{\circ}\text{C}$ , მარჯვნივ – კელვინი. ცისფერი არე (1) შეესაბამება ყინულის თხევად ფაზას ანუ წყალს.

დედამიწის ბუნებრივ პირობებში წყალი ჰქმნის ერთი კრისტალური მოდიფიკაციის, ჰექსაგონალური სინგონიის მქონე (ყინული  $I_h$ ) კრისტალებს.  $I_h$ -ყინულში წყლის ყოველი მოლეკულა გარშემორტყმულია მასთან უახლოვეს ერთ მანძილზე მყოფი ( $2,76 \text{ \AA}$ ) ოთხი მოლეკულით, რომლებიც მოთავსებულია სწორი ტეტრაედრის წვეროებში.

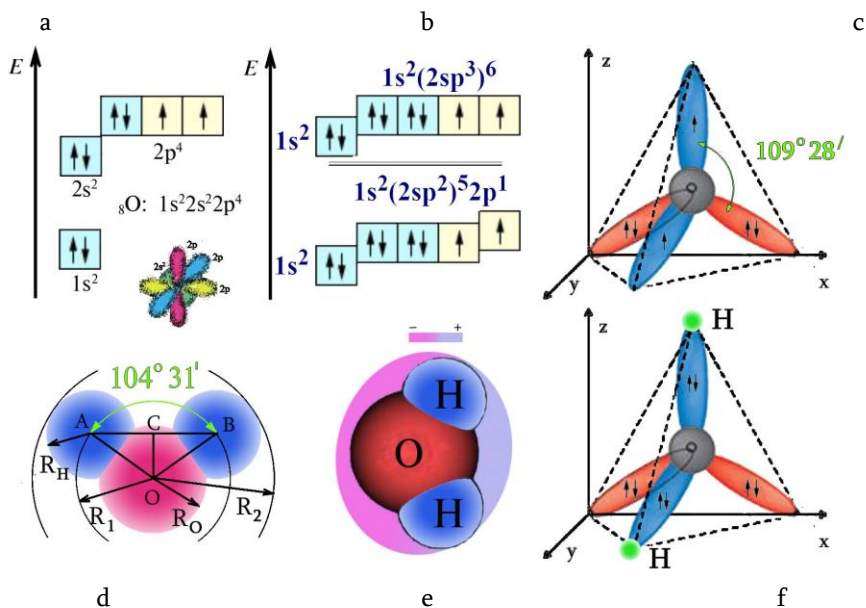
წყლის ქცევა ბუნებაში წნევის, ტემპერატურის, ელექტრომაგნიტური ველების, და განსაკუთრებით ელექტრული პოტენციალთა სხვაობის და ბევრ სხვა განსხვავებულ პირობებში საკმაოდ უცნაურია, მითუმეტეს რომ ბუნებრივი წყალი არაა ქიმიურად სუფთა ნივთიერება, მასში ბევრი სხვა ნივთიერებაა გახსნილი (პერიოდული სისტემის თითქმის ყველა ელემენტი) და თან განსხვავებულ კონცენტრაციებში. ეს უცნაურობები განსაკუთრებით ვლინდება დედამიწის ლიტოსფეროს დიდ სიღრმეებზე, სადაც ადგილი აქვს მაღალ წნევებსა და ტემპერატურებს. მაგრამ „სუფთა“ წყლის შემთხვევაშიც მისი ზოგიერთი თვისების ცვლილება მაღალი წნევების და ტემპერატურების პირობებში, იღებს საკმაოდ საინტერესო ხასიათს. მაგალითად, სიმკვრივისათვის მივიღებთ ასეთ მნიშვნელობებს ( $\text{გ/სმ}^3$ ):  $100^\circ\text{C}$  და  $100 \text{ ატმ.}-ზე$ , და აგრეთვე  $1000^\circ\text{C}$  და  $10\,000 \text{ ატმ.}-ზე$  ის მიუახლოვდება ერთს;  $1000^\circ\text{C}$  და  $100 \text{ ატმ.}-ზე$  –  $0,017$ ;  $800^\circ\text{C}$  და  $2500 \text{ ატმ.}-ზე$  –  $0,5$ ;  $770^\circ\text{C}$  და  $13\,000 \text{ ატმ.}-ზე$  –  $1,7$ , ხოლო ასეთი წყლის ელექტროგამტარობა ხუთნორმალური მარილმჟავის ელექტროგამტარობის ტოლია.

ყველაფერი, რასაც ჩვენ ვამბობდით წყლის ნაირსახეობათა მრავალფეროვნობაზე, სუფთა, მინარევეების გარეშე წყალს ეხებოდა. მაგრამ ქიმიურად სუფთა წყალი ბუნებაში ვერანაირად ვერ იარსებებს. ხელოვნურად დისტილირებული წყალიც, მრავალჯერადი გამოხდის შემდეგაც, შეიცავს გახსნილ ნახშირორჟანგს, აზოტს, ჟანგბადს, და ასევე უმნიშვნელო რაოდენობით ნივთიერებას, რომლისგანაც გაკეთდა ამ წყლის შემცავი მოცულობა.

ამრიგად, ხელოვნურადაც კი თითქმის სუფთა წყლის მიღება ძალზე რთულია, თუმცა ამის მცდელობა XX ს. დასაწყისში ჰქონდა გერმანელ ფიზიკოსს ფ.კალრაუმს. მან 42 გამოხდის ციკლის შემდეგ მიიღო ძალზე მცირე რაოდენობის და სულ რამდენიმე წამით, აბსოლუტურად სუფთა წყალი. ამ მცირე დროის განმავლობაში კალრაუმმა მოასწრო აბსოლუტურად სუფთა წყლის ელექტროგამტარობის გაზომვა.

რაშია ამ ანომალიების მიზეზი?

ვცადოთ ამ კითხვაზე პასუხის გაცემა, მაგრამ ჯერ განვიხილოთ წყლის სტრუქტურა ატომურ და მოლეკულურ დონეებზე.

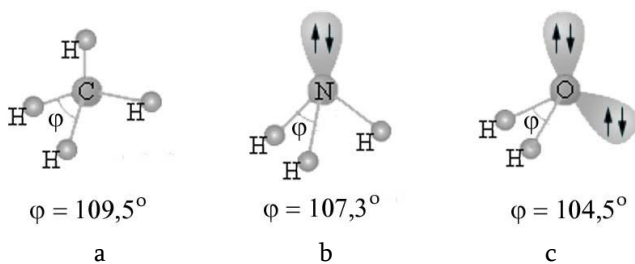


სურ. 64. ჟანგბადის ატომი (a,b,c) და წყლის მოლეკულის აგება (d,e,f).



სურ. 64a-ზე მოყვანილია ჟანგბადის ატომი ძირითად მდგომარეობაში, რომელშიც p ორბიტალებზე მოთავსებულია ორი შეწყვილური და ორი შეუწყვილადი ელექტრონი. იქვე, ქვემოთ, მოყვანილია ჟანგბადის ატომის მოდელი შეფერადებული p ორბიტალებით. ერთერთი ორბიტალი ბოლომდეა შევსებული, ხოლო დანარჩენი ორი – ნაწილობრივ. სურ. 64b-ზე წარმოდგენილია ჟანგბადის ატომის ჰიბრიდიზაციის ორი ვარიანტი –  $sp^2$  და  $sp^3$ . პირველ, ანუ  $sp^2$  ჰიბრიდიზაციის შემთხვევაში, ორი ჰიბრიდული ორბიტალი ბოლომდეა შევსებული, ხოლო ერთი – ნაწილობრივ. ამ რიგად, სიბრტყეზე ფორმირდება, ტოლგვერდა სამკუთხედის კუთხეებზე ორიენტირებული ჰიბრიდული ორბიტალები-საგან შედგენილი სტრუქტურა, რომლის პერპენდიკულარულად განლაგდება p ორბიტალი.  $sp^3$  ჰიბრიდიზაციის შემთხვევაში, ორი ჰიბრიდული ორბიტალი ბოლომდეა შევსებული, ხოლო ორი – ნაწილობრივ. მიღებული ატომის მოდელი მოყვანილია სურ. 64c-ზე. აქ ჟანგბადის ბირთვი იმყოფება სწორი ტეტრაედრის ცენტრში, ხოლო ჰიბრიდული ორბიტალები მის დიაგონალებზეა ორიენტირებული. შესაბამისად, კუთხე ორბიტალებს შორის შეადგენს  $\sim 109,5^\circ$ . ამ ნახატზე ბოლომდე შევსებული ჰიბრიდული ორბიტალები წითლადაა შეფერადებული, ხოლო ნაწილობრივ შევსებული – ლურჯად.

ჟანგბადის ატომს შეუძლია ორი წყალბადის ატომის მიერთება რის შედეგადაც წარმოიქმნება წყლის მოლეკულა. ასეთი მოლეკულის მოდელი, მასზე დატანილი ძირითადი პარამეტრებით, მოყვანილია სურ. 64d-ზე. აქ, ჟანგბადის ატომი წარმოდგენილია წითელი ფერის სფეროთი, რომლის რადიუსი ტოლია  $R_o = 0,66 \text{ \AA}$ . წყალბადის ატომები (A და B) ლურჯი ფერის სფეროებია, რომელთა რადიუსები ტოლია  $R_H = 0,53 \text{ \AA}$ . მოდელის ინტერპრეტირებისათვის მასზე ორი წრეა დატანილი – პირველი, რომლის რადიუსი  $R_1 = 0,96 \text{ \AA}$  გადის წყალბადის ატომების ცენტრებზე, ხოლო მეორე, რომლის რადიუსიც  $R_2 = 1,38 \text{ \AA}$ , გარს შემოერთყმის წყლის მოლეკულას. გარდა ამისა ცნობილია, რომ მანძილი წყალბადის ატომების ცენტრებს შორის (AB) ტოლია  $1,515 \text{ \AA}$ . მაშინ, ACO ან BCO სამკუთხედების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება გამოითვალოს კუთხე COB, და მათსადამე კუთხეც წყალბადის ატომებს შორის ( $\angle AOB$ ), რომელიც აღმოჩნდა  $\sim 104,5^\circ$ , და არა  $109,5^\circ$ , როგორც შეგვეძლო გვევარაუდა. ეს ფაქტი ჯერ ჯერობით ბოლომდე არაა გარკვეული და საჭიროებს შემდგომ ანალიზს.



სურ. 65. ვალენტური კუთხეების მნიშვნელობები: მეთანის (a), ამიაკის (b) და წყლის (c) მოლეკულებისათვის.

ავლნიშნოთ, რომ კავშირების კუთხეების ასეთი შეუსაბამლობა მათ გამოთვლილ მნიშვნელობებთან, აღინიშნება არა მხოლოდ წყლის მოლეკულაში. შედარებითი ანალიზისათვის სურ. 65-ზე მოყვანილია მეთანის ( $CH_4$ ), ამიაკის ( $NH_3$ ) და წყლის ( $H_2O$ ) მოლეკულები. მეთანის შემთხვევაში (სურ. 65a) ნახშირბადი ( $1s^2 2s^2 2p^2$ ) უკავშირდება წყალბადის ოთხ ატომს. ამიაკში (სურ. 65b) აზოტის ატომი ( $1s^2 2s^2 2p^3$ ) დაკავშირებულია წყალბადის სამ ატომთან, ხოლო წყალში (სურ. 65c) ჟანგბადის ატომი ( $1s^2 2s^2 2p^4$ ) უკვე წყალბადის ორ ატომს უკავშირდება. უნდა აღინიშნოს, რომ  $sp^3$  ჰიბრიდიზაციის შემთხვევაში ყველა ეს ატომი (ნახშირბადი, აზოტი და ჟანგბადი) იმყოფებიან ტეტრაედრის ცენტრში. პირველ შემთხვევაში (სურ. 65a) ყველა ჰიბრიდული ორბიტალი

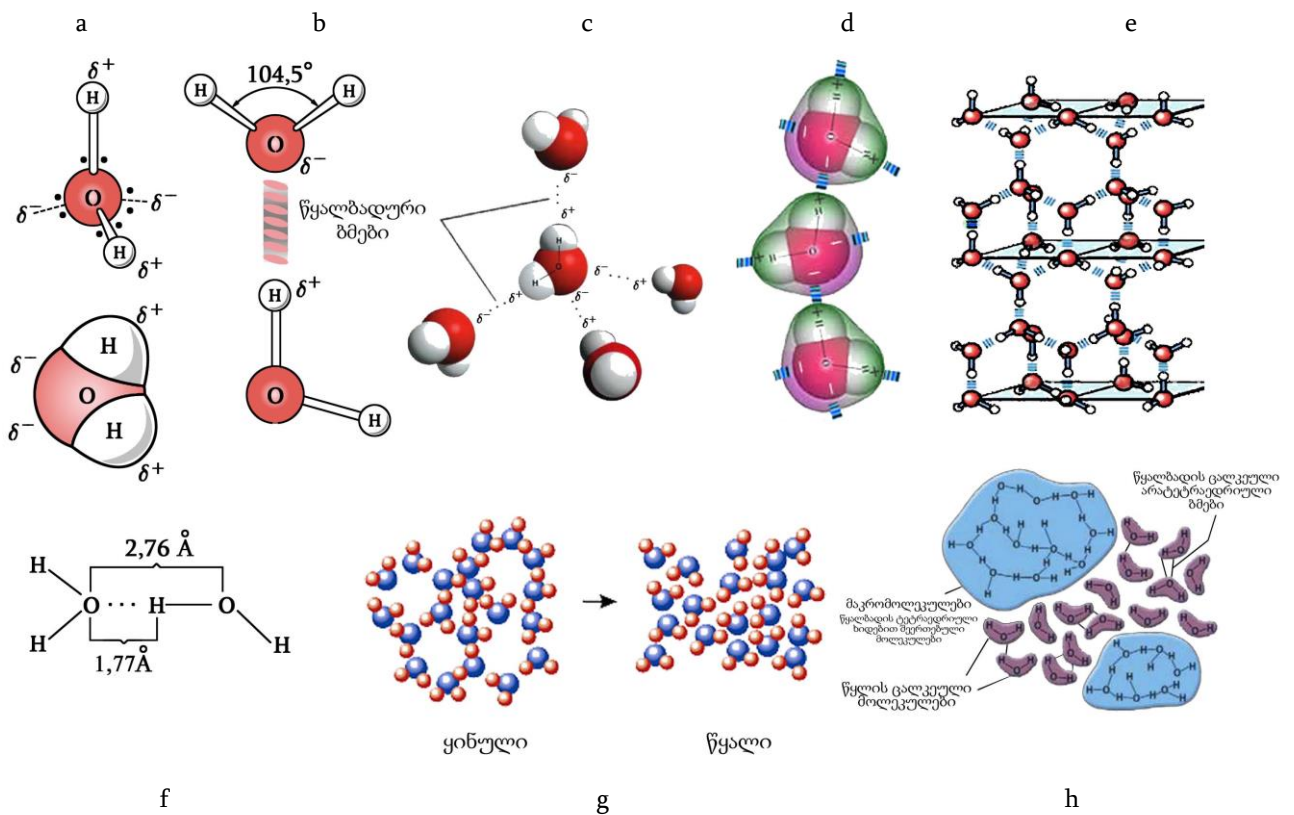
ქმედითა და წყალბადის ატომების ვალენტური კუთხეები<sup>71</sup> 109,5°-ის ტოლია. მეორე შემთხვევაში (სურ. 65b) ქმედითი მხოლოდ 3 ორბიტალია, ხოლო დარჩენილ ერთ ორბიტალზე იმყოფება ორი შეწყვილებული ელექტრონი. წყალბადის ვალენტური კუთხეები აქ 107,3°-ის ტოლია. წყლის შემთხვევაში (სურ. 65c) ქმედითი ორი ჰიბრიდული ორბიტალია, ხოლო დარჩენილ ორ ორბიტალზე იმყოფებიან ორ ორი შეწყვილებული ელექტრონი. წყალბადის ატომის ვალენტური კუთხეები აქ უკვე 104,5°-ის ტოლია.

ეხლა მოდით კვლავ დაუბრუნდეთ სურ. 64-ს. წყალბადის ატომების მიერთების შემდეგ, ჟანგბადის ჰიბრიდული ორბიტალები აღმოჩნდება შევსებული შეწყვილებული ელექტრონებით. სურ. 64f-ზე ლურჯი ფერის ორბიტალებზე მონიშნულია უკვე ორ ორი შეწყვილებული ელექტრონი და წყალბადის ატომების პროტონების დასმის ჰიპოტეტური ადგილები (მწვანე ფერის პატარა სფეროები).

ვინაიდან ჟანგბადის ბირთვს წყალბადის ბირთვთან შედარებით გააჩნია მეტი მუხტი, ის თავისკენ ექაჩება ელექტრონებს, ხოლო წყალბადი მათ პირიქით გასცემს. ამის შედეგად მიიღება წყლის ატომის პოლარული სტრუქტურა. სურ. 64e-ზე მოყვანილია წყლის მოლეკულის ჰიპოტეტური მოდელი და ნახვენებია მუხტების განაწილება მის ზედაპირზე. იისფერი შეფერილობის ფონზე მყოფი მოლეკულის ნახევარი, დადებითადაა დამუხტული, ხოლო ვარდისფერი შეფერილობის ფონზე – უარყოფითად.

ასე რომ, წყალი – დიპოლია, და ამიტომაც მას შეუძლია წყალბადური ბმების შექმნა. რაც შეეხება წყლის სტრუქტურას, ის უნდა განიხილოს როგორც წყალბადური ბმებით სტაბილიზირებული ცალკეული მოლეკულების სტატისტიკური კრებული. სუსტი კავშირები, და მასში შემავალი წყალბადური ბმები განიხილება შემდეგ თავებში.

განვიხილოთ წყლის სტრუქტურა დაწყებული ცალკეული მოლეკულიდან (სურ. 66).



სურ. 66. წყლის სტრუქტურა

<sup>71</sup> ვალენტური კუთხე – ეს არის კუთხე ერთი ატომიდან გამოსული ქიმიური (კოვალენტური) კავშირების მიმართულებებს შორის.

სურ. 66a-ზე მოყვანილია წყლის ცალკეული მოლეკულის სქემატური გამოსახულება, რომელზეც დატანილია ამ მოლეკულის წყალბადური ბმები: ( $\delta^-$ ) ჟანგბადის, ხოლო ( $\delta^+$ ) წყალბადის ატომებთან. სურ. 66b-ზე ისევ სქემატური გამოსახულებაა, მაგრამ უკვე წყლის ორი მოლეკულისათვის დატანილი წყალბადური ბმებით: ჟანგბადის ( $\delta^-$ ) და წყალბადის ( $\delta^+$ ) ატომებს შორის. სურ. 66f-ზე მოყვანილ სქემაზე ნაჩვენებია მანძილები წყლის მეზობელი მოლეკულების ჟანგბადის ატომებს შორის ( $2,76 \text{ \AA}$ ) და წყალბადური ბმის სიგრძე ( $1,77 \text{ \AA}$ ). წყლის ყოველ მოლეკულას, ვირტუალური ტეტრაედრის ცენტრში ყოფნისას, შეუძლია წყალბადური ბმების შექმნა ტეტრაედრის წვეროებში მყოფ ოთხ ასეთივე მოლეკულასთან, რაც სწორედაც ნაჩვენებია სურ. 66c-ზე. საჭიროა ყურადღების მიქცევა იმაზე, რომ წყალბადური ბმების შორისი კუთხეები განისაზღვრება ვალენტური კუთხეებით. ამიტომაც, ვინაიდან ვალენტური კუთხეები წყალში  $\sim 110^\circ$ , მასში არსებული წყალბადური ბმები შემოაბრუნებენ მოლეკულებს საწინააღმდეგო მიმართულებით (იხ. სურ. 66d), რის გამოც ისინი შორდებიან ერთმანეთს (იხ. სურ. 66e). წყალბადური ბმების არსებობის პირობებში მიღებული სტრუქტურა ნაკლებად მკვრივია, ვიდრე მათ გარეშე. ეხლა კი გავიხსენოთ, რომ წყალბადური კავშირი მიეკუთვნება სუსტ ურთიერთობებს. მაშასადამე, მოლეკულების სითბურ მოძრაობას შეუძლია ამ კავშირების დარღვევა და წყლის სტრუქტურა აღმოჩნდება უფრო მკვრივია (იხ. სურ. 66g), ვიდრე ყინულის სტრუქტურა, რომელშიც წყალბადური ბმები სტაბილიზირებულია (ვინაიდან სითბური მოძრაობა არ არღვევს ამ კავშირებს). წყლის გაყინვისას წყალბადური ბმები ასტაბილურად მის სტრუქტურას.

ეხლა ვივარაუდოთ, რომ წყლის მცირე მოცულობაში აღინიშნება „ლოკალური სიმშვიდე“. რაც უფრო მცირეა ეს მოცულობა, მით მეტია მისი სტრუქტურირების ალბათობა წყალბადური ბმების მეშვეობით. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ასეთი სტრუქტურირებული უბნები წარმოიქმნება წყლის შედარებით დიდ მოცულობაში. ასეთი სტრუქტურის ვარიანტი, რომელიც ცნობილია ნემეტი და შერაგის მოდელის სახელით, მოყვანილია სურ. 66h-ზე. აქ, ლურჯი ფერით მონიშნულ უბნებში განლაგდებიან ე.წ. „მაკრომოლეკულები“ ან და, როგორც მათ ხშირად ეძახიან „კლასტრები“. ამ წარმონაქმნებში, წყლის მოლეკულები წყალბადური ბმების ხიდების მეშვეობით ერთიანდებიან ტეტრაედრულ სტრუქტურებში. სივრცეს „მაკრომოლეკულებს“ შორის იკავებენ წყლის მოლეკულები, რომელთა შორის შესაძლებელია ისეთი ცალკეული წყალბადური ბმების ხიდების არსებობა, რომლებიც არა ჰქმნიან ტეტრაედრულ სტრუქტურებს.

მოყვანილი მოდელი დღეისათვის საკმაოდ დიდი პოპულარობით სარგებლობს, თუმცა, ზოგიერთი მეცნიერის თვალსაზრისით არასაკმარისად დასაბუთებულია. მაგრამ სამართლიანობისათვის უნდა აღინიშნოს, რომ წყლის სტრუქტურის კლასტრულ მოდელს საკმაოდ ბევრი მომხრე ჰყავს. ამიტომ განვიხილოთ, თუ საიდან წარმოიშვა ეს მოდელი და რაში მდგომარეობს მისი პრინციპი.

ჯერ კიდევ წინა საუკუნის ორმოცდაათიან წლებში, ჯ.პოპლმა შემოგვთავაზა წყლის მოდელი უწყვეტი ტეტრაედრიული ბადის სახით, რომელშიც კავშირები მოლეკულებს შორის გამრუდებულია და სხვადასხვა სიგრძისა არიან. ეს მოდელი ხსნის წყლის გამკვრივებას ყინულის ღლობისას კავშირების გამრუდებით. როდესაც  $60 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$  გამოჩნდა ყინული II და ყინული IX-ს სტრუქტურების პირველი განმარტებები, ნათელი გახდა თუ როგორ შეიძლება კავშირების გამრუდებამ მიგვიყვანოს უფრო მკვრივ სტრუქტურებამდე. პოპის მოდელს არ შეეძლო აეხსნა წყლის თვისებების არამონოტონური დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და წნევაზე ისე კარგად, როგორც ამას აკეთებდა ორი

მდგომარეობის<sup>72</sup> მოდელი. ამასთან ერთად ცნობილი გახდა წყალბადური ბმების არსებობა, ამიტომაც წარმოიშვა „არეული“ მოდელების ორი ჯგუფი: *კლასტერული* და *კლატრატული* ჯგუფები.

პირველ ჯგუფში წყალი მოგვევლინებოდა კლასტერებში გაერთანებული წყალბადური ბმებით დაკავშირებული მოლეკულებისაგან. ეს კლასტერები „დაცურავდნენ“ წყლის მოლეკულების ზღვაში, რომლებიც არ იღებდნენ მონაწილეობას ასეთი კავშირების შექმნაში. მეორე, კლატრატური ჯგუფის მოდელები განიხილავდნენ წყალს როგორც წყალბადური ბმების უწყვეტ ბადეს (ჩვეულებრივ ამ კონტექსტში ასეთ ბადეს კარკასს უწოდებდნენ), რომელიც ღრუებს შეიცავდა; ამ ღრუებში თავსდებიან მოლეკულები, რომლებიც არა ჰქმნიან კავშირებს კარკასის მოლეკულებთან. არანაირ სიძნელეს არ წარმოადგენდა კლასტერული მოდელის მიკროფაზების ისეთი თვისებების და კონცენტრაციების ან და კლატრატური მოდელის კარკასის თვისებების და ღრუების შევსების ხარისხის ისეთი შერჩევა, რომ ახსნილიყო წყლის ყველა თვისება, მათ შორის ცნობილი ანომალიებიც.

პირველი კლატრატული ტიპის მოდელი 1946 წ შემოგვთავაზა ო.სამოილოვმა: მისი აზრით, წყალი ინარჩუნებს ჰექსაგონალური ყინულის მაგვარ წყალბადური ბმების ბადეს, რომლის ღრუებიც ნაწილობრივ მონომერული მოლეკულებითაა შევსებული. 1959 წ ლ.პოლინგმა შექმნა ამ მოდელის სხვა ვარიანტი: მისი აზრით სტრუქტურის საფუძვლად შეიძლება ვივარაუდოთ ზოგიერთი კრისტალოჰიდრატისათვის<sup>73</sup> დამახასიათებელი კავშირების ბადე.

ასეთი წყლის სტრუქტურულ ერთეულს წარმოადგენს კლასტერი, რომელიც კლატრატებიდანაა შედგენილი; კლატრატის ბუნებას კი განაპირობებენ კულონის შორეული კავშირები. კლასტერებში, უფრო ზუსტად კი თხევადკრისტალური სტრუქტურის დისლოკაციებში, შეიძლება იყოს კოდირებული ინფორმაცია გარემოსთან წყლის მოლეკულის ურთიერთობის შესახებ. ჟანგბადის და წყალბადის ატომების ასეთი ურთიერთობის შედეგად შესაძლებელია მოხდეს პროტონების ( $H^+$ ) მიგრაცია ესტაფეტური მექანიზმის გამოყენებით, რომელსაც მივყევართ პროტონის დელოკალიზაციამდე კლასტერის ფარგლებში (ხვრელური გამტარობის ანალოგი ნახევარგამტარებში). სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, დისლოკაციები კლასტერებში შეიძლება ფორმირდებოდეს წყლის მოლეკულის ელემენტარული შეტრიალების მეშვეობით, პროტონის გადატანისას ჟანგბადის სხვა ჰიბრიდულ ორბიტალზე.

წყალი, რომელიც შეიცავს სხვადასხვა ტიპის კლასტერების სიმრავლეს, ჰქმნის იერარქიულ სივრცულ თხევადკრისტალურ სტრუქტურას, რომელსაც შეუძლია მიიღოს და შეინახოს უზარმაზარი მოცულობის ინფორმაცია. ყველაფერი თითქოს და მართებულია, მაგრამ მოდით არ ავჩქარდეთ დასკვნების გაკეთებისას. საჭიროა დღეისათვის არსებული ფაქტობრივი მასალის ანალიზი აგრეთვე ექსპერიმენტის სწორედ ჩატარების პოზიციებიდან. მაგალითად, ინტერნეტი პირდაპირ გადავსებულია ინფორმაციით ეგრედ წოდებულ სტრუქტურირებულ წყალზე. ვრცელდება ფოტოსურათები რომლებზეც მოყვანილია სხვადასხვა ტიპის ყინულის კრისტალები. ამ კრისტალების ფორმა და სტრუქტურა თითქოს და განისაზღვრება გაყინვამდე წყლის მიერ „მოსმენილი“ მუსიკით (მასაკუ ემოტო – იაპონია). მოდით გავერკვეთ რაშია აქ საქმე.

<sup>72</sup> ორი მდგომარეობის მოდელის თანახმად წყალი არაა ერთიანი სითხე, არამედ წარმოადგენს ორი კომპონენტის ნარევის, რომლებიც განსხვავდებიან თვისებებით, მაგალითად სიმკვრივით და სიბლანტით და მათსადასრულ სტრუქტურითაც.

<sup>73</sup> კრისტალოჰიდრატები – წყლის მოლეკულების შემცავი კრისტალები.

დავიწყით ინფორმაციის ცნებიდან. საერთოდ, უფრო დაწვრილებით, ეს თემა განიხილება მართვის სისტემებისადმი მიძღვნილ თავში, მაგრამ მისი საწყისების განხილვა შეიძლება უკვე ამ ეტაპზე. ინფორმაცია, შენონის განმარტებით – ესაა ცნება რაიმეს შესახებ. ინფორმაცია შეიძლება არსებობდეს მისი მატარებლის დამოუკიდებლად, ანუ ვირტუალურად. მაგრამ ის ასევე შეიძლება იყოს გადატანილი მატერიალურ მატარებელზე, ანუ შესაძლებელია მისი „ჩაწერა“. ავლნიშნით რომ ამისათვის საჭიროა მისი რაიმე სახით კოდირება (ბგერებით, სიმბოლოებით, ცნებებით და ა.შ.), ანუ ეხლა უპრიანი იქნებოდა ინფორმაციის კოდირების დონეების განხილვა, რაც უეჭველად გართულებდა განსახილავ მასალას და ვინაიდან ეს ინფორმაცია სცილდება ჩვენს თემატიკას, ის შეიძლება განიხილოს მომდევნო თავებში. აქ კი მხოლოდ ავლნიშნავთ, რომ კოდირებული უნდა იყოს როგორც ციფრული, ასევე ანალოგური სახის ინფორმაცია. უბრალოდ, ანალოგური ინფორმაციის კოდირებისას საჭიროა კონკრეტული პარამეტრების გამოყენება, მაგალითად, სიხშირე ან ამპლიტუდა (მაგალითად, ფაზური ან ამპლიტუდური კონტრასტი მიკროსკოპიაში).

კოდირებული ინფორმაცია უკვე შეიძლება ჩაიწეროს მის მატარებელზე: ქაღალდი, დაფა, ვინილის დისკი, მაგნიტური ფირი და ა.შ. ინფორმაციის მატარებლად შეიძლება გამოდგეს წყლის კლასტერებიც, იმ პირობით, თუ იგი სხვადასხვა კლასტერებში იქნება მრავალჯერ დუბლირებული, რათა გაიზარდოს მისი შენახვის საიმედოობა. ანალოგიური წესით, ინფორმაციის დუბლირების პრინციპის გამოყენებით, იწერება ობიექტის გამოსახულება ჰოლოგრამაზე, რომელშიც მის უმცირეს ფრაგმენტებშიც კი ინახება სრული ინფორმაცია „გადაღებული“ ობიექტის შესახებ. უბრალოდ, საინფორმაციო „მარცვლების“ რაოდენობის ზრდისას, იზრდება სიგნალის ინტენსივობა. მაგრამ, როგორც ინფორმაციის ჩაწერისთვის, ასევე მისი ამოკითხვისათვის (ინფორმაციის მატარებლიდან), საჭიროა რაღაც საკომუნიკაციო მოწყობილობა (სისტემა) და გარკვეული „ჩაწერა-ამოკითხვის“ ალგორითმის არსებობა. თავად ინფორმაცია, ჯადოსნური წესით, ვერ გადავა მის მატარებელზე და ვერ იქნება იქიდან ამოკითხული.

ეხლა კი განვიხილოთ წყლის კლასტერები და ვივარაუდოთ, რომ მათ შეუძლიათ ინფორმაციის ხანგრძლივი შენახვა მისი განახლების (თავიდან გადაწერის) გარეშე. წესით, მასაკუ ემოტოს ცდებში, წყლის სტრუქტურაში მუსიკალური ნაწარმოების შესახებ ინფორმაციის ჩაწერამდე, მას უნდა გაევილო რამდენიმე ეტაპი:

- მუსიკა უნდა ყოფილიყო მოსმენილი რესპონდენტის მიერ;
- უნდა მომხდარიყო მისი კლასიფიცირება (კლასიკა, როკი, პოპი და ა.შ.);
- უნდა მომხდარიყო მისი გაანალიზება (რესპონდენტზე ემოციონალური ზეგავლენა).

მხოლოდ ამ ყველაფრის შემდეგ შესაძლებელი იქნებოდა კლასტერებში ჩაწერილი ინფორმაციის პოვნის მოლოდინი გექონოდა, და მათ მიერ მიღებული ინფორმაცია შეიძლება კრისტალიზაციის სხვადასხვა ფორმებში გამოვლენილიყო. მიაქციეთ ყურადღება, რომ „მუსიკასა“ და მისი წყლის სტრუქტურაში გამოსახვის შორის, იმყოფება ინფორმაციის დამამუშავებელი სისტემა – რესპონდენტი (მუსიკალური ნაწარმოების მომსმენი), ანუ რაღაც სისტემა (გონება, ინტელექტი) რომელსაც შეუძლია მუსიკალური ინფორმაციის მიღების და დამამუშავება.

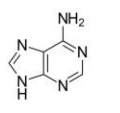
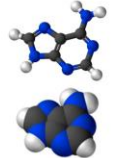
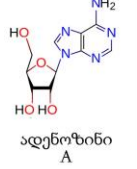

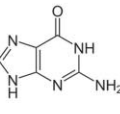
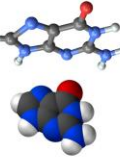
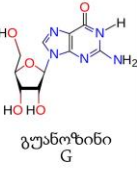
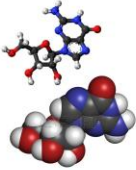
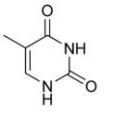

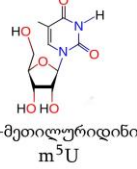
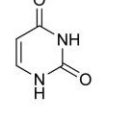
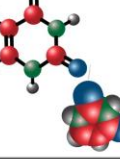
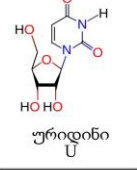
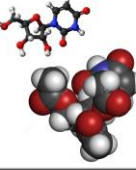
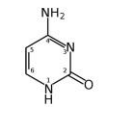

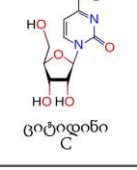
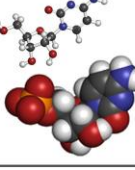
მასაკუ ემოტოს „ექსპერიმენტებში“ არანაირი ანალიზი არ ტარდებოდა. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, მან მოგვაწოდა შედეგები, მათ საფუძველში მყოფი მიზეზებში გარკვევის გარეშე. ანალოგია რომ გავავლოთ, მისი სიტყვებიდან გამომდინარე, შეიძლება მაგიდაზე დავდოთ ცარიელი, ჩაუწერავი დისკი, მოვასმენინოთ მას მუსიკა და ველოდოთ, რომ ეს მუსიკა აღმოჩნდება დისკზე ჩაწერილი. და ეს ყველაფერი მხოლოდ იქიდან გამომდინარე, რომ პრინციპში დისკზე შეიძლება მუსიკის ჩაწერა. ექსპერიმენტის

„სისუფთავესათვის“ მასაკუ ემოტოს წესით უნდა მოეხდინა წყლის მიერ მუსიკის „მოსმენის“ პროცესის სრული ავტომატიზირება. აპარატურასთან ახლოვ კი არ უნდა ყოფილიყო ადამიანი ან ნებისმიერი ცოცხალი არსება, რომელსაც თავისი ემოციებით შეეძლო მოეხდინა ზეგავლენა წყალში ინფორმაციის „ჩაწერის“ პროცესზე.

შეიძლება კიდევ ბევრი ვისაუბროთ წყალთან დაკავშირებულ საოცარ მოვლენებზე, მაგრამ ეს უკვე სცილდება ჩვენი კურსის შინაარსს. ამიტომაც, საბოლოო შტრიხისათვის, უბრალოდ ავღნიშნავთ, რომ წყლის სტრუქტურაში ჯერ კიდევ ბევრია გაუგებარი და საოცარი. ცხადია მხოლოდ ის, რომ წყალი – ეს სიცოცხლის საწყისია ჩვენს და შესაძლებელია არა მხოლოდ ჩვენს პლანეტაზე.

## 12.6. ბიომაკრომოლეკულების მონომერები.

ბიოლოგიური სისტემების სტრუქტურის და ფუნქციების ანალიზის ჩატარებისას, პირველ ყოვლისა საჭიროა მაკრომოლეკულების სტრუქტურული პირველსაწყისის, მათი მონომერების განხილვა. მონომერები შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც პატარა „აგურები“ რომლებისგანაც აგებულია ყველა ცოცხალი სისტემა ჩვენს პლანეტაზე. ვინაიდან წინამდებარე კურსის მიზანს წარმოადგენს ცოცხალი სისტემების ბიოფიზიკის და არა ბიოქიმიის შესწავლა, ჩვენს მიერ განიხილება მონომერები რომლებიც შედიან ნუკლეინის მჟავების შემადგენლობაში – ნუკლეოტიდები, და მონომერები რომლებიც შედიან ცილების შემადგენლობაში – ამინომჟავები.

	აზოტური ფუძე	მოდელი	ნუკლეოზიდი	მოდელი
პურინები	 ადენინი		 ადენოზინი A	
	 გუანინი		 გუანოზინი G	
პირიმიდინები	 თიმიინი		 5-მეთილურიდინი m <sup>5</sup> U	
	 ურაცილი		 ურიდინი U	
	 ციტოზინი		 ციტიდინი C	

სურ. 67. აზოტური ფუძეები და მათგან აგებული ნუკლეოზიდები.

**ნუკლეოტიდები** — წარმოადგენენ ნუკლეოზიდების ფოსფორულ ეთერებს. თავისუფალი ნუკლეოტიდები, კერძოდ კი ATP, cAMP, ADF მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ

ენერგეტიკულ და საინფორმაციო შიდაუჯრედულ პროცესებში, და ასევე წარმოადგენენ ნუკლეინის მჟავების და ბევრი კოფერმენტის შემადგენელ ნაწილებს.

**ნუკლეოზიდები** — წარმოადგენენ შაქართან დაკავშირებულ (რიბოზა ან დეზოქსი-რიბოზა) აზოტური ფუძის მქონე გლიკოზილამინებს. ნუკლეოზიდები შეიძლება იყვნენ ფოსფორილირებული უჯრედის კინაზებით შაქრის პირველ სპირტული ჯგუფის მიმართ, ამ დროს წარმოიქმნება შესაბამისი ნუკლეოტიდები (სურ. 67).

სურ. 67-ზე მოყვანილია აზოტური ფუძეების და ნუკლეოზიდების როგორც ჰიპოტეტური, ასევე სტრუქტურული მოდელები. სურათზე არაა ნაჩვენები დეზოქსინუკლეოტიდების ფორმულები და მოდელები, ვინაიდან ჩვენს მიზანს წარმოადგენს არსებული სისტემების სტრუქტურული ორგანიზების განხილვა და არა მათი ბიოქიმიური ასპექტები. მოყვანილ მოდელებში ინტერესს იწვევს პირველყოვლისას მათი ძალიან დიდი სტრუქტურული მსგავსობა. განსაკუთრებით კი, თუ ყურადღებაში მივიღებთ იმ გარემოებას, რომ მაკრომოლეკულარული სისტემების ფორმირებისას, ნუკლეოზიდები ჯგუფებიან კომპლემენტარული პრინციპით: პურინები — პირიმიდინები. ამიტომაც, შედეგად მიიღება ღერძსიმეტრიული სტრუქტურები – გრძელი ორმაგი სპირალები.

სრულიად საწინააღმდეგო სურათს ვღებულობთ ცილოვანი სტრუქტურების ანალიზის დროს, და ეს ყველაფერი იმიტომ, რომ მათ საწყისს წარმოადგენენ ძირითადად 20 (24) ამინომჟავა.

**ამინომჟავები** — ორგანული (კარბონული) მჟავები, რომლებიც, როგორც წესი, შეიცავენ ერთ ან ორ ამინოჯგუფს ( $-NH_2$ ). ამინომჟავის ყოველ მოლეკულაში ჩართულია ნახშირბადის ატომი ოთხი შემცვლელი ელემენტით. ერთ-ერთი მათგანიდან – წყალბადის ატომია, მეორე – კარბოქსილური ჯგუფი –  $COOH$ . კარბოქსილურ ჯგუფს ადვილად ეცლება წყალბადის იონი  $H^+$ , სწორედ ამიტომ ამინომჟავების დასახელებაში მონაწილეობს სიტყვა „მჟავა“. მესამე შემცვლელი ელემენტი – ამინოჯგუფია  $-NH_2$ . ამინომჟავის მეოთხე ელემენტი – ატომთა ჯგუფი, რომლებიც საერთო შემთხვევაში R-ით აღინიშნებიან. ყველა ამინომჟავას განსხვავებული R-ჯგუფები გააჩნიათ. R-ჯგუფს აგრეთვე გვერდითი ჯაჭვი ჰქვია. ამინომჟავის საერთო ფორმულა ნეიტრალურ გარემოში ( $pH = 7$ ) ასე გამოიყურება:

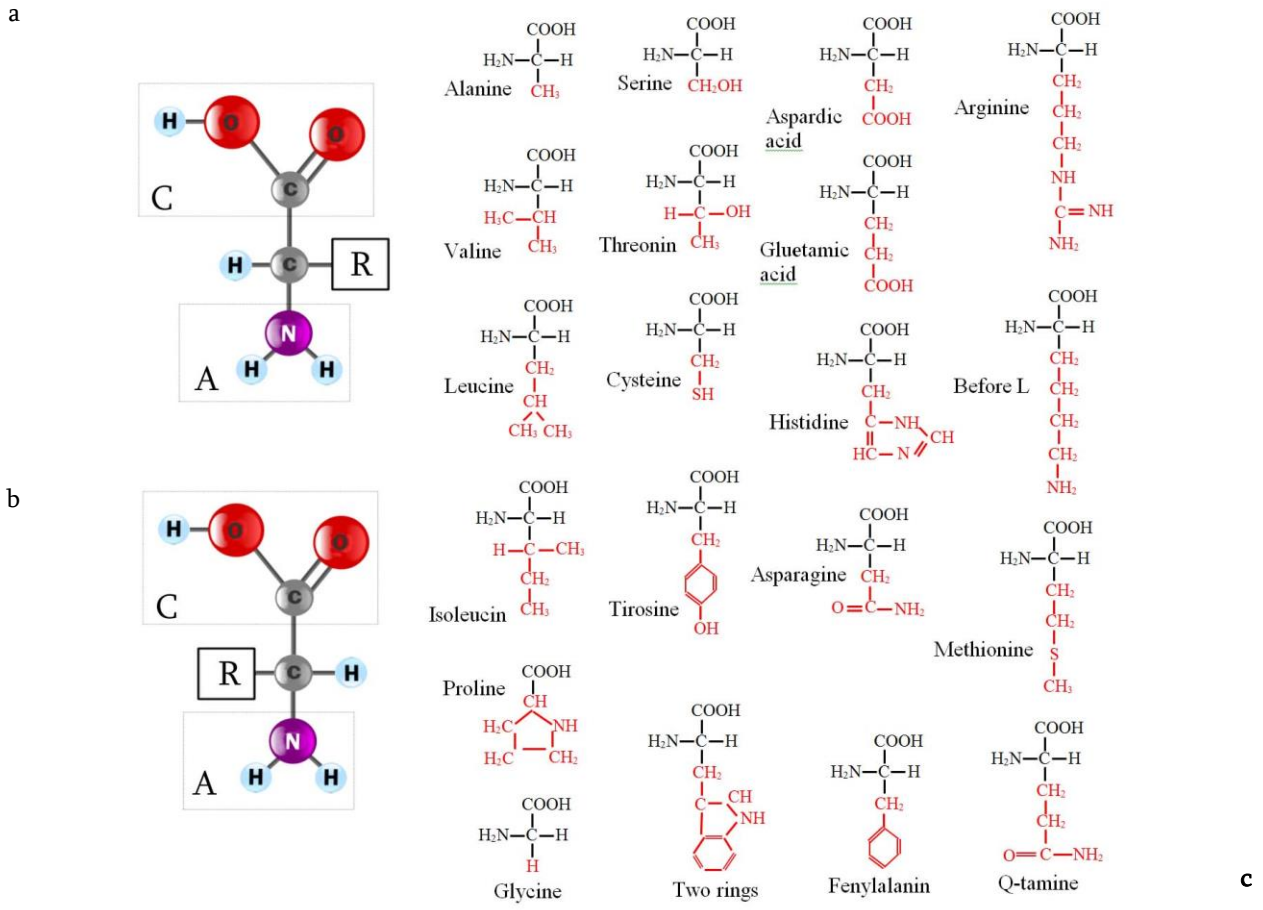


რაც შეეხება  $-COOH$  ჯგუფს, ქიმიკოს-ორგანიკოსები მას დიდი მოწიწებით ებყრობიან: მოლეკულაში ნახშირბადის ყველა სხვა ატომს ეძლევათ აღნიშვნა იმის მიხედვით, თუ რამდენადაა ის დაშორებული კარბოქსილურ ჯგუფს. კარბოქსილური ჯგუფის უახლოვეს ატომს ეწოდება  $\alpha$ -ატომი, მეორეს –  $\beta$ -ატომი და ა.შ. ამინომჟავებში შემავალი ნახშირბადის ატომი, რომელიც ყველაზე ახლოსაა კარბოქსილურ ჯგუფთან, ანუ  $\alpha$ -ატომი, აგრეთვე უკავშირდება ამინოჯგუფს. ამიტომაც, ცილების შემადგენლობაში შემავალ ბუნებრივ ამინომჟავებს  $\alpha$ -ამინომჟავებს უწოდებენ.

ბუნებაში აგრეთვე გვხვდება ამინომჟავები, რომლებშიც  $NH_2$ -ჯგუფი უკავშირდება კარბოქსილურ ჯგუფის უფრო მოშორებულ ნახშირბადის ატომებს. მაგრამ ცილების აგებისათვის ბუნებამ აირჩია სწორედ რომ  $\alpha$ -ამინომჟავები. ეს განპირობებულია პირველყოვლისა იმით, რომ მხოლოდ გრძელ ჯაჭვებში ჩართულ  $\alpha$ -ამინომჟავებს შეუძლიათ დიდი ცილოვანი მოლეკულების საკმარისი სიმტკიცის და სტრუქტურის მდგრადობის უზრუნველყოფა.

ყოველი  $\alpha$ -ამინომჟავა (გლიცინის გარდა) იმის მიხედვით თუ როგორია ოთხი შემცვლელი ელემენტის ურთიერთ განლაგება, შეიძლება არსებობდეს ორ ფორმაში. ისინი ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან ისე, როგორც საგანი და მისი სარკისებრივი ანარეკლი. ასეთ ნაერთებს დაარქვენ ქირალურები (ბერძ. „ქირ“ — ხელი).

ქირალური მოლეკულები 1848 წელს აღმოაჩინა დიდმა ფრანგმა მეცნიერმა ლუი პასტერმა. ორგანული მოლეკულების ოპტიკური იზომერების ორმა ტიპმა მიიღეს D-ფორმის (ლათ. Dexter – მარჯვენა) და L-ფორმის (ლათ. Laevus – მარცხენა) სახელები. დღეისათვის ცნობილ ყველა ცილის შემადგენლობაში შედიან მხოლოდ L-რივის ამინომჟავები, რომლებშიც, თუ კი უყურებთ ქირალურ ატომს H ატომის მხრიდან, NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, COO<sup>-</sup> ჯგუფები და რადიკალი –R განლაგდებიან საათის ისრის მიმართულებით (იხ. სურ. 68a). თუ კი NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, COO<sup>-</sup> ჯგუფები და რადიკალი –R განლაგდებიან საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით D-ფორმის სიმეტრიას. როგორც უკვე ითქვა, ცილების შემადგენლობაში შედიან მხოლოდ L-ამინომჟავები. მოლეკულების აგებაში ჩვეულებრივად მონაწილეობს 20 L-α-ამინომჟავა (იხ. სურ. 68c).



სურ. 68. ცილების შემადგენლობაში შემავალი 20 ძირითადი ამინომჟავა. ამინომჟავის სტრუქტურული აგებულება L-ფორმა (a) და D-ფორმა (b); A – ამინოჯგუფი; C – კარბოქსილური ჯგუფი, R – რადიკალი (გვერდითი ჯაჭვი, გამოყოფილია კვადრატით). (c) მოყვანილია ძირითადი ამინომჟავების სტრუქტურული ფორმულები; წითელი ფერით გამოყოფილია გვერდითი ჯაჭვები.

### ამინომჟავების კლასიფიცირება

1. ფიზიკო-ქიმიური – ეფუძნება განსხვავებებს მათი ფიზიკო-ქიმიურ თვისებებში.
  - 1.1. ჰიდროფობული ამინომჟავები (არაპოლარული). რადიკალების კომპონენტები ჩვეულებრივ შეიცავენ ნახშირწყალბადის ჯგუფებს და არომატულ რგოლებს. ჰიდროფობულ ამინომჟავებს მიეკუთვნებიან: ალანინი, ვალინი, ლეიცინი, იზოლეიცინი, გლიცინი, პროლინი.
  - 1.2. ჰიდროფილური (არაპოლარული) დაუმუხტავი ამინომჟავები. ამ ამინომჟავების რადიკალები თავის შემადგენლობაში შეიცავენ პოლარულ დაჯგუფებებს (–OH,



-SH, -NH<sub>2</sub>). ეს ჯგუფები ურთიერთობენ წყლის დიპოლურ მოლეკულებთან, რომლებიც მათ გარშემო ორიენტირდებიან. პოლარულ დაუმუხტავ ამინომჟავებს მიეკუთვნებიან: სერინი, ტრეონინი, ცისტეინი, მეთიონინი, ასპარაგინი, გლუტამინი.

1.3. **არომატული ამინომჟავები:** ფენილალანინი, ტრიფტოფანი, თიროზინი.

1.4. **პოლარული უარყოფითად დამუხტული ამინომჟავები.** მათ მიეკუთვნებათ: ასპარაგინის და გლუტამინის მჟავები. ნეიტრალურ გარემოში ასპარაგინის მჟავა და გლუტამინის მჟავა უარყოფით მუხტს იძენენ.

1.5. **პოლარული დადებითად დამუხტული ამინომჟავები.** მათ მიეკუთვნებათ: არგინინი, ლიზინი, ჰისტიდინი. რადიკალში გააჩნიათ დამატებითი ამინოჯგუფი (ანჰისტიდინის მაგვარად იმიდაზოლური რგოლი). ნეიტრალურ გარემოში არგინინი, ლიზინი, ჰისტიდინი იღებენ დადებით მუხტს.

2. ბიოლოგიური კლასიფიცირება.

2.1. შეუცვლელი ამინომჟავები ვერ სინთეზირდებიან ადამიანის ორგანიზმში და ორგანიზმში აუცილებრივ საკვებთან ერთად უნდა მოხვდნენ (ვალინი, ლეიცინი, იზოლეიცინი, ლიზინი, მეთიონინი, ტრეონინი, ტრიპტოფანი, ფენილალანინი) და კიდევ 2 ამინომჟავა, რომელიც მიეკუთვნება ნაწილობრივ შეუნაცვლადს (არგინინი, ჰისტიდინი).

2.2. შენაცვლებადი ამინომჟავები შეიძლება სინთეზირდეს ადამიანის ორგანიზმში (გლუტამინის მჟავა, გლუტამინი, პროლინი, ალანინი, ასპარაგინის მჟავა, ასპარაგინი, თიროზინი, ცისტეინი, სერინი და გლიცინი).

### ამინომჟავების აგებულება.

ყველა ამინომჟავა ეკუთვნის  $\alpha$ -ამინომჟავებს. ყველა ამინომჟავის საერთო ნაწილის ამინოჯგუფი  $\alpha$ -ნახშირბადის ატომზეა მიერთებული. ამინომჟავები შეიცავენ კარბოქსილურ -COOH და ამინოჯგუფებს -NH<sub>2</sub>. თვითონ ცილებში პეპტიდური ბმების შექმნაში მონაწილეობენ ამინომჟავების საერთო ნაწილების იონოგენური ჯგუფები, ხოლო ცილის ყველა თვისებას განსაზღვრავენ მხოლოდ ამინომჟავების რადიკალების თვისებები. ამინომჟავები ამფოტერული <sup>74</sup> შენაერთებია. ამინომჟავის დასახასიათებლად ძალზე მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს მისი იზოელექტრული წერტილი (pI) — pH-ის ის მნიშვნელობა, რომელზეც ამინომჟავის მოლეკულების მაქსიმალური ნაწილი ნულოვანი მუხტის მატარებელი ხდება. ბუნებრივია, რომ ცილებსაც ექნებათ აღნიშნული პარამეტრი. შეიძლება მოვიყვანოთ ცილის იზოელექტრული წერტილის შემდეგი განმარტება: **გარემოს pH-ის მნიშვნელობას, რომელზეც ჯამური მუხტი ცილის ზედაპირზე ნულის ტოლია, ცილის იზოელექტრული წერტილი ეწოდება – pI.** თუ  $pH < pI$  ცილის მოლეკულა იქნება დადებითად დამუხტული, ხოლო თუ  $pH > pI$  – უარყოფითად.

ყველაფერი ეს ნიშნავს, რომ უჯრედს გააჩნია ცილების სტრუქტურის რეგულაციის მექანიზმი – ეს არის გარემოს pH-ის მნიშვნელობა. მაგალითად, ნეიტრალური pH-ის შემთხვევაში ასპარაგინის მოლეკულა იქნება უარყოფითად დამუხტული, ლიზინის კი – დადებითად. ლოკალურად pH-ის შემცირებისას 3,09-ზე მცირე მნიშვნელობამდე, ასპარაგინის მოლეკულა დაიმუხტება დადებითად, ხოლო ლოკალურად pH-ის ზრდისას 9,74-ზე მეტ მნიშვნელობამდე, დადებითად დაიმუხტება ლიზინის მოლეკულა. ეს კი ნიშნავს, რომ ცოცხალ სისტემებს გააჩნიათ თავისი სტრუქტურული ელემენტების სისტემური რეგულაციის მშვენიერი საშუალება. უნდა გვახსოვდეს, რომ ამინომჟავების

<sup>74</sup> **ამფოტერულობა** (ბერძ. ორმაგობა, ორმხრივობა) — ზოგიერთი ქიმიური ნივთიერებების და შენაერთების უნარი პირობებიდან გამომდინარე გამოავლინონ როგორც მჟავების, ასევე ტუტების თვისებები.

მუხტის სიდიდე და მნიშვნელობა, განმსაზღვრავი ფაქტორია მაკრომოლეკულების სტრუქტურული ორგანიზებისას.

ცხრილი 18

				B.C.	pl	M (გ/მოლი)
ალანინი	Ala	A	Alanine	C	6,11	89,09
სერინი	Ser	S	Serine	C	5,68	105,09
ასპარაგინის მჟავა	Asp	D	asparDic acid	C	2,98	133,1
არგინინი	Arg	R	aRginine	B	10,76	174,2
ვალინი	Val	V	Valine	A	6,00	117,15
ტრეონინი	Thr	T	Threonine	A	6,16	119,12
გლუტამინის მჟავა	Glu	E	gluEtamic acid	C	3,09	147,13
ლეიციანი	Leu	L	Leucine	A	6,04	131,18
ცისტეინი	Cys	C	Cysteine	C	5,08	121,16
ჰისტიდინი	His	H	Histidine	B	7,64	155,16
ლიზინი	Lys	K	before L	A	9,74	146,19
იზოლეიციანი	Ile	I	Isoleucine	A	5,68	131,17
თიროზინი	Tyr	Y	tYrosine		5,63	181,19
ასპარაგინი	Asn	N	asparagiNe	C	3,09	132,12
მეთიონინი	Met	M	Methionine	A	5,74	149,21
პროლინი	Pro	P	Proline	C	7,64	115,13
გლიცინი	Gly	G	Glycine	C	6,20	75,07
ტრიპტოფანი	Trp	W	tWo rings	A	5,88	204,23
ფენილალანინი	Phe	F	Fenylalanine	A	5,91	165,19
გლუტამინი	Gln	Q	Q-tamine	C	3,09	146,14

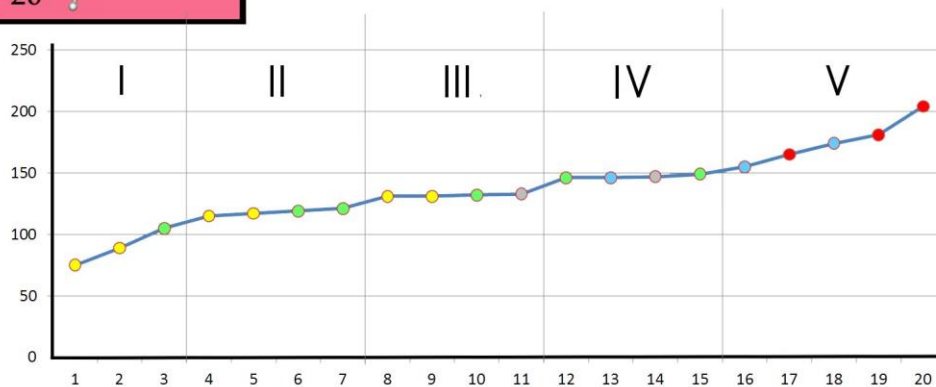
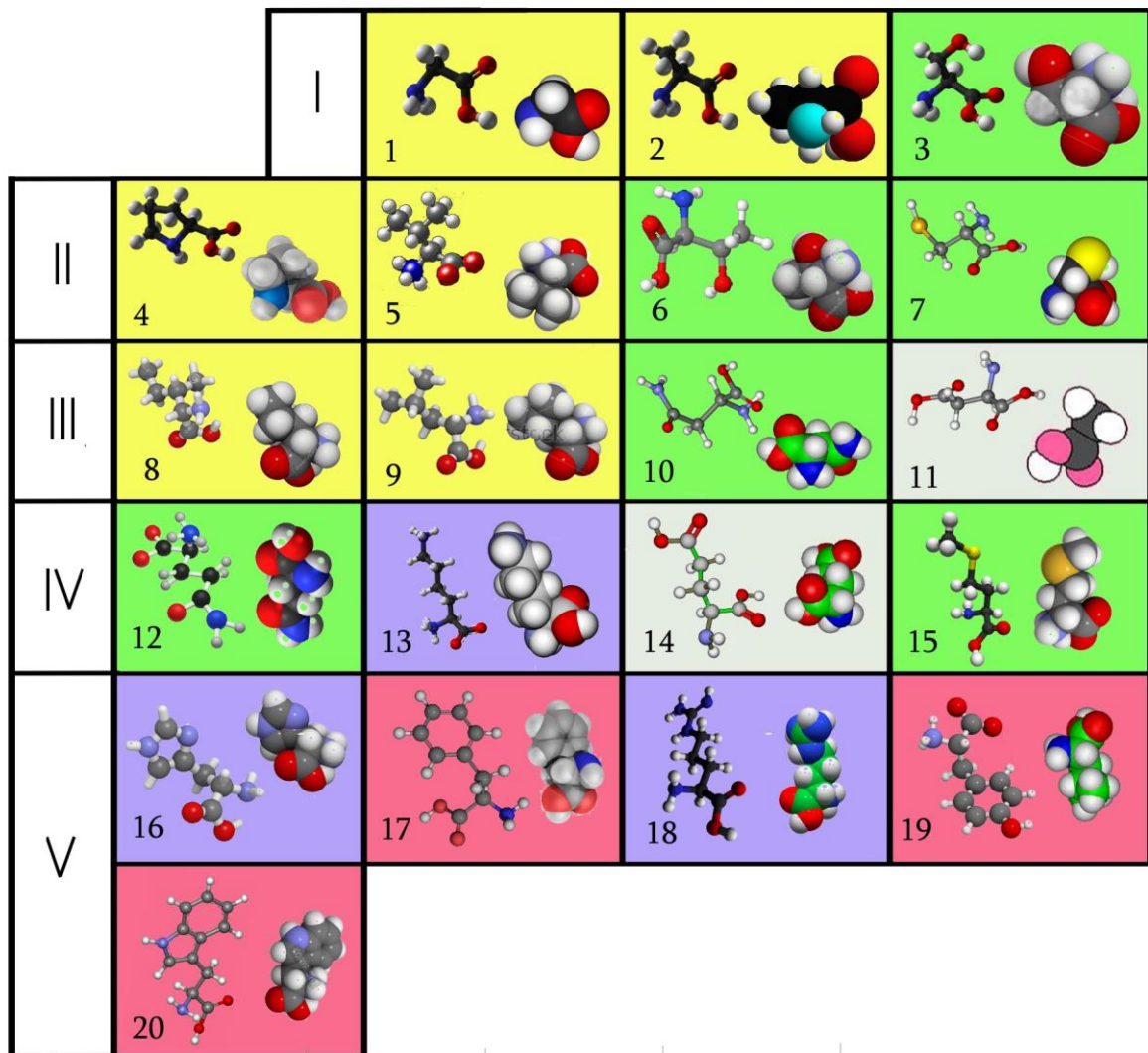
	ჰიდროფობული ამინომჟავები (არაპოლარული)
	ჰიდროფილური (პოლარული) დამუხტავი
	არომატული ამინომჟავები
	პოლარული (-) დამუხტული ამინომჟავები
	პოლარული (+) დამუხტული ამინომჟავები

შეუცვლელი ამინომჟავები A  
 ნაწილობრივ შეუცვლელი ამინომჟავები B.C.  
 შენაცვლებადი ამინომჟავები C

ბიოლოგიური კლასიფიცირება

ცხრილი 19

ჯგ	№		M გ/მოლი
I	1	გლიცინი	75.07
	2	ალანინი	89.09
	3	სერინი	105.09
II	4	პროლინი	115.13
	5	ვალინი	117.15
	6	ტრეონინი	119.12
	7	ცისტეინი	121.16
III	8	იზოლეიციანი	131.17
	9	ლეიციანი	131.18
	10	ასპარაგინი	132.12
III	11	ასპარაგინის მჟავა	133.10
IV	12	გლუტამინი	146.14
	13	ლიზინი	146.19
	14	გლუტამინის მჟავა	147.13
V	15	მეთიონინი	149.21
	16	ჰისტიდინი	155.16
	17	ფენილალანინი	165.19
	18	არგინინი	174.20
	19	თიროზინი	181.19
	20	ტრიპტოფანი	204.23



სურ. 69. ხუთ ჯგუფად დალაგებული ამინომჟავების ჰიპოტეტური და სტრუქტურული მოდელები. გარკვეული ჯგუფისადმი კუთვნილობა განისაზღვრებოდა სურათის ქვემოთ მოყვანილი გრაფიკიდან, სადაც ფასდებოდა მოლეკულების ზომები, მათი მოლეკულური მასის მიხედვით. ორდინატების ღერძზე აღრიცხულია ამინომჟავების მოლეკულური მასა (გ/მოლ), ხოლო აბსცისის ღერძზე ამინომჟავების რიგითი ნომრები, რომლებიც მოყვანილია ცხრილის უჯრედების ქვემო მარცხენა კუთხეებში. უჯრედების ფერები აღებულია ცხრილი 18-დან და ახასიათებენ ამინომჟავების ფიზიკო-ქიმიურ თვისებებს, ხოლო ჯგუფებად დაყოფა ასახულია ცხრილი 19-ში.

რაც შეეხება მაკრომოლეკულების ნატიურ სტრუქტურებს, მათი ფორმირებისას განმსაზღვრავი იქნება საშენი „აგურების“ საწყისი ზომები, ანუ ამინომჟავების ზომები. ამინომჟავის ზომის შეფასება შეიძლება მისი მოლეკულური მასის მიხედვით. ამიტომაც, ცხრილი 18 და ცხრილი 19-ში მოყვანილია ამინომჟავების მოლეკულური მასები (გ/მოლ).

ცხრილი 19-ში ამინომჟავები დალაგებულია მოლეკულური მასის ზრდის მიხედვით, ანუ ცხრილის დასაწყისში იმყოფება ყველაზე მცირე ზომის ამინომჟავა – გლიცინი ( $M = 89,09$  გ/მოლ), ხოლო ბოლოში კი ყველაზე დიდი – ტრიპტოფანი ( $M = 204,23$  გ/მოლ). სურ. 69-ის ქვემოთ მოყვანილ დიაგრამიდან, რომელზეც ორდინატების ღერძზე აღრიცხულია ამინომჟავების მოლეკულური მასა (გ/მოლ), ხოლო აბსცისის ღერძზე ამინომჟავების რიგითი ნომრები (მოყვანილია იმავე სურათზე მყოფი ცხრილის უჯრედების ქვემო მარცხენა კუთხეებში), ჩანს, რომ ამინომჟავები ბუნებრივი წესით ლაგდება ხუთ ჯგუფათ. პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება პირველი სამი ამინომჟავა: გლიცინი, ალანინი და სერინი, რომელთა მასები საკმაოდ განსხვავდება ერთმანეთისაგან (18 – 19%). შემდეგ, მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება ოთხი ამინომჟავა: პროლინი, ვალინი, ტრეონინი, ცისტეინი რომელთა მასები დაახლოებით ერთმანეთის ტოლია (განსხვავება 1,7%). მესამე ჯგუფში კვლავ ოთხი ამინომჟავაა: იზოლეიცინი, ლეიცინი, ასპარაგინი, ასპარაგინის მჟავა, რომლებსაც ასევე დაახლოებით ერთნაირი მასები გააჩნია (განსხვავება ~0,8%). მეოთხე ჯგუფში განლაგდნ ამინომჟავები: გლუტამინი, ლიზინი, გლუტამინის მჟავა, მეთიონინი (განსხვავება ~2 – 4 %). და ბოლოს, მეხუთე ჯგუფს მიეკუთვნება ხუთი ამინომჟავა, რომლებიც ზომებიდან საკმაოდ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან: გისტიდინი, ფენილალანინი, არგინინი, თიროზინი, ტრიპტოფანი (განსხვავება ~ 6 – 12 %).

მოდით გავერკვეთ, თუ რა გზით ამინომჟავების მოლეკულების ზომები ახდენენ ზეგავლენას მთელი მაკრომოლეკულის სტრუქტურულ ორგანიზებაზე. ამისათვის ცოტა შევიჭრათ მომდევნო თავებში განსახილავ მასალაში.

მეორადი სტრუქტურის ფორმირებისას, მის სტაბილიზირებაში მონაწილე წყალბადური ბმები, წარმოიქმნება კარბოქსილურ და ამინოჯგუფებს შორის. როგორ ეს ჩანს სურ. 68a,b-დან, ყველა ამინომჟავის ფუძე ერთი და იგივეა — ესაა კარბოქსილური და ამინოჯგუფები, ეს კი ნიშნავს, რომ ამინომჟავების ზომები არ უნდა ახდენდნ ზეგავლენას წყალბადური ბმების ფორმირებაზე, ანუ უნდა იქმნებოდეს ერთი ტიპის სტრუქტურები, მაგალითად, გრძელი  $\alpha$ -სპირალები, მაგრამ სინამდვილეში ესე არ არის. საქმე იმაშია, რომ ამინომჟავების გვერდითი ჯაჭვები (რადიკალები), რომლებიც განსაზღვრავენ მათ ძირითად თვისებებს, მათ შორის ზომებსაც, ხელს უშლიან ერთი ტიპის სტრუქტურების შექმნას. უფრო მარტივად რომ ითქვას, რადიკალები „გამოშვერილები“ არიან მაკრომოლეკულის ფუძედან და რათგანაც ცილა შედგება სხვადასხვა, განსხვავებული რადიკალების მქონე ამინომჟავების დიდი რაოდენობისაგან, მათი ურთიერთობა არ აძლევს მოლეკულას საშუალებას შეიქმნას ერთი ტიპის სტრუქტურა.

ბიომაკრომოლეკულების ფუნქციონირების პრინციპების გასაგებისათვის, განმსაზღვრავია მათი სტრუქტურა. ამიტომ, მაკრომოლეკულის სტრუქტურის გამოსავლენათ საჭიროა ჩატარდეს კვლევები სტრუქტურული ანალიზის სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებით. ქვემოთ განვიხილავთ ასეთი ანალიზის ძირითად მეთოდებს, რომლებმაც ჰპოვა ფართო გამოყენება მაკრომოლეკულების ბიოფიზიკაში და მოლეკულურ ბიოლოგიაში.

## 12.7. დიფრაქციის თეორიის საფუძვლები.

როგორც უკვე აღინიშნებოდა, ელექტრონულ მიკროსკოპში გამოსახულების ფორმირებისას, საწყის ეტაპზე წარმოიქმნება ობიექტის დიფრაქციული სურათი. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, მიკროსკოპში რეალურ სივრცეში მყოფ ობიექტიდან წარმოიქმნება გამოსახულება უკუ, ანუ დიფრაქციულ სივრცეში. მიღებულ დიფრაქციულ სურათს, ოპტიკური მიკროსკოპის ანალოგიური გამოსახულებებიდან განსხვავებით, გააჩნია მნიშვნელოვანი ინფორმაცია გამოსაკვლევი ობიექტის შესახებ. ელექტრონული მიკროსკოპის მემვობით მიღებული დიფრაქციულ სურათები გაცილებით მეტად ინფორმატიულია

ვიდრე რენტგენული დიფრაქციებიც კი, ვინაიდან შეიცავენ ინფორმაციას რეფლექსების ფაზების შესახებ.

გარდა ამისა, პირდაპირ სივრცეში მიღებული ელექტრონული მიკროფოტოსურათების ანალიზისათვის (ჩვეულებრივი გამოსახულება), ტრადიციულად გამოიყენებენ ოპტიკური დიფრაქციული ანალიზის მეთოდებს, რომელიც იყო შემოთავაზებული ჯერ კიდევ 1964 წ ბრიტანელი მეცნიერის ნობელის პრემიის ლაურეატის, არონ კლუგის მიერ. აქ, დიფრაქციული ანალიზის ობიექტად წარმოგვიდგება ელექტრონული მიკროფოტოსურათები, ანუ ობიექტის გამოსახულება პირდაპირ სივრცეში. ეს მეთოდი უკავშირდება დიფრაქციული მესერის ზომას და მასზე დასხივებულ ტალღის სიგრძეს, რომლებიც ადრე განხილული ბრეგი-ვულფის პირობის თანახმად, ერთი რიგისანი უნდა იყვნენ.

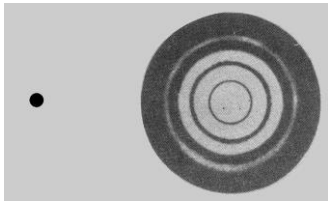
რენტგენის სხივების ელექტრომაგნიტური ბუნება საშუალებას იძლევა გავატაროთ ანალოგია რენტგენის სხივების მიერ დიფრაქციის შედეგად გამოსახულების წარმოქმნის და ხილული სინათლის სხივებით მიღებული გამოსახულების შორის. ოპტიკურ მიკროსკოპში, როგორც უკვე იყო აღნიშნული, ობიექტი ნათდება ხილული სინათლის სხივების მიერ და გააბნევს მათ, ხოლო ეს გაბნეული სხივები შემდეგ გროვდებიან ობიექტის ლინზებით და რეკომბინაციის შემდეგ იძლევიან ობიექტის გამოსახულებას. რენტგენის სხივების შემთხვევაში გამოსახულების წარმოქმნის საწყისი პროცესი იგივეა. კრისტალი დასხივდება რენტგენის სხივთა კონით, ხოლო გაბნეული სხივები რეგისტრირდება ფოტოფირზე. მაგრამ რენტგენის სხივების შემთხვევაში ობიექტის ლინზების ანალოგია აღარ გვესაჭიროება. რენტგენის დასკვნა იმის თაობაზე რომ ნივთიერებათა ფართო წრის წარმომადგენლებს არ შეუძლიათ რენტგენის სხივების გარდატეხა, რჩება მეტნაკლებად მართებული<sup>75</sup>. ეს კი ნიშნავს, რომ არ არსებობს ისეთი მასალა, რომელიც შეიძლება გამოვიყენოთ რენტგენის სხივების ფოკუსირებისათვის. მაგრამ დიფრაქციის თეორია საშუალებას იძლევა ანალიტიკურად მოვახდინოთ გაბნეული რენტგენის სხივების რეკომბინირება კომპიუტერის მეშვეობით. აქ მხოლოდ ერთი პრობლემაა: იმისათვის რომ აღვადგინოთ ობიექტის გამოსახულება დიფრაქციული სურათის მიხედვით საჭიროა ყოველი დიფრაგირებული სხივის ფაზების და ინტენსივობების ცოდნა. მაგრამ დიფრაქციულ ექსპერიმენტში შეიძლება მხოლოდ გაბნეული სხივების ინტენსივობების გაზომვა. რეფლექსების ფაზათა შეფარდებასთან დაკავშირებული სრული ინფორმაცია იკარგება. ფაზების პოვნა – წარმოადგენს ძირითად პრობლემას ნებისმიერი რენტგენოსტრუქტურული კვლევისას.

ადრე, ჩვენ უკვე განვიხილეთ კრისტალი როგორც ელემენტარული უჯრედების სამგანზომილებიანი პერიოდული განლაგება. ყოველი ელემენტარული უჯრედი შეიცავს მოლეკულების ერთნაირ რაოდენობას, რომლებიც ისეა განლაგებული, რომ ყოველი მოლეკულა იმყოფება იმავე გარემოცვაში, როგორც ნებისმიერი სხვა. კრისტალის მიერ დიფრაგირებული სხივები შეიცავენ ინფორმაციას ელემენტარული უჯრედის დამოუკიდებელი ნაწილის წარმომქნელი მოლეკულის აგებულების შესახებ. თუ ცნობილია ელემენტარული უჯრედის დამოუკიდებელი ნაწილის აგებულება, ესე იგი ცნობილია კრისტალის ყველა დანარჩენი მოლეკულის სტრუქტურაც. რენტგენული და სინათლის დიფრაქციების ანალოგიით სარგებლობისას, შეიძლება წარმოვიდგინოთ ერთი მოლეკულის მოსალოდნელი დიფრაქციული სურათი და აგრეთვე მისი ცვლილება მოლეკულის კრისტალურ მესერში განთავსებისას. მიუხედავად იმისა, რომ კრისტალური სტრუქტურის განსაზღვრა წარმოადგენს სამგანზომილებიან პრობლემას, ჩვენ შემოვიფარგლებით ორგანზომილებიანი შემთხვევის განხილვით.

<sup>75</sup> სინამდვილეში რენტგენის სხივების უმნიშვნელო გარდატეხა მაინც ხდება: კალციტის კრისტალის გარდატეხის მაჩვენებელი შეადგენს 0,999998.

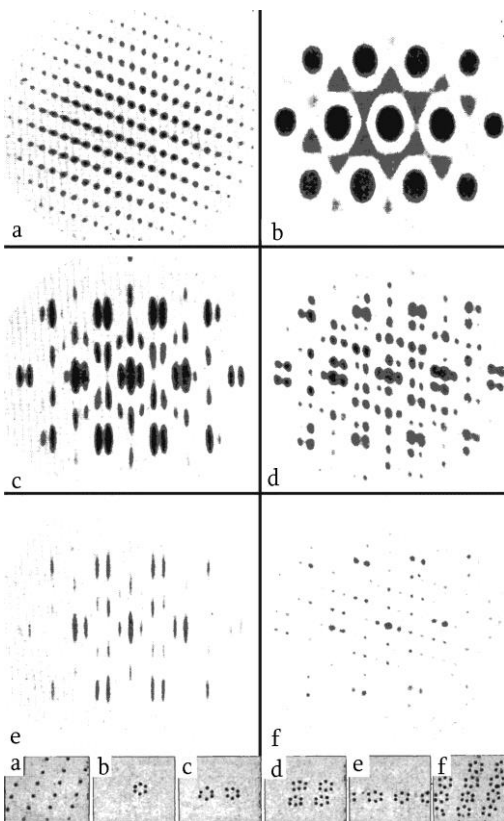
რენტგენის სხივების შემთხვევაში, კარგად კოლიმირებული<sup>76</sup> სხივთა კონის გამოყენებისას, შეიძლება კრისტალის დიფრაქციული სურათის რეგისტრირება ფოტოფირზე. ოპტიკური მოწყობილობა დიფრაქციული სიბრტყის სტადიის ჩათვლით (იხ. სურ. 26-ზე დიფრაქციული სიბრტყე – D) რენტგენული სხივების შემთხვევის ანალოგიურია. მაგრამ, ხილული სინათლის დიფრაქციის საწინააღმდეგოთ, რენტგენის სხივების ფოკუსირებისათვის საჭირო ლინზების არ არსებობის გამო, შეუძლებელია განხორციელდეს გაბნეული რენტგენის სხივების უშუალო რეკომბინირება.

ოპტიკური დიფრაქციული სურათის მიღებისათვის არსებული ხელსაწყო სქემა ჩვენს მიერ უკვე იყო განხილული. ეხლა კი განვიხილოთ დიფრაქციული ანალიზის ძირითადი პრინციპები.



სურ. 70. ოპტიკური დიფრაქციის სურათი მრგვალ ხვრელზე.

განვიხილოთ დიფრაქციული სურათი ძალზე მარტივ ობიექტზე – გაუმჭვირვალე ეკრანის მრგვალ ნახვრეტზე. ამ შემთხვევაში ოპტიკური დიფრაქციული სურათი (სურ. 70) წარმოადგენს ნათელი და ბნელი რგოლების რიგს, რომლებიც წარმოიქმნება ნახვრეტის სხვადასხვა ნაწილებში გასული სინათლის სხივების ინტერფერენციის გამო. რაც უფრო მცირეა ნახვრეტის დიამეტრი, მით უფრო მეტია პირველი ბნელი რგოლის დიამეტრი (ეს არის რეალურ და დიფრაქციულ სივრცეებში ზომების უკუ შეფარდების მრავალიდან ერთ-ერთი მაგალითი). რენტგენის სხივების დიფრაქციის დროს გამბნევი ობიექტის (ატომის) ზომები იმავე რიგისაა, რაც რენტგენის სხივის ტალღის სიგრძე.



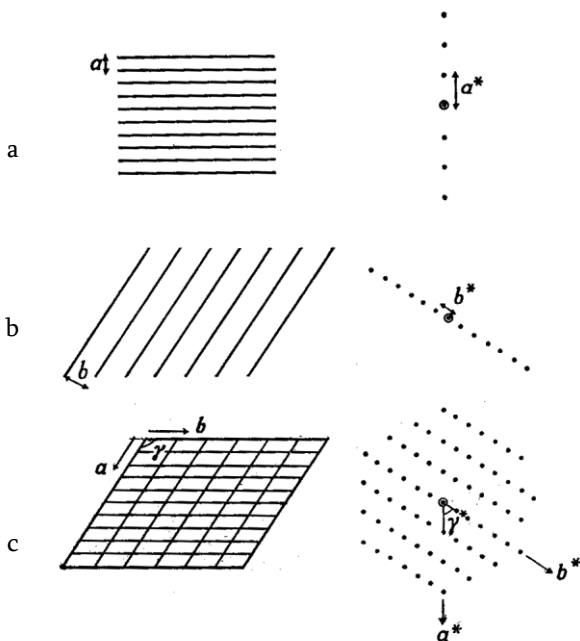
სურ. 71. ოპტიკური დიფრაქციის სურათები, რომლებზეც აისახება გაბნევა: მესერის მიერ (a), ერთი მოლეკულის მიერ (b), ორი მოლეკულით (c), ოთხი მოლეკულით (d), ექვსი მოლეკულის რიგით (e), მცირე კრისტალით (f). ქვემოთ მოყვანილია შესაბამისი გამბნევი ობიექტები.

<sup>76</sup> კოლიმირებული სხივთა კონა — გამოსხივების სხივთა კონა ძალზე მცირე უკრების ან გაშლის კუთხით.

ეხლა განვიხილოთ დიფრაქციული სურათი გარკვეულ რაოდენობის მცირე ზომის ნახვრეტებზე (ან წერტილებზე), რომელთა განლაგება „მოლეკულას“ ასახავს. არასწორი ექვსკუთხედის წვეროებში განლაგებული ექვსი წერტილი ჰქმნის სურ. 71b-ზე მოყვანილ ოპტიკურ დიფრაქციულ სურათს. ვინაიდან წერტილების ზომები მცირეა მათ შორის მანძილთან შედარებით, პრინციპში, ჩვენ ვაკვირდებით მცირეკუთხოვან დიფრაქციას ნახვრეტის დიფრაქციული სურათის პირველი ბნელი რგოლის რადიუსის ფარგლებში. სხვადასხვა წერტილების მიერ გაბნეული სხივების ინტერფერენციის გამო, დიფრაქციულ სურათზე მივიღებთ ინტენსივობის უწყვეტ ცვლილებას. ინტენსივობის არარეგულარული განაწილება ცენტრსიმეტრულია, ცენტრალური სხივის მიმართ, რაც წარმოადგენს ყველა დიფრაქციული სურათის საერთო თავისებურებას. ამ მაგალითიდან შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ დიფრაქციული სურათის ინტენსივობის ცვლილება მოლეკულის სტრუქტურითაა განპირობებული.

ცალკეული მოლეკულის მიერ მოცემულ დიფრაქციულ სურათს *მოლეკულური ტრანსფორმანტა* ან მოლეკულის ფურიე-ტრანსფორმანტა<sup>77</sup> ეწოდება.

მოლეკულური ტრანსფორმანტის ნახვა სინათლის დიფრაქციის დროს იმის გამოა შესაძლებელი, რომ სინათლის ურთიერთობა ნივთიერებასთან შედარებით ძლიერია. რენტგენის სხივები კი პირიქით, ნაკლებად ურთიერთობენ ნივთიერებასთან, და ცალკეული მოლეკულების ტრანსფორმანტების ნახვა შეუძლებელია. ამიტომაც შენაერთი უნდა იქნას კრისტალიზებული, რათა ყველა მოლეკულა განლაგდეს რეგულარულად, და სათითაო მოლეკულის გაბნევა ძლიერდებოდეს გაბნევით დანარჩენ მოლეკულაზე. განვიხილოთ ზეგავლენა რომელსაც ახდენს კრისტალური მესერის ტრანსფორმანტა მოლეკულურ ტრანსფორმანტაზე.



სურ. 72. რიგი ხაზების (a,b) და მესერის ტრანსფორმანტა (c).

სურ. 72a-ზე მოყვანილია ხაზები და მათი დიფრაქციული სურათი, რომელიც წარმოადგენს ხაზების პერპენდიკულარულად განლაგებულ წერტილების რიგს. მანძილი ამ წერტილებსა და ხაზებს შორისი ერთმანეთის უკუ პროპორციულია. სხვა სიტყვებით, ხაზთა რიგის ფურიე ტრანსფორმანტა წარმოადგენს წერტილების რიგს. ავლნიშნოთ, რომ

<sup>77</sup> საერთოდ რაიმე ფუნქციის ფურიე-ტრანსფორმანტას უწოდებენ ამ ფუნქციის ფურიე-გარდაქმნის (ტრანსფორმირების) შედეგს.

მართებულია საწინააღმდეგო მოსაზრებაც: წერტილების რიგის ფურიე ტრანსფორმანტა წარმოადგენს ხაზების რიგს. ანუ ჩვენ წავაწყდით უკუ ურთიერთობის მოვლენას რეალურ სივრცეში არსებული ობიექტისა და მისი დიფრაქციული სურათის შორის.

სურ. 72b-ზე მოყვანილი დიფრაქციული სურათი შეესაბამება სხვა, პირველისაგან განსხვავებულად განლაგებულ, ხაზების რიგს. ამ ორი ხაზების რიგის ზედდებით შეიძლება მივიღოთ მესერი, როგორც ორი ფუნქციის ნამრავლი. იმისათვის რომ ვიწინასწარმეტყველოთ ასეთი მესერის მოსალოდნე დიფრაქციული სურათის ხასიათი, გამოვიყენოთ ფურიეს გარდაქმნის თეორია.

**თეორემა:** ორი ჩახვეული ფუნქციის ფურიე-ტრანსფორმანტა უდრის მათი ფურიე ტრანსფორმანტების ნამრავლს.

**უკუთეორემა:** ორი ფუნქციის ნამრავლის ფურიე-ტრანსფორმანტა არის ერთიერთი ტრანსფორმანტის ჩახვევა მეორესთან

ორი ფუნქციის ჩანახვევი (*convolution*) – ეს არის მეორე ფუნქციის დასაწყისის მოთავსების შედეგი პირველი ფუნქციის ყოველ წერტილში ამ წერტილებში პირველი და მეორე ფუნქციების მნიშვნელობების ერთმანეთზე გამრავლებისას.

მაშასადამე, თუ ორგანზომილებიან მესერს განვიხილავთ როგორც ორი რიგი ხაზების ნამრავლს, მაშინ ასეთი მესერის დიფრაქციული სურათი წარმოადგენს ორივე ხაზთა რიგების დიფრაქციული სურათების ჩანახვევს. ორი ხაზთა რიგების დიფრაქცია – წარმოადგენს წერტილების ორ რიგს. წერტილთა ორი რიგის ჩახვევა წარმოადგენს მესერს (სურ. 72c). ამრიგად: **მესერის დიფრაქციული სურათი წაემოადგენს ასევე მესერს, ოღონდ რეალურისგან განსხვავებით უკუ პროპორციული ზომებით** (სურ. 71a).

მანძილები დიფრაქციული სურათის მეზობელ წერტილებს შორის, ან და უკუ მესერის კვანძებს შორის შემდეგია:

$$a^* = \frac{1}{a \sin \gamma} \quad b^* = \frac{1}{b \sin \gamma} \quad \gamma = \pi - \gamma^*$$

სადაც,  $\gamma$  – არის კუთხე რეალური (პირდაპირი) მესერის ხაზების რიგებს შორის.

თუ კი უკუ მესერის ყოველ კვანძს გააჩნია ორი მთელრიცხოვანი ინდექსი  $h$  და  $k$ , მაშინ უკუ მესერის რაიმე კვანძის მანძილი დიფრაქციული სურათის საწყის წერტილიდან უდრის:

$$d^* = \sqrt{h^2 a^{*2} + k^2 b^{*2} - 2hka^*b^* \cos \gamma}$$

ორგანზომილებიან მესერში მყოფი მოლეკულის დიფრაქციული სურათი, შეიძლება იყოს გამოყვანილი შემდეგი მოსაზრებების საფუძველზე. კრისტალი წარმოადგენს მოლეკულის და ორგანზომილებიანი მესერის ჩახვევის შედეგს, ანუ მესერის ყოველ წერტილში მოლეკულის თანმიმდევრული ჩასმის შედეგს. მაშასადამე, მოლეკულური კრისტალის დიფრაქციული სურათი წარმოადგენს მოლეკულის დიფრაქციული სურათის (მოლეკულური ტრანსფორმანტის) და მესერის დიფრაქციული სურათის (უკუ მესერის) ნამრავლს. ამ ორი ტრანსფორმანტის ნამრავლი, წარმოადგენს მოლეკულური ტრანსფორმანტის გამოვლენას უკუ მესერის ყოველ კვანძში. დიფრაქციული სურათის (უკუ მესერის კვანძებში) მაქსიმუმს (რეფლექსს) ექნება მეტი ინტენსივობა, თუ მისი შესაბამისი ამ წერტილში მყოფი მოლეკულური ტრანსფორმანტა მეტი სიდიდისაა, რეფლექსი იქნება სუსტი, თუ მისი გამომწვევი მოლეკულური ტრანსფორმანტა მცირეა (სურ. 71c,f).



ამ რიგად ჩანს, რომ დიფრაქციული სურათის „უჯრედული“ ბუნება კრისტალური მესერიტაა განპირობებული, ხოლო ყოველი რეფლექსის ინტენსივობა განისაზღვრება მოლეკულური ტრანსფორმანტის მნიშვნელობით ამ წერტილში. საერთოდ, მოლეკულის ყოველ ნაწილს შეაქვს თავისი წვლილი დიფრაქციულ სურათის სათითაო ფრაგმენტშიც. და პირიქით, იმისათვის რომ მოვახდინოთ მოლეკულის რეკონსტრუირება მისი დიფრაქციული სურათის მიხედვით, საჭიროა ყველა რეფლექსის ინტენსივობის გაზომვა.

კოჰერენტული გაბნევა რომელსაც აწარმოებს თავისუფალი ელექტრონი არაა დამოკიდებული გაბნევის კუთხეზე, თუ არ გავითვალისწინებთ მამრავლი  $(1 + \cos^2 \theta)$ , რომელიც წარმოადგენს გაბნეული სხივის ნაწილობრივ პოლარიზებას. ატომში ელექტრონები იკავებენ საზღვრულ მოცულობას და იმეფებიან გარკვეულ, სრუქტურით განსაზღვრულ ენერგეტიკულ მდგომარეობებში. იმისათვის, რომ მივიღოთ ანალიტიკური გამოსახვა ატომის მიერ გაბნევის შესახებ, საჭიროა გავითვალისწინოთ ელექტრონების განლაგება სივრცეში.

ვთქვათ ელექტრონული სიმკვრივე ატომის ცენტრიდან  $r$  მანძილზე  $\rho(r)$ -ის ტოლია. განვიხილოთ  $r$  წერტილში  $s$  მიმართულებით გაბნეული ტალღა ატომის ცენტრში მყოფი ერთი ელექტრონით გაბნეული ტალღასთან შეფარდებაში. ჯამური გაბნეული ტალღა დამოკიდებულია ცალკეული გაბნეული ტალღებს შორის არსებულ ფაზათა სხვაობაზე.

ვთქვათ, დაცემული გამოსხივების მიმართულება განისაზღვრება  $s_0$  ვექტორით, ხოლო გაბნეული გამოსხივების მიმართულება  $s$  ვექტორით. შემდგომი გამოთვლების გასამარტივებლად მივიღოთ, რომ

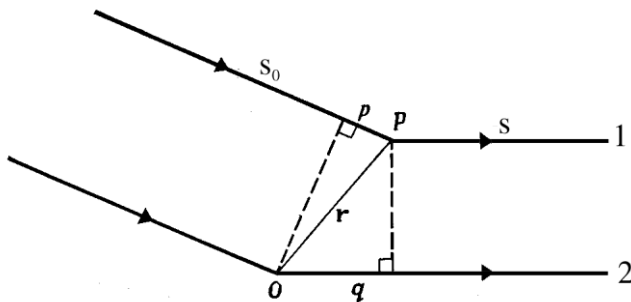
$$|s_0| = |s| = \frac{1}{\lambda}$$

სადაც,  $\lambda$  – დაცემული გამოსხივების ტალღის სიგრძეა.

სურ. 73-ის თანახმად 1 და 2 სხივთა მსვლელობის სხვაობა შეადგენს  $p - q$ , ამასთან

$$p = \lambda r \cdot s_0 \quad \text{და} \quad q = \lambda r \cdot s$$

$$\text{ფაზათა სხვაობა} = \frac{2\pi}{\lambda} \times (\text{მანძილთა სხვაობა}) = 2\pi \vec{r} \cdot (\vec{s}_0 - \vec{s}) = 2\pi \vec{r} \cdot \vec{S} \quad \text{სადაც} \quad \vec{S} = \vec{s}_0 - \vec{s}$$



სურ. 73.  $P$  წერტილში გაბნევა, საწყისი  $O$  წერტილის მიმართ.

$\vec{S}$  ვექტორი გამოიყენება მდებარეობის აღწერისას დიფრაქციულ, ანუ უკუ სივრცეში, ისევე როგორც  $\vec{r}$  ვექტორი გამოიყენება მდებარეობის აღწერისას რეალურ, ანუ პირდაპირ სივრცეში.

$r$  მდებარეობით მყოფი ელემენტარული  $dv$  მოცულობის მიერ გაბნეულ ჯამურ ტალღას, საწყის  $O$  წერტილში გაბნეული ტალღის მიმართ, ექნება ამპლიტუდა, რომელიც  $\sim \rho(r) dv$  და ფაზა  $= 2\pi \vec{r} \cdot \vec{S}$ , ესე იგი გაბნეული ტალღა  $= \rho(\vec{r}) \exp(2\pi i \vec{r} \cdot \vec{S}) dv$

ამ რიგად, ატომის მიერ გაბნეულ ჯამურ ტალღას პოულობენ ინდივიდუალური შენატანების შეჯამებით ატომის სრულ მოცულობაში ( $V$ ).

$$F(\vec{S}) = \int_V \rho(\vec{r}) \exp(2\pi i \vec{r} \cdot \vec{S}) dv$$

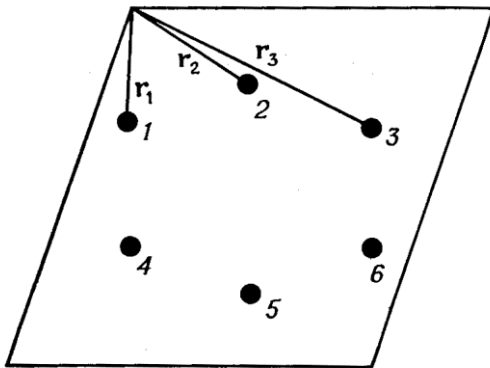
ეს გამოსახულება წარმოადგენს ატომური გაბნევის ფაქტორს. ელექტრონული სიმკვრივის განაწილება ატომის მთელ მოცულობაში ზუსტადაა ცნობილი (კვანტური მექანიკიდან) მხოლოდ წყალბადის ატომისათვის. ჩვეულებრივ ვარაუდობენ, რომ ატომის ელექტრონული სიმკვრივე სფერულად სიმეტრიულია. მაშინ ატომური გაბნევის ფაქტორიც სფერულად სიმეტრიული იქნება, ანუ ის არაა დამოკიდებული  $\vec{S}$  ვექტორის მიმართულებაზე, არამედ მხოლოდ მის აბსოლუტურ მნიშვნელობაზე. ვარაუდი  $\rho(r)$ -ის სფერული სიმეტრიის შესახებ, გულისხმობს ამ ფუნქციის ცენტრსიმეტრიულობას, ანუ  $\rho(r) = \rho(-r)$ . ეს კი ნიშნავს, რომ აჯამებისას წარმოსახვითი კომპონენტები აბათილებენ ერთმანეთს, და მიღებული ჯამი წარმოადგენს ნამდვილ სიდიდეს, ესე იგი  $F(S)$  ფუნქცია იქნება ნამდვილი ყველა  $S$ -სათვის.

ავლნიშნოთ, რომ  $S = 0$  შემთხვევაში

$$F(0) = \int_V \rho(\vec{r}) dv = Z$$

სადაც  $Z$  – ატომში ელექტრონების საერთო რიცხვია.

ეხლა კი გამოვიყვანოთ ელემენტალური უჯრედის გარკვეულ ადგილას მყოფი ატომთა ერთობლიობის მიერ რენტგენის სხივების გაბნევის განტოლებები. ქვემოთმოყვანილი მსჯელობები მართებულია სინათლის გაბნევისთვისაც წერტილთა ერთობლიობით, რომლებიც იკავებენ გარკვეულ ადგილს მაგრამ უკვე მიკროფოტოსურათის ელემენტარულ უჯრედში (ობიექტის გადიდებული გამოსახულება პირდაპირ სივრცეში).



სურ. 74. ატომების მდებარეობა (წერტილთა ერთობლიობა) ელემენტარულ უჯრედში

განვიხილოთ ატომი 1 სურ. 74-ზე, რომელიც იმყოფება კოორდინატთა სათავიდან  $r_1$  მანძილზე. საწყისი წერტილის ატომის ცენტრიდან ასეთი გადასაცვლება ნიშნავს  $r$  სიდიდის შეცვლას ატომის გაბნევის განტოლებაში  $r + r_1$  სიდიდით. მაშინ გაბნევა 1-ლი ატომით კოორდინატთა სათავესთან მიმართებაში, იქნება

$$f_1 = \int_V \rho(\vec{r}) \exp(2\pi i (\vec{r} + \vec{r}_1) \cdot \vec{S}) dv = f_1 \exp(2\pi i \vec{r}_1 \cdot \vec{S})$$

სადაც  $f_1 = \int_V \rho(\vec{r}) \exp(2\pi i \vec{r} \cdot \vec{S}) dv$

ანალოგიური გამოსახულება შეიძლება ჩაიწეროს მე-2, მე-3 და ასევე ელემენტარული უჯრედის ყველა სხვა ატომისათვის.

ყველა ატომის მიერ გაბნეული ჯამური ტალღა, წარმოადგენს ყველა ატომის ინდივიდუალური შენატანის ვექტორულ ჯამს, და აღიწერება გამოსახულებით:

$$\vec{G}(\vec{S}) = \vec{f}_1 + \vec{f}_2 + \vec{f}_3 + \dots + \vec{f}_N$$

ესე იგი

$$\vec{G}(\vec{S}) = \sum_{j=1}^N f_j \exp(2\pi i \vec{r}_j \cdot \vec{S})$$

მიღებული გამოსახულება წარმოადგენს მოლეკულურ ტრანსფორმანტას. ეს კომპლექსური ფუნქციაა რომელიც მთელ დიფრაქციულ სივრცეში  $\vec{S}$  იცვლება.

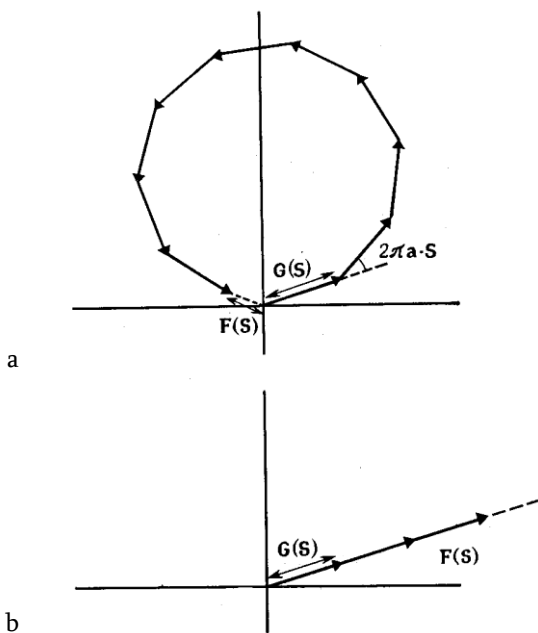
იმისათვის რომ გამოვიყვანოთ  $G$

კრისტალის მიერ ტალღის გაბნევის გამოსახულების გამოსაყვანად, თავიდან განვიხილოთ ერთგანზომილებიანი კრისტალის შემთხვევა, რომელიც წარმოადგენს წრფივლად განლაგებულ ელემენტარულ უჯრედებს  $a$  გამოორების პერიოდით. კრისტალის მიერ საერთო გაბნეული ტალღა წარმოადგენს, ყოველი ელემენტარული უჯრედის მიერ გაბნეული ტალღების ჯამს.

ტალღა გაბნეული დასაწყისიდან პირველი უჯრედით იქნება უბრალოდ  $G(\vec{S})$ . ტალღა გაბნეული დასაწყისიდან მეორე უჯრედით იქნება  $G(\vec{S}) \times \exp(2\pi i \vec{a} \cdot \vec{S})$ , რათგან ყველა მდებარეობა გადაინაცვლება  $\vec{a}$  ვექტორით. ესე იგი, ტალღა გაბნეული მე  $n$  უჯრედით იქნება  $G(\vec{S}) \times \exp[2\pi i(n-1)\vec{a} \cdot \vec{S}]$ , ხოლო ჯამური გაბნეული ტალღა იქნება

$$\vec{F}(\vec{S}) = \sum_{n=1}^T G(\vec{S}) \exp[2\pi i(n-1)\vec{a} \cdot \vec{S}]$$

სადაც  $T$  – ელემენტარული უჯრედების საერთო რაოდენობაა.



სურ. 75. ვექტორული დიაგრამა, რომელიც გვიჩვენებს კრისტალურ მესერში მყოფი მოლეკულის მიერ გაბნეულ ჯამურ ტალღას.

განიხილება ორი შემთხვევა:

(a) ფაზათა სხვაობა მეზობელი ელემენტარული უჯრედებით გაბნეულ ტალღებს შორის შეადგენს  $2\pi \vec{a} \cdot \vec{S}$

(b) ფაზათა სხვაობა მეზობელი ელემენტარული უჯრედებით გაბნეულ ტალღებს შორის მთელი,  $2\pi$ -ს ჯერადი რიცხვია.

თუ რანაირად იჯამება ეს ინდივიდუალური შენატანები, გვიჩვენებს მოყვანილი სურ. 75a-ზე ვექტორული დიაგრამა. ტალღა, გაბნეული რაიმე ელემენტარული უჯრედით, განსხვავდება მეზობელი უჯრედით გაბნეული ტალღისაგან ფაზით  $2\pi \vec{a} \cdot \vec{S}$ . ესე იგი, ელემენტარული უჯრედების რაოდენობის გაზრდისას, ჯამური გაბნეული ტალღა  $\vec{F}(\vec{S})$  გახდება იმავე რიგის სიდიდე, რაც მოლეკულური ტრანსფორმანტა  $G(\vec{S})$ . როგორც უკვე ვიცით, რენტგენის სხივების შემთხვევაში ეს ტრანსფორმანტა მეტისმეტად მცირეა დაკვირვებისათვის. მაშ როგორ იკვლევენ კრისტალის მიერ გაბნეულ სხივებს?

გაბნევაზე დაკვირვება შეიძლება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ფაზათა სხვაობა თანმიმდევრულად განლაგებულ ელემენტალურ უჯრედებზე გაბნეულ ტალღებს შორის, იქნება  $2\pi$ -ს ჯერადი (სურ. 75b), ანუ

$$2\pi\vec{a} \cdot \vec{S} = 2\pi h \quad \text{ან} \quad \vec{a} \cdot \vec{S} = h \quad \text{სადაც } h \text{ – მთელი რიცხვია}$$

ამ პირობის შესრულების შემთხვევაში ტალღები იჯამებიან და იძლევიან მნიშვნელოვანი ინტენსივობის გაბნეულ ტალღას; ამ ტალღის ამპლიტუდა იქნება  $T \times |\vec{G}(\vec{S})|$  -ის პროპორციული. 1მმ სიგრძის კრისტალისათვის, ელემენტარული უჯრედის 10 ნმ რიგის ბიჯით, გვექნება  $T = 10^5$ , ანუ სახეზეა მნიშვნელოვანი გაძლიერების კოეფიციენტი.

სამგანზომილებიანი შემთხვევაზე გადასვლისას  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  და  $\vec{c}$  ვექტორებით აღწერილი ელემენტარული უჯრედით, დიფრაქციის პირობა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{cases} \vec{a} \cdot \vec{S} = h \\ \vec{b} \cdot \vec{S} = k \\ \vec{c} \cdot \vec{S} = l \end{cases} \quad \text{სადაც } h, k, l \text{ – მთელი რიცხვებია}$$

ეს განტოლებები ლაუეს განტოლებების სახელს ატარებენ და წარმოადგენენ მათემატიკურ გამოსახვას ადრე მოყვანილი დებულებისა, რომ მესერის დიფრაქციული სურათი ასევე მესერს წარმოადგენს.

ეს განტოლებები საშუალებას იძლევა შემდეგნაირად გადავწეროთ კრისტალის მიერ  $\vec{S}$  მიმართულებით გაბნეული ჯამური ტალღის განტოლება:

$$\vec{F}(\vec{S}) = \sum_{j=1}^N f_j \exp(2\pi i \vec{r}_j \cdot \vec{S})$$

სადაც ჩვენ უგულველვყვეთ პროპორციულობის კოეფიციენტი  $T$ .

ვთქვათ  $x_j, y_j, z_j$  – მე- $j$ -ვე ატომის შეფარდებითი კოორდინატებია, ანუ

$$\vec{r}_j = \vec{a}x_j + \vec{b}y_j + \vec{c}z_j$$

მაშინ, ლაუეს განტოლებიდან

$$\vec{r}_j \cdot \vec{S} = x_j \vec{a} \cdot \vec{S} + y_j \vec{b} \cdot \vec{S} + z_j \vec{c} \cdot \vec{S} = x_j h + y_j k + z_j l$$

და ჯამური ტალღისათვის საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\vec{F}(hkl) = \sum_{j=1}^N f_j \exp[2\pi i(x_j h + y_j k + z_j l)]$$

აქ, განტოლების მარცხენა მხარეს  $\vec{S}$  სიდიდე შევცვალეთ  $hkl$  -ით

ეს განტოლება ცნობილია სტრუქტურული ფაქტორის განტოლების სახელით. ის გვაძლევს მოლეკულური ტრანსფორმანტის მნიშვნელობას უკუ მესერის  $hkl$  კვანძებში. თუ ცნობილია ელემენტარული უჯრედის ყველა ატომის მდებარეობა, შეიძლება გამოითვალოს შესაბამისი დიფრაქციული სურათი.

განმარტებიდან  $\vec{S} = \vec{s} - \vec{s}_0$  ჩანს, რომ თუ კი  $\vec{s}$  ახასიათებს დიფრაგირებულ სხივს, მაშინ ბრეგი-ვულფის კანონის თანახმად ის უნდა გაიბნეს  $2\theta$  კუთხით, თანაც  $\theta$  -ს მნიშვნელობა განისაზღვრება განტოლებით:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

ვინაიდან

$$|\vec{s}| = |\vec{s}_0| = 1/\lambda$$

მივიღებთ, რომ

$$\vec{S} = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} = \frac{1}{d} \quad (n = 1 \text{ პირობის შემთხვევაში})$$

$\vec{S}$  ვექტორის მოდული, რომელიც განსაზღვრავს დიფრაქციული სიბრტყის რაიმე წერტილს, უკუ პროპორციულია მანძილისა იმ სიბრტყეთა შორის, რომლებიც ჰქმნიან მოცემულ დიფრაქციულ მაქსიმუმს.

ჩვენ უკვე არაერთხელ ავღნიშნეთ, რომ მესერის დიფრაქციული სურათი ასევე მესერია, რომლის ზომები რეალური (პირდაპირი) მესერის ზომების უკუ პროპორციულია. დავახასიათოთ დიფრაქციული მესერი (უკუ მესერი)  $\vec{a}^*$ ,  $\vec{b}^*$ ,  $\vec{c}^*$  ვექტორებით. დიფრაქციული  $\vec{S}$  ვექტორი განისაზღვრება მანძილით უკუ მესერის საწყისი წერტილიდან მოცემულ კვანძამდე, ანუ

$$\vec{S} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$$

ეხლა კი ვიპოვოთ ურთიერთკავშირი პირდაპირი და უკუ მესერების ვექტორებს შორის. ლაუეს განტოლებიდან:  $\vec{a} \cdot \vec{S} = h$   $\vec{b} \cdot \vec{S} = k$   $\vec{c} \cdot \vec{S} = l$   
აქედან

$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{a}^* &= 1, & \vec{a} \cdot \vec{b}^* &= 0, & \vec{a} \cdot \vec{c}^* &= 0 \\ \vec{b} \cdot \vec{a}^* &= 0, & \vec{b} \cdot \vec{b}^* &= 1, & \vec{b} \cdot \vec{c}^* &= 0 \\ \vec{c} \cdot \vec{a}^* &= 0, & \vec{c} \cdot \vec{b}^* &= 0, & \vec{c} \cdot \vec{c}^* &= 1 \end{aligned}$$

ამ განტოლებებიდან გამომდინარეობს, რომ  $\vec{a}^*$  და  $\vec{b}^*$  პირდაპირი მესერის  $\vec{c}$  ღერძის პერპენდიკულარულია. და პირიქით,  $\vec{c}^*$  ღერძი  $\vec{a}$  და  $\vec{b}$ -ს პერპენდიკულარულია.

ასე რომ, რენტგენული სხივების გაბნევა ატომით, ან მოლეკულის გამოსახულების ელემენტით მიკროფოტოსურათზე აღიწერება ატომური გაბნევის ფაქტორით. რენტგენული სხივების გაბნევა მოლეკულის ან გამოსახულების ელემენტების მიერ, აღიწერება მოლეკულური ტრანსფორმანტით. კრისტალურ მესერში მყოფი მოლეკულის დიფრაქცია განისაზღვრება სტრუქტურული ფაქტორის განტოლებით, რომელიც იძლევა მოლეკულური ტრანსფორმანტის მნიშვნელობას უკუ მესერის კვანძებში. ამ კვანძებს კი განსაზღვრავენ პირობები რომლებიც დაედება  $\vec{S}$  ვექტორს ლაუეს განტოლებების სახით. ამრიგად, თუ კი გვეცოდინება კრისტალის სტრუქტურა, ყოველთვის შეიძლება გამოითვალოს მისი დიფრაქციული სურათი. დიფრაქციული სურათი წარმოადგენს სტრუქტურის ფურიე ტრანსფორმანტას. და პირიქით, კრისტალის სტრუქტურა, რომელიც აღიწერება ელექტრონული სიმკვრივით  $\rho(x, y, z)$  ელემენტარული უჯრედის ყოველ წერტილში, შეიძლება გამოითვალოს როგორც დიფრაქციული სურათის ფურიე ტრანსფორმანტა (ფურიეს უკუ გარდაქმნა).

### 12.8. სპირალური სტრუქტურების დიფრაქციული ანალიზი.

სპირალურ სტრუქტურებს ახასიათებს ხრახნისებრივი ღერძების არსებობა, რომლის გარშემოც ხდება მასში შემავალი ელემენტების დატრიალება ბრუნვითი ღერძის რიგით განპირობებულ კუთხეზე და გადაადგილება მის გასწვრივ. სიმეტრიის ეს ოპერაციები ჩვენს მიერ უკვე იყო განხილული (იხ. შიდა სიმეტრიის ელემენტები).

გავიხსენოთ, რომ სიმეტრიის ოპერაცია, რომელსაც მივყევართ წერტილების სპირალურ განლაგებამდე, წარმოადგენს ხრახნისებრივ წანაცვლებას  $s_M$ , რომელიც შეიცავს შებრუნებას  $\Psi = 2\pi/M$  კუთხეზე  $c'$  გადაადგილებით  $z$  ღერძის გასწვრივ. მთელი  $M = p$  -ს შემთხვევაში სპირალის ერთ ბრუნზე მოდის  $M$  წერტილი, ანუ  $c' = C/p$  და

უწყვეტი სპირალის პერიოდი ( $C$ ) ემთხვევა დისკრეტული სპირალის პერიოდს ( $c$ ). შესაძლებელია შემთხვევა როდესაც  $p$  წერტილი მოდის არა ერთ არამედ  $q$  ბრუნვაზე ( $M = p/q$ ). ამ შემთხვევაში დისკრეტული სპირალის ჭეშმარიტი პერიოდი ( $c$ ), წარმოადგენს ტრანსლაციულად იდენტურ წერტილებს შორის მანძილს და შემდეგნაირად განისაზღვრება:

$$c = qC = pc' \quad C/c' = p/q = M$$

და ის  $q$  ჯერ აღემატება უწყვეტი სპირალის პერიოდს. მაგალითად  $\alpha$ -სპირალისათვის:  $C = 5,4\text{\AA}$ ,  $c' = 1,5\text{\AA}$ , ესე იგი  $M = 18/5$  და ჭეშმარიტი პერიოდი  $c = 27\text{\AA}$ .

სპირალური სიმეტრიის მქონე სტრუქტურების ანალიზისათვის დღეს დღეობით ძალიან ფართოდ გამოიყენება დიფრაქციის (ოპტიკური და კომპიუტერული) მეთოდები. ამ მეთოდის საფუძველს წარმოადგენს ის მოსაზრება, რომ კვლევის დროს (ვთქვათ ელექტრონული მიკროფოტოსურათები) ჩვენ ხელთ გვაქვს სამგანზომილებიანი სტრუქტურის ორგანზომილებიანი პროექცია რომელსაც ახასიათებს გარკვეული  $c$  პერიოდით და კანონზომიერებით განაწილებული სიმკვრივეები  $\rho(r, \varphi, z)$ . აღნიშნული სიდიდეები წარმოიქმნა სპირალური სტრუქტურების პროეცირებისას გამოსახულების სიბრტყეზე და რა თქმა უნდა ამ სპირალის შესახებ ამომწურავი ინფორმაცია გააჩნიათ. ასე რომ გამოსაკვლევი მიკროფოტოსურათი წარმოადგენს დიფრაქციულ მესერს რომლის პარამეტრების გამოკვლევით შესაძლებელი ხდება თვით საწყისი სტრუქტურის პარამეტრების დადგენაც. აღნიშნულ მესერზე მიღებული დიფრაქციული სურათი შეიძლება ავლწეროთ ფურიე-ბესელის ტრანსფორმანტით:

$$F\left(Q, \Psi, Z = \frac{\ell}{c}\right) = \sum_n G_{n\ell} \exp \theta$$

სადაც რეფლექსის ამპლიტუდა  $G_{n\ell} = A J_n(X)$

ხოლო მისი ფაზა  $\theta = n(\Psi + \pi/2)$

აქ  $J_n(X)$  – ბესელის ფუნქციაა,  $n$  – ბესელის ფუნქციის რიგი,  $X$  – მისი არგუმენტი.

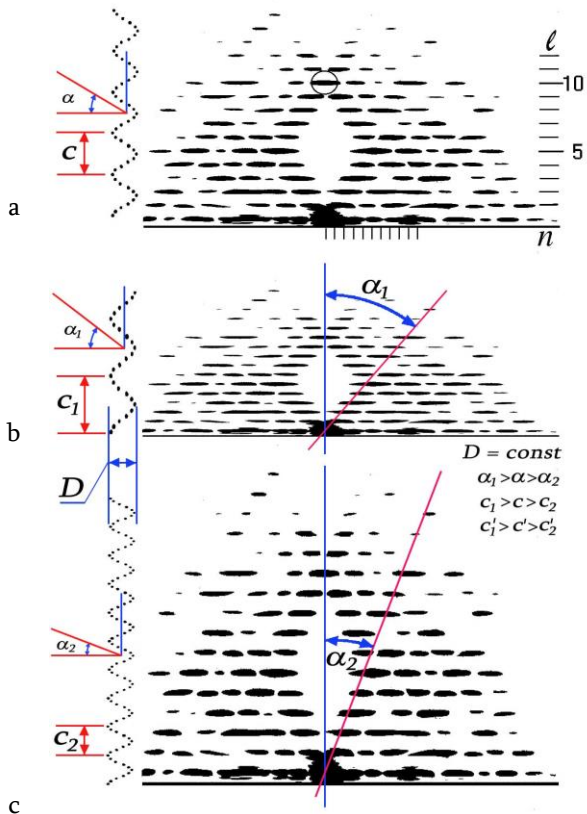
აღნიშნული დისკრეტული სპირალის წარმოდგენა შეიძლება როგორც ორი პარალელური სპირალური ჯგუფის ზედდება, და უკუ სივრცეში, ანუ დიფრაქციულ სურათზე, მას შეესაბამება ცილინდრული მესერი, რომლის მაქსიმუმები (ე.წ. დიფრაქციული სურათის რეფლექსები) განისაზღვრება შემდეგი არჩევის წესით:

$$\ell = \frac{kNq + mp}{d(N, p)} \quad (100)$$

სადაც  $kN = n$  – ბესელის ფუნქციის რიგია;  $p$  – სპირალურად განლაგებული სტრუქტურების (დისკრეტული სპირალის კვანძების) ანუ გამზნევი წერტილების რაოდენობა  $q$  ხვიაზე (ერთი შემოვლის პერიოდი);  $N$  – სპირალის შემოვლიანობა (დისკრეტულ სპირალის შემთხვევაში ამ პარამეტრის ნახვა შეიძლება სპირალის განივ კვეთზე, ანუ რამდენი წერტილიც ან დისკრეტული სპირალის ელემენტი მოინახება მასში იმდენ შემოვლიანი იქნება სპირალური სტრუქტურა);  $m$  – მთელი რიცხვი  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, d(Np)$  – უდიდესი საერთო გამყოფი.  $\ell$  – ფენოვანი ხაზის ნომერი. თუ  $N = 1$  (ერთშემავლიანი სპირალი) განტოლება (100) ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\ell = nq + mp \quad (101)$$

ილუსტრაციისათვის სურ. 76a-ზე მოყვანილია მოდელოური სპირალი  $p/q = 10/1$  და მისი ფურიე ტრანსფორმანტის (დიფრაქციული სურათის) ზემო ნახევარი. მარჯვენა მხარეს მოყვანილია ფენოვანი ხაზების ნომრები, ხოლო ქვემოთ ბესელის ფუნქციის რიგები, რომლის ნახვა შეიძლება ამ ფუნქციის არგუმენტის გამოთვლის შემდეგ.



სურ. 76. (a) მოდელოური სპირალი პარამეტრებით  $\frac{p}{q} = \frac{10}{1}$  და მისი ფურიე ტრანსფორმანტის ზემო ნაწილი. დატანილია ფენოვანი ხაზების ნომრები ( $l$ ) და ბესელის ფუნქციის რიგები ( $n$ ).

(b) იგივე მოდელოური სპირალი, ოღონდ გადატანის მუდმივა  $c'$  გაზრდილია, შესაბამისად გაიზარდა როგორც სპირალის პერიოდი ( $c_1$ ), ასევე მისი დახრის კუთხე ( $\alpha_1$ ). რაც შეეხება დიფრაქციულ სურათს, მასზე მანძილი ფენოვან ხაზებს შორის შემცირდა, ხოლო მერიდიანსა და მერიდიონალური რეფლექსების ტანგენციალურ მდგენელს შორის კუთხე ( $\alpha_1$ ) გაიზარდა.

(c) ისევე იგივე მოდელოური სპირალი, ოღონდ გადატანის მუდმივა  $c'$  უკვე შემცირებულია, შესაბამისად შემცირდნენ როგორც სპირალის პერიოდი ( $c_2$ ), ასევე მისი დახრის კუთხეც ( $\alpha_2$ ). დიფრაქციულ სურათზე მანძილი ფენოვან ხაზებს შორის გაიზარდა, ხოლო კუთხე – შემცირდა.

ამ სურათიდან ჩანს, რომ მერიდიონალური რეფლექსი განთავსებულია მე 10-ე ფენოვან ხაზზე, ხოლო ძირითადი რეფლექსები იმყოფებიან მე 5-ე ფენოვან ხაზზე, და მათი ბესელის ფუნქციის რიგი  $n = 5$ . ამრიგად არჩევს წესის (101) თანახმად:

$$10 = 0 \cdot q + mp = p \quad \text{ანუ} \quad p = 10$$

$$5 = 5 \cdot q + 0 \cdot p = 5 \cdot q \quad \text{და} \quad q = 1$$

ასე რომ დიფრაქციული სურათი სრულად ასახავს გამოსაკვლევ სპირალურ სტრუქტურას და მისი  $p$  და  $q$  პარამეტრების პოვნისათვის საკმარისია ბესელის ფუნქციის რიგის ( $n$ ) და ფენოვანი ხაზის ნომრის ( $l$ ) პოვნა.  $n$ -ის ნახვა შეიძლება ბესელის ფუნქციის არგუმენტის გამოთვლის შემდეგ:

$$X = \frac{2\pi Rr}{t\lambda} \quad (102)$$

სადაც  $r$  – სპირალური სტრუქტურის რადიუსია;  $2R$  – სიმეტრიულ რეფლექსებს შორის მანძილი;  $t$  – დიფრაქციული ლინზის ფოკუსური მანძილი;  $\lambda$  – დიფრაქციული სხივის ტალღის სიგრძე (წითელი ლაზერის გამოყენებისას  $\lambda = 6328 \text{ \AA} = 632,8 \cdot 10^{-6} \text{ მმ}$ ). ნამრავლი  $t\lambda$  – წარმოადგენს ე.წ. ხელსაწყოს მუდმივას და თუ  $t = 1600 \text{ მმ}$ ,  $t\lambda = 1,035 \text{ მმ}^2 \approx 1 \text{ მმ}^2$ .

სურ. 76b-ზე მოყვანილია იგივე მოდელოური სპირალი, ოღონდ გაზრდილი  $c'$  პარამეტრით – გვერდითი წერტილების შორისი მანძილის პროექცია მთავარ  $z$  ღერძზე (ზოგჯერ მას გადატანის მუდმივას უწოდებენ), შესაბამისად გაზრდილია როგორც სპირალის პერიოდი ( $c_1$ ), აგრეთვე მისი დახრის კუთხე ( $\alpha_1$ ). რაც შეეხება დიფრაქციულ სურათს, მასზე მანძილი ფენოვან ხაზებს შორის მცირდება, ხოლო მერიდიანსა და მერიდიონალური რეფლექსების ტანგენციალურ მდგენელს შორისი კუთხე ( $\alpha_1$ ) იზრდება. გადატანის მუდმივის  $c'$  სიდიდის შემცირებისას (იხ. სურ. 76c), მცირდება როგორც

სპირალის პერიოდი ( $c_2$ ), აგრეთვე მისი დახრის კუთხე ( $\alpha_2$ ). დიფრაქციულ სურათზე მანძილი ფენოვან ხაებს შორის იზრდება, ხოლო კუთხე – მცირდება. ეს კი ნიშნავს, რომ დიფრაქციული სურათის და სახელდობრივ მერიდიანსა და მერიდიონალური რეფლექსების ტანგენციალურ მდგენელს შორის დახრის კუთხის სიდიდის ანალიზის შედეგად, ჩვენ შეიძლება ვიპოვოთ სპირალის მნიშვნელოვანი პარამეტრი – მისი პერიოდი.

$$c = \pi D \tan \alpha$$

ეხლა კი მოვიყვანოთ ბესელის ფუნქციის ანალიტიკური გამოსახვა განხილული შემთხვევისათვის:

$$J = J_n(2\pi Rr) \quad (103)$$

სპირალური სტრუქტურების სრული აღწერისათვის გარდა უკვე ჩამოთვლილი პარამეტრებისა, სასარგებლოა გამოყენებული იქნეს მათგან წარმოებული პარამეტრები:

1.  $\alpha = 2\pi q/p$  – ე.წ. ელემენტარული კუთხე, ანუ დისკრეტულ სპირალში მეზობელი ელემენტებს შორის არსებული კუთხე.
2.  $\Delta = c/p$  – ელემენტარული დისკოს სისქე, ანუ დისკრეტულ სპირალში მეზობელი ელემენტებს შორის არსებული მანძილი ამ სპირალის ღერძზე პროეცირებისას.

სიმეტრიის ელემენტებში გარკვევის შემდეგ ჩვენ უკვე შეგვიძლია კონკრეტული სტრუქტურების ამოცნობა, რასაც მომდევნო თავებში გავაკეთებთ. ეხლა კი განვიხილოთ მაკრომოლეკულების და საერთოდ მიკროსტრუქტურის ერთ-ერთი მეტად საინტერესო შესწავლის მეთოდი – ელექტრონული მიკროსკოპია.

## 12.9. ელექტრონული მიკროფოტოსურათების ანალიზი.

მაკრომოლეკულების სუბერთეულთა სივრცული განლაგების ყველაზე ეფექტურ მეთოდებს წარმოადგენენ ელექტრონული მიკროსკოპია და რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი. ელექტრონული მიკროსკოპიის უპირატესობას წარმოადგენს კვლევების ჩატარების შედარებითი სისწრაფე და ცალკეულ ნაწილაკებთან მუშაობის შესაძლებლობა. მოდელის მეშვეობით, რომლებსაც იძლევა ელექტრონული მიკროსკოპია, შეიძლება როგორც სუბერთეულების განლაგების სიმეტრიის დახასიათება, აგრეთვე წარმოადგენის მიღება მათი ფორმის შესახებ. ელექტრონულ მიკროსკოპიას ასევე შეუძლია გამოავლინოს დომენური სტრუქტურა და დაახასიათოს მათი რაოდენობა და განლაგების შესაძლო სიმეტრია.

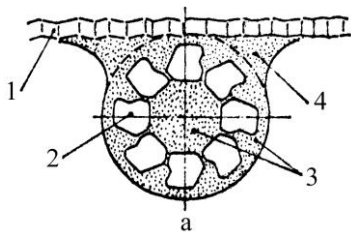
ელექტრონული მიკროსკოპიის შესაძლებლობები ბიოლოგიური ობიექტების კვლევისას, იზღუდება ორი ფაქტორით.

1. მოლეკულების კონტრასტირების აუცილებლობით, რის შედეგადაც სტრუქტურის გარჩევადობა ბევრად განპირობებულია კონტრასტიორის შესაძლებლობით გამოავლინოს სტრუქტურის თხელი დეტალები და შეინახოს ისინი დამახინჯების გარეშე. დღემდე, გამოსახულების კონტრასტის გასაძლიერებლად და ამავდროულად გაშრობისაგან სტრუქტურის დასაცავათ ფართოდ გამოიყენებენ ნეგატიურ კონტრასტირებას. მოლეკულების გამოსახულება მიკროფოტოსურათებზე ამ შემთხვევაში განიხილება როგორც კონტრასტიორის განაწილების სურათი გამოსავლელი ნაწილაკის ირგვლივ (სურ. 77). ნეგატიური კონტრასტირების მნიშვნელოვან თავისებურებას წარმოადგენს ის, რომ მოლეკულის ან მოლეკულების ასოციატების გამოსახულება წარმოადგენს მთელი მისი სტრუქტურის ორგანზომილებიან პროექციას. ეს კი, როგორც შემდეგ იქნება ნაჩვენები, გვიხსნის შიდა სტრუქტურის ინტერპრეტირების, ხოლო ოპტიმალურ შემთხვევაში სამგანზომილებიანი რეკონ-



სტრუქციის შესაძლებლობას. ჩვეულებრივ, ნეგატიური კონტრასტიორად გამოიყენებენ: ამონიუმის მოლიბდატს, ფოსფორვოლფრამის მჟავას, ნატრიუმის ვოლფრამატს, ურანილაცეტატს. ჩატარებული კვლევების გამოცდილება გვეუბნება რომ ურანილაცეტატი იძლევა ყველაზე უკეთეს გარჩევადობას, მაგრამ ზოგი მოლეკულა ვერ უძლებს მასთან ურთიერთობას. ამ შემთხვევაში გამოიყენება სხვა საკონტრასტო ნივთიერება, მაგალითად, ამონიუმის მოლიბდატი. ცნობილია რამდენიმე ცილა, რომლებისთვისაც ნეგატიური კონტრასტირების გამოყენება შეუძლებელი აღმოჩნდა. ამ შემთხვევაში „კონტრასტირების“ ერთად ერთ შესაძლებელ მეთოდს წარმოადგენ დაჩრდილვის მეთოდი, როდესაც ვლინდება ნაწილაკების მხოლოდ ზედაპირული რელიეფი გარჩევადობით 25 – 30 Å.

2. ობიექტის დაშლა ელექტრონების ნაკადის ქმედების შედეგად. იგივე ელექტრონები, რომლებიც ჰქმნიან გამოსახულებას, ამავდროულად აწარმოებენ მის რადიაციულ დაზიანებას. ამჟამად, მოლეკულის სტრუქტურის გარჩევადობა ჩვეულებრივ ლიმიტირდება არა ხელსაწყოს გარჩევითუნარიანობით, რომელიც სადღეისოდ შეადგენს ~2Å, არამედ იმ ზღვარით, რომლამდეც სტრუქტურა გარჩეულია ელექტრონული კონით გავლისას. ნეგატიური კონტრასტირების გამოყენებისას დასხივების ჩვეულებრივი დოზების პირობებში (2-3 ელ/ნმ<sup>2</sup>), გარჩევადობა შეადგენს ~20Å. საშუალო დოზების შემთხვევაში (0,2-0,5 ელ/ნმ<sup>2</sup>) აღწევს 10 Å.



სურ. 77. პრეპარატის ნეგატიური კონტრასტირების სქემა ხისტი ღეროსებრივი სტრუქტურის მაგალითზე, ღერძის გასწვრივ ცქერისას. 1 – სადები აპკი; 2 – ცილოვანი მოლეკულები, რომლებიც ჰქმნიან სტრუქტურას; 3 – სტრუქტურის გამომავლენი კონტრასტიორის ნაწილი; 4 – დამატებითი, ასიმეტრიულად განლაგებული კონტრასტიორი.

არ უნდა ვიფიქროთ რომ მიღწეულია ელექტრონული მიკროსკოპიის შესაძლებლობების ზღვარი. გამუდმებით მიმდინარეობს ახალი მეთოდების ინტენსიური დამუშავება, რომელიც გაზრდის ბიოლოგიური ობიექტების გარჩევადობას. მაგალითად, იმისათვის რომ დაიცვან გაშრობასთან დაკავშირებულ დაზიანებისაგან როდოფსინის მემბრანები (ან ცილის თხელი კრისტალები), წყალი ობიექტში იცვლება გლუკოზით. ამ წესით პრეპარირებისას ანვინმა, როდოფსინის მემბრანების მიკროფოტოსურათების გადაღებისას, დასხივების უჩვეულოდ მცირე დოზით (0,005 ელ/ნმ<sup>2</sup>), მიიღო ძალზე ნაკლებექსპონირებული „სტატისტიკურად დახმაურებული“ გამოსახულებები. ამ გამოსახულებების დიდი ფართობების დენსიტომეტრირების და შემდგომი კრისტალური მესერის ასეულ უჯრედების გასაშუალებამ, მისცა ანვინს საშუალება მიეღო მოლეკულების გამოთვლილი (კომპიუტერული) გამოსახულებები გარჩევითობით 6 Å და დაენახა ბაქტერიოროდოფსინის მოლეკულაში α-სპირალები. ისეთივე გარჩევადობა, იმავე ობიექტზე, მაგრამ დასხივების უფრო მაღალი დოზებით, იყო მიღწეული გაყინული ობიექტების კვლევისას. კრიოგენული ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდებით ბოლო ხანს იყო მიღებული კარგი შედეგები ჩონჩხის კუნთის წვრილი ძაფებისათვისაც.

შემთხვევების დიდ უმრავლესობაში ბიომაკრომოლეკულების ელექტრონული მიკროსკოპია არ შემოიფარგლება მიკროფოტოსურათების მიღებით. ყოველი ელექტრონული მიკროსკოპისტი ფაქტიურად ყოველთვის აწარმოებს მოლეკულების ან მათი ასოციატების ვიზუალურ დამუშავებას, რათა მისცეს მათი სტრუქტურის მეტ ნაკლებად დასაბუთებული ინტუიციური შეფასება. სპეციალურ ვიზუალურ დამუშავებისას, ნაწილაკის გამოსახულებები კლასიფიცირდება და მიეკუთვნება ამა თუ იმ პროექციებს.

გარკვეული შედეგი ამ ეტაპზე შეიძლება მოგვცეს ელექტრონულ მიკროსკოპში ობიექტის დახრით გადაღებამ, სპეციალური გონიომეტრიული თავის გამოყენებით. შემდეგ ხდება გამოსაკვლევი ნაწილაკის მოდელირება. იმისათვის რომ მიუახლოვოთ მოდელების გამოსახულება ნეგატიური კონტრასტირების პირობებს, ზოგჯერ გამოიყენებენ კასპარის მეთოდს. ამისათვის მოდელი შემოიფარგლება უფრო მკვრივი ნივთიერებით (თაბაშირი, პლასტელინი) ვიდრე თვით მოდელის მასალა და იღებენ რენტგენის სურათს. მოდელების აგება შეიძლება მიკროსკოპის დისპლეიზე მიერთებული კომპიუტერის მეშვეობითაც.

რეგულარულად აგებული ობიექტის ელექტრონული მიკროფოტოსურათი, მაგალითად ცილის კრისტალის, შეიცავს რაღაც განმეორებადი ელემენტის ბევრ გამოსახულებას. თუ კი ობიექტი ჭეშმარიტად რეგულარულია, ეს ელემენტები უნდა იყვნენ ერთნაირი, თუმცა ელექტრონულ მიკროფოტოსურათზე მათი გამოსახულებები შეიძლება განსხვავდებოდეს სტრუქტურის დარღვევებთან დაკავშირებული „ხმაურების“ გამო, ან შეღებვის არაერთგვაროვნობით და სადები აპკის მარცვლიანობით. ბუნებრივია, რომ ელექტრონული მიკროსკოპის სპეციალისტებს უნდა შეემუშავათ მეთოდი, რომელიც მისცემდა ასეთი პერიოდული ობიექტების ზუსტი ანალიზის საშუალებას და აღმოფხვრავდა ხმაურების ზეგავლენას.

ამ პრობლემის ამოხსნის ყველაზე პირდაპირ მიდგომას იძლევა განხილული წინა თავში ოპტიკური დიფრაქციის მეთოდი. ოპტიკური დიფრაქტომეტრის სქემა მოყვანილია სურ. 26-ზე. როგორც უკვე აღინიშნა, ამ პროცესის პირველი სტადია (დიფრაქციული სურათის შექმნა) შედარებით მარტივია, და შეიძლება იყოს მიღებული საშუალო ხარისხის ლინზებითაც. დიფრაქციული სურათი საკმაოდ ინფორმატიულია. ხშირად ვლინდება ისეთი პერიოდულობები, რომელთა ვიზუალური გამოვლინება საწყის მიკროფოტოსურათებზე საკმაოდ რთულია. ვინაიდან განათებულ მიდამოში მყოფი ყველა რეგულარულად მეორებად ელემენტს შეაქვს თავისი წვლილი დიფრაქციულ სურათში, მისგან შეიძლება უფრო ზუსტი ცნობების მიღება იდენტურობის პერიოდზე, ელემენტარული უჯრედის პარამეტრებზე და მის სიმეტრიაზე ვიდრე თვით მიკროფოტოსურათიდან, იმ პირობით, თუ ოპტიკური დიფრაქტომეტრი კარგადაა აწყობილი. მიკროფოტოსურათის გარჩევადობის ობიექტიური შეფასების გაკეთება შეიძლება დიფრაქციულ სურათზე მონახული სიბრტყეთაშორისი მაქსიმალური მანძილების გაზომვით. და ბოლოს, ნიმუშის დრეიფი და ელექტრონული მიკროსკოპის ობიექტივის ლინზის ასტიგმატიზმი, ქმნიან გამოსახულების მახასიათებელ თავისებურებებს, რომლებიც ყველაზე მარტივად შეიძლება აღმოვაჩინოთ მარცვლოვან ნახშირის სადებ აპკზე.

შემდეგი სტადია – ხმაურის ოპტიკური ფილტრაცია და გაფილტრული გამოსახულების რეკონსტრუირება – მოითხოვს დიფრაქტომეტრის საგულდაგულო იუსტირებას და ლინზების ძალზე მაღალ ხარისხს. იმისათვის რომ გავიგოთ ფილტრაციის პროცესის არსი, ავლნიშნავთ, რომ ელექტრონული მიკროფოტოსურათის რეგულარული ნაწილები აისახება დიფრაქციულ სურათზე დიფრაქციული მესერის სტრუქტურაში, იმ დროს როდესაც ხმაურით განპირობებული არარეგულარული ფლუქტუაციები აისახება საერთო, ფონურ გაბნევაში. ამიტომ, თუ დიფრაქციული სურათის სიბრტყეში მოვათავსებთ ეკრანს ნახვრეტებით, რომლებიც შეესაბამება დიფრაქციული მესერის კვანძებს, მაშინ ხმაურით განპირობებული დიფრაგირებული სხივები ვერ მიაღწევენ გამოსახულების სიბრტყეს. ეს ეკრანი უნდა იყოს საგულდაგულოდ გაკეთებული და ზუსტად შეესაბამებოდეს შესასწავლ მესერს. ის დიფრაგირებული სხივები, რომლებმაც შესძლეს ეკრანის გავლა, იკრიფება ლინზების სისტემით (O), და ქმნიან გაფილტრულ გამოსახულებას.

ოპტიკური ფილტრაცია და გამოსახულების რეკონსტრუირება ადვილად განხორციელებადია, მაგრამ მათ ახასიათებს ის ნაკლი რომ ლინზების არასრულყოფილობის გამო

შეიძლება წარმოიქმნას არტეფაქტები. ეს პრობლემა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ოლინზების სისტემისათვის, რომლებმაც უნდა შეკრიფონ გადიდებული დიფრაქციული სურათის დიდ ფართობზე გაბნეული სხივები. ამ პრობლემის მოხსნა შეიძლება ფურიე გარდაქმნის გამოთვლითი მეთოდების გამოყენებით. ამისათვის ელექტრონული მიკროფოტოსურათის ამორჩეული უბანი გადაგვყავს ციფრულ გამოსახულებაში ავტომატური მიკროდენსიტომეტრის ან სკანერის მეშვეობით. შემდეგ ითვლება ფურიეა ტრანსფორმანტა, სასურველია სწრაფი ფურიე გარდაქმნის პროცედურის გამოყენებით, რაც იძლევა დიფრაქციული სურათის სტრუქტურული ფაქტორების ამპლიტუდების და მათი ფაზების რიცხვულ მნიშვნელობებს. რეკონსტრუირებულ კომპიუტერის მეშვეობით გამოსახულებაზე სიმკვრივის განსხვავებულ დონეებს წარმოადგენენ იზოხაზების მეშვეობით. ზოგჯერ გამოიყენება შერეული სინთეზი, როდესაც ფაზები იღება გამოსახულებებიდან, ხოლო ამპლიტუდები ელექტრონული ან რენტგენული დიფრაქციული სურათებიდან. ფონისგან ფილტრაცია მდგომარეობს ხმაურის ამორჩევით მოშორებაში და გამოსახულების რეკონსტრუქციაში, ფურიეს უკუ გარდაქმნის მეშვეობით. ავლნიშნოთ, რომ ასეთი გამოთვლების შემთხვევაში არ წარმოიქმნება „ფაზური პრობლემა“, ვინაიდან სტრუქტურა უკვე წარმოდგენილია ელექტრონულ მიკროფოტოსურათში.

მარკხემმა აღწერა ბრუნვითი სიმეტრიის მქონე გამოსახულებების დამუშავების მარტივი მეთოდი. ამ მიზნისათვის გამოყენებული მოწყობილობა შედგება დანაყოფებიანი მბრუნავი დისკოსგან (მაგიდისაგან), რომელზეც თავსდება ფოტოქაღალდი. დისკოს კიდეებზე დატანებულია კუთხური დანაყოფები. ფოტოგამადიდებელის მეშვეობით გამოსაკვლევი ნაწილაკის გამოსახულება პროეცირდება დისკოზე მყოფ ფოტოქაღალდზე. ამასთან ნაწილაკის ბრუნვის სიმეტრიის სავარაუდო ღერძი რაც შეიძლება ზუსტად უთავსდება დისკოს ღერძს. შემდეგ ფოტოქაღალდზე სრულდება აუცილებელი ექსპოზიციის  $1/N$  ნაწილი (სადაც  $N$  – ბრუნვითი ღერძის რიგის სავარაუდო მნიშვნელობაა). შემდეგ დისკო ტრიალდება  $360^\circ/N$  კუთხეზე და სრულდება განმეორებითი ექსპოზიცია. ყველაფერი ეს მეორდება  $N$  ჯერ. დეტალების მაქსიმალური გაძლიერება და საწყისი გამოსახულებასთან მსგავსობა მიიღება იმ შემთხვევაში, როდესაც  $N$  – ბრუნვითი ღერძის ჭეშმარიტი მნიშვნელობაა.

გამოსახულების რეკონსტრუქციის მეთოდი იყო გადატანილი სამგანზომილებიან შემთხვევისათვის ნაწილაკების გამოსახულებების აღსადგენათ. ეს მეთოდი ეფუძნება პროეცირების თეორემას, რომელიც ამტკიცებს, რომ სიმკვრივის სამგანზომილებიანი განაწილების ბრტყელი პროექციის ორგანზომილებიანი ფურიე ტრანსფორმანტა შესაბამისი სამგანზომილებიანი ტრანსფორმანტის პროეცირების ნორმალური მიმართულების ცენტრალური კვეთის იდენტურია. ამიტომ ფურიეს სამგანზომილებიანი ტრანსფორმანტის აგება შეიძლება თანმიმდევრული კვეთების მეშვეობით ობიექტის განსხვავებული მიმართულების პროექციების გარდაქმნების გამოყენებით, ხოლო გამოსახულების სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია მიიღება ფურიეს უკუ გარდაქმნით. ეს მეთოდი იყო წარმატებით გამოყენებული რეგულარული სფერული ვირუსის სტრუქტურაზე და ასევე დეკორირებული აქტინის ფიბრილებისათვის. ორივე შემთხვევაში ობიექტის სიმეტრიის გამო საჭირო გამოსახულებების მიღებისათვის (განსხვავებული პროექციების) საკმარისი იყო ერთი მიკროფოტოსურათის დამუშავება. სხვა ობიექტებზე საჭირო იყო ობიექტის დახრის გამოყენება, რათა მიგველო პროექციების საკმარისი რაოდენობა. ეს მეთოდი იყო გამოყენებული ხოპეს მიერ (1974) ინდივიდუალური, ნეგატიურად კონტრასტირებული საფუარის სინტეტაზის მოლეკულების სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციისათვის.

ადრე იყო აღნიშნული, რომ კონტრასტი შეიძლება შეიქმნას ამპლიტუდური და ფაზური ეფექტების ხარჯზე, რომლებსაც დეფოკუსირება და ობიექტივის ლინზის

სფერული აბერაცია განაპირობებენ. ფაზური კონტრასტი ჭარბობს საშუალო და მაღალ გარჩევადობაზე. ფაზური კონტრასტის ეფექტები უფრო მარტივად გამოსახულებაში კი არა არამედ ფურიე გარდაქმნაში ვლინდება. ამიტომაც ამ ეფექტების ანალიზი ძალზე მარტივად შეიძლება ოპტიკური დიფრაქტომეტრის ან გამოთვლითი მეთოდებით მიღებული ტრანსფორმანტების მეშვეობით. გამოსახულების ფორმირების ტალღურ თეორიაში სფერული აბერაციის და დეფოკუსირების ეფექტები მიეწერება ფაზურ წანაცვლებას  $\chi(\alpha)$ , რომელსაც განიცდის გაბნეული ელექტრონის ტალღა მიკროსკოპის დიფრაქციულ სიბრტყეში. ეს წანაცვლება გაბნევის  $\alpha$  კუთხეზეა დამოკიდებული და უდრის:

$$\chi(\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda} \left( -\frac{1}{4} C_s \alpha^4 + \frac{1}{2} \Delta f \alpha^3 \right)$$

სადაც  $C_s$  – წარმოადგენს სფერული აბერაციის კოეფიციენტს, ხოლო  $\Delta f$  – დეფოკუსირებას (დადებითია ფოკუსამდე მყოფ, ანუ ფოკუსამდე არ მისულ მდებარეობაში).

ფაზურკონტრასტული გამოსახულების ტრანსფორმანტა  $T_{ph}$  დაკავშირებულია ობიექტის ჭეშმარიტ ტრანსფორმანტასთან  $T(\alpha, \varphi)$  შემდეგი შეფარდებით:

$$T_{ph} = -T(\alpha, \varphi) A(\alpha) f(\alpha) \sin \chi(\alpha)$$

სადაც,  $\alpha$  – როგორც აღინიშნა, გაბნევის კუთხეა,  $\varphi$  – აზიმუტალური კოორდინატა,  $f(\alpha)$  – ელექტრონის გაბნევის ატომური ფაქტორი, ხოლო  $A(\alpha)$  – ობიექტივის აპერტურის ფუნქცია [ $A(\alpha) = 1$ , თუ  $\alpha \leq$  აპერტურის განმსაზღვრავ კუთხეზე; სხვა შემთხვევებში  $A(\alpha) = 0$ ]

ზემოთმოყვანილი გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ჭეშმარიტი ტრანსფორმანტა სამი თანამამრავლით მოდულირდება, რომელთა შორის  $\sin \chi(\alpha)$  ყველაზე მნიშვნელოვანია და ცნობილია როგორც **გადატანის ფუნქცია**. ეს ფუნქცია ახდენს შემდეგ ზეგავლენას გარჩევადობაზე ( $\lambda/\alpha$ ) მოპასუხე წევრებზე:

1. თუ კი  $\sin \chi(\alpha)$ -ს მნიშვნელობა 1 მახლობლად იმყოფება, მაშინ ეს წევრები შენატანს იძლევიან ფურიეს ტრანსფორმანტაში თავისი სრული წონით, და ამ გარჩევადობაზე მეპასუხე დეტალები სწორედ გამოისახება გამოსახულებაში;
2. თუ  $\sin \chi(\alpha)$  -ს მნიშვნელობა 0 ახლო მდებარეობს, მაშინ წევრები შესაბამისი სივრცული გარჩევადობით გამოირიცხებიან ტრანსფორმანტიდან და ვერ შეიტანენ თავის წვლილს საბოლოო გამოსახულებაში;
3. თუ  $\sin \chi(\alpha)$  იცვლის ნიშანს, მაშინ ამ გარჩევადობის შესაბამისი წევრები შეიტანენ თავის წვლილს საბოლოო გამოსახულებაში ოღონდ შებრუნებული კონტრასტით, რაც წარმოქმნის ცრუ გამოსახულებების მიღების საშიშროებას. ამიტომაც აუცილებელია იმ მოთხოვნების შესრულება, რომ წევრი  $\sin \chi(\alpha)$  იყოს შედარებით ინვარიანტული ჩვენთვის საინტერესო გარჩევადობის მთელ ინტერვალში

ერიკსონმა და კლუგმა გამოთვალეს  $\sin \chi(\alpha)$ -ს მრუდები ფოკუსიდ წინამდებარეობის სხვადასხვა ხარისხების შემთხვევაში (1970), და აჩვენეს, რომ 90 ნმ სიდიდის ფოკუსის წინამდებარეობა უმჯობესია დეტალების გამოსახვისას გარჩევადობით 2,0 დან 5 ნმ-მდე. დეტალებისათვის ინტერვალში 5,0 დან 20 ნმ-მდე ოპტიმალურია უფრო დიდი ფოკუსის წინამდებარეობა (500 ნმ). ამიტომაც მათ გააკეთეს დასკვნა, რომ ზომიერი ფოკუსის წინა მდებარეობისას მიღებული მიკროფოტოსურათები, რომლებსაც მეტწილად გამოიყენებენ ბიოლოგიურ მიკროსკოპიულ კვლევებში, წარმოადგენენ ინტერესს დაბალი და საშუალო გარჩევადობის უბნებში.

უმეტეს შემთხვევებში მაკრომოლეკულის გამოსახულება წარმოადგენს მთელი მისი სტრუქტურის ორგანოზომილებიან პროექციას. რამდენიმე ასეთი პროექციის არსებობის შემთხვევაში სამგანზომილებიანი სტრუქტურა შეიძლება იყოს აღდგენილი ან ვიზუა-

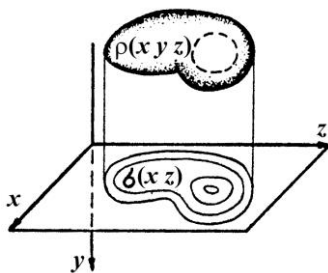
ლური აგებით, ან სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის ამა თუ იმ მეთოდით. რეკონსტრუქციის ყველაზე გავრცელებულ მეთოდებს წარმოადგენენ: ფურიეს ორმაგი გარდაქმნის მეთოდი, სადაც პროექციების შეთავსების ოპერაცია სრულდება უკუ სივრცეში და ვაინშტაინის მოდიფიცირებული პროექციებადი ფუნქციების მეთოდი, რომელშიც პროექციების შეთავსება მიმდინარეობს რეალურ სივრცეში. სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მეთოდი უფრო დაწვრილებით განხილულია შემდეგ თავში. ელექტრონულ მიკროსკოპიას სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციასთან ერთად ზოგჯერ „სამგანზომილებიან ელექტრონულ მიკროსკოპიას“ უწოდებენ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ცილის სტრუქტურა არ წარმოადგენს ელექტრონული მიკროსკოპიის ყველაზე ხელსაყრელ ობიექტს. მაგრამ ამ კვლევებთან დაკავშირებული ბევრი მეთოდური შემუშავება, საშუალებას იძლევა შეისწავლოთ მოლეკულური ბიოლოგიისათვის ისეთი მნიშვნელოვანი სტრუქტურები, როგორცაა ნუკლეოსომები, რიბოსომები და სხვა, სადაც რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის საშუალებები მნიშვნელოვნადაა შეზღუდული. რაც შეეხება ცილების სტრუქტურას, ბოლო ხანს სულ უფრო აშკარა ხდება, რომ მათი ყველაზე მნიშვნელოვანი ფუნქციონალური ასპექტი ვლინდება მხოლოდ ყველაზე დიდ გარჩევადობის შემთხვევაში. ამიტომაც სტატიკური სტრუქტურების მისაღებად (დინამიური სტრუქტურის გაუთვალისწინებლად) მაღალი გარჩევის (0,2 – 0,3 ნმ) რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის მნიშვნელობა სულ უფრო განმსაზღვრავი ხდება.

### 12.10. სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია.

თუ კი ჩვენ გვაქვს სამგანზომილებიანი ობიექტი, მისი აღწერა შეიძლება რაღაც  $\rho(x, y, z)$  ფუნქციით, რომელიც შემოფარგლულ არეშია მოცემული (იხ. სურ. 78). პროექცია  $\rho(r)$  რაღაც  $y$  მიმართულების გასწვრივ  $y$ -ის პერპენდიკულარულ  $xz$  სიბრტყეზე შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვადგინოთ:

$$L(x, z) = \int \rho(x, y, z) dy$$



სურ. 78. სამგანზომილებიანი ობიექტის ორგანზომილებიანი პროექცია.

ფუნქცია  $L(x, z)$  წარმოადგენს  $\rho(r)$  ფუნქციის ინტეგრალულ წარმოდგენას. თუ უწყვეტლივ შევცვლით პროექციების მიმართულებას  $y$ , მაშინ მივიღებთ რაღაც უწყვეტ ნაკრებს, ამასთან  $\rho(r)$  ცალსახად განსაზღვრავს  $L(x, z)$  ერთობლიობას. აქედან ცხადია შეზღუდებითი მტკიცებულობა:  $L(x, z)$  ერთობლიობა განსაზღვრავს საწყის ფუნქციას  $\rho(r)$ , ანუ პროექციების ერთობლიობა განსაზღვრავს საწყისი სტრუქტურის ფორმას. შეიძლება სამგანზომილებიანი ამოცანა დაყვანილ იქნას ორგანზომილებიანზე, თუ პროექციების ყველა მიმართულება  $y_j$  კომპლანარულია<sup>78</sup> – ვთქვათ ყველა  $z$ -ის პერპენდიკულარულია. ასეთ პროექციებს შეიძლება კოაქსიალური უწოდოთ. ასეთ პროექციებში სამგანზომილებიანი ფუნქციის  $\rho(r)$  ორგანზომილებიანი კვეთები პროექტირდებიან ერთგანზომი-

<sup>78</sup> სამი (ან მეტი) ვექტორი კომპლანარულია თუ ისინი საერთო სათავეში მიყვანისას ერთ სიბრტყეში აღმოჩნდებიან.

ლებიან ფუნქციებში  $L_j(x_i, z_k)$ . ამ შემთხვევაში, თუ  $y_j$  (პროექციების მიმართულება)  $\varphi$ -ზე იქნება დამოკიდებული (კუთხეზე რომლითაც მიმდინარეობს პროექცია), მაშინ ყოველი  $z_k$  ფენისათვის

$$L(\varphi, x_\varphi) = \int_{\varphi} \rho(r) dr$$

ანუ, ყოველი  $z_k$  ფენისათვის ჩვენ გვაქვს ერთგანზომილებიანი პროექციების ნაკრები. თუ კი რომელიმე  $z_k$  მნიშვნელობისათვის გვაქვს ერთგანზომილებიანი პროექციების ნაკრები, შეიძლება ავაგოთ ორგანზომილებიანი კვეთები  $\rho_z(r)$  რომლებსაგანაც შეიძლება აღვადგინოთ სიმკვრივის სამგანზომილებიანი განაწილება  $\rho(r)$ .

როგორც უკვე აღინიშნა, ბიოლოგიური მოლეკულების და მათი ასოციატების დიდი სიმრავლე სიმეტრიულია. თუ კი ობიექტს გააჩნია  $N$  ხარისხის სიმეტრიის ღერძი, მაშინ:

$$L(\varphi, x_\varphi) = L\left(\varphi + i\left(\frac{2\pi}{N}\right), x_{\varphi+i\left(\frac{2\pi}{N}\right)}\right) \\ i = 1, 2, 3, \dots, N$$

ამ რიგად ამ განტოლებიდან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ სიმეტრიული ობიექტის ერთი პროექცია ( $p$ ) ეკვივალენტურია ასიმეტრიული ობიექტის  $N$  (კენტი  $N$ -თვის), ან  $p = N/2$  (ლუწი  $N$ -თვის) პროექციისა.

თუ კი ობიექტს გააჩნია სპირალისებრივი სიმეტრია, ანუ შეიცავს სიმეტრიის ხრახნისებრივ ღერძს  $S_{p/q}$ , მაშინ ამ ღერძის პერპენდიკულარულად პროექციებისას, შესრულდება პირობა:

$$L(\varphi, x_\varphi, z) = L\left(\varphi + i\left(\frac{2\pi q}{p}\right), x_{\varphi+i\left(\frac{2\pi q}{p}\right)}, z + i\left(\frac{c}{p}\right)\right) \\ i = 1, 2, 3, \dots, p$$

რათგან  $\varphi = 2\pi q/p$  კუთხეზე დატრიალებისას, ობიექტი გადადის ეკვივალენტურ მდებარეობაში  $Z$  ღერძის გასწვრივ  $c/p$  სიდიდეზე წანაცვლებისას.

სპირალური სტრუქტურებისათვის სიმეტრიის ჯგუფით  $S_{p/q}N$ , ჯგუფის რიგი  $v = pN$ , და ერთი პროექცია  $v$  ან  $v/2$  (ლუწი  $N$ -სათვის) პროექციის ეკვივალენტურია.

არსებობს სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის რამდენიმე მეთოდი:

1. **ალგებრული მეთოდი**, რომელიც იყო შემოთავაზებული და გამოყენებული რამდენიმე სტრუქტურისათვის.

2. **ფურიეს ორმაგი გარდაქმნის მეთოდი**, რომელიც დეროზიე და კლუგის მიერ იყო შემოთავაზებული ელექტრონულ მიკროსკოპიაში სამგანზომილებიანი აღდგენისათვის. ფუნქცია  $\rho(r)$ -ის ფურიე ტრანსფორმანტა და მისი პროექციები  $L(x)$  დაკავშირებულია ერთმანეთთან:

$$\int \rho(\vec{r}) \exp(2\pi i \vec{r} \vec{S}) dx dy dz = F[\rho] = \Phi(\vec{S})$$

აქ,  $\vec{S}(X, Y, Z)$  უკუ სივრცის ვექტორია. მეორეს მხრივ

$$\int L(x) \exp[2\pi i (\vec{x} \vec{S}_x)] dx dz = F[L] = \Phi(X, 0, Z)$$

ფუნქცია  $L(x)$ -ის ფურიე ტრანსფორმანტა წარმოადგენს უკუ სივრცის კვეთს. ასე რომ, რეკონსტრუქციის სქემა ფურიეს ორმაგი გარდაქმნისას გამოიყურება ასე:

$$\text{ნაკრები } L^i \rightarrow \text{ნაკრები } F[L^i] \rightarrow \Phi(S) \rightarrow \rho(r) \quad (104)$$

ამრიგად, პროექციების ნაკრებზე სრულდება ფურიეს გარდაქმნა და მიიღება მისი ფურიე ტრანსფორმანტების ნაკრები. შემდეგ ტრანსფორმანტებს შორის ტარდება ინტერპოლაცია და უკუ სივრცეში მიიღება რაღაც ფუნქცია  $\Phi(S)$ , რომლის უკუ ფურიე გარდაქმნა იძლევა სიმკვრივის სამგანზომილებიან განაწილებას პირდაპირ სივრცეში  $\rho(r)$ .

3. **პროეცირებადი ფუნქციების სინთეზის მეთოდი** იყო შემოთავაზებული და გამოყენებული ვაინშტაინის მიერ 1970 წ. ამ მეთოდს არა სჭირდება ფურიე გარდაქმნის ჩატარება. ერთგანზომილებიანი პროექცია  $L^i(x_i)$  მიმართულებით  $y_i$  წრფიულად „იდლაზნება“ პროეცირების მიმართულების  $y_i$  გასწვრივ. ამ შემთხვევაში წარმოიქმნება ორგანზომილებიანი პროეცირებადი ფუნქცია:  $L^i(x_i y_i) = L(x_i) \cdot 1(y_i)$

სიბრტყე  $xy$ -ზე  $p$  ფუნქციების  $L^i(x_i y_i)$  ზედღებისას, მივიღებთ ფიგურას, რომელსაც აღწერს ფუნქცია:

$$\sum_p(x, y) = \sum_{i=1}^p L^i(x_i y_i)$$

პროექციების უწყვეტი განაწილებისას

$$\sum(\vec{r}) = \int_0^\pi L(\varphi, \vec{r}) d\varphi = \rho(\vec{r}) * |\vec{r}|^{-1}$$

სადაც,  $\vec{r}$  – ორგანზომილებიანი ვექტორია, ანუ  $\sum_p \vec{r}$  წარმოადგენს  $|\vec{r}|^{-1}$ -თან ჩახვევას და კარგად ასახავს  $\rho(\vec{r})$  ფუნქციას. თუმცა ყოველი  $r$  წერტილის ირგვლივ წარმოიქმნება ფონი, რომელიც მცირდება  $r^{-1}$  კანონის მიხედვით:  $\rho(\vec{r}) = \sum \vec{r} +$  ფონი, რაც მეთოდის მნიშვნელოვან ნაკლს წარმოადგენს.

4. პროეცირებადი ფუნქციების სინთეზის მეთოდის დემონსტრირების თვალსაჩინო ხერხს წარმოადგენს მათი ფოტომეჯამება. **პროეცირებადი ფუნქციების ფოტომეჯამების** მეთოდი შემდეგში მდგომარეობს. პირველყოვლისა სამგანზომილებიანი სტრუქტურის ორგანზომილებიანი პროექციიდან გამოყოფენ სიმკვრივის განაწილების ერთგანზომილებიან ფუნქციებს. ამისათვის ხდება ობიექტის დაყოფა  $z$  ღერძის გასწვრივ, რითიც ამოცანა სამგანზომილებიანიდან ორგანზომილებიანში გადადის. პროეცირებადი ფუნქციები მიიღება სპეციალურ მოწყობილობაზე, რომელზეც ერთგანზომილებიანი კვეთები „იდლაზნება“ ორგანზომილებიანში. ყველა ერთი „კვეთის“ პროეცირებადი ფუნქცია იჯამება ერთ ფოტოფირფიტაზე შესაბამისი კუთხეებზე დატრიალებით, რითიც მიიღება სამგანზომილებიანი ობიექტის ვითომც და ორგანზომილებიანი კვეთი – ყველა პროეცირებადი ფუნქციის სინთეზი. ასევე შეიძლება დანარჩენი კვეთების მიღება. მიღებული კვეთებიდან შეიძლება აიგოს საკვლევი ობიექტის სამგანზომილებიანი მოდელი.

პროეცირებადი ფუნქციების ფოტომეჯამების მეთოდი ძალზე მარტივია თავის შესრულებაში და მისი გამოყენება იძლევა კარგ შედეგებს ხსნარიდან აღებული ცილების სტრუქტურულ კვლევებში. ამ შემთხვევაში პროექციების რაოდენობა შეზღუდულია გამოსაკვლევი მაკრომოლეკულის სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფით. ასე, აღწერილი მეთოდით იყო შესწავლილი ორი ცილის სტრუქტურა: რიბულოზოდიფოსფატკარბოქსილაზის და ლეიციანამინოპეპტიდაზის.

მაგრამ, როგორც უკვე აღინიშნა, პროეცირებადი ფუნქციების მეთოდის ნაკლი იმაშია, რომ ობიექტის სტრუქტურის რეკონსტრუირების პროცესში ფორმულის მიხედვით წარმოიქმნება ფონი.

5. სტრუქტურის ზუსტი აღდგენა რეალურ სივრცეში ეფუძნება **მოდულირებული პროეცირებადი ფუნქციების** მეთოდის გამოყენებას, რომელიც შეიძლება მივიღოთ ჩვეულებრივი პროეცირებადი ფუნქციიდან როგორც

$$\mathcal{L}(x_\varphi) = \int L(x'_\varphi)K(x'_\varphi - x_\varphi)dx'_\varphi \quad (105)$$

სადაც

$$K(x) = \int_{-Rmax}^{+Rmax} |\vec{R}| \exp(-2\pi i R_x) dR$$

რადაც ფუნქცია, რომელიც ერთნაირია ყველა კუთხისათვის.

აქ  $R = |S|$  უკუ სივრცის ვექტორის მოდულია. შემდეგ,  $\rho(\vec{r})$ -ის განსაზღვრისათვის შემდეგნაირად ვიქცევით

$$\rho(\vec{r}) = \int_0^\pi \mathcal{L}(\Psi, \vec{r}) d\Psi$$

პროექციების შეზღუდული რაოდენობის შემთხვევაში

$$\rho(\vec{r}) = \sum_{i=1}^p \mathcal{L}^i(\Psi_i, \vec{r}) d\Psi \quad (106)$$

ამასთან ერთად  $\mathcal{L}(x, \Psi)$  უნდა გავწელოთ  $y$ -ის გასწვრივ  $\mathcal{L}(\Psi, \vec{r})$  -ში გადასაყვანად. ამ რიგად, ბოლო სამი მოყვანილი ფორმულები რეალურ სივრცეში ოპერირების გზით პროექტირებადი ფუნქციების სინთეზის მეთოდის ანალოგიურად გვადლევენ  $\rho(\vec{r})$ -ის ახლა უკვე ზუსტ აღდგენას. ამისათვის საჭიროა წინასწარ მივიღოთ მოდიფიცირებული პროექცია (105).

$$\mathcal{L}(x\Psi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{L(x_\Psi + x'_\Psi) + L(x_\Psi - x'_\Psi) - 2L(x_\Psi)}{(x'_\Psi)^2} dx'_\Psi$$

და შემდეგ,  $\rho(\vec{r})$  -ის აღდგენა მიმდინარეობს (106)-ის მიხედვით. აქ, (104)-გან განსხვავებით არაა საჭირო უკუ სივრცეში გადასვლა, ანუ ხორციელდება უშუალო გადასვლა:

$$L(x'_\Psi) \rightarrow \mathcal{L}(x\Psi)$$

მოდიფიცირებული პროექტირებადი ფუნქციების გამოყენებისას  $\mathcal{L}(x\Psi)$  შეიძენს მინიმუმებს, რომლებიც „აჭრიან“  $\Psi$  კუთხეზე ინტეგრირებისას სხვა  $\mathcal{L}(x\Psi)$ -საგან წარმოქმნილ დადებით ფონს, ესე იგი  $L(x'_\Psi)$ -ის ნაცვლად ჩვენ გვაქვს „წამახვილებული“ ფუნქცია  $\mathcal{L}(x\Psi)$ . პრაქტიკულად, კუთხით ინტეგრირებას ცვლის გარკვეული რაოდენობის მოდიფიცირებული პროექტირებადი ფუნქციების შეჯამება  $L^i(x\Psi)$ . ასე რომ, მოდიფიცირებული პროექტირებადი ფუნქციების გამოყენება, ფონის მოშორების გამო, რომელიც, როგორც უკვე არაერთხელ აღინიშნა, წარმოიქმნება პროექტირებადი ფუნქციების სინთეზის დროს, რეკონსტრუირებული  $\rho(\vec{r})$ -ის ზუსტ შედეგებს იძლევა.

სადღეისოდ, სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებით ბევრი ცილები და მათი ასოციატებია შესწავლილი. ასე, მაგალითად, წრფიული განტოლებების მეთოდით (აღგებრული მეთოდი) იყო გამოკვლეული კატალაზა (მოლ. მასა 240 000). ბევრი სტრუქტურა იყო გამოკვლეული ფურიეს ორმაგი გარდაქმნის მეთოდით. ასე, მაგალითად, იყო შესწავლილი კუნთის ცილის F-აქტინის სტრუქტურა, ცხოველების და მცენარეების სფერული ვირუსების კავსულები, სიმეტრიულად განლაგებული რიბოსომალური ნაწილაკები და ბევრი სხვა ობიექტი. მოდიფიცირებული პროექტირებადი ფუნქციების მეთოდით გამოიკვლიეს გლუკოზოოქსიდაზის მილისებრივი კრისტალები, ციტოპლაზმური და ფლაგელარული მიკრომილაკები.



## 13. მაკრომოლეკულების სტრუქტურა.

### 13.1. სიცოცხლის მატარებელი სტრუქტურები.

პირველყოვლისა განვმარტოთ თვით სიცოცხლეს ცნება, გავერკვიოთ არსებობს თუ არა ზღვარი ცოცხალსა და არაცოცხალს შორის? ბუნებაში არ არსებობენ ქიმიური ელემენტები, რომლებიც განეკუთნებოდნენ მხოლოდ ცოცხალ ორგანიზმს. თუ განვიხილავთ ელემენტარულ, დაბალმოლეკულურ ნაერთებს, რომელთაგანაც საბოლოო ანგარიშში შედგება ნებისმიერი უჯრედი – ამინომჟავებს, ნუკლეინის მჟავებს, პოლისახარიდებს, კოფერმენტებს და ა.შ., აქაც ვერ ვნახავთ პრინციპულად ახალ შენაერთებს, რომლებიც განეკუთნებიან მხოლოდ ცოცხალ სისტემებს. მეორე მხრივ არსებობენ ვირუსები და ბაქტერიები, რომელთაც ახასიათებს როგორც ცოცხალი, ასევე არაცოცხალი ბუნების ნიშან-თვისებები. ამგვარად საჭიროა ჩამოყალიბდეს ზოგადი პარადიგმა, რომელიც სისტემებს დაახასიათებს როგორც ცოცხალს:

1. ცნობილია, რომ ყოველ უჯრედში მიმდინარეობს ნივთიერებათა ცვლა – მეტაბოლიზმი. რომელიც გამოხატავს ცოცხალი არსებობის უპირველეს პრინციპს: თავისუფალი ენერჯის მრავალჯერად გარდაქმნებს ღია სისტემის პირობებში. ბიოსისტემას შეუძლია შეინარჩუნოს დინამიური წონასწორობა, სპეციფიკური სტრუქტურა და არ ჩაეშვას თერმოდინამიკური წონასწორობის მდგომარეობაში (სიკვდილი), მხოლოდ ინფორმაციის და ენერჯის განუწყვეტელი მიმოცვლის პირობებში.
2. საკუთარი თავის რეპროდუქცია. ეს იმითაა განპირობებული, რომ მაკრომოლეკულები და მოწესრიგებული ზემოლეკულური სტრუქტურები ხასიათდებიან არსებობის შემოსაზღვრული დროით. იმისათვის, რომ მათში არ დაიკარგოს დაგროვილი ინფორმაცია, ისინი უნდა ასწრებდნენ თავის დაშლამდე ერთი ასლის შექმნას მაინც, რომელიც შეიცავს სტრუქტურის აშენების და ფუნქციონირების გეგმას.
3. სითბური ფლუქტუაციების და სხვა სპეციფიური ზემოქმედებების არსებობა დასაშვებს ხდის გარკვეული შეცდომების დაშვებას რეპროდუქციის დროს. ანუ ხდება მუტაციები.

როგორც აღინიშნა, ცოცხალი სტრუქტურა არ შეიცავს რაიმე სპეციფიურ, მარტო მისთვის დამახასიათებელ ქიმიურ ელემენტებს. რაც შეეხება ბიომაკრომოლეკულებს, ისინი მართლაც ხასიათდებიან სპეციფიურობით და მოიხსენებიან როგორც სიცოცხლის მოლეკულები. ესენია: ცილები, ნუკლეინის მჟავები, ნახშირწყლები და ლიპიდები. სწორედ ცილების და ნუკლეინის მჟავების საშუალებით ხდება გენეტიკური ინფორმაციის შენახვა და ამ ინფორმაციის ბიოსტრუქტურაში რეალიზება.

ცილები, ესაა მაკრომოლეკულები რომლებიც შედგებიან ერთმანეთთან პეპტიდური კავშირებით დაკავშირებული 200 მდე ამინომჟავისაგან. ყველა ცნობილი ცილა შეიცავს მხოლოდ 24 სხვადასხვა ამინომჟავას. ცილებს ახასიათებს ამინომჟავების გარკვეული თანმიმდევრობა და სივრცული სტრუქტურა. ცილის მოლეკულის კატალიზური აქტივობა დამოკიდებულია მის კონფორმაციაზე (სივრცულ აგებულებაზე).

ნუკლეინის მჟავებიც ასევე გიგანტურ მაკრომოლეკულებს წარმოადგენენ და იყოფიან ორ ჯგუფად – რიბონუკლეინისა (RNA) და დეოქსირიბონუკლეინის (DNA) მჟავებად. DNA-ს (500 – 600 Å სიგრძის უწყვეტი უბნების მქონე პოლიმერი რომლის საერთო სიგრძე შეიძლება აღწევდეს 4 მ) მოლეკულები შეიცავენ სრულ ინფორმაციას ნებისმიერი ბიოლოგიური ნივთიერების, მათ შორის DNA-ს შესახებ. ინფორმაციის

გადაცემა ხდება შემდეგნაირად: DNA → RNA → ცილები. ნუკლეინის მჟავებს უფრო მარტივი სივრცული სტრუქტურა ახასიათებს, ვიდრე ცილებს. ყოველი ცალკეული ნუკლეოტიდი წარმოადგენს გენეტიკური ანბანის გარკვეულ ასოს, რომელიც სულ ხუთია: ადენინი, გუანინი, ციტოზინი, თიმიინი და ურაცილი. სამი ასეთი ასოდან შემდგარი ტრიპლეტი წარმოადგენს კოდონს და ესაა ცილის მოლეკულის ცალკეული ელემენტის (ამინომჟავის) კოდი. ბიოსტრუქტურის განუმეორებლობა სწორედ დაგროვილი ინფორმაციის სემანტიკური აზრით, ფასეულობით განისაზღვრება. ასეთი შეხედულების საფუძვლიანობა დასტურდება იმით, რომ სხვა შემთხვევაში ისეთი მოკლე მოლეკულის ასაგებადაც კი როგორცაა ციტოქრომი (~100 ამინომჟავა) საჭირო იქნებოდა  $10^{17}$  წმ-ზე მეტი დრო, ანუ დედამიწაზე ორგანული ევოლუციის მთელ პერიოდზე მეტი. ასე რომ DNA-ს უბნებზე, გენებში, ცილის პირველადი სტრუქტურის შესახებ ჩაწერილი ინფორმაცია ხასიათდება მაღალი სემანტიკურობით და ამდენად მას ახასიათებს გაცილებით დაბალი ენტროპია ვიდრე ნუკლეოტიდების შემთხვევით ნაკრებს.

როგორც ცნობილია გენეტიკური ინფორმაციის შენახვისა და გადატანის უნარი ცილებს არ გააჩნიათ. გარემოსთან ურთიერთქმედ ცოცხალ ორგანიზმის ნებისმიერ ერთეულში ცალსახად გამოირჩევა განსხვავებანი გენოტიპსა<sup>79</sup> და ფენოტიპს<sup>80</sup> შორის. შეიძლება ითქვას, რომ გენოტიპი და ფენოტიპი განსხვავებული კლასის მოლეკულებითაა წარმოდგენილი. გენოტიპი ნუკლეინის მჟავებით, ხოლო ფენოტიპი ცილებით.

### 13.2. სტრუქტურული ორგანიზების საფუძვლები.

ცოცხალ სტრუქტურებში შემავალი პოლიმერული მოლეკულები შეიცავენ მონომერების დიდ რაოდენობას, რომლებიც წრფიულად, ჯაჭვისებურად არიან დაკავშირებული. პოლიმერულ ჯაჭვში შემავალი ატომებისა და ატომთა ჯგუფების შედარებით ადვილი ბრუნვადობა განაპირობებს მთელი მაკრომოლეკულის შინაგანი თავისუფლების მაღალ ხარისხს. ამავე დროს ატომებს შორის არსებული ქიმიური კავშირები, ახლო და შორი ურთიერთქმედება გარკვეულად ზღუდავენ მაკრომოლეკულის შესაძლო კონფორმაციების რიცხვს.

უნდა აღინიშნოს, რომ ორგანული ნივთიერებების ატომებს შორის არსებული ქიმიური კავშირები, წარმოადგენენ თავისუფალი ენერჯის მთავარ მატერიალურ მატარებელს, ამიტომ მოლეკულაში ქიმიური კავშირის გარდაქმნისას შენაერთის თავისუფალი ენერჯის დონე იცვლება. თუ კი ნაერთის ქიმიური კავშირის შექმნის ან დარღვევის დროს თავისუფალი ენერჯის დონის ცვლილება იმყოფება 12,5 კჯ/მოლ ფარგლებში, მაშინ ასეთი კავშირი, თავისი ენერგეტიკული დონით, ნორმალურად ითვლება. სწორედ ასეთ დონეზე იცვლება თავისუფალი ენერჯია ორგანულ ნაერთებში უმეტესი კავშირის გარდაქმნის დროს. მაგრამ, ზოგი კავშირის შექმნის ან დარღვევის დროს თავისუფალი ენერჯის დონის ცვლილება გაცილებით მეტია, და შეადგენს 25 - 50 კჯ/მოლ და მეტს. ასეთ ნაერთებს მაკროერგული ნაერთები ჰქვია, ხოლო კავშირები, რომელთა გარდაქმნის დროს წარმოიქმნება ასეთი მნიშვნელოვანი ცვლილებები ნივთიერების ენერგეტიკულ ბალანსში – მაკროერგული კავშირები<sup>81</sup>.

<sup>79</sup> **გენოტიპი** – მოცემული ორგანიზმის გენების ერთობლიობა, რომელიც, გენომისგან განსხვავებით (სრული ქრომოსომული ნაკრები), ახასიათებს ინდივიდს და არა სახეობას. გარე ფაქტორებთან ერთად განსაზღვრავს ორგანიზმის ფენოტიპს.

<sup>80</sup> **ფენოტიპი** – ინდივიდუუმის დამახასიათებელი დახასიათებების ერთობლიობა განვითარების გარკვეულ სტადიაზე. ფენოტიპი ფორმირდება გენოტიპის საფუძველზე გარკვეული გარე ფაქტორების ჩარევის საფუძველზე.

<sup>81</sup> მაკროერგულ კავშირებს, ჩვეულებრივისგან განსხვავებით, აღნიშნავენ „~“ ნიშნით.

ერთ ერთ წინა თავში (მოლეკულური სტრუქტურების ფორმირების პრინციპები), ჩვენ უკვე განვიხილეთ ქიმიური კავშირები და ის თუ როგორ შეიძლება მათი წარმოჩენა ატომარულ დონეზე. უნდა გვახსოვდეს, რომ კავშირის ენერგია და თავისუფალი ენერგიის კავშირი სრულიად განსხვავებული ცნებებია. კავშირის ენერგია ეს ფაქტიურად სურ. 48-ზე ნაჩვენები აქტივაციის ენერგია ( $E_a$ ), ხოლო თავისუფალი ენერგია, ეს კავშირის ენერგიის მხოლოდ მცირე ნაწილია (~10%).

ქვემო ცხრილში მოყვანილია სხვადასხვა ტიპის კავშირების ენერგიები.

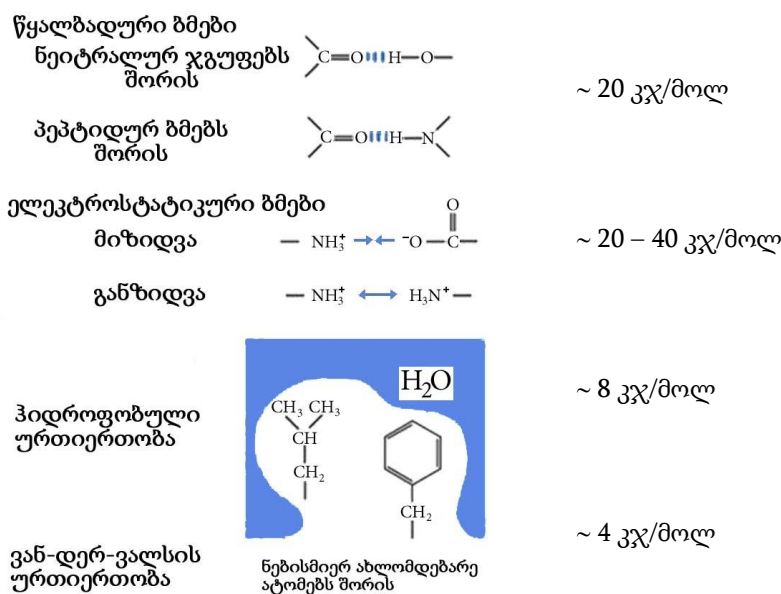
ცხრილი 20

კავშირების ტიპები	კავშირის ენერგია	
	კკალ/მოლ	კჯ/მოლ
კოვალენტური (C — C, O = C = O)	40 – 230	167 – 963
დისულფიდური (CH <sub>3</sub> — S — S — CH <sub>3</sub> )	66	276
იონური, კრისტალებში (Na <sup>+</sup> - - - Cl <sup>-</sup> )	50 – 100	209 – 419
იონური, ხსნარებში	5 – 10	21 – 42
წყალბადური (— O — H - - - O — H —)	3 – 5	12 – 21
ვან-დერ-ვალსის	1 – 2	4 – 8
ჰიდროფობული	1 – 5	4 – 21

პოლიმერული ჯაჭვის პირველადი სტრუქტურა განისაზღვრება ქიმიური და ვალენტური ურთიერთობებით (კოვალენტური კავშირები). ეს ყველაზე მტკიცე კავშირებია, და მათსადამე ყველაზე ენერგოტევადი.

ამ ძალების გარდა მოლეკულებს და ატომებს შორის მოქმედებენ არავალენტური, ე.წ. სუსტი ბმები, რომლებიც შეიძლება მიეკუთვნებოდეს ელექტროსტატიკურ ურთიერთობებს. ასე რომ ცილის სტრუქტურის სტაბილიზაციაში მონაწილეობენ სხვადასხვა კავშირები. ჩამოვთვალოთ ეს კავშირები:

1. ვან-დერ-ვალსის ძალები
2. იონური კავშირები
3. წყალბადური ბმები
4. ჰიდროფობული კავშირი (ჰიდროფობული ეფექტი)



სურ. 79. ძირითადი არაკოვალენტური ურთიერთობები. კავშირის ენერგიის მიახლოებითი მნიშვნელობები.

სურ. 79-ზე წარმოდგენილია ძირითადი არაკოვალენტური ურთიერთობები და მოყვანილია მათი კავშირების ენერგიების მიახლოებითი მნიშვნელობები.

განვიხილოთ ყოველი ძალა ცალკე.

**ვან-დერ-ვალსის ძალები** – ელექტრომაგნიტური ხასიათის ძალები, გამოწვეული მიზობელი მოლეკულების ელექტრული დიპოლების ურთიერთობით. ეს სუსტი, არაკოვალენტური ძალები (კავშირის ენერგია 0,8 – 8,16 კჯ/მოლ) განაპირობებენ პოლიმერების კონფორმაციულ ცვლილებებს მათი ფუნქციონირების პირობებში. ვან-დერ-ვალსის ძალები შეიქმნება შევსებული ორბიტალების მქონე ატომების ერთმანეთთან მიახლოებისას.

ეს ძალები პირველად გამოიყენეს რეალური აირების მდგომარეობის განტოლებების დასაბუთებისათვის — ვან-დერ-ვალსის განტოლებებში (კავშირი წნევისა, მოცულობისა და ტემპერატურას შორის).

ვან-დერ-ვალსის აირის ერთი მოლისათვის ის შემდეგნაირად გამოიყურება:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$$

სადაც,  $p$  – წნევა,  $V_m$  – მოლარული მოცულობა,  $T$  – აბსოლუტური ტემპერატურა,  $R = kN_A$  – აირის უნივერსალური მუდმივა ( $k$  – ბოლცმანის მუდმივა;  $N_A$  – ავოგადროს რიცხვი).  $a$  და  $b$  – შესწორებები.

როგორც ჩანს, ფაქტიურად ეს განტოლება წარმოადგენს იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებას ორი შესწორებით. შესწორება „ $a$ “ ითვალისწინებს მიზიდულობის ძალებს მოლეკულებს შორის (კედელზე წნევა მცირდება, ვინაიდან არსებობენ ძალები, რომლებიც შეიწოვენ მოსაზღვრე ფენებში მყოფ მოლეკულებს შიგნით); შესწორება „ $b$ “ ითვალისწინებს აირის მოლეკულების ჯამურ მოცულობას.

ვან-დერ-ვალსის აირის  $\nu$  მოლისათვის მდგომარეობის განტოლება ასე გამოიყურება

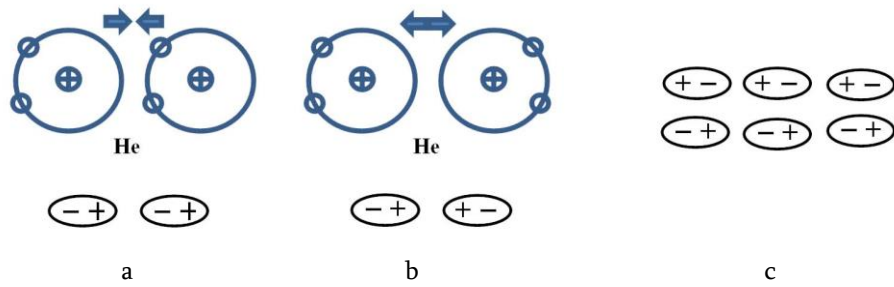
$$\left(p + \frac{a\nu^2}{V^2}\right)(V - b\nu) = \nu RT$$

სადაც  $V$  – მოცულობაა.

ამ განტოლებაში განისაზღვრებოდა მიზიდულობის ( $a/V^2$ ) და განზიდვის ( $b$ ) ძალების მოქმედებასთან დაკავშირებული შესწორებები რეალური აირების მოლეკულებს შორის. პრაქტიკულად სუფთა სახით, ასეთი ძალები მქლავდება გაჯერებული ქიმიური კავშირების მქონე ( $O_2$ ,  $H_2$ , და ა.შ.) მოლეკულებს შორის, და აგრეთვე, ინერტული აირების ატომებს შორის მათ თხიერ და მყარ მდგომარეობაში. ვან-დერ-ვალსის კავშირი შეიცავს სამ ურთიერთობას:

**დისპერსიული ურთიერთობა.** ამ ურთიერთობის განხილვა შეიძლება ჰელიუმის ორი ატომის მაგალითზე (სურ. 80a,b). ჰელიუმის ატომში ელექტრონული სიმკვრივის განაწილება სფერული სიმეტრიულობით ხასიათდება, ანუ ატომის საშუალო ელექტრული მომენტი ნულის ტოლია. დროის სხვადასხვა მომენტში ელექტრონები იმყოფებიან სივრცის გარკვეულ წერტილებში, რითიც იქმნება მყისიერი, სწრაფად ცვლადი **ელექტრული დიპოლები**. ჰელიუმის ორი ატომის ერთმანეთთან მიახლოებისას, მათი ელექტრონების მოძრაობაში ყალიბდება კორელაცია (შეთანხმება), რაც იწვევს ურთიერთქმედების ძალების წარმოქმნას. ასეთ ძალებს შეიძლება ჰქონდეთ ორმაგი ხასიათი. თუ ელექტრონების მოძრაობა კორელირებულია როგორც ეს ჩანს სურ. 80a-ზე, მაშინ მყისიერ დიპოლებს შორის წარმოიქმნება მიზიდულობა, რასაც ატომების დაკავშირება მოიყვება. სურ. 80b-ზე მოყვანილ შემთხვევაში ატომები განიზიდებიან. პირველ ვარიანტში (სურ. 80a) სისტემის ენერგია მცირდება, ამიტომაც ეს შემთხვევა მეტად ალბათურია, რაც

განაპირობებს მუდმივად მოქმედი მიზიდულობის ძალის წარმოქმნას ჰელიუმის ატომებს შორის. კავშირის ასეთ ძალებს დისპერსიულს უწოდებენ.



სურ. 80. (a,b) ჰელიუმის He ატომების დისპერსიული ურთიერთობა. წარმოიშვება მყისიერი დიპოლები, თანაც, თუ ელექტრონების მოძრაობა კორელირებულია ისე როგორც (a) ნახატზე, წარმოიქმნება მიზიდულობის ძალები; (b) – წარმოიქმნება განზიდვის ძალები. (c) მუდმივი დიპოლის მომენტის შემთხვევაში, ატომები პოლარულები არიან, და მათ შორის ყალიბდება ელექტროსტატიკური ურთიერთობა, რომელიც ცდილობს განალაგოს მოლეკულები მკაცრი წესრიგით (ორიენტაციული ურთიერთობა).

ამ ძალების გასათვალისწინებლად 1930 წ. ლონდონმა გამოთვალა შესაბამისი მოდელი. ამ მოდელს საფუძვლად დაედო ადრული დიპოლი, რომელიც წარმოიქმნება ატომში მეორე ატომის მყისიერი ელექტრული დიპოლის ზემოქმედების შედეგად, რის გამოც რეალიზდება სურ. 80a-ზე მოყვანილი კონფიგურაცია. ამის გამო, დისპერსიული ურთიერთობის ენერგია იქნება:

$$U_D = -\frac{3 a^2 I}{4 r^6}$$

სადაც,  $a$  – ნაწილაკების პოლარიზაციის უნარია,  $I$  – მათი აღზნების ენერგია,  $r$  – მანძილი მათ შორის.

**ორიენტაციული ურთიერთობა.** თუ კი მოლეკულებს ახასიათებს მუდმივი დიპოლის მომენტები  $P$  (პოლარულები არიან), მაშინ მათ შორის მიმდინარეობს ელექტროსტატიკური ურთიერთობა, რომელიც ცდილობს ამ ნაწილაკების მკაცრად მოწესრიგებულ მდგომარეობაში მოყვანას (სურ. 80c), ვინაიდან ამ მდგომარეობაში სისტემის ენერგია მცირდება.

მოლეკულების მოწესრიგება დაბალი ტემპერატურის პირობებში მაქსიმალურად სრულია და მათი ურთიერთობის ენერგია განისაზღვრება შემდეგი შეფარდებით:

$$U_{or} = -\frac{P^2}{2\pi\epsilon_0 r^3}$$

სადაც,  $r$  – მოლეკულთაშორისი მანძილია,  $\epsilon_0$  – დიელექტრიკული მუდმივა.

**ინდუქციური ურთიერთობა.** პოლარულ მოლეკულებს, რომლებსაც ახასიათებს მაღალი პოლარიზების უნარი შეიძლება წარმოექმნას ადრული (ინდუცირებული) მომენტი, მეზობელი მოლეკულების მუდმივი დიპოლების ველის ზეგავლენით. დეზაიმ უჩვენა, რომ მიზიდულობის ენერგია პირველი მოლეკულის ხისტი და მეორე მოლეკულის ადრული დიპოლებს შორის არაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე და განისაზღვრება შეფარდებით:

$$U_{Ind} = -\frac{\alpha P^2}{8\pi\epsilon_0^2 r^6}$$

მოყვანილ ურთიერთობას ინდუცირებული, ან და დეფორმაციული ეწოდება.

საერთო შემთხვევაში ორი მოლეკულის მიახლოებისას შეიძლება წარმოიქმნას კავშირის სამივე ტიპი, შესაბამისად ურთიერთობის ენერგია შეიცავს ზემოთგანხილულ ენერგიებს

$$U = U_D + U_{Or} + U_{Ind}$$

სხვადასხვა მოლეკულებში ვან-დერ-ვალსის კავშირშირის განხილვისას ყოველი ნაწილის შენატანი საერთო ენერგიაში განსხვავებულია.

ვან-დერ-ვალსის ძალების არსებობამ განაპირობა ისეთი ცნების შემოღება როგორცაა ვან-დერ-ვალსის რადიუსი – მოლეკულის ორი უახლოვესი ერთნაირი ატომების შორის არსებული მანძილის ნახევარი. ელემენტის ვან-დერ-ვალსის რადიუსი წარმოადგენს მინიმალურ მანძილს რომელზეც შეიძლება მიუახლოვდნენ ერთმანეთს კოვალენტურად არ დაკავშირებული ატომები ან მოლეკულები.

ჩვეულებრივ ვან-დერ-ვალსის რადიუსი აღემატება იმავე ელემენტის კოვალენტურ რადიუსს ერთმაგი კავშირის შემთხვევაში 0,8 Å რიგის სიდიდით. ეს პარამეტრი განაპირობებს მოცემული ატომის ზომას სხვა ატომებთან შეფარდებაში, რომლებთანაც ის არ არის ქიმიური ბმებით დაკავშირებული. ატომების მიახლოებისას მათი ვან-დერ-ვალსის რადიუსების ჯამზე მცირე მანძილზე, ატომებს შორის აღიძვრება ძლიერი განზიდვის ძალები. ამიტომაც ეს რადიუსები ახასიათებენ სხვადასხვა მოლეკულებში მყოფი ატომების მინიმალურად დასაშვებ კონტაქტებს.

გარკვეული სიზუსტით, ყოველი ბირთვის გარშემო შეიძლება შემოიხაზოს სფერო, რომელიც შეესაბამება მიზიდვის და განზიდვის ძალების ტოლობას (ლენარდ-ჯონსის პოტენციალი), ხოლო ვან-დერ-ვალსის რადიუსი გამოვსახოთ ამ პოტენციალის მეშვეობით. სურ. 81-ზე ეს სფეროები მწვანე და წითელი ფერისა არიან.

ლენარდ-ჯონსის პოტენციალი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$U_{LJ}(r) = 4\varepsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (107)$$

სადაც,  $r$  – მანძილი ნაწილაკების ცენტრებს შორის,  $\varepsilon$  – პოტენციალური ორმოს სიღრმე,  $\sigma$  – მანძილი, რომელზეც ურთიერთქმედების ენერგია ნულის ტოლი ხდება. პარამეტრები  $\varepsilon$  და  $\sigma$  წარმოადგენენ შესაბამისი ნივთიერების ატომების დახასიათებებს.

დიდი  $r$ -ის შემთხვევაში მოლეკულები იზიდავენ ერთმანეთს, რაც შეესაბამება  $\left( \frac{\sigma}{r} \right)^6$  წევრს ფორმულაში. ამ დამოკიდებულების დასაბუთება შესაძლებელია თეორიულად, და მას განაპირობებენ ვან-დერ-ვალსის ძალები (დიპოლ-დიპოლური ინდუცირებული ურთიერთობა).

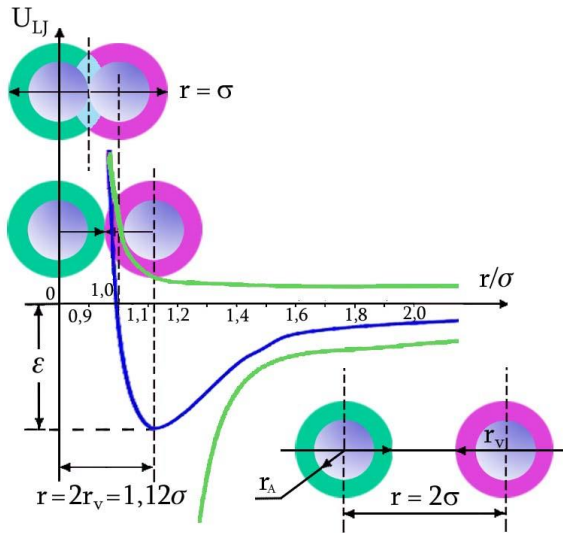
მცირე მანძილებზე კი გაცვლითი ურთიერთობის<sup>82</sup> გამო მოლეკულები განიზიდება (ელექტრონული ღრუბლების გადაფარვისას მოლეკულები ძლიერი განზიდვის ძალები აღიძვრება), რასაც შეესაბამება  $\left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12}$  წევრი. განზიდვის პოტენციალის მოცემულ კონკრეტულ სახეს, მიზიდულობის პოტენციალისგან განსხვავებით, არ გააჩნია თეორიული დასაბუთება.

ფორმულა (107) შეიძლება ჩაიწეროს გამარტივებული სახით:

$$U_{LJ} = U_{repuls} + U_{attract}$$

სადაც,  $U_{repuls}$  – განზიდვის (Repulsion), ხოლო  $U_{attract}$  – მიზიდვის (Attraction) ენერგებია.

<sup>82</sup> გაცვლითი ურთიერთობა — იგივეობრივი ნაწილაკების ურთიერთობა კვანტურ მექანიკაში, რომელსაც მიყვება ნაწილაკთა სისტემის ენერგიის დამოკიდებულებასთან ან სისტემის სრულ სპინზე. წარმოადგენს სუფთა კვანტურ ეფექტს, რომელიც ქრება კლასიკურ მექანიკაში ზღვრულ გადასვლისას.



სურ. 81. ლენარდ-ჯონსის პოტენციალი.

სურ. 81-ზე მოყვანილია ლენარდ-ჯონსის პოტენციალის ( $U_{LJ}$ ) დამოკიდებულება ატომებს შორის მანძილზე, უფრო სწორედ კი მის შეფარდებაზე იმ მანძილთან, რომელზეც ურთიერთობის ენერგია ნულს უტოლდება ( $r/\sigma$ ). აქედან კი გამომდინარეობს, რომ  $r = \sigma$  მანძილს აბსცისის ღერძზე შეესაბამება კოორდინატა 1,0 რომელშიც ჯამური კავშირის ენერგიის მრუდი კვეთს აბსცისის ღერძს, და მაშასადამე ნულის ტოლია. თუ  $r < \sigma$  განზიდვის ძალები ჭარბობენ. წერტილს კოორდინატით  $r = 1,12\sigma$  შეესაბამება  $\epsilon$  სიღრმის პოტენციალური ორმო, და მაშასადამე ენერგიის მინიმუმი და მაქსიმალურად მყარი კავშირი. იმ შემთხვევაში როდესაც  $r = 2\sigma$ , ატომებს შორის ჭარბობენ მიზიდულობის ძალები. მოყვანილ სურათზე ზედა მრუდი, რომელიც მწვანე ფერისაა, შეესაბამება მაქსიმალურ ენერგიებს, და მაშასადამე განზიდვის ძალებს. იმავე ფერის ქვედა მრუდი შეესაბამება ენერგიის უარყოფით მნიშვნელობებს, და მაშასადამე მიზიდულობის ძალებს. ლენარდ-ჯონსის ენერგიას შეესაბამება ლურჯი ფერის მრუდი, რომლის მიღება შეიძლება მიზიდვის და განზიდვის მრუდების შეჯამებისას.

საჭიროა მივაქციოთ ყურადღება იმას, რომ მწვანე და წითელი სფეროების რადიუსები ატომების ცენტრებს შორის ფორმულა (107)-ში მოყვანილი  $r$ -ის ნახევრის ტოლია და შეესაბამება ვან-დერ-ვალსის რადიუსს ( $r_v$ ). ხოლო თვით ატომების რადიუსები, რომლებიც ნაჩვენებია როგორც ცისფერი ფერის სფეროები, მოცემულ სიდიდეზე ნაკლებია და  $r_A$ -ს ტოლია.

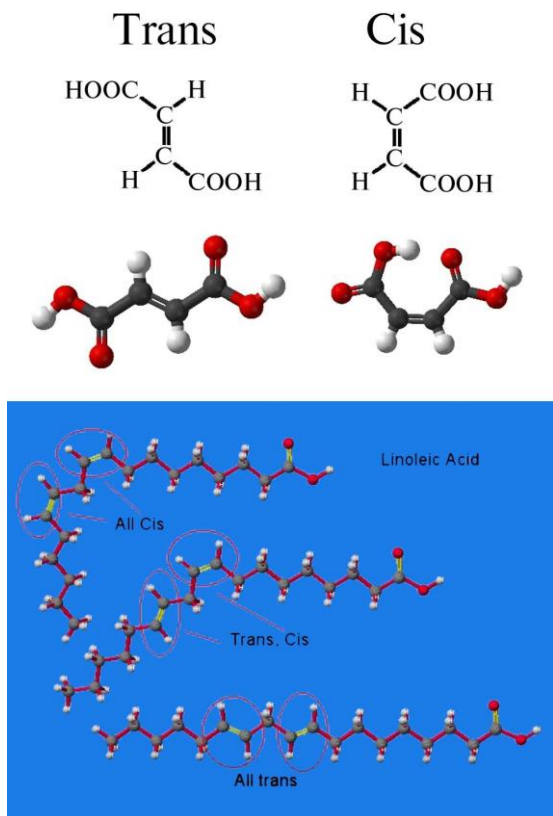
ვან-დერ-ვალსის რადიუსის ცოდნა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს როგორც მოლეკულების ფორმა და კონფორმაცია, ასევე მათი მოლეკულურ კრისტალებში ჩალაგების წესი. მჭიდრო ჩალაგების პრინციპიდან გამომდინარე, კრისტალის ფორმირებისას მოლეკულები ლაგდებიან ისეთნაირად, რომ ერთი მოლეკულის „ამოზნექილი ნაწილები“ მეორე მოლეკულის „შეზნექილ ნაწილებში“ შედიან. ამ პრინციპის გამოყენებით შეიძლება არსებული კრისტოლოგრაფიული მონაცემების ინტერპრეტირება, ზოგ შემთხვევაში კი მოლეკულური კრისტალის სტრუქტურის წინასწარმეტყველობა.

ქვემო ცხრილში მოყვანილია ზოგიერთი ატომის ვან-დერ-ვალსის რადიუსი.

ცხრილი 21

ელემენტი	რადიუსი (Å)	ელემენტი	რადიუსი (Å)	ელემენტი	რადიუსი (Å)
P	1,0	N	1,5	Br	1,93
H	1,2	C	1,8	Se	2,00
F	1,35	Cl	1,80	I	2,15
O	1,4	S	1,85	Sb	2,2

ცის-ტრანს-იზომერია ან გეომეტრიული იზომერია – სტერეოიზომერიის<sup>83</sup> ერთერთი სახეობა: მდგომარეობს ჩამნაცვლებლების განლაგების შესაძლებლობებში ორმაგი კავშირის სიბრტყის, ან არაარომატული ციკლის ერთ ან სხვადასხვა მხარეს. ყველა გეომეტრიული იზომერი დიასტერეომერებს მიეკუთვნება, ანუ მათ არ ახასიათებს სარკისებრივი სიმეტრია. ცის- და ტრანს-იზომერები გვხვდებიან როგორც ორგანულ, ასევე არაორგანულ შენაერთებში. აღნიშვნები „ცის“ (Cis) და „ტრანს“ (Trans) ლათინურიდან მოდის. სიტყვა Cis ნიშნავს „ერთ მხარეს“, ხოლო სიტყვა Trans – „მეორე მხარეს“ ან წინმდებარე.



a

b

c

სურ. 82. ტრანს-ბუტენდიური (ფუმარული) და ცის-ბუტენდიური (მალეინური) მჟავები: (a) ტრანს და ცის იზომერების სტრუქტურული ფორმულები; (b) მოდელი, რომელიც აჩვენებს ატომების განლაგებას მოლეკულაში. შავი ბურთულები შეესაბამება ნახშირბადს, წითელი – წყალბადს, ხოლო თეთრი – ჟანგბადს; (c) ლინოლის მჟავა ორი იზოლირებული ორმაგი კავშირით აყალიბებს ცის და ტრანს იზომერებს.

თვალსაჩინოებისათვის სურ. 82a,b-ზე მოყვანილია ბუტენდიური მჟავის ტრანს- (ფუმარული მჟავა) და ცის- (მალეინის მჟავა) ფორმების სტრუქტურული ფორმულები და მოდელები. კითხვაზე თუ რომელი სტერეოიზომერი უფრო მდგრადია, ან და სხვა სიტყვებით უფრო სტაბილურია თერმოდინამიური თვალსაზრისით, ცალსახა პასუხის გაცემა შეუძლებელია. ყველაფერი დამოკიდებულია სტრუქტურის ფორმირების კონკრეტულ პირობებზე, რომელიც გულისხმობს როგორც ატომურ თანმიმდევრობას, ასევე სტრუქტურაში შემავალი ატომების უშუალო გარემოცვას. ასე მაგალითად, ლინოლის მჟავა (სურ. 82c) ორი იზოლირებული ორმაგი კავშირით აყალიბებს ცის- და ტრანს-იზომერებს. თანაც, ერთი მოლეკულა შეიძლება შეიცავდეს როგორც ცალკე ცის- და ტრანს- იზომერებს, აგრეთვე მათ კომბინაციას.

ასე რომ, ზემოდთქმულიდან შეიძლება საბოლოოდ ითქვას, რომ ვან-დერ-ვალსის ძალები კვანტური ბუნებისაა და დამოკიდებულები არიან ურთიერთქმედებაში მყოფი ატომების ელექტრონების სინქრონიზაციაზე. ეს ურთიერთქმედება ვლინდება მიზიდულობაში შორეულ მანძილებზე და განზიდვაში ახლო მანძილებზე. ვან-დერ-ვალსის

<sup>83</sup> **სტერეოიზომერები** (სივრცული იზომერები) — ქიმიური შენაერთები, რომელთაც ერთნაირი შემადგენლობა და ატომების განსხვავებული სივრცული განლაგება ახასიათებს. სტერეოიზომერებს ერთნაირი კონსტიტუცია და განსხვავებული კონფორმაცია გააჩნიათ.



ძალები კრძალავენ კავშირებს **ცის** კონფორმაციაში და უზრუნველყოფენ სტაბილურ **ტრანს** კონფორმაციას.

**იონური კავშირები** – წარმოიქმნება საწინააღმდეგოდ დამუხტული იონების ელექტროსტატიკური ურთიერთობის გამო. ამრიგად, იონური კავშირის წარმოქმნის პროცესი დაიყვანება ელექტრონების ერთი ატომიდან მეორეზე გადაყვანამდე საწინააღმდეგოდ დამუხტული იონების წარმოქმნით, რომლებსაც ახასიათებს გარე ფენების დასრულებული ელექტრონული კონფიგურაცია.

იონური კავშირი ხასიათდება მიმართულობის არ არსებობით და გაუჯერადობით.

იონური კავშირის **მიმართულობის არ არსებობა** (კოვალენტური კავშირისგან განსხვავება) – მისი ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი თვისებაა. ეს ნიშნავს, რომ ყოველ იონს შეუძლია მიიზიდოს საწინააღმდეგო ნიშნის იონები ნებისმიერი მიმართულებით.

იონური კავშირის **გაუჯერადობა** გამომდინარეობს იქიდან, რომ ცალკეულ მუხტს შეუძლია ნებისმიერი რაოდენობის საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტის მიზიდვა (ნათელია, რომ მუხტებს შორის მანძილის გაზრდით მიზიდულობის ძალაც მათ შორის მცირდება).

ეს ძალიან ძლიერი კავშირია და მისი გახლეჩა ფიზიკური გზით (მაგალითად დნობით) ძალზე ძნელია, სწორედ ამიტომ იონური შენაერთები ხასიათდება დნობის მაღალი ტემპერატურით. იონური შენაერთები იხსნება პოლარულ გამხსნელებში ისეთში როგორცაა, მაგალითად, წყალი, და იხსნება იმიტომ, რომ წყლის პოლარული მოლეკულები „იტაცებენ“ შემდეგ კი იკავებენ კათიონებსა და ანიონებს.

ელექტროსტატიკური ურთიერთობების ბუნება განისაზღვრება საწინააღმდეგოდ დამუხტული ჯგუფების ან ატომების კულონური მიზიდვით და ერთი ნიშნის მქონე მუხტების განზიდვით. დამუხტული ნაწილაკების ელექტროსტატიკური ურთიერთობების ენერგია განისაზღვრება კულონის კანონით:

$$U(r) = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{er} \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{მ} \cdot \text{მ}^2}{\text{მ}^2 \cdot \text{მ}^2} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{მ}^2}{\text{მ}^2 \cdot \text{მ}^2}$$

სადაც,  $|q_1|$  და  $|q_2|$  — ურთიერთქმედებაში მყოფი ნაწილაკების მოდულები;  $\epsilon$  — გარემოს დიელექტრული შეღწევადობა;  $r$  — მანძილი ნაწილაკებს შორის.

დამუხტული ნაწილაკების ურთიერთობის ენერგია შეიძლება იყოს საკმაოდ მნიშვნელოვანი. ასე, მაგალითად, ვაკუუმში 1 Å-ზე მყოფი ნაწილაკების ურთიერთობის ენერგია შეადგენს 1380 კჯ/მოლ. მაგრამ წყლიან ხსნარებში, განსაკუთრებით კი ელექტროლიტების ხსნარებში, კულონური ურთიერთობა მნიშვნელოვნად მცირდება. წყლის მოლეკულებს გააჩნია დიდი დიპოლური მომენტი, ამიტომაც დამუხტულ ნაწილაკებთან ურთიერთობისას შეუძლიათ მათი ურთიერთდამოკიდებულების ნაწილობრივი კომპენსირება. წყლის დიელექტრიკული შეღწევადობა უდრის  $\epsilon = 80$ , ამიტომაც, კულონის კანონის თანახმად, დამუხტული ნაწილაკების ურთიერთქმედების ძალა წყალში იქნება 80 ჯერ ნაკლები, ვიდრე ვაკუუმში.

**წყალბადური ბმები** – წარმოიქმნება მოლეკულასთან ქიმიურად დაკავშირებულ წყალბადსა და უარყოფითად დამუხტულ მეზობელ ატომთა შორის. ვან-დერ-ვალსის ძალებთან შედარებით, წყალბადური ბმები უზრუნველყოფენ უფრო ძლიერ კავშირს და იწვევენ ცილის მაკრომოლეკულის მეორადი სტრუქტურის წარმოქმნას და სტაბილიზირებას. წყალბადურ ბმებს ელექტროსტატიკური ბუნება გააჩნიათ ისინი მიმართულია დონორისგან (წყალბადის ატომი) აქცეპტორისკენ (ჟანგბადის ან აზოტის ატომი). წყალბადი ყოველთვის ერთი წყალბადური ბმის დონორია, ხოლო ჟანგბადი შეიძლება ორი წყალბადური ბმის აქცეპტორი იყოს. ცილის მოლეკულებში წყალბადური ბმები

წარმოიქმნება ამინომჟავათა ნარჩენების ცალკეულ უბნებს შორის, და ასევე პოლარული ამინომჟავებსა და წყლის მოლეკულებს შორის.

წყალბადური კავშირის ენერგია გაცილებით სუსტია ჩვეულებრივი კოვალენტური კავშირის ენერგიასთან შედარებით (არ აღემატება 40 კჯ/მოლ). მაგრამ ეს ენერგია სრულიად საკმარისია მოლეკულების ასოციაციების მისაღებათ, ანუ მათი დიმერებში და პოლიმერებში გაერთიანებისათვის. სწორედ მოლეკულების ასოციაცია, დნობის და დუღილის ანომალურად მაღალი ტემპერატურების მიზეზს წარმოადგენს ისეთ ნივთიერებებში, როგორცაა ფტორწყალბადი, წყალი, ამიაკი. მიუხედავად იმისა, რომ ასეთი ტიპის კავშირი იონუნ და კოვალენტურ კავშირებზე სუსტია, ის თამაშობს ძალზე მნიშვნელოვან როლს შიდა და მოლეკულათშორის ურთიერთობებში. წყალბადური ბმები ბევრად განაპირობებენ წყლის და ბევრი ორგანული სითხის ფიზიკურ თვისებებს. წყალბადური ბმის სიმტკიცე (კომპლექსის წარმოქმნის ენტალპია) დამოკიდებულია კომპლექსის პოლარობაზე და მერყეობს ~ 6 კჯ/მოლ-დან 160 კჯ/მოლ-მდე.

წყლის ანომალურად მაღალი თბოშემცველობა და აგრეთვე ბევრი სპირტების თბოგამტარობა უზრუნველყოფილია დიდი რაოდენობის წყალბადური ბმებით. როგორც უკვე აღინიშნა, წყლის ერთ მოლეკულას შეუძლია მეზობლებთან ოთხამდე წყალბადური ბმის შექმნა (ბიფურკატული<sup>84</sup> წყალბადური ბმების გათვალისწინებით 5–6-მდე).

წყალბადური ბმები სწევენ სითხეების დუღილის ტემპერატურას, სიბლანტესა და ზედაპირულ დაჭიმულობას. წყალბადური ბმები წყლის ბევრ სხვა უნიკალურ თვისებაზეა პასუხისმგებელი.

წყალბადური ბმის ენერგია წყლის დიმერში შეადგენს 21 კჯ/მოლ ( $\approx 5$  კკალ/მოლ), რაც სულ ერთი რიგით მეტია ვიდრე სითბური მოძრაობის მახასიათებელი ენერგია 300 K ტემპერატურაზე. ამავე დროს O — H კოვალენტური კავშირის ენერგია სითბურ ენერგიაზე 200 ჯერ მეტია. ამრიგად, წყალბადური ბმები შედარებით სუსტი და არამდგრადია: იგულისხმება, რომ მათ ადვილად შეუძლიათ როგორც წარმოქმნა, ასევე გაქრობა სითბური ფლუქტუაციების გამო. ამას კი კერძოდ, მივყევართ დასკვნამდე, რომ წყალი უნდა განიხილოს არა როგორც „მარტივი“, არამედ როგორც „მეკრული სითხე“: წყალი წარმოგვიდგება როგორც წყალბადური ბმებით დაკავშირებული მოლეკულების ბადე.

წყალბადური ბმები არსებითად განსაზღვრავენ ისეთი ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების თვისებებს, როგორცაა ცილები და ნუკლეინის მჟავები. კერძოდ, მეორადი (მაგალითად,  $\alpha$ -სპირალი,  $\beta$ -სტრუქტურა) და მესამეული სტრუქტურის ელემენტები ცილების მოლეკულებში, RNA და DNA-ში სტაბილიზირებულია წყალბადური ბმებით. ამ მაკრომოლეკულებში წყალბადური ბმები კრავენ თვით მაკრომოლეკულის ნაწილებს, რითიც აიძულებენ მას დაიხვიოს, და მიიღოს გარკვეული ფორმა. მაგალითად, DNA-ს ორმაგი სპირალის სტრუქტურა არსებითად განისაზღვრება წყალბადური ბმების არსებობით, რომლებიც აბავენ ნუკლეოტიდების წყვილებს, და აკავშირებენ ერთ კომპლემენტარულ ძაფს მეორესთან.

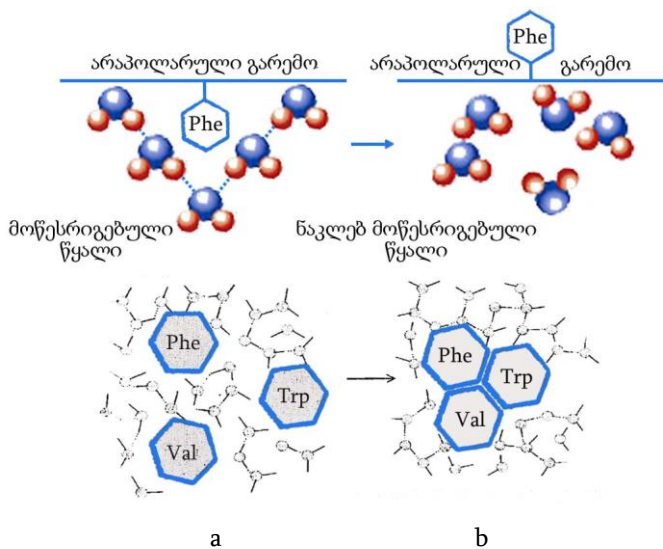
**ჰიდროფობული ურთიერთობა** — (ბერძ. hydor – წყალი და phobos – შიში), წყალში არსებული ძლიერი მიზიდვა არაპოლარულ ნაწილაკებს შორის (მოლეკულები, რთული მოლეკულების ნარჩენები, დისპერსიული ფაზის ნაწილაკები და ა.შ.). ჰიდროფობული ურთიერთობის მიზეზი წყლის მოლეკულებს შორის არსებული წყალბადური ბმების დიდი ენერგიაა, რომელიც აღემატება არაპოლარულ ნაწილაკებთან ურთიერთობის ენერგიას. სწორედ წყლისა და არაპოლარული ნივთიერებების კონტაქტის თერმოდინამიური

<sup>84</sup> ბიფურკატული წყალბადური ბმა — ბმა, რომელშიც წყლის ერთი მოლეკულის პროტონი უკავშირდება ორი მეზობელი მოლეკულის ორ ჟანგბადს.

უსარგებლობა (განიხილება როგორც ჰიდროფობულობა), განაპირობებს მათი მოლეკულების ძლიერ მიზიდვას ერთმანეთის მიმართ.

ურთიერთობა პოლიმერული მოლეკულების შემადგენლობაში შემავალი არაპოლარულ ჯგუფებს შორის ახდენს გადამწყვეტ ზეგავლენას მათ კონფორმაციულ მდგომარეობაზე წყალში. კერძოდ, ცილათა მოლეკულების ნატიური კონფორმაციის მდგრადობა განპირობებულია პოლიპეპტიდურ ჯაჭვში მყოფი ჰიდროფობული ამინომჟავების ნარჩენების გარკვეული თანმიმდევრობით. ჰიდროფობული ურთიერთობა უზრუნველყოფს სპეციფიურ ურთიერთობას ფერმენტსა და სუბსტრატს შორის, ბიომემბრანების და სხვა ზემოლეკულური სტრუქტურების თვითაწყობის და ფუნქციონირების სხვადასხვა ასპექტებს. ჰიდროფობულ ურთიერთობას უკავშირდება წყლის აპკების არამდგრადობა არაპოლარულ ფაზებს შორის, კოაგულაცია და სტრუქტურათა შექმნა ჰიდროფობული ნაწილაკების წყლის დისპერსიებში.

ჰიდროფობული ურთიერთობის ექსპერიმენტული შესწავლა ეფუძნება ინერტული აირების, ნახშირწყალბადების, და სხვა არაპოლარული ნივთიერების წყალში ხსნადობის კვლევას. აგრეთვე ორგანული შენაერთების წყლის ხსნარების სხვადასხვა თერმოდინამიური და კინეტიკური თვისებების შესწავლას, და მაკროსკოპული არაპოლარული ზედაპირების შორის არსებული ურთიერთობის ძალების შესწავლას. ეს ურთიერთობები მჭიდროდ არიან დაკავშირებული წყლის სტრუქტურის შესწავლასთან სხვადასხვა სპექტროსკოპული მეთოდის გამოყენებით (ოპტიკური სპექტროსკოპია, ბირთვულ-მაგნიტური რეზონანსი, ნეიტრონების გაბნევა და სხვა).



სურ. 83. ჰიდროფობული ურთიერთობა. Phe (არაპოლარული ამინომჟავის) ნარჩენის გვერდითი ჯაჭვის ხსნარიდან მოლეკულის სიღრმეში გადასვლა. ნახატის ქვემო მხარეს ნაჩვენებია უკვე სამი არაპოლარული ამინომჟავა (Phe, Val, Trp) და ის მდგომარეობა, რომ წყლის მოლეკულების განდევნით ხდება ამინომჟავების გაერთიანება.

თეორიულ ასპექტში ჰიდროფობული ურთიერთობა განიხილება მოლეკულთა-შორის ურთიერთობაზე გარემოს ზეგავლენის საერთო პრობლემის ჩარჩოებში. შეუძლებელია არაპოლარული მოლეკულის წყალში ჩანერგვა წყლის მოლეკულებით აგებული მყარი წყალბადური ბმების სივრცული ბადის დარღვევის გარეშე. ასეთ ჩანერგვას ესაჭიროება მნიშვნელოვანი მუშაობის შესრულება, ანუ მატულობს სისტემის თავისუფალი ენერგია (იზოქორულ-იზოთერმული პოტენციალი, ანუ ჰელმჰოლცის ენერგია). შედეგად იწყება წყალში მყოფი არაპოლარული მოლეკულების მიზიდვა, ვინაიდან მათი დაახლოებისას სისტემა ამა თუ იმ დონეზე მოიცვალა წყალთან თერმოდინამიურად არამარგებელ კონტაქტს და მისი თავისუფალი ენერგია შემცირდება. არაპოლარული მოლეკულის ყოფნით გამოწვეული წყლის სტრუქტურის დამახინჯებები შეიძლება წყალბადური ბმების ჯაჭვებით იყოს გადატანილი საკმაოდ დიდ მანძილებზე და განაპირობოს ჰიდროფობული ურთიერთობის შორეული მოქმედება. ეს დამახინჯებები

ატარებენ მოწესრიგებულ ხასიათს, და მათ ახლავს სისტემის ენტროპიის შემცირება; სწორედ რომ ჰიდროფობული ურთიერთობის ენტროპიული ბუნება მჟღავნდება ამ ეფექტის გაძლიერებაში ტემპერატურის ზრდის დროს.

სურ. 83-ზე ილუსტრირებულია ის ფაქტი, რომ წყლის გარემოში ჰიდროფობული ნაწილაკების თერმოდინამიურად ხელსაყრელ დაახლოვებას ენტროპიული ბუნება გააჩნია. სურ. 83a-ზე ნაჩვენებია, თუ როგორ ცდილობენ წყლის მოლეკულები ჰიდროფობულ ნაწილაკებთან წყალბადური ბმების შექმნას, შედეგად კი გაედინებიან ამ ნაწილაკებზე და მათ მჭიდრო დალაგებას უწყობენ ხელს. იზრდება სისტემის მოწესრიგებლობა, ენტროპია კი მცირდება. ენტროპიის შემცირება (a) შემთხვევაში გამოიწვევს ჰიდროფობული ნაწილაკების მიერ წყლის მოლეკულების თვითნებურ მოშორებას, და მათ ერთმანეთთან დაახლოვებას, ანუ ჰიდროფობული ურთიერთობების დამყარებას მათ შორის. ამასთან იზრდება სისტემის ენტროპიაც.

ვინაიდან თხევად გარემოში არსებული მოლეკულების ურთიერთობის ეფექტური პოტენციალი (ე.წ. საშუალო ძალის პოტენციალი), წარმოადგენს დიდი რაოდენობის მოლეკულების ურთიერთობის ჯამურ შედეგს, მისი პარამეტრების ზუსტი განსაზღვრა წარმოადგენს რთულ თეორიულ ამოცანას, რომლის ამოხსნა შესაძლებელია თხევადი მდგომარეობის სხვადასხვა მოდელების ფარგლებში. წყალში მყოფი არაპოლარული მოლეკულების ჰიდროფობული ურთიერთობის ენერგია რომელიც პოტენციალური ორმოს სიღრმესთან არის დაკავშირებული, ანუ სხვა სიტყვებით რომ ითქვას მოლეკულთაშორისი კავშირის ეფექტური ენერგია, შესაძლებელია აღემატებოდეს ამავე მოლეკულების დისპერსიული ურთიერთობის ენერგიას გარემოცვის არ არსებობის პირობებში (ვაკუუმში). გარემოცვის გარეშე მყოფი მოლეკულების ურთიერთობის პოტენციალისგან განსხვავებით, ჰიდროფობული ურთიერთობის პოტენციალს გააჩნია ოსცილირებადი ხასიათი (აღინიშნება მინიმუმების და მაქსიმუმების მონაცვლეობა პერიოდით, რომელიც გარემოს მოლეკულების დიამეტრის რიგისა).

ურთიერთობა არაპოლარულ ნაწილაკებს შორის, რომელიც თავისი ბუნებით ჰიდროფობული ურთიერთობის ანალოგიურია, წარმართება არა მხოლოდ წყალში, არამედ მაღალი კოგეზიონური ენერგიის მქონე (მაღალი ზედაპირული დაჭიმულობით) სხვა სითხეებშიც, მაგალითად, ფორამიდიში და გლიცერინში. ეს კი საშუალებას იძლევა ვისაუბროთ უფრო საერთო სახის მოვლენაზე — ლიოფობურ ურთიერთობაზე. პრინციპში, ლიოფობური ურთიერთობა შეიძლება განხორციელდეს პოლარულ ნივთიერებებს შორისაც. ასე, მაგალითად, ჰიდროფილური მინის ნაწილაკების ადგეზია ძლიერდება მათი ჩაშვებისას ვერცხლის წყალში, რასაც თან ახლავს ვაკუუმის ღრმულების წარმოქმნა ნაწილაკების კონტაქტის ადგილას, მათი ჰიდროფილური ზედაპირების და ვერცხლის წყლის ურთიერთობის შეუძლებლობის გამო.

### **13.3. მაკრომოლეკულების სტრუქტურული ორგანიზება.**

კიდევ ერთხელ ავღნიშნოთ, რომ სხვა მაკრომოლეკულებისაგან განსხვავებით ცილებს ახასიათებს სტრუქტურული მრავალფეროვნება. ეს იმიტომ გამოწვეული, რომ ცილები აგებულია სხვადასხვა ტიპის ამინომჟავებისაგან, რომლებიც განსხვავდებიან როგორც თვისებებით, ასევე ზომებითაც. ამიტომაც მაკრომოლეკულების ორგანიზების პრინციპებს განვიხილავთ ცილების მაგალითზე. სადღეისოდ მიღებული ნომენკლატურის მიხედვით არსებობს ცილის ორგანიზების ოთხი დონე (იხ. სურ. 84a). მაგრამ ზოგიერთი მეცნიერი თვლის, რომ საჭიროა კიდევ ერთი დონის დამატება ცილების რთული წარმონაქმნების აღსაწერათ. ჩამოვთვალოთ და შემდეგ კი განვიხილოთ ცილის ორგანიზების ძირითადი ოთხი დონე.



ცილის ერთ-ერთი თვისება – დენატურაციის უნარი. დენატურაცია – ცილის ბუნებრივი სტრუქტურის დარღვევა. დენატურაციას იწვევენ: რადიაცია, ტემპერატურა, pH, მძიმე მეტალების მარილები და ა.შ. დენატურაცია შეიძლება იყოს:

- შეუქცევადი – პეპტიდური ბმების დარღვევა;
- შექცევადი – მესამეული სტრუქტურის გაშლა მეორად სტრუქტურამდე გლობულის ადდგენის შესაძლებლობით.

მეორადი სტრუქტურის რთული ორგანიზების გამო, ბოლო ხანს, სულ უფრო ხშირად გამოიყენებენ ტერმინს – ზემეორადი სტრუქტურა (იხ. სურ. 84f), რომელიც შეიცავს:

- $\alpha$ -ცილებს:
  - მიოგლობინი, გემოგლობინი, პარამიოზინი,  $\alpha$ -კერატინი;
- $\beta$ -ცილებს:
  - კონკავალინი A (მცენარეული ლექტინი), სუპეროქსიდდისმუტაზა, აბრეშუმის და აბლაბუდის ფიბროინი;
- $\alpha+\beta$ -ცილებს ( პეპტიდური ჯაჭვის ერთი ნაწილი წარმოდგენილია  $\alpha$ -სპირალებით, მეორე კი  $\beta$ -სტრუქტურებით) – იშვიათია:
  - თერმოლიზინი (ბაქტერიული);
- $\alpha / \beta$ -ცილები (ხდება  $\alpha$  და  $\beta$  სტრუქტურების მონაცვლება) – ყველაზე ხშირი:
  - ფოსფოგლიცერატკინაზა, ფლავოდოქსინი;
- $\alpha$ -ს გარეშე  $\beta$  (პრაქტიკულად არა აქვთ სპირალური და დაკეცილი სტრუქტურები):
  - ფერედოქსინი (ბაქტერიული).

განვიხილოთ უფრო დაწვრილებით სტრუქტურული ორგანიზების ყოველი დონე.

**ცილის პირველადი სტრუქტურა** – ამინომჟავების ნარჩენების თანმიმდევრობითი განლაგება პოლიპეპტიდურ ჯაჭვში. ცალკეული ამინომჟავები ცილებში უკავშირდებიან ერთმანეთს **პეპტიდური ბმებით**, რომლებიც წარმოიქმნება ამინომჟავების  $\alpha$ -კარბოქსილური და  $\alpha$ -ამინოჯგუფების ურთიერთობისას.

მოყვანილი ნახატიდან (სურ. 84b) ჩანს, რომ კავშირი ამინომჟავების ნარჩენებს შორის პოლიპეპტიდურ ჯაჭვში ხორციელდება მე i-ე ამინომჟავის კარბოქსილური ჯგუფის (=C=O) ნახშირბადისა და i+1 ამინომჟავის აზოტს შორის. ამისათვის კარბოქსილურ ჯგუფს (COOH) უნდა მოშორდეს ჰიდროქსილური ჯგუფი (OH), ხოლო ამინოჯგუფს (NH<sub>2</sub>) – წყალბადის ატომი. შედეგად, ამინომჟავების წყვილის გაერთიანებისას გამოიყოფა წყლის ერთი მოლეკულა.

სადღეისოდ, პირველადი სტრუქტურა დადგენილია ათეული ათასი სხვადასხვა ცილისათვის. ცილის პირველადი სტრუქტურის გამოკვლევისას ჰიდროლიზის მეთოდის მეშვეობით, პირველყოფლისა ადგენენ მასში ამინომჟავების შემადგენლობას. შემდეგ იკვლევენ ბოლოებში მყოფი ამინომჟავების ქიმიურ ბუნებას. შემდეგი ეტაპი – ამინომჟავების თანმიმდევრობის დადგენა პოლიპეპტიდურ ჯაჭვში. ამისათვის გამოიყენებენ ამორჩევით ნაწილობრივ (ქიმიურ და ფერმენტატიულ) ჰიდროლიზს. შესაძლებელია როგორც რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის, ასევე DNA-ს კომპლემენტარულ ნუკლეოტიდურ თანმიმდევრობის მონაცემების გამოყენება.

**ცილის მეორადი სტრუქტურა** – წარმოადგენს სივრცულ სტრუქტურას, რომელიც იქმნება პეპტიდური ფუძის არაფუნქციონალური ჯგუფების ურთიერთობისას. უფრო მარტივად რომ ითქვას, ორგანიზების ამ დონეზე წყალბადური ბმები იქმნება პეპტიდური ჯაჭვის წრფიულ თანმიმდევრობაში მყოფი (ამინომჟავების რადიკალების გარეშე) წყალბადის და ჟანგბადის ატომებს შორის (სურ. 84b).

## რეგულარული მეორადი სტრუქტურა

რეგულარულს უწოდებენ ამინომჟავების ნარჩენებისგან შექმნილ მეორად სტრუქტურებს, რომლებშიც მთავარი ჯაჭვი იმყოფება ერთნაირ კონფორმაციაში (სტაბილური ფ და  $\psi$  კუთხეებით) გვერდითი ჯგუფების მრავალფეროვანი კონფორმაციების ფონზე.

რეგულარულ მეორად სტრუქტურებს მიაკუთვნებენ:

1. სპირალებს, რომლებიც შეიძლება იყოს როგორც მარცხნივ, ასევე მარჯვნივ შემავლანი სხვადასხვა პერიოდითა და ბიჯით. პოლიპეპტიდურ ჯაჭვებში მყოფი უმრავლესი სპირალური სტრუქტურის უზრუნველყოფა ხდება შიდამოლეკულური წყალბადური ბმებით. ამ შემთხვევაში წყალბადური ბმა წარმოიქმნება ერთი ამინომჟავის ნაშტის კარბონილურ ჯგუფსა და პოლიპეპტიდის N-ბოლოსკენ ახლოს მყოფი მეორე ნაშტის ამინოჯგუფს შორის. სპირალების სხვადასხვა ტიპები აღიწერება  $a_b$  სახის ციფრული ჩანაწერით, სადაც  $a$  – იმ ამინომჟავური ნაშტის რიგითი ნომერია, რომელიც იძლევა წყალბადური ბმის ფორმირებაში მონაწილე ამინოჯგუფს,  $b$  – ატომების რაოდენობა წყალბადური ბმით შეკრულ ციკლში. სპირალურ სტრუქტურებს, რომლებიც ცილებში გვხვდებიან (იხ. სურ. 84c), მიეკუთვნებიან:

1.1.  $\alpha$ -სპირალი, ან სპირალი  $4_{13}$ , (იხ. სურ. 84d,e) — ყველაზე გავრცელებული მეორადი სტრუქტურა ცილებში. აღნიშნული სპირალი ხასიათდება მჭიდრო ხვიებით მოლეკულის გრძელი ღერძის ირგვლივ. ერთი ხვია შეიცავს 3,6 ამინომჟავურ ნაშტს და სპირალის ბიჯი შეადგენს  $5,4 \text{ \AA}$  (ასე რომ, ამინომჟავის ერთ ნაშტზე მოდის  $1,5 \text{ \AA}$ ). სპირალი სტაბილიზირებულია წყალბადური ბმებით პეპტიდური ჯგუფების წყალბადსა და ჟანგბადს შორის, რომლებიც პეპტიდური ჯაჭვის ოთხი წევრით არიან დაშორებული ერთმანეთს.  $\alpha$ -სპირალი შეიძლება წარმოიქმნას როგორც L-, აგრეთვე D-ამინომჟავებისაგან, ოღონდ სპირალის ყველა ამინომჟავა უნდა იყოს ერთი სტერეოქიმიური რიგის. თუ საწყისად გამოვიყენებთ L- ბუნებრივ ამინომჟავას, შესაძლებელია აიგოს როგორც მარჯვენა, ასევე მარცხენა სპირალი, მაგრამ როგორც უჩვენეს პოლინგმა და კორიმ, მარჯვენა სპირალი უფრო სტაბილურია. ყველა შესწავლილ ბუნებრივ ცილაში L-ამინომჟავებისაგან შემდგარი  $\alpha$ -სპირალი, მიეკუთვნება მარჯვენა ტიპს. სპირალურ სტრუქტურას არღვევენ გლუტამინის მჟავის, ლიზინის და არგინინის ელექტროსტატიკური ურთიერთობები. ერთმანეთთან ახლოს მყოფ ასპარაგინის, სერინის, ტრეონინის და ლეიცინის ნაშტებს შეუძლიათ სტერიულად ხელი შეუშალონ სპირალის შექმნას. პროლინის ნაშტები იწვევენ ჯაჭვის მოკეცვას და ასევე არღვევენ  $\alpha$ -სპირალებს.

1.2. სპირალი  $3_{10}$  (იხ. სურ. 84c) – ძალზე „დაჭიმული“ სპირალია, კვეთში აქვს სამკუთხედის ფორმა, ცილებში გვხვდება ძირითადად მისი მარჯვენა ფორმა და ისიც 1-2 ხვიის სახით. მანძილი ამინომჟავების ნაშტებს შორის სპირალის გასწვრივ შეადგენს  $2 \text{ \AA}$ . ერთ ხვიაზე მოდის 3,0 ამინომჟავის ნაშტი. წყალბადური ბმები წარმოიქმნება მე  $i$ -ე და  $i+3$ -ე ნაშტებს შორის; წყალბადური ბმის სიგრძე  $1,83 \text{ \AA}$ .

1.3.  $\pi$ -სპირალი, ანუ სპირალი  $5_{16}$  (სურ. 84c) – სპირალი უფრო შეკუმშულია, ფართე ხვიებით. ამის შედეგად სპირალის ცენტრში რჩება ცარიელი ადგილი. მანძილი ამინომჟავების ნაშტებს შორის სპირალის გასწვრივ შეადგენს  $1,1 \text{ \AA}$ . ერთ ხვიაზე მოდის 4,3 ამინომჟავის ნაშტი. წყალბადური ბმები წარმოიქმნება ყოველი მე  $i$ -ე და  $i+5$ -ე ნაშტებს შორის. წყალბადური ბმის სიგრძე  $1,65 \text{ \AA}$ . ცილებში იშვიათად გვხვდება და ჩვეულებრივ არა უმეტესი ერთი ხვიისა.

2.  $\beta$ -სტრუქტურა ( $\beta$ -ფენები, ნაკეციანი ფენები) (იხ. სურ. 84d) – რამდენიმე ზიგზაგის მაგვარი პოლიპეპტიდური ჯაჭვი, რომლებშიც წყალბადური ბმები წარმოიქმნება პირველად სტრუქტურაში ერთმანეთს შედარებით მოშორებულ ( $3,47 \text{ \AA}$  ამინომჟავის

ერთ ნაშტზე) ამინომჟავებს შორის, ან და ცილის განსხვავებულ ჯაჭვებს შორის, და არა ახლომდებარე ამინომჟავებს შორის, როგორც ეს  $\alpha$ -სპირალებში აღინიშნებოდა.  $\beta$ -სტრუქტურის შემადგენლობაში მყოფი პოლიპეპტიდური ჯაჭვები შეიძლება თავისი N-ბოლოებით იყვნენ მიმართული სხვადასხვა მხარეს (ანტიპარალელური  $\beta$ -სტრუქტურა), ერთ მხარეს (პარალელური  $\beta$ -სტრუქტურა), და ასევე შესაძლებელია შერეული  $\beta$ -სტრუქტურის არსებობა (შედგება პარალელური და ანტიპარალელური  $\beta$ -სტრუქტურებისაგან).  $\beta$ -ფენების შექმნისათვის მნიშვნელოვანია ამინომჟავების გვერდითი ჯგუფების მცირე ზომები, ჩვეულებრივ ჭარბობენ გლიცინი და ალანინი.  $\beta$ -სტრუქტურა ცილებში მონახვის სიხშირით მეორეა  $\alpha$ -სპირალის შემდეგ.

3. პოლიპროლინის სპირალი – მკვრივი მარცხნივშემავლიანი სპირალი, რომელიც სტაბილიზირებულია ვან-დერ-ვალსის ძალებით და არა წყალბადური ბმების სისტემით. ასეთი სტრუქტურა ყალიბდება პროლინით მდიდარი პოლიპეპტიდურ ჯაჭვებში, სადაც წყალბადური ბმების ნაჯერი სისტემის ფორმირება ამ მიზეზის გამო შეუძლებელია. poly(Pro)II ტიპის პოლიპროლინის სპირალი რეალიზებულია კოლაგენში, შემაერთებული ქსოვილის უმნიშვნელოვანეს კომპონენტში. ეს არის მარცხნივ შემავლიანი სპირალი 9,6 Å ბიჯით და 3,3 ამინომჟავის ნაშტით თითო ხვიაში, რომელიც უფრო დამრეცია ვიდრე  $\alpha$ -სპირალი.  $\alpha$ -სპირალისგან განსხვავებით წყალბადური ბმების წარმოქმნა აქ შეუძლებელია. სტრუქტურა სტაბილიზირდება სამი პეპტიდური ჯაჭვის დახვევით მარჯვნივშემავლიან სამმაგ სპირალში (იხ. სურ. 84i).

### არარეგულარული მეორადი სტრუქტურა.

არარეგულარულს უწოდებენ ამინომჟავების ნარჩენებისგან შექმნილ მეორად სტრუქტურებს, რომლებშიც მთავარი ჯაჭვი განსხვავებული კონფორმაციით ხასიათდება (ცვლადი  $\phi$  და  $\psi$  კუთხეები). არარეგულარულ მეორად სტრუქტურებს მიაკუთვნებენ:

- მოხვევები (სურ. 84f) – პოლიპეპტიდური ჯაჭვის არარეგულარული მონაკვეთები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მისი მიმართულების მოტრიალებას  $180^\circ$ -ით. თუ კი მოტრიალების უზრუნველმყოფი მონაკვეთი შედარებით გრძელია, გამოიყენება ტერმინი „მარყუჟი“. 1968 წ. მინიმალურად შესაძლო ამინომჟავების ნაშტებით (4) მოხვევების აღწერისას, ვენკატაჩალამმა შემოიღო მათთვის ტერმინი „ $\beta$ -მოლუნვა“. ასევე არსებობენ 5 და 6 ამინომჟავის ნაშტის შემცავი მოხვევებიც.
- ნახევარმოხვევები, ანუ გადასვლები – პოლიპეპტიდური ჯაჭვის არარეგულარული მონაკვეთები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მისი მიმართულების შეცვლას  $90^\circ$ -ით. მინიმალური ნახევარმოხვევა შეიცავს 3 ამინომჟავის ნაშტს.

### ძირითადი რეგულარული სტრუქტურის დახასიათება

**$\alpha$ -სპირალი** (ალფა-სპირალი) – ცილების მეორადი სტრუქტურის ტიპიური ელემენტი; წარმოადგენს მარჯვნივ შემავლიან ხრახნისებრივ ხაზს, რომლის კარკასში მყოფი ყოველ ამინოჯგუფს ( $-\text{NH}$ ) გააჩნია წყალბადური ბმა ოთხი ამინომჟავით ადრე მყოფი კარბონილურ ჯგუფთან ( $-\text{C}=\text{O}$ ). მეორადი სტრუქტურის ამ ელემენტს ზოგჯერ პოლინგ-კორი-ბრენსონის კლასიკურ  $\alpha$ -სპირალს უწოდებენ – იმ ავტორების სახელით, რომლებმაც ეს სტრუქტურა პირველბმა აღწერეს 1951 წ.

შეხედულობით  $\alpha$ -სპირალი წააგავს გაწეილ ზამბარას.  $\alpha$ -სპირალის სტაბილიზირება ხდება პეპტიდურ ჯგუფებს შორის წარმოქმნილი წყალბადური ბმებით. წყალბადური ბმების რეგულარობა (1 – 4, 2 – 5, 3 – 6 და ა.შ.) განსაზღვრავს  $\alpha$ -სპირალის



ხვიების რეგულარობას: ერთი ხვიის სიმაღლე, ანუ სპირალის ბიჯი, შეადგენს 5,4 Å და მასში 3,6 ამინომჟავის ნაშტი (M) იმყოფება.

- ეხლა კი ჩამოვთვალოთ იდეალური  $\alpha$ -სპირალის თვისებები და პარამეტრები:
- წყალბადური ბმის წარმოქმნა ყოველი პირველი და მეოთხე ამინომჟავის ნაშტების პეპტიდურ ჯგუფებს შორის;
  - სპირალის ხვების რეგულარობა;
  - ყველა ამინომჟავის ნაშტის ტოლმნიშვნელოვნობა  $\alpha$ -სპირალში გვერდითი რადიკალების აგებულებაზე დამოუკიდებლად;
  - გვერდითი რადიკალები არ იღებენ მონაწილეობას  $\alpha$ -სპირალის შექმნაში;
  - მარჯვნივშემავლიანი სპირალი;
  - წყალბადური ბმები წარმოიქმნება მე  $i$ -ე და  $i+4$ -ე ნაშტებს შორის; წყალბადური ბმის სიგრძე დაახლოებით 2,0 Å.
  - წყალბადური ბმები სპირალის შიგნითაა ლოკალიზებული; ყველა ამინომჟავის ნაშტი, პირველი და ბოლოს გარდა, მონაწილეობენ წყალბადური ბმის შექმნაში;
  - ამინომჟავების რაოდენობა სპირალის ერთ ხვიაზე შეადგენს —  $M = 3,6-3,7$ ;
  - სპირალის დიამეტრი — 15 Å;
  - სპირალის ბიჯი — 5,4 Å;
  - ყოველ ამინომჟავის ნაშტზე მოდის 1,5 Å;
  - ყოველი ამინომჟავა შეესაბამება სპირალის დატრიალებას 100°;
  - ტორსიალური კუთხეები იცვლება საზღვრებში:  $\varphi = -47$  —  $-50^\circ$  და  $\psi = -60^\circ$ .

ასეთი პარამეტრები გამოთვლილია გამომდინარე იმ ვარაუდიდან, რომ  $\alpha$ -სპირალში შემავალი ყველა ამინომჟავის ნაშტის კონფორმაცია ( $\varphi$  და  $\psi$  კუთხეები) ერთნაირია. მაგრამ რეალურ ცილებში ცალკეული ამინომჟავის ნაშტები ოდნავ განსხვავდებიან, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს სპირალის ღერძის მცირე გამრუდება, სპირალის ხვიებში განსხვავებული რაოდენობის ამინომჟავების ნაშტების ჩალაგება და ა.შ.

***β-სტრუქტურა*** – მეორადი სტრუქტურის ნაირსახეობა, რომელსაც ახასიათებს პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ოდნავ გამრუდებული კონფორმაცია და რომელიც ფორმირდება ***პეპტიდთაშორისი*** წყალბადური ბმებით ერთი პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ცალკეული უბნების ფარგლებში, ან მომიჯნავე პოლიპეპტიდური ჯაჭვების უბნებს შორის. მას ასევე უწოდებენ ფენოვან-ნაკვეციან სტრუქტურას. ეს სტრუქტურა სტაბილიზირდება პეპტიდთაშორისი წყალბადური ბმებით, ზოგჯერ დისულფიდური ბმებითაც, რომლებიც წარმოიქმნება პოლიპეპტიდური ჯაჭვის გასწვრივ ცისტეინის ნაშტების განლაგების ადგილებში. მოკლე პეპტიდების ციკლებში ჩართვას სწორედაც რომ დისულფიდურ ბმებს უნდა უმადლოდეთ.

ბევრ ცილაში ერთდროულად არსებობენ როგორც  $\alpha$ -სპირალური უბნები, აგრეთვე  $\beta$ -სტრუქტურები. ამავდროულად, წყალბადური ბმების გადანაცვლების გამო, შესაძლებელია გადასვლები  $\alpha$ -სპირალიდან  $\beta$ -სტრუქტურაში და პირიქით.

სადღეისოდ გამოყოფენ ზემოთაღნიშნულ სტრუქტურებსაც (იხ. სურ. 84f). ზემოთაღნიშნულ სტრუქტურაში გულისხმობენ პოლიპეპტიდური ჯაჭვის დახვევის პროცესში ელემენტარული სტრუქტურების კანონზომიერ წარმოქმნას, რომლებიც წარმოდგენილია  $\beta$ -შრეებით ( $\beta$ - $\beta$ -სტრუქტურები), ან  $\alpha$  სპირალური მონაკვეთების მდგომარეობით ( $\alpha$ ,  $\alpha$ -სტრუქტურა), ან ორივეთი ერთად (ე.წ. ბერძნული გასაღები, ბერძნული ორნამენტი).

ბუნებრივ ცილებში 100% სპირალიზებულია მხოლოდ პარამიოზინი, დანარჩენი კი ხასიათდებიან  $\alpha$ -სპირალურების და  $\beta$ -სტრუქტურების გარკვეული შეფარდებით (%):

ცილა	α	β
ხიმოტრიფსინი	14	45
რიბონუკლეაზა	26	35
ინსულინი	52	6

**ცილის მესამეული სტრუქტურა** – ერთიანი ჯაჭვიდან შემდგარი მთელი ცილის ან სხვა მაკრომოლეკულის სივრცული აგებულება (კონფორმაციის ჩათვლით). ეს სტრუქტურა წარმოიქმნება პეპტიდური ჩონჩხის ფუნქციონალური ჯგუფების ურთიერთობის შედეგად. მის სტაბილიზირებაში მონაწილეობს სუსტი ურთიერთობების ყველა სახე და ასევე კოვალენტური (დისულფიტური კავშირის შემთხვევაში) ბმები. ამ პროცესში ცილის თვითორგანიზების დროს მონაწილეობს გარე „მაორგანიზებელი“ ფაქტორი, რომელიც ეფუძნება გამხსნელის მოლეკულებისა და ცილოვანი სტრუქტურის ელემენტებს შორის არსებულ განზიდვის ძალას. ზუსტად ამაში მდგომარეობს ჰიდროფობული ეფექტი. ჰიდროფობული ურთიერთობა აღიმკვრება პეპტიდური ჯაჭვის უბნებს შორის. არაპოლარული მონაკვეთები ეწინააღმდეგებიან წყალბადური ბმების წარმოქმნას წყლის მოლეკულებს შორის (იხ. სურ. 83). ეს იწვევს სისტემის ენტროპიის შემცირებას და მისი თავისუფალი ენერჯის ზრდას. ვინაიდან ცილოვანი სტრუქტურების არაპოლარულ მონაკვეთებთან კონტაქტში მყოფ წყლის მოლეკულებში, მცირდება თავისუფლების ხარისხების რაოდენობა. შემდეგ ჰიდროფობული უბნები უახლოვდებიან ერთმანეთს, რათა ამით შეამცირონ მათი წყლის მოლეკულებთან ურთიერთშეხების ფართობი. ასე რომ, ჰიდროფობული ურთიერთობის შემთხვევაში სისტემა მიისწრაფვის სტაციონარულ მდგომარეობისაკენ, რომელიც ხასიათდება ჰიდროფობული მონაკვეთების და წყლის მოლეკულების ურთიერთშეხების მინიმალური ფართობით. არსებული ცილებში ჰიდროფობული უბნები ჰქმნიან ე.წ. „ჰიდროფობულ ბირთვს“.

ავლნიშნოთ, რომ სპირალიზება 4 ჯერ ამცირებს პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ზომას, ხოლო მესამეული სტრუქტურა ცილის მოლეკულას ათეულობით უფრო კომპაქტურს ხდის.

ასე რომ, მესამეული სტრუქტურა წარმოადგენს სპირალიზებული ან გარკვეულ ფართობში ჩაკეცილი სტრუქტურის მქონე პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ჩალაგების წესს. ეს სტრუქტურა :

- უნიკალურია ყოველი ცილისათვის;
- ყალიბდება უშუალოდ რიბოსომაზე, ცილის მოლეკულის სინთეზის დასრულებისას, მისი მოთავსებით ენერგეტიკულად უფრო მომგებიან სტრუქტურაში თვითორგანიზაციის პრინციპებიდან გამომდინარე;
- ყალიბდება ამინომჟავების რადიკალების ხარჯზე, ასე რომ განპირობებულია მოცემული ცილის პირველადი სტრუქტურით.

განასხვავებენ გლობულარულ (სფეროსებრივ) და ფიბრილარულ (გაჭიმულ, ბოჭკოვან) მესამეულ სტრუქტურას (სურ. 84h,i). მესამეული სტრუქტურის ფორმირებისას ურთიერთობაში შედიან ამინომჟავების ნაშტების გვერდითი რადიკალები. მესამეული სტრუქტურის ფორმირების პროცესს ეწოდება ფოლდინგი. ამ პროცესში მონაწილეობენ სპეციალური ცილები – შაპერონები. შაპერონებთან კავშირი ხელს უშლის აგრეგაციას სხვა ცილებთან და ამით ხელს უწყობს მზარდი პეპტიდის ნორმალურ ჩახვევას. მესამეული სტრუქტურის სტაბილიზირება ხორციელდება ამინომჟავების რადიკალებს შორის წყალბადური, იონური, დისულფიტური ბმების წარმოქმნით, ხოლო არაპოლარული ნახშირწყალბადური რადიკალებს შორის ვან-დერ-ვალსის მიზიდულობის ძალებით.

მესამეული სტრუქტურის პირველი მოდელი იყო შექმნილი ჯ.კენდრიუს მიერ კაშალოტის მიოგლობინისათვის 1952 წ. დღეისათვის მესამეული სტრუქტურა დადგენილია 300-ზე მეტ ცილისათვის. მის სტაბილიზაციაში მონაწილეობენ კოვალენტური ბმები – დისულფიდური და ფსევდოპეპტიდური (კავშირი, რომელიც შეიძლება წარმოიქმნას ამინომჟავების რადიკალების NH<sub>2</sub> და COOH ჯგუფებს შორის), მაგრამ ძირითადად სუსტი ურთიერთობები: წყალბადური, იონური, არაპოლარული (ვან-დერ-ვალსის). სუსტი ურთიერთობების დიდი რაოდენობით მონაწილეობის გამო, მესამეული სტრუქტურა ძალზე ლაბილურია, მოძრავი, და ადვილად იცვლება გარემოს ფაქტორების ზეგავლენით (t, pH, იონური ძალები).

ზოგიერთი ცილის ქიმიური სტრუქტურის შესწავლამ აჩვენა, რომ მათ მესამეულ სტრუქტურებში მკაფიოდ გამოიკვეთება ზონები, რომლებშიც ამინომჟავების ჰიდროფობული რადიკალებია კონცენტრირებული, ხოლო პოლიპეპტიდური ჯაჭვი ფაქტიურად ჰიდროფობულ ბირთვზეა შემოხვეული. ზოგ შემთხვევაში მოლეკულაში გამოიყოფა ამნაირი 2 ან 3 ჰიდროფოფული ბირთვი. მოლეკულების ასეთი ტიპი ბევრი ფერმენტისთვისაა დამახასიათებელი. სწორედ ამან განაპირობა შექმნილიყო ცილის მოლეკულის აგებულების თეორა დომენურ სტრუქტურებზე დაფუძნებით (სურ. 84გ).

დომენში იგულისხმება ცილის მოლეკულის განცალკევებული ნაწილი, რომელსაც ახასიათებს გარკვეული სახის სტრუქტურული და ფუნქციონალური ავტონომია. დომენის არსებობით აიხსნება ცილების მოლეკულებში სხვადასხვა ფუნქციონალური ცენტრების არსებობა – აქტიური, ალოსტერული, ქიმიური მოდოფიკაციის ცენტრის და ა.შ.

**ცილის მეოთხეული სტრუქტურა** – ცილის მაკრომოლეკულის ელემენტების სივრცული ორგანიზება, რომელიც დამახასიათებელია ორი ან მეტი გლობულისაგან შემდგარი რთული ცილებისათვის. გლობულების ერთმანეთთან დაკავება ხდება იონური, ჰიდროფილურ-ჰიდროფობული და ელექტროსტატიკური ურთიერთობებით. უმეტესი ცილისათვის მოლეკულის ორგანიზება შემოიფარგლება მესამეული სტრუქტურით. მაგრამ ზოგი ცილა აგებულია რამდენიმე პოლიპეპტიდური ჯაჭვისაგან, და ყოველ მათგანს ახასიათებს მეორეული და მესამეული სტრუქტურები. ასეთ ცილას **ოლიგომერულს** უწოდებენ, ხოლო პოლიპეპტიდურ ჯაჭვებს მესამეული სტრუქტურის დონის ფორმირების შემდეგ – **სუბერთეულებს** ან **პროტომერებს**. სტრუქტურული ორგანიზების მეოთხეული დონის არსებობისას, ცილა ინარჩუნებს მესამეული სტრუქტურის ძირითად კონფორმაციას (ფიბრილარული ან გლობულარული). მაგალითად, ჰემოგლობინის მოლეკულა (სურ. 84j) – გლობულარული ცილაა, ვინაიდან შედგება ორი α და ორი β პოლიპეპტიდური ჯაჭვებისაგან (ოთხი გლობულისაგან). ყოველი პოლიპეპტიდური ჯაჭვი შემოფარგლავს ჰემის ჯგუფს – არაცილოვან პიგმენტს, რომელიც აძლევს სისხლს წითელ შეფერილობას. ზუსტად რომ ჰემის შემადგენლობაში შედის რკინის კათიონი, რომელსაც გააჩნია ორგანიზმის ფუნქციონირებისათვის აუცილებელი ჟანგბადის მიერთების და ორგანიზმში ტრანსპორტირების უნარი. კერატინები – მესამეული სტრუქტურის მიხედვით ფიბრილები არიან და მთლიანობაშიც ცილა ფიბრილარულია. სუბერთეულების რაოდენობა ცილის მოლეკულაში შეიძლება იყოს 2-დან 16-მდე, უფრო ხშირად – ლუწი რიცხვი (2 და 4), იშვიათად – კენტი რიცხვი. თუ კი ცილის მოლეკულარული მასა 50 ათას დალტონზე მეტია, მაშინ დიდი ალბათობით მას ახასიათებს მეოთხეული სტრუქტურა.

მეოთხეული სტრუქტურა გააჩნია ცილების 5%, მათ შორის ჰემოგლობინს, იმუნოგლობულინებს, ინსულინს, ფერიტინს, თითქმის ყველა DNA- და RNA- პოლიმერაზებს. სუბერთეულებიანი აგებულება ბევრი ფერმენტისთვისაცაა დამახასიათებელი.

ცილის ბიოლოგიური ქმედება ვლინდება მხოლოდ ნაშინ, როდესაც ცილის მოლეკულის სუბერთეულები ერთადაა თავმოყრილი. კონტაქტები სუბერთეულებს შორის ხორციელდება ამინომჟავების პოლარული ჯგუფების ხარჯზე, ვინაიდან მესამეული სტრუქტურის ფორმირებისას, მცირე ზომის ჰიდროფობული რადიკალები მოლეკულის სიღრმეში გადაინაცვლებიან. პოლარული ჯგუფები ჰქმნიან მრავალრიცხოვან იონურ, წყალბადურ, ზოგ შემთხვევაში კი დისულფიდურ ბმებსაც. მეოთხეული სტრუქტურის დარღვევა იწვევს მოცემული ცილის ბიოლოგიური თვისებების დაკარგვას.

მეოთხეული სტრუქტურის მქონე ცილების სუბერთეულები ცალკეულად, რიბოსომებზე იქმნება და მხოლოდ სინთეზის დასრულებისას ჰქმნიან საერთო ზემოლეკულურ სტრუქტურას. ბიოლოგიურ აქტივობას ცილა ღებულობს მხოლოდ მის შემადგენლობაში მყოფი პროტომერების გაერთიანებისას. მეოთხეული სტრუქტურის სტაბილიზაციაში მონაწილეობას ღებულობენ ურთიერთობების იგივე ტიპები, რაც მესამეული სტრუქტურის სტაბილიზაციაში.

უჯრედებში ცილებს შეუძლიათ ერთმანეთის და სხვა მოლეკულების მიერთება, ზემოლეკულური კომპლექსების შექმნით. ცილების და ლიპიდების გაერთიანება წარმოადგენს მემბრანების, ენდოპლაზმური რეტიკულუმის, მიტოქონდრიების საწყისს; ცილების და პოლისახარიდების მიერთება უჯრედების კედლებისთვისაა დამახასიათებელი; რიბოსომები – ცილის და RNA-ს კომპლექსის მაგალითს წარმოადგენს. ამიტომ ზოგიერთი მკვლევარი აღიარებს ცილის სტრუქტურული ორგანიზების მეხუთე დონეს. ეს **მეტაბოლონები** – პოლიფუნქციონალური მაკრომოლეკულარული სხვადასხვა ფერმენტების კომპლექსები, რომლებიც უწყვენ კატალიზს სუბსტრატის გარდაქმნების მთელ ციკლს (უმაღლესი ცხიმოვანი მჟავების სინთეზაზები, პირუვატდეჰიდროგენაზური კომპლექსი, სუნთქვის ციკლი).

გარდა ამისა, ცნობილია ბიოსისტემები, რომელთა პროტომერებს უკვე გააჩნიათ მეოთხეული სტრუქტურა. ამიტომ, ასეთი სისტემების კვლევისას უპრიანი იქნება განიხილოს სტრუქტურული ორგანიზების შემდეგი დონე – **მეხუთეული სტრუქტურა**.

დასასრულს ჩამოვთვალოთ ცილის მოლეკულის სტრუქტურის კვლევების მეთოდები.

ცხრილი 22

სტრუქტურა	ეტაპები და კვლევის მეთოდები
პირველადი	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ამინომჟავების შემადგენლობის დადგენა პოლიპეპტიდურ ჯაჭვში:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1.1. სრული ჰიდროლიზი (ტუტოვანი, მჟავური და ფერმენტული)</li> <li>1.2. ამინომჟავების იდენტიფიკაცია (ამინომჟავების ანალიზატორი, ქრომატოგრაფია, ფერადი რეაქციები)</li> </ol> </li> <li>2. ჯაჭვის ბოლოებში მყოფი ამინომჟავების იდენტიფიკაცია:               <ol style="list-style-type: none"> <li>2.1. N-ბოლოს ამინომჟავის დადგენა (ედმან სენგერის მეთოდი, ამინოპეპტიდაზის გამოყენება).</li> <li>2.2. C-ბოლოს ამინომჟავის დადგენა (ჰიდრაზინული მეთოდი, კარბოქსიპეპტიდაზის გამოყენება).</li> </ol> </li> <li>3. ამინომჟავების თანმიმდევრობის დადგენა ცილის მოლეკულაში:               <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1. ცილის მცირე პეპტიდებზე დაშლა.</li> <li>3.2. ბოლოებში მყოფი ამინომჟავების და პეპტიდებში მათი თანმიმდევრობის დადგენა (სეკვენატორის გამოყენება).</li> <li>3.3. ამინომჟავების თანმიმდევრობის შედარება გადაფარულ პეპტიდებში.</li> </ol> </li> </ol>

მეორეული	სპექტროპოლარიმეტრია, იზოტოპური შენაცვლების მეთოდი, ულტრა- იისფერი სპექტროფოტომეტრია, ინფრაწითელი სპექტროსკოპია.
მესამეული	ელექტრონული მიკროსკოპია, რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი.
მეოთხეული	ელექტრონული მიკროსკოპია, რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი, ელექტროფორეზი.

ამრიგად, ჩვენ განვიხილეთ ცილების მრავალრიცხოვანი ბიოლოგიური ფუნქცია, რომლის გამოც ცილები იკავებენ განსაკუთრებულ ადგილს ცხოველქმედობის პროცესში. თავის მხრივ ცილებისადმი მინიჭებული ფუნქციები, განისაზღვრება ცილის მაკრომო-  
ლეკულის სტრუქტურის თავისებურებით, რომელთა სტრუქტურულ კომპონენტებს წარმოადგენენ პროტეინოგენური (კოდირებული გენეტიკური კოდით) ამინომჟავები. ამინომჟავების ბუნებაზე და ცილის მოლეკულაში ჩართვის თანმიმდევრობაზე, ანუ მის პირველად სტრუქტურაზე (დეტერმინირებულია გენომში ჩადებული ინფორმაციით) დამოკიდებულია ცილის მოლეკულის ორგანიზების ყველა შემდგომი დონე, მათი ბიოლოგიური და ყველა სხვა თვისება.

### **13.4. ფერმენტები – ცილოვანი კატალიზატორები და რეგულატორები.**

ფერმენტები წარმოადგენენ მაღალეფექტურ ცილოვან კატალიზატორებს. ისინი იწვევენ ბიოქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის დაჩქარებას  $10^8 - 10^{14}$  –ჯერ, იგივე რეაქციების ფერმენტების გარეშე მიმდინარეობასთან შედარებით, იგივე პირობებში. ფერ-  
მენტების გლობულარული მოლეკულების მასა იცვლება  $10^4$  დან  $10^7$  დ-მდე. უშუალოდ ბიოქიმიური რეაქციის კატალიზში მონაწილეობს ფერმენტის მოლეკულის შედარებით მცირე ნაწილი, რომელსაც აქტიური ცენტრი ან კატალიზური ცენტრი ეწოდება.

ნებისმიერი ფერმენტული გარდაქმნა იწყება აქტიურ ცენტრთან სუბსტრატის მოლეკულების მიერთებით და მთავრდება მიღებული პროდუქტის და აქტიურ ცენტრს შორის არსებული ბმების გაწყვეტით. ამ ორ მდგომარეობას შორის ფერმენტი იმყოფება ლაბილური ფერმენტ – სუბსტრატული კომპლექსის პირობებში, რაც წარმოადგენს რეაქციის სუბსტრატების და ფერმენტების ლაბილურ, არამგრად ნაერთს.

ჰიპოთეზა ლაბილური ფერმენტ – სუბსტრატული ნაერთის წარმოქმნის შესახებ ფერმენტული რეაქციის მიმდინარეობის პროცესში გამოითქვა 1902 წელს ბრაუნის მიერ. იგი დიდი ხნის განმავლობაში არ დასტურდებოდა ექსპერიმენტალურად. ამის მიზეზი ის იყო, რომ ფერმენტული რეაქციის მიმდინარეობის პროცესში წარმოქმნილი კომპლექსი ძალზე არამდგრადია და რომ მისი კონცენტრაცია უჯრედში ძალზე მცირეა. უნდა ითქვას, რომ სადღეისოდ შუალედური ფერმენტ – ლიგანდური კომპლექსის რამდენიმე ფორმას გამოყოფენ. ასე რომ კარგად შესწავლილი რეაქციების უმეტესობისათვისაც კი შუალედური კომპლექსების რაოდენობა და ურთიერთგარდაქმნის წესი საბოლოოდ არაა დადგენილი. აქტიურ ცენტრში რეაქციის ყველა კომპონენტის განლაგება უზრუნველყო-  
ფილია პოლიპეპტიდური ჯაჭვის გარკვეული სივრცული განლაგებით, ანუ ფერმენტის კონფორმაციით. ამიტომაც იგი უნიკალურია კონკრეტული ფერმენტისათვის. ამავე დროს კონფორმაცია არაა უცვლელი, იგი დამოკიდებულია გარემოს ქიმიურ შემადგენლობაზე და მის ფიზიკურ მდგომარეობაზე. ამ უკანასკნელთა ცვლილება ბუნებრივია გამოიწვევს კონფორმაციის ანუ ატომების და მათი ჯგუფების ურთიერთ-  
განლაგების ცვლილებას. ეს კონფორმაციული ცვლილებები ხშირად აქტიური ცენტრის სტრუქტურის დეფორმაციას იწვევს, რამაც შესაძლებელია გამოიწვიოს არა მხოლოდ

ფერმენტის აქტიურობის, არამედ მისი სხვა თვისებების შეცვლა მორეაგირე ნივთიერებთან მიმართებაში.

ნივთიერებებს, რომლებიც იწვევენ ფერმენტის კატალიზური ცენტრის აქტიურობის ცვლილებას, მოდიფიკატორებს, რეგულატორებს ან მოდულატორებს უწოდებენ. ზოგიერთ მათგანის მაღალი სპეციფიურობის გამო ზოგჯერ ეფექტორებსაც უწოდებენ. მოდიფიკატორები, თუ ისინი ფერმენტის მიერ კატალიზებული რეაქციის უშუალო მონაწილეები არიან, რეაქციის პროცესში არ იხარჯებიან. არსებობენ ორი ტიპის მოდიფიკატორები:

1. ისეთი რომლებიც უკავშირდებიან უშუალოდ აქტიურ ცენტრს – იზოსტერული მოდიფიკატორები
2. ისეთი რომლებიც უკავშირდებიან ფერმენტს აქტიურ ცენტრისგან მოშორებით – ალოსტერული მოდიფიკატორები.

ფერმენტ – სუბსტრატული ურთიერთქმედების კოოპერატიულ ხასიათზე საუბრისას ხაზი უნდა გაესვას იმ გარემოებას, რომ ამ ურთიერთქმედებაში მონაწილე ყველა ბმები – ელექტროსტატუკური, ჰიდროფობული, წყალბადური და ა.შ. თვითონ არიან “კოოპერატიული” იმ გაგებით, რომ ცილის მოცემული ჯგუფის ფუნქციონალური მდგომარეობა დამოკიდებულია მეზობელი ჯგუფების მდგომარეობაზე.

### **13.5. ფერმენტული კატალიზის თერმოდინამიკის ელემენტები.**

ცნობილია, რომ ფერმენტები აჩქარებენ რეაქციებს, ზრდიან სიჩქარის კონსტანტას. მიღებულია, რომ საწყისი კომპონენტები ქმნიან კომპლექსს, რომელიც აქტივირდება და ქმნის გარდამავალ მდგომარეობას. აქტიური კომპლექსის ფორმირებისას ხდება ენტროპიის შემცირება ( $dS < 0$ ), მორეაგირე ნივთიერებათა მოლეკულური ჯგუფების გარკვეული ორიენტირების (დალაგების) გამო საწყისი ქაოსური განლაგებასთან შედარებით.

ფერმენტული რეაქციის დაჩქარება ნიშნავს, რომ მასში აქტივაციის ბარიერი დაბლდება, ანუ  $\Delta G_c < \Delta G_0$  სადაც  $\Delta G_0$  – რეაგენტების საწყისი თავისუფალი ენერგიაა, ხოლო  $\Delta G_c$  – აქტივაციის შედეგად მიღებული კომპლექსის შიდა ენერგია. ეს უნდა ხდებოდეს ენტროპიის აბსოლუტური მნიშვნელობის შემცირების ხარჯზე ( $|S_c| < |S_0|$ ), და აქტივაციის ენტალპიის შემცირებით. ენტროპიული ნაწილის შემცირება ხორციელდება ფერმენტზე სუბსტრატეს ფიქსაციით, რასაც მოსდევს ენტროპიის შემცირება რეაგენტების საწყის განაწილებასთან შედარებით. ენერგიის ცვლილება გარდამავალი (ფერმენტ – სუბსტრატის) კომპლექსის წარმოქმნისას აბსოლუტური მნიშვნელობით არ უნდა იყოს ისეთი დიდი, როგორც თავისუფალი რეაგენტების შემთხვევაში. სუბსტრატის მიერთებისას გამონთავისუფლებული ენერგიის ნაწილი ნაწილობრივ მაინც გაიფანტება სითბოს სახით. ამით მოხდება კომპლექსის წარმოშობით შემცირებული ენტროპიის კომპენსირება და უკურეაქციის მიმდინარეობის ალბათობის შემცირება.

ფერმენტ-სუბსტრატული კომპლექსის ფიქსაციის დროს ადგილი აქვს ორ ძირითად მოვლენას:

1. მცირდება კომპლექსის საკუთარი ენერგია და იზრდება მისი სტაბილურობა.
2. ხდება ახლად წარმოქმნილი კომპლექსის შინაგანი დამაბულობის ზრდა, რაც ხელს უწყობს რეაქციის მიმდინარეობას. თავის მხრივ, ასეთი დამაბულობისათვის საჭირო ენერგია მოედინება ლიგანდის სორბციის პროცესიდან, ცილის ახალი კომფორმაციის სტაბილიზაციის გზით.

გავიხსენოთ, რომ **ლიგანდი** ეს მოლეკულაა, რომელსაც შეუძლია ურთიერთობა გარკვეული სტრუქტურის კომპლემენტარულ უზანთან. მაგალითად ჟანგბადი ჰემოგლობინის ლიგანდია. ფერმენტული რეაქციების შემთხვევაში ლიგანდი წარმოგვიდგება როგორც რეაქციის სუბსტრატი. **სორბცია** (ლათინური სორბეო – შთანთქმა), გარემოდან სხეულის მიერ ნივთიერების შთანთქმაა. შთანთქმავ სხეულს უწოდებენ **სორბენტს**, ხოლო შთანთქმულ ნივთიერებას **სორბეტს**. თუ ნივთიერების შთანთქმა მიმდინარეობს თხიერი სორბენტის მთელ მასით ადგილი აქვს **აბსორბციას**, თუ შთანთქმავს მყარი ან თხიერი სორბენტის ზედაპირი – ადგილი აქვს **ადსორბციას**. ბიოლოგიურ სისტემებში დიდი როლი ეკისრება როგორც გარკვეული ნივთიერებების ადსორბციას უჯრედების და მათი კომპონენტების (ორგანელების) მემბრანებზე ასევე უჯრედების ორგანელებით და ბიოპოლიმერების მოლეკულებით ნივთიერების აბსორბციას. ბიოლოგიური სისტემებისათვის დამახასიათებელია სორბენტების მაღალი სპეციფიურობა, რასაც განაპირობებს სორბენტის მოლეკულის სივრცული კონფიგურაცია. ეს მაკრომოლეკულები წარმოგვიდგებიან როგორც სორბენტების რეცეპტორები. სორბციის მაგალითად შეგვიძლია მოვიყვანოთ ქლოროპლასტების მიერ CO<sub>2</sub> მოლეკულის შებოჭვა ფოტოსინთეზის დროს, ერთტროციტების მიერ ამინომჟავების შებოჭვა მათი ორგანოებთან გადატანისას, ბაკტერიულ უჯრედზე მისთვის სპეციფიური ფაგის მიმაგრება და ა.შ.

### **13.6. მაკრომოლეკულის კვანტური ბიოფიზიკის ელემენტები.**

როგორც ცნობილია, ელემენტების ქიმიური თვისებები მათი გარე ელექტრონული შრის ხასიათით განისაზღვრება. ელექტრონების რაოდენობა გარე ელექტრონულ შრეში განსაზღვრავს პერიოდულ სისტემაში ელემენტის განლაგების ჯგუფს. ელექტრონების ნაწილი შეიძლება შეწყვილებული ან შეუწყვილებული იყოს. მოლეკულების წარმოქმნის დროს ქიმიური კავშირები წარმოიქმნებიან ელექტრონების წყალობით. ელექტრონული ენერჯის გარდა მოლეკულებს გააჩნია რხევითი და ბრუნვითი ენერჯია, რაც საბოლოოდ სითბური ენერჯის სახით გამოვლინდება.

როგორც საბოლოოდ იქნა დადგენილი, სამივე ეს ენერჯია იცვლება დისკრეტულად და არ გააჩნია უწყვეტი სპექტრი. ამავე დროს რხევითი და ელექტრონულ დონეებს შორის განსხვავება ერთნაირი არ არის. ენერჯის შთანთქმის ან გამოსხივების მომენტში მოლეკულა გადადის ახალ ენერგეტიკულ დონეზე. ცხადია, რომ ფოტონის შთანთქმას მხოლოდ მაშინ ექნება ადგილი, თუ მისი ენერჯია მოლეკულების ენერგეტიკულ დონეებს შორის სხვაობას დაემთხვევა.

მაკრომოლეკულების შემთხვევაში, მოლეკულის რხევითი დონეები განისაზღვრება მისი კონფორმაციით. ერთის ცვლილება იწვევს მეორის ცვლილებას და პირიქით. მაკრომოლეკულების ელექტრონული ენერგეტიკულ დონეებს შორის მანძილი უფრო მეტია, ვიდრე რხევით დონეებს შორის. ამიტომ მოლეკულის ახალ ელექტრონულ ენერგეტიკულ დონეზე გადასაყვანად საჭიროა უფრო მაღალი ენერჯის ფოტონები ხილული ან უხილავი დიაპაზონიდან.

აქვე დავძენთ, რომ ელექტრონულ გადასვლებს თან სდევს რხევითი და ბრუნვითი მდგომარეობის შეცვლა. საზოგადოდ, ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ნივთიერებაში გავლის შედეგად ამ გამოსხივების სიხშირე, ინტენსივობა და პოლარიზაცია იცვლება. ძირითადი ცვლილებანი, რომლებსაც განიცდიან ატომებთან და მოლეკულებთან ზემოქმედი ფოტონები ასეთია:

1. **შთანთქმა** – ფოტონის ენერჯია გარდაიქმნება ნაწილაკების კინეტიკურ ენერჯიად (ფოტოეფექტი) ან სითბოდ.

2. რელიეს გაბნევა – ამ დროს გაბნეული ფოტონების ენერგია ტოლია დაცემული გამოსხივების ენერგიისა. რელიეს გაბნევის შედეგია არეკვლა, გარდატეხვა, დიფრაქცია, პოლარიზაციის სიბრტყის ბრუნვა, დეპოლარიზაცია.
3. ფოსფორისცენცია და ფლუორესცენცია – ფოტონების მეორადი გამოსხივება დროის შესაბამისად დიდი ( $10^{-4}$  წმ) ან მცირე ( $10^{-8}$  წმ) შუალედების შემდეგ.
4. კომპტონის გაბნევა და კომპტონის ეფექტი – პირველის დროს გაბნეული ფოტონების ენერგია მცირედ განსხვავდება დაცემული გამოსხივებისაგან, ხოლო მეორე შემთხვევაში, გაბნეული ფოტონის ენერგია ნაკლებია (ტალლის სიგრძე კი მეტი) ვიდრე დაცემული ტალლის ფოტონებისა. უკანასკნელ შემთხვევაში ფოტონის ენერგიის ნაწილი გადაეცემა ნაწილაკებს დრეკადი შეჯახების შედეგად.
5. ელექტრონ-პოზიტრონული წყვილის წარმოქმნა – ხდება შედარებით მაღალი ენერგიის მქონე ფოტონების შემთხვევაში.

ყველა ეს მოვლენა საინტერესოა იმდენად, რამდენადაც სამეცნიერო და მათ შორის სამედიცინო დანიშნულების ხელსაწყოთა მუშაობის ერთ-ერთი ძირითად პრინციპს შეადგენს.

რაც შეეხება იმ ცვლილებებს, რომლებსაც ადგილი აქვს ატომებსა და მოლეკულების ფოტონებთან ურთიერთქმედების შედეგად, ისინი შემდეგია:

1. აღზნება.
2. იონიზაცია.
3. ბირთვული სტრუქტურის შეცვლა (ბირთვული რეაქციები).
4. ქიმიური ბმების გაწყვეტა.

ბიოლოგიური სისტემების მიმართებაში ელექტრომაგნიტური (ხილულ დიაპაზონში) ენერგიის შთანთქმით მიმდინარე პროცესებს ფოტობიოლოგიურ პროცესებს უწოდებენ. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია ფოტოსინთეზი. განსაკუთრებით უნდა ავლნიშნოთ ის ფაქტი, რომ ფოტოსინთეზი არის ერთ-ერთი ბიოლოგიური პროცესი, რომლის დროსაც ხდება მთელი ბიოლოგიური პროცესის თავისუფალი ენერგიის ამალღება. ყველა სხვა პროცესი, როგორც მცენარეებში, ისევე ცხოველებში, მიმდინარეობს ქიმიური ბმების პოტენციალური ენერგიის ხარჯზე, რომლებიც სწორედ ფოტოსინთეზის პროცესში ჩამოყალიბდნენ. საინტერესოა ისიც, რომ ფოტოსინთეზის მაგვარი პროცესები მიმდინარეობდნენ გაცილებით მარტივ სისტემაში, როგორცაა წყლის ნახშირმჟავა აირის ხსნარის ნარევი მეთანსა და ამიაკთან. ამ დროს წარმოიქმნება ამინომჟავებიც კი. საყურადღებოა ისიც, რომ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების (სინათლის) როლი მარტო ენერგეტიკული კი არაა, არამედ ინფორმაციული გავლენითაც ხასიათდება (თუმცა, როგორც ავლნიშნეთ, ეს არცაა გასაკვირვი ენერგიისა და ინფორმაციის იგივეურობის გათვალისწინებით). აქ ვგულისხმობთ როგორც ფოტოტროპიზმს, ასევე ფოტოპერიოდოზმსაც.

ფოტოტროპიზმი წარმოადგენს ტროპიზმის ერთ ერთ ნაირსახეობას და ვლინდება მცენარეების ზრდის მიმართულების შეცვლაში მათი ცალმხრივი განათების დროს. ანსხვავებენ დადებით (მიმართული სინათლის წყაროსაკენ) და უარყოფით (მცენარის გადახრა სინათლის წყაროს საწინააღმდეგო მიმართულებით) ფოტოტროპიზმს. ერთსა და იმავე მცენარეს შეიძლება ორივე ფოტოტროპიზმი გააჩნდეს. ფოტოტროპიზმი, მაგალითად, ხელს უწყობს ფოთლებს თანაბრად განლაგდნენ მცენარის სხეულის გასწვრივ.



ფოტოპერიოდიზმი (ფოტო... და პერიოდი) წარმოადგენს ორგანიზმის რეაქციას სინათლის დღეღამის რიტმზე. ფოტოპერიოდიზმი ახასიათებს როგორც მცენარეებს, ასევე ცხოველებს. ფოტოპერიოდიზმი უთუოდ ბიორიტმებთან არის დაკავშირებული.

### **13.7. მაკრომოლეკულის კონფორმაცია და ენერჯის ტრანსპორტი.**

ცილების ნატივური სამგანზომილებიანი სტრუქტურა ჩამოყალიბდება მთელი რიგი ენერგეტიკული და ინფორმაციული ფაქტორების გავლენით თვითორგანიზაციის პროცესში. ეს უკანასკნელი ყოველთვის მიმდინარეობს ორ ეტაპად: ბიოსინთეზი და თვითაწყობა, რომლებიც ეფუძნებიან მოლეკულურ გამოცნობას სუსტი ურთიერთქმედების ბაზაზე. ნატიური გლობულის მეოთხეული სტრუქტურის თვითაწყობის საკითხი, ან უფრო ფართო გაგებით თვითორგანიზაციის პრობლემა განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს თუნდაც იმ გაგებით, რომ გენეტიკურად კოდირდება მხოლოდ ბიოსინთეზი, ანუ ცილის პირველადი სტრუქტურა. ამავე დროს ფუნქციონალურად აქტიურია მხოლოდ ცილის ნატივური სივრცული სტრუქტურა, რომელიც ყალიბდება თვითორგანიზაციით. ბუნებრივი შერჩევაც სწორედ სივრცული მესამეული და მეოთხეული სტრუქტურის მიხედვით ხდება. რათქმაუნდა ცილის პირველადი სტრუქტურის გენეტიკური განსაზღვრულობა გარკვეულ შესაბამისობაშია საბოლოო მეორეულ სტრუქტურასთან. აქ არ ხდება სივრცული განლაგების სტოქასტიკური, ანუ ალბათური შერჩევა, რათგან ამას დასჭირდებოდა უზარმაზარი დრო, ცილის აწყობა კი ხდება დაახლოებით ერთი წამის განმავლობაში.

სადღეისოდ დადასტურებულია აგრეთვე ცილის სივრცული სტრუქტურის შესაბამისობა მის ფუნქციონალურ აქტივობასთან. აქვე უნდა ითქვას, რომ აღნიშნული შესაბამისობები ხასიათდება გადაგვარებით, ანუ ერთი და იგივე პირველად სტრუქტურას შეიძლება შეესაბამებოდეს სხვადასხვა მეოთხეული სტრუქტურა და პირიქით. ეს გარედან მიღებული ენერჯისა და ინფორმაციის დიდ როლზე მიუთითებს ცილებისა და საერთოდ ცოცხალი სტრუქტურის თვითორგანიზაციის და ფუნქციონირების საკითხში. ამის ნათელ მაგალითად შეიძლება წარმოვაჩინოთ ღეროვანი უჯრედები, რომელთაც არ გააჩნია კონკრეტული ქსოვილებისათვის მახასიათებელი აგებულება და რომელთა თვისებები შეიძლება შეიცვალოს იმის და მიხედვით, თუ ორგანიზმის რა ნაწილში ისინი იმყოფებიან. ანუ მათში არსებული ელემენტების კონფიგურაცია დამოკიდებულია იმ არაგენეტიკურ ინფორმაციაზე, რომელიც შემოვა სისტემაში გარემოდან, შესაძლოა სპეციფიური გამოსხივების (ბიოველების) გზით.

მიუხედავად რთული სამგანზომილებიანი სივრცული სტრუქტურისა ფუნქციონირების პროცესში, ცილებს შესწევთ უნარი განიცადონ სწრაფი ( $10^{-2} - 10^{-3}$  წმ. რიგის) შიდამოლეკულური გარდაქმნები. ცხადია, ასე მცირე დროში ცილის მთელი მოლეკულა კონფორმაციულად ვერ შეიცვლება, მაგრამ მოხდება მიკროკონფორმაციების ინტეგრალური ცვლილება, რაც საბოლოოდ მაკრომოლეკულების მთლიან კონფორმაციულ ცვლილებაში გამოიხატება. მაკრომოლეკულების შინაგანი ძვრადობის შესწავლა მხოლოდ ბოლო წლებში გახდა შესაძლებელი. ამისათვის გამოიყენება ფიოფიზიკური მეთოდების მთელი რიგი: იზოტოპური მიმოცვლის მეთოდი, ლუმინესცენტური მეთოდი, სპინური ნიშნულების, ბირთვული, მაგნიტური რეზონანსის,  $\gamma$ - რეზონანსული სპექტროსკოპიის, მიკროკალორიმეტრიის, ელექტრონული მიკროსკოპიის და სხვა მეთოდები. სადღეისოდ ყველა ამ მეთოდის გამოყენებით დადგენილია და შესწავლილია კონფორმაციული ცვლილებები მთელ რიგ ცილებში როგორც ნატიურ, ნორმალურ პირობებში, ასევე რიგი პათოლოგიური ცვლილებების დროსაც. ნაჩვენებია, რომ როგორც წესი, პათოლოგიური ცვლილებები აღინიშნება ცილის კონფორმაციაშიც. პათოლოგიის

ხარისხიდან დამოკიდებულებით ეს ცვლილებები ატარებენ შექცევად ან შეუქცევად ხასიათს. უფრო ხშირად ადგილი აქვს ცილის ენერგეტიკული სტრუქტურის ისეთ ცვლილებებს, რომ სისტემის შინაგანი ენერგია მცირდება. ეს თავისთავად არცაა გასაკვირვი, რათგან პათოლოგიური პროცესი უნდა განვიხილოთ როგორც ნორმალურ პირობებში დინამიურ წონასწორობაში მყოფი ბიოსტრუქტურების ალტერნატიული ცვლილების, ანუ რღვევის პროცესი, რაც იწვევს სისტემაში ენტროპიის ზრდას და მისი თვითორგანიზაციის უნარის დაქვეითებას.

მაკრომოლეკულებში კონფორმაციულ გადასვლებზე საუბრისას, შეუძლებელია არ გამოვყოთ ენერგიის მიგრაციის საკითხი.

*ენერგიის მიგრაციას უწოდებენ ენერგიის გადატანას მოლეკულის გასწვრივ და მოლეკულებს შორის ატომურთან შედარებით უფრო დიდ მანძილებზე, ისე რომ არ ხდება ენერგიის გადაცემა გამოსხივების გზით და მისი კარგვა სითბოს სახით.*

ენერგიის მიგრაციის სამ სახეს (ტიპს) განიხილავენ:

1. ენერგიის შთანთქვისას ელექტრონი ძირითადი ენერგეტიკული დონიდან გადადის უფრო მაღალ, ე.წ. აღზნებულ დონეზე. ამ ელექტრონების ორბიტებზე მოძრაობისას იქმნება ცვლადი ელექტრომაგნიტური ველი. ველის რხევის სიხშირე განისაზღვრება აღზნებული ელექტრონის ენერგეტიკული დონით, როცა აღზნებული მოლეკულის (ან მაკრომოლეკულის სუბერთეულის) მახლობლად აღმოჩნდება ისეთი მოლეკულა, რომელსაც გააჩნია აღზნებული მოლეკულის ენერგეტიკული დონის შესაბამისი ენერგეტიკული დონე, ადგილი ექნება რეზონანსს. ე.ი. აუგზნებელი მოლეკულა აღეგზნება, ხოლო აღზნებული გადადის არააღზნებულ მდგომარეობაში. ანუ ენერგია მთლიანად გადადის ახალ უბანზე ან ახალ მოლეკულაზე. ყოველივე ეს ცნობილია როგორც *ენერგიის გადაცემის რეზონანსული სახე*. ენერგიის გადაცემის ეს ტიპი ცილებისთვის მთავარი არ არის. მასზე მოდის ენერგიის მიგრაციის მხოლოდ 30 – 40%.
2. უფრო გავრცელებულია ენერგიის მიგრაციის ე.წ. *ექსიტონური ტიპი*. ამ დროს ელექტრონი გადაადგილდება რა ერთი მოლეკულიდან მეორეში, წარმოიშობა ე.წ. ელექტრონული “ხვრელი”, რომელიც ასევე გადაადგილდება. ასეთ ელექტრონულ-ხვრელურ წყვილს უწოდებენ ექსიტონს. ექსიტონური მიგრაციით ენერგია უფრო დიდ მანძილზე გადაეცემა ვიდრე რეზონანსური მიგრაციით.
3. არსებობს ენერგიის მიგრაციის ე.წ. *სოლიტონური თეორია*, რომლის მიხედვითაც ენერგიის გადაცემა ხდება მდგრადი ელექტრომაგნიტური ტალღის სოლიტონის საშუალებით.

## 14. რთული მაკრომოლეკულების ორგანიზება

### 14.1. მეოთხეული და დომენური სტრუქტურა

როგორც უკვე აღინიშნა, ცილებში მეოთხეული სტრუქტურის არსებობის შემთხვევაში, მათი სუბერთეულების ორგანიზება უფრო რთულ წარმონაქმნებში თვითაწყობის შედეგია. ერთნაირი ელემენტები, რომლებისგანაც შეიძლება აიწყოს მთელი სტრუქტურა, შეიძლება შეიცავდეს ერთზე მეტ სუბერთეულს. ამასთან დაკავშირებით ზოგჯერ გამოიყენება ტერმინი – პროტომერი – მინიმალური ზომის მოლეკულის ნაწილი, რომელსაც ასეთივე ნაწილების მთელ რიცხვთან შეერთებისას, შეუძლია სტრუქტურის ფორმირება. თვითაწყობის უმარტივესი გზა – ესაა ერთნაირი ან მსგავსი სუბერთეულების ისეთნაირი ჩალაგება, რომ მოხდეს მათ შორის წარმოქმნილი ერთი და იგივე ტიპის კონტაქტების გამეორება. ყოველი ასეთი სტრუქტურული ერთეული მეზობლებთან უნდა იყოს დაკავშირებული ერთი საერთო წესით, რის გამოც ნაწილაკი იმყოფება ერთნაირ, ან „ეკვივალენტურ“ გარემოცვაში. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, თვითაწყობის შედეგად წარმოქმნილი სტრუქტურა აუცილებრივ უნდა იყოს სიმეტრიული. ეს მოსაზრება დადასტურდა მრავალრიცხოვან ექსპერიმენტებში, თუმცა გვხვდება გადახრები ჭეშმარიტი სიმეტრიისგან.

მეოთხეული სტრუქტურის მქონე ობიექტებს შეიძლება მივაკუთვნოთ ბიოლოგიური მაკრომოლეკულების ფართო სპექტრი. ასე, მაგალითად, ფერმენტები, ცილები-გადამტანები, მცირე ზომის სფერული ვირუსების ცილოვანი გარსები, წარმოადგენენ კომპაქტურ იზომეტრიულ ნაწილაკებს. ისინი ხასიათდებიან სიმეტრიის ე.წ. წერტილოვანი ჯგუფით, რომლისათვისაც ტიპიურია ბრუნვითი სიმეტრიის ღერძები. ბიოლოგიური მაკრომოლეკულებისათვის შესაძლოა წერტილოვანი ჯგუფების სამი ტიპი:

1. ციკლური სიმეტრია. არსებობს ერთი  $N$  რიგის ბრუნვითი ღერძი და შესაბამისად  $N$  სუბერთეული.
2. ტრაპეცოედრიული სიმეტრია. არსებობს ერთი  $N$  რიგის ბრუნვითი ღერძი და მისი პერპენდიკულარული მე-2-ე რიგის ღერძები.
3. სიმეტრიის კუბური ჯგუფი. ეს წერტილოვანი ჯგუფი ხასიათდება იმით, რომ გააჩნია ერთზე მეტი მე-2-ეზე მაღალი რიგის ღერძი. ასეთი სიმეტრიის მქონე გეომეტრიული ფიგურების მაგალითებათ მოვიყვანოთ ტეტრაედრი (წერტილოვანი ჯგუფი 32), კუბი (წერტილოვანი ჯგუფი 432), იკოსაედრი (წერტილოვანი ჯგუფი 532).

ცილოვანი სუბერთეულების ზოგი სხვა ასოციატი, ასეთი, მაგალითად, როგორიცაა მიკრომილაკები, ჩხირისებრივი და ძაფისებრივი ვირუსები, აქტინის ძაფები, ხასიათდებიან სპირალური სიმეტრიით. სპირალური სიმეტრიის მატარებელი სტრუქტურები შეიცავენ ხრახნისებრივ გადატანას  $S_M$ , რომელიც შედგება  $\alpha = 2\pi q / p$  კუთხეზე შებრუნებისაგან, ამავედროული  $\Delta = c/p$  გადატანით სპირალის ღერძის გასწვრივ. აქ,  $c$  – სპირალის პერიოდია,  $p$  – სპირალში ჩალაგებული ერთეულების მინიმალური მთელი რიცხვი, რომელიც მოდის ამ სპირალის  $q$  ხვიაზე. სპირალური სტრუქტურები შეიძლება შეიცავდნენ მთავარი ღერძის გასწვრივ განლაგებულ  $N$  რიგის ბრუნვის ღერძებს.  $N$ -ის მნიშვნელობა განსაზღვრავს სპირალის შემავლიანობას. პარამეტრები  $p, q, c$  და  $N$  იძლევა სპირალური სტრუქტურის სრულ აღწერას.

ბევრი დიდი ზომის, ერთი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისაგან შემდგარი ცილის მოლეკულა შეიძლება, მიუხედავად ამისა, შედგებოდეს რამდენიმე განცალკევებული ნაწილისაგან, ანუ დომენებისაგან. ასეთი დომენების წარმოქმნა შეიძლება შემდეგნაირად აიხსნას: ერთიანი პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ცალკეული ნაწილები შეიძლება დამოუკი-

დებლად ჩაიხვიონ თავიანთი ჰიდროფობული ბირთვის გარშემო, შემდეგ კი გაერთიანდნენ, და ამით დაასრულონ ერთიანი გლობულარული სტრუქტურის შექმნა. ზოგჯერ ორი დომენისაგან შემდგარ სტრუქტურებს „ბინუკლეალურს“ უწოდებენ. ამ სტრუქტურებს მიეკუთვნებათ: ლაკტატდეგიდროგენაზა, მალატდეგიდროგენაზა, პაპაინი, თერმოლიზინი და ხიმოტრიფსინი. ბინუკლეალურ სტრუქტურებს შეიძლება ჰქონდეთ მეორე რიგის ღერძები (ან ფსევდოღერძები), რომლებიც აერთიანებენ დომენებს.

თანამედროვე მონაცემებით ცილის დომენი მისი მესამეული სტრუქტურის ელემენტია, რომელიც წარმოადგენს ცილის საკმაოდ სტაბილურ და დამოუკიდებელ ქვესტრუქტურას, რომლის ფოლდინგი წარმართება დანარჩენი ნაწილებისაგან დამოუკიდებლად. ჩვეულებრივ დომენის შემადგენლობაში შედის მეორადი სტრუქტურის რამდენიმე ელემენტი. სტრუქტურით მსგავსი დომენები გვხვდება არა მხოლოდ მონათესავე (მაგალითად, სხვადასხვა ცხოველების ჰემოგლობინში), არამედ სრულიად განსხვავებულ ცილებშიც. თუ პოლიპეპტიდური ჯაჭვი 200-ზე მეტ ამინომჟავას შეიცავს, მაშინ, როგორც წესი, მისი სივრცული სტრუქტურა ფორმირდება ორი ან მეტი დომენის მეშვეობით. შეიძლება ითქვას, რომ დომენი წარმოადგენს პოლიპეპტიდური ჯაჭვის მონაკვეთს, რომელმაც სივრცული სტრუქტურის ფორმირების პროცესში შეიძინა იმავე ჯაჭვის სხვა მონაკვეთებისგან დამოუკიდებლად, გლობულარული ცილის კონფორმაცია.

საკმაოდ ხშირად დომენებს განსხვავებულ სახელებს მიაკუთვნებენ, ვინაიდან მათი ყოფნა უშუალოდ გავლენას ახდენს ცილის ბიოლოგიური ფუნქციის შესრულებაზე – მაგალითად, კალმადულინის  $Ca^{2+}$ -შემკვრავი დომენი – გომეოდომენი – პასუხობს DNA-სთან შეკვრას ტრანსკრიპციის სხვადასვა ფაქტორებში და სხვა.

ვინაიდან დომენები საკმაოდ „ავტონომიურია“ თავის სტრუქტურის ფორმირებისას და ფუნქციის შესრულებისას, გენური ინჟინერიის მეთოდებით შეიძლება რომელიმე ცილას „მივაკეროთ“ სხვა ცილის დომენი (ამრიგად შეიქმნება ცილა-ქიმერა). ასეთ ქიმერას, წარმატების შემთხვევაში, ორივე ცილის ფუნქციის შეთავსება შეეძლება.

ამასთან ცნობილია შემთხვევები, როდესაც ცილის გლობულარული ფორმირდება რამოდენიმე დომენის შემცავი ერთიანი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისაგან. უკვე ამის შემდეგ ხდება ჯაჭვის გახლეჩა დომენების მიერთების ადგილებზე, რითიც წარმოიქმნება არაკოვალენტურად დაკავშირებული სუბერთეულები, ანუ მეოთხეული სტრუქტურა.

## 14.2. გლობულარული ცილები.

მეოთხეული სტრუქტურის მქონე ცილების უმეტესი ნაწილი შედგება ორი ან ოთხი სუბერთეულისაგან. თანაც სტრუქტურების ფორმირება შეიძლება როგორც იდენტური, აგრეთვე არაიდენტური სუბერთეულებისაგან. დავძენთ, რომ არაერთნაირი სუბერთეულების მქონე ცილებში აღინიშნება სუბერთეულების სხვადასხვა შეერთებები. მაგალითად, RNA-პოლიმერაზა (მოლ. მასა 486 კდალ)  $\sigma$ -ფაქტორის გარეშე შედგება ხუთი სუბერთეულისაგან (მათ შორის ორი  $\alpha$  სუბერთეული):  $\alpha_2\beta\beta'\omega$ .

განვიხილოთ რამდენიმე კონკრეტული მაგალითი, განვალაგოთ ცილები შესაძლებლობისდაგვარად მათი მეოთხეული სტრუქტურის გართულების მიხედვით, და დავაჯგუფოთ ისინი სუბერთეულების რაოდენობის მიხედვით: დიმერებში, ტრიმერებში, ტეტრამერებში, პენტამერებში და გეკსამერებში.

### დიმერები.

**ინსულინი** გარკვეული კონცენტრაციების პირობებში წარმოადგენს დიმერს. ის ორი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისაგან შედგება. ჯაჭვი A შეიცავს 21 ამინომჟავის ნაშტს, ხოლო B ჯაჭვი – 30. ორივე ჯაჭვი მიერთებულია ერთმანეთზე დისულფიდური ბმებით. ინსუ-

ლინი შეიძლება არსებობდეს რამდენიმე ფორმით: მონომერი, დიმერი და გეკსამერი. ინსულინის გეკსამერული სტრუქტურა სტაბილიზირდება ცინკის იონებით, რომელიც კავდება მე10-ე პოზიციაში მყოფი ჰისტიდინის ნაშტებით ექვსივე სუბერთეულის ჯაჭვებში. შექმნილ გეკსამერში მე 3-მე რიგის ღერძი მე 2-რე რიგის ღერძების პერპენდიკულარულია, და გეკსამერი წარმოგვიდგება მე 3-მე რიგის ღერძის გასწვრივ ცქერისას (იხ. სურ. 84j). ეს უკვე ტრაპეცოედრიული 32 სიმეტრიაა. ცინკის ორი მოლეკულა ცენტრალურ ღრუში იმყოფება. ამასთან დაკავშირებით შეიძლება აღინიშნოს, რომ არსებობენ ბევრი დიმერებისაგან აგებული ცილები, რომლებიც აგრეგირებენ ტეტრამერებში, გეკსამერებში და ა.შ.

**ფოსფორილაზა** აქტიურია მხოლოდ დიმერის სახით და არსებობს ორ ერთმანეთში გარდაქმნის შესაძლებლობის მქონე A და B ფორმაში. ფოსფორილაზის ძირითადი რეგულაცია ხორციელდება ფერმენტებით – კინაზით და ფოსფოტაზით, რომლებიც არააქტიურ B ფორმას გადააქცევენ აქტიურ A ფორმაში სერინი 14-ის ფოსფორილირების და შემდგომი დეფოსფორილირების მეშვეობით. ცნობილია ფოსფორილაზის არააქტიური ტეტრამერული ფორმები. დაბალმოლეკულური ცილის პროტამინის თანხლებით, ფოსფორილაზის ტეტრამერებს შეუძლიათ მოლეკულათა ფენების და მილოვანი კრისტალების ფორმირება, რომელთა გაფილტრულ გამოსახულებებზე შეიძლება მოლეკულის სხვადასხვა პროექციის ნახვა. ელექტრონულ მიკროსკოპიულმა კვლევებმა გამოავლინა ტეტრამერული ფორმის სიმეტრია. მისი განხილვა შეიძლება როგორც ორი დიმერის გაერთიანება. ამასთან სუბერთეულები აღმოჩნდებიან განლაგებული გაწელილი ტეტრაედრის წვეროებში სიმეტრიით 222.

### ტრიმერები.

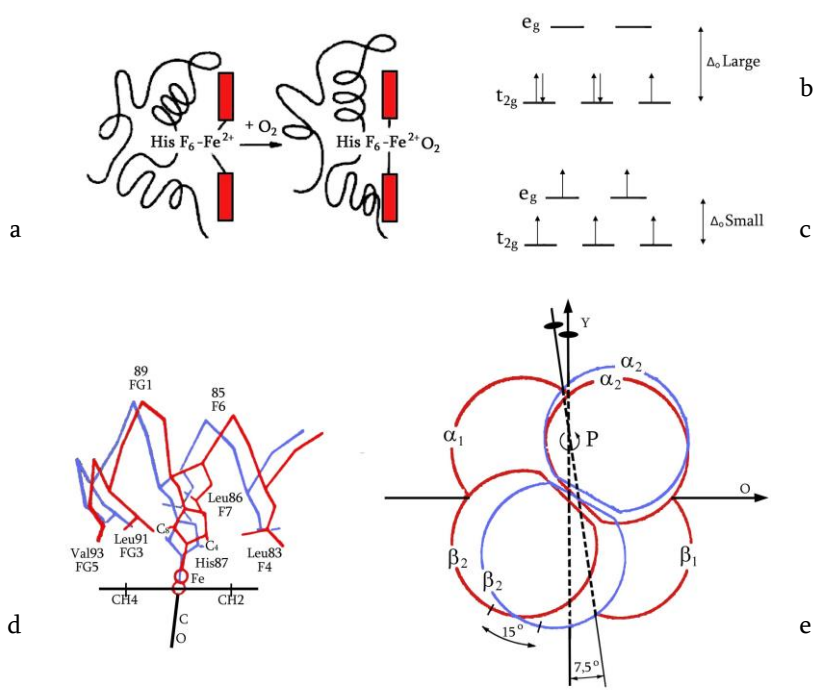
კეტოდეზოქსიფოსფოგლუკონატ ალდოლაზის (მოლ. მასა 70 კდალ) რენტგენოსტრუქტურულმა ანალიზმა ( $3,5 \text{ \AA}$  გარჩევით) უჩვენა, რომ იგი წარმოადგენს ტრიმერს. მოლეკულა ხასიათდება სუბერთეულების ჰეტეროლოგიური (სხვა, არაბუნებრივი) შეერთებით. იმის გამო, რომ ტრიმერების რაოდენობა მცირეა და ისინი დანამდვილებით მოგვიანებით იყო გამოვლენილი, საკმაოდ დიდ ხანს ვარაუდობდნენ, რომ სუბერთეულები, რომლებიც უშვებენ კენტი ღერძების არსებობას, არასიცოცხლეუნარიანია ევოლუციის პროცესში.

### ტეტრამერები.

ფოსფორილაზის მაგალითზე ჩვენ უკვე გავეცანით ტეტრამერს, რომელშიც სუბერთეულები განლაგდებიან ტეტრაედრის წვეროებში სიმეტრიით 222. ტეტრამერული სტრუქტურა სიმეტრიით 222 გააჩნია ასევე **კატალაზას** და **გლუკოზოოქსიდაზას**. კატალაზის მეოთხეული სტრუქტურა დაადგინეს მილაკოვანი კრისტალების კვლევისას ოპტიკური ფილტრაციის მეთოდის გამოყენებით, და აგრეთვე სამგანზომილებიანი კრისტალების ელექტრონული მიკროფოტოსურათების კვლევისას სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მეთოდის გამოყენებით. ასევე არსებობს მაღალი გარჩევითუნარიანი რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის მონაცემები. გლუკოზოოქსიდაზა რიგით მესამე ფერმენტია, რომლისთვისაც იყო მიღებული მილაკოვანი კრისტალები.

ყველაზე კარგად ყველა მხრივ გამოკვლეული ტეტრამერი რა თქმა უნდა **ჰემოგლობინია**. როგორც ცნობილია, ჰემოგლობინის მოლეკულა შედგება ორი  $\alpha$  და ორი  $\beta$  სუბერთეულისაგან (სურ. 84j). ყოველ მათგანს გააჩნია მიოგლობინთან მიახლოებული სამგანზომილებიანი სტრუქტურა. სუბერთეულები განლაგებულია დაახლოებით ტეტრაედრის წვეროებში. მოლეკულას გააჩნია ერთი ჭეშმარიტი მე 2-ე რიგის ღერძი,

რომელიც აერთიანებს  $\alpha_1\beta_1$  და  $\alpha_2\beta_2$  წყვილებს და კიდევ ორი ფსევდოდერმი. ჰემოგლობინი, ალბათ თავისი განსაკუთრებული პოპულარობის გამო, ერთადერთი ცილაა რომლისთვისაც დეტალურად არის გაანალიზირებული მისი კოოპერატიულობის მექანიზმი. ამასთან ერთად, შეიძლება აღინიშნოს, რომ ამ მიმართულების კვლევები საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს სხვა ცილებთან მიმართებაშიც. პირველყოვლისა ესენი არიან ასპარტატკარბოქსილაზა და ზოგიერთი დეჰიდროგენაზა.



სურ. 85. ჰემოგლობინის კოოპერატიული ურთიერთობის მექანიზმი. (a) გემის სიბრტყეში რკინის ატომის შეტაცება მასთან დაკავშირებულ ჰისტიდინთან ერთად, და როგორც შედეგი პროტომერის კონფორმაციის შეცვლა. (b) d-ელექტრონების განაწილება  $[Fe(NO_2)_6]^{3-}$  დაბალსპინურ კომპლექსში. (c) d-ელექტრონების განაწილება  $[FeBr_6]^{3-}$  მაღალსპინურ კომპლექსში. (d) სპირალის პოზიცია გემის მიმართ ჰემოგლობინის დიოქსი (წითელი ხაზი) და კარბომონოქსი (ლურჯი ხაზი) სუბერთეულში. (e) სქემატური დიაგრამა, რომელიც ილუსტრირებს  $\alpha_2\beta_2$  დიმერის ბრუნვას  $\alpha_1\beta_1$  მიმართ (საწყისი მდგომარეობა – წითელი ხაზი, ხოლო მოტრიალების შემდეგ – ლურჯი)

ვინაიდან, ჩვენ გვინტერესებს ცილოვანი მაკრომოლეკულების მეოთხეული სტრუქტურის ფუნქციონალურობა, უპრიანი იქნება განვიხილოთ პერუტცის თეორია ჰემოგლობინში კოოპერატიული ურთიერთობის შესახებ. ჰემოგლობინის ოლიგომერული სტრუქტურა უზრუნველყოფს მის ჟანგბადით სწრაფ გაჯერებას ფილტვებში და გადაყვანას ოქსიჰემოგლობინის ფორმაში. ამ ფენომენის ახსნა შეიძლება იმით, რომ ფილტვებში რკინის ატომზე პირველი ჟანგბადის ატომის მიერთებისას (მე 6-ე კოორდინაციული კავშირის<sup>85</sup> ხარჯზე), რკინის ატომი შეიტაცება ჰემის ღრუში, ჟანგბადი რჩება ღრუს ფარგლებს გარეთ (სურ. 85a). ეს იწვევს ცილის პოლიპეპტიდური ჯაჭვის მონაკვეთის გადაადგილებას და პირველი პროტომერის კონფორმაციის ცვლილებას. ასეთი შეცვლილი პროტომერი სხვა სუბერთეულებზეც მოქმედებს და უადვილებს მეორე სუბერთეულს ჟანგბადის ატომის მიერთებას. ეს კი ცვლის მეორე სუბერთეულის კონფორმაციას და უადვილებს ჟანგბადის შემდგომი ატომების მიერთებას და სხვა პროტომერების ცვლილებას.  $O_2$ -ის მეოთხე მოლეკულა 300 ჯერ უფრო ადვილად უერთდება ჰემს, ვიდრე პირველი. ოლიგომერული ცილის პროტომერების ურთიერთგავ-

<sup>85</sup> რკინას, ჰემში, ექვსი კოორდინაციული კავშირი გააჩნია. ოთხი მათგანი – ესაა კავშირები პორფირინის რგოლის აზოტის ატომთან – ჰემის სიბრტყეში იმყოფება. დარჩენილი მე 5-ე და მე 6-ე კავშირები აქსიალურად არიან განლაგებული, ანუ ჰემის სიბრტყის პერპენდიკულარულად. ჰემშემცავი ცილებისათვის ისინი, როგორც წესი, დაკავებულია პოლიპეპტიდური ჯაჭვის ამინომჟავების ნაშტების იმიდაზოლური ჯგუფების აზოტის ატომებით. ცილები, რომლებშიც ჰემის რკინის მე 6-ე კოორდინაციული კავშირი თავისუფალია (მაგალითად, ჰემოგლობინი, მიოგლობინი, პეროქსიდაზები) რეაგირებენ  $NO$ -თან უფრო სწრაფად, ვიდრე ცილები, რომლებშიც ყველა კოორდინაციული კავშირი შევსებულია (მაგალითად, ციტოქრომი c), რადგან უკანასკნელებს ესაჭიროებათ დამატებითი ენერგია მე 6-ე ლიგანდის განდევნისათვის.

ლენას კოოპერატიული ურთიერთობა ეწოდება. ფილტვებში ჰემოგლობინის სუბერთეულების ასეთი ურთიერთობა ამაღლებს ჰემოგლობინის ჟანგბადთან შეთვისებადობას და აჩქარებს მის მიერთებას 300 ჯერ. ქსოვილებში წარიმართება უკუ პროცესი – შეთვისებადობა მცირდება და ჟანგბადის გაცემის აჩქარება ასევე 300-ჯერადია.

მოცემული საკითხის უფრო დეტალური განხილვისათვის ჩვენ დაგვჭირდება გარკვეული ცნობები კვანტური ქიმიიდან. პირველყოვლისა განვიხილოთ თუ რა არის გარდამავალი ელემენტები, ჩამოვაყალიბებთ ხუნდის წესს და მივმართავთ კრისტალური ველის თეორიას (კვთ).

გარდამავალი მეტალები (გარდამავალი ელემენტები) — ქიმიური ელემენტების პერიოდული სისტემის თანამდევი ქვეჯგუფების ელემენტები, რომელთა ატომებში ვლინდება ელექტრონები  $d$ - და  $f$ -ორბიტალებზე. საერთო სახით გარდამავალი ელემენტების ელექტრონული აგებულება შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგნაირად:  $(n-1)d^x ns^y$ .  $ns$ -ორბიტალზე ერთი ან ორი ელექტრონი იმყოფება, დანარჩენი ვალენტური ელექტრონები იმყოფებიან  $(n-1)d$ -ორბიტალზე. ვინაიდან ვალენტური ელექტრონების რაოდენობა მნიშვნელოვნად ნაკლებია ორბიტალების რიცხვზე, ამიტომ გარდამავალი ელემენტებისაგან ფორმირებული მარტივი ნივთიერებები წარმოადგენენ მეტალებს.

ხუნდის წესი — კვანტურ ქიმიის წესი, რომელიც განსაზღვრავს ქვედონის გარკვეული ორბიტალების შევსების თანმიმდევრობას და შემდეგნაირად ფორმულირდება: მოცემული ქვედონის ელექტრონების სპინური კვანტური რიცხვის ჯამური მნიშვნელობა უნდა იყოს მაქსიმალური. ეს წესი შეიმუშავა ფრიდრიხ ხუნდმა 1925 წ.

ეს კი ნიშნავს, რომ ქვედონის ყოველ ორბიტალში ჯერ ხდება ერთი ელექტრონით შევსება და მხოლოდ შეუვსებელი ორბიტალების გამოლევისას, ამ ორბიტალზე ემატება მეორე ელექტრონი. ამასთან ერთ ორბიტალზე იმყოფება ნახევრადმთელი სპინის ორი ელექტრონი საწინააღმდეგო ნიშნებით, რომლებიც დაწყვილებისას ჰქმნიან ორელექტრონულ ღრუბელს. შედეგად ორბიტალის ჯამური სპინი ნულის ტოლი იქნება.

კვთ-ს თანახმად, ურთიერთობა გარდამავალ მეტალსა და ლიგანდებს შორის წარმოიქმნება მეტალის დადებითად დამუხტული კათიონის და ლიგანდის<sup>86</sup> არაგამაერთიანებელ ორბიტალებზე მყოფი ელექტრონების უარყოფითი მუხტის მიზიდვის შედეგად. თეორია განიხილავს ენერჯის ცვლილებას ხუთი გადაგვარებული<sup>87</sup>  $d$ -ორბიტალებისათვის ლიგანდების წერტილოვანი მუხტების გარემოცვაში. მეტალის იონთან ლიგანდის მიახლოებისას, ლიგანდის ელექტრონები ზოგ  $d$ -ორბიტალებთან უფრო ახლოს აღმოჩნდებიან ვიდრე სხვებთან, რაც იწვევს გარდამავალ მეტალებში გადაგვარებულობის დაკარგვას.  $d$ -ორბიტალების და ლიგანდების ელექტრონები განიზიდებიან როგორც ერთი ნიშნის მქონე მუხტები. ამრიგად, იმ  $d$ -ელექტრონების ენერჯია, რომლებიც ლიგანდთან უფრო ახლოს იმყოფება უფრო მეტია, ვიდრე შორს მყოფი ელექტრონებისათვის, ამას კი მიყვება  $d$ -ორბიტალების ენერგეტიკული დონეების გახლეჩა.

ენერგეტიკული დონეების გახლეჩაზე მოქმედებენ შემდეგი ფაქტორები:

- მეტალის იონის ბუნება.

<sup>86</sup> ლიგანდი (ლათ. *ligare* – გაერთიანება) — რაიმე ცენტრთან (აკცეპტორთან) დაკავშირებული ატომი, იონი ან მოლეკულა. ეს ცნება გამოიყენება ბიოქიმიაში იმ აგენტების აღსანიშნავათ, რომლებიც ბიოლოგიურ აკცეპტორებს უერთდებიან. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, ეს არის ყველაფერია რაც კი შეიძლება მიუერთდეს განსახილავ სისტემას.

<sup>87</sup> თუ ატომის რამდენიმე ორბიტალი შეესაბამება ერთსა და იგივე ენერჯიას, ისინი გადაგვარებულია.  $s$  ქვედონისათვის გადაგვარების ჯერადობა 1-ის ტოლია,  $p$  – 3,  $d$  – 5,  $f$  – 7.

- მეტალის ჟანგვის ხარისხი. რაც მეტია ჟანგვის ხარისხი, მით მეტია გახლეჩის ენერგია.
- ლიგანდების განლაგება მეტალის იონის გარშემო.
- მეტალის იონის გარშემო მყოფი ლიგანდების ბუნება. რაც უფრო ძლიერია ლიგანდით გამოწვეული ეფექტი, მით მეტია სხვაობა მაღალი და დაბალი ენერგიების დონეებს შორის.

ლიგანდების კოორდინაციის ყველაზე გავრცელებული სახეობა — ოქტაედრიულია, რომლისას ექვსი ლიგანდი ჰქმნის ოქტაედრიული სიმეტრიის მქონე კრისტალურ ველს მეტალის იონის გარშემო. გარე შრეზე ერთი ელექტრონის მქონე მეტალის იონის ოქტაედრიული გარშემორტყმისას, *d*-ორბიტალები ორ ჯგუფად იყოფა ენერგეტიკული დონეების სხვაობით  $\Delta_{\text{ოქტ}}$  (გახლეჩის ენერგია), ამასთან ენერგია  $d_{xy}, d_{xz}$  და  $d_{yz}$  ორბიტალებზე იქნება უფრო დაბალი ვიდრე  $d_{z^2}$  და  $d_{x^2-y^2}$ , ვინაიდან პირველი ჯგუფის ორბიტალები ლიგანდებისგან უფრო შორს იმყოფებიან და ნაკლებად განიზიდებიან. დაბალი ენერგიის მქონე სამი ორბიტალი აღინიშნება როგორც  $t_{2g}$ , ხოლო მაღალი — როგორც  $e_g$  (იხ. სურ. 85b,c).

შემდეგი თავისი გავრცელებულობით *ტეტრაედრიული* კომპლექსებია, რომლებშიც ოთხი ლიგანდი ჰქმნის ტეტრაედრს მეტალის იონის ირგვლივ. ამ შემთხვევაში *d*-ორბიტალები ასევე ორ ჯგუფად იყოფა ენერგეტიკული დონეების  $\Delta_{\text{ტეტ}}$  სხვაობით. ოქტაედრიული კოორდინაციისაგან განსხვავებით, დაბალი ენერგიები ექნება  $d_{z^2}$  და  $d_{x^2-y^2}$  ორბიტალებს, ხოლო მაღალი —  $d_{xy}, d_{xz}$  და  $d_{yz}$  ორბიტალებს. გარდა ამისა, ვინაიდან ლიგანდების ელექტრონები არ იმყოფებიან უშუალოდ *d*-ორბიტალის მიმართულებით, მათი გახლეჩის ენერგია იქნება უფრო დაბალი ვიდრე ოქტაედრიული კოორდინაციის შემთხვევაში. აგრეთვე, *კვთ*-ს მეშვეობით შეიძლება იყოს ახსნილი როგორც ბრტყელკვადრატული, აგრეთვე კომპლექსების სხვა გეომეტრიებიც.

*d*-ზე აგრეთვე მოქმედებს მეტალის ჟანგვის ხარისხი. უფრო მაღალი ჟანგვის ხარისხის მქონე მეტალი, უფრო ახლოს მიიზიდავს ლიგანდებს მუხტების მეტი სხვაობის გამო. მეტალის იონთან უფრო ახლოს მყოფი ლიგანდები იწვევენ დონეების უფრო მეტ გახლეჩას. ენერგეტიკული დონეების სხვაობა ( $\Delta$ ) ორსა და მეტ ორბიტალების ჯგუფებს შორის, ასევე ლიგანდის ბუნებაზეა დამოკიდებული. ზოგი ლიგანდი იწვევს დონეების სხვებზე ნაკლებ გახლეჩას, რის მიზეზებსაც ლიგანდების ველის თეორია ხსნის.

#### **დაბალ- და მაღალსპინური კომპლექსები.**

ლიგანდებს, რომლებიც გამოიწვევენ *d*-დონეების ძლიერ გახლეჩას, მაგალითად,  $\text{CN}^-$  და  $\text{CO}$ , ეწოდებათ *ძლიერი ველის* ლიგანდები. კომპლექსებში, რომლებშიც მონაწილეობენ ასეთი ტიპის ლიგანდები, ელექტრონებისთვის არაა მომგებიანი დაიკავონ მაღალი ენერგიის ორბიტალები. მაშასადამე, სანამ დაიწყება მაღალი ენერგიის ორბიტალების შევსება, დაბალი ენერგიის ორბიტალები უკვე სრულად შევსებული იქნება. ასეთ კომპლექსებს *დაბალსპინურებს* უწოდებენ (სურ. 85b). მაგალითად,  $\text{NO}_2^-$  — ძლიერი ველის ლიგანდია, რომელიც ორბიტალების ძლიერ გახლეჩას იწვევს. ოქტაედრიული იონის  $[\text{Fe}(\text{NO}_2)_6]^{3-}$  ხუთივე *d*-ელექტრონი განლაგდება ქვედა  $t_{2g}$  დონეზე.

ამის საპირისპიროდ, ლიგანდებს, რომლებიც გამოიწვევენ *d*-დონეების მცირე გახლეჩას, მაგალითად,  $\text{I}^-$  და  $\text{Br}^-$ , ეწოდებათ *სუსტი ველის* ლიგანდები. ამ შემთხვევაში ელექტრონების მოთავსება მაღალი ენერგიის ორბიტალებზე უფრო ადვილია, ვიდრე ორი ელექტრონის მოთავსება დაბალი ენერგიის ერთ ორბიტალზე, ვინაიდან ორი ელექტრონი ერთ ორბიტალზე განიზიდებიან და ორბიტალზე მეორე ელექტრონის მოთავსების ენერგიის დანახარჯი აღემატება  $\Delta$ -ს. ამრიგად, მანამ, სანამ წარმოიქმნება



დაწვევილებული ელექტრონები, ხუთი *d*-ორბიტალიდან ყოველ ორბიტალზე, ხუნდის წესის თანახმად, უნდა იყოს მოთავსებული თითო ელექტრონი. ასეთ კომპლექსებს *მაღალსპინურს* უწოდებენ (სურ. 85c). მაგალითად, Br<sup>-</sup> სუსტი ველის ლიგანდია, რომელიც იწვევს ორბიტალების სუსტ გახლეჩას. ხუთი *d*-ელექტრონის მქონე [FeBr<sub>6</sub>]<sup>3-</sup> იონის ხუთივე *d*-ორბიტალი, დაკავდება ერთი ელექტრონით.

ტეტრაედრიული კომპლექსების გახლეჩის ენერგია  $\Delta_{tet} \approx \frac{4}{9} \Delta_{oct}$  (ერთნაირი მეტალე-ბისათვის და ლიგანდებისათვის). ამის შედეგად სხვაობა *d*-ორბიტალების ენერგეტიკულ დონეებს შორის, ჩვეულებრივ, ელექტრონების დაწვევილების ენერგიაზე დაბალია, და ტეტრაედრიული კომპლექსები მეტ წილად მაღალსპინურია.

*d*-ელექტრონების განაწილების დიაგრამები საშუალებას იძლევა წინასწარ გავსაზღვროთ კოორდინაციული კავშირების მაგნიტური თვისებები. დაუწვევილებელი ელექტრონების მქონე კომპლექსები წარმოადგენენ პარამაგნეტიკებს და მიიზიდებიან მაგნიტური ველით, ხოლო დაუწვევილებელი ელექტრონების გარეშე – დიამაგნეტიკები და სუსტად განიზიდებიან მაგნიტური მელით.

გავაანალიზოთ კოოპერატიული ურთიერთობის პროცესი უფრო დაწვრილებით და განვიხილოთ ჰემოგლობინის პროტომერის სპირალის სქემატური განლაგება ჰემის მიმართ (სურ. 85d) დიოქსი (წითელი ხაზი) და კარბომონოქსი (ლურჯი ხაზი) ჰემოგლობინების სუბერთეულში. ამ სურათზე ჰემის CH<sub>1</sub>, CH<sub>3</sub> მიმართულება ნახატის სიბრტყის პერპენდიკულარულია. ნახატზე ნაჩვენებია თუ როგორ მოძრაობ ჯაჭვი CH<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> მიმართულებით და ამავედროულად ბრუნავს ჰემის სიბრტყის მიმართულებით. სურ. 85e-ზე მოყვანილია სქემატური დიაგრამა, რომელზეც ილუსტრირებულია α<sub>2</sub>β<sub>2</sub> დიმერის ბრუნვა α<sub>1</sub>β<sub>1</sub>-ის მიმართ (საწყისი მდგომარეობა – წითელი ხაზი, ხოლო დატრიალების შემდეგ – ლურჯი). ეს ცვლილებები აღინიშნება მეოთხეული სტრუქტურაში დიოქსი (წითელი ხაზი) ჰემოგლობინის ფორმიდან კარბომონოქსი (ლურჯი ხაზი) ფორმაში გადასვლისას. ნახატზე მოლეკულას უცქერით ბრუნვის P ღერძის გასწვრივ, რომელიც კვეთს დიოქსი ჰემოგლობინის მეორეულ ღერძს (Y) ნაჩვენებ წერტილში. ბრუნვის გარდა α<sub>2</sub>β<sub>2</sub> დიმერი გადაადგილდება ნახატის სიბრტყის მიმართულებით 0,8 Å-ით.

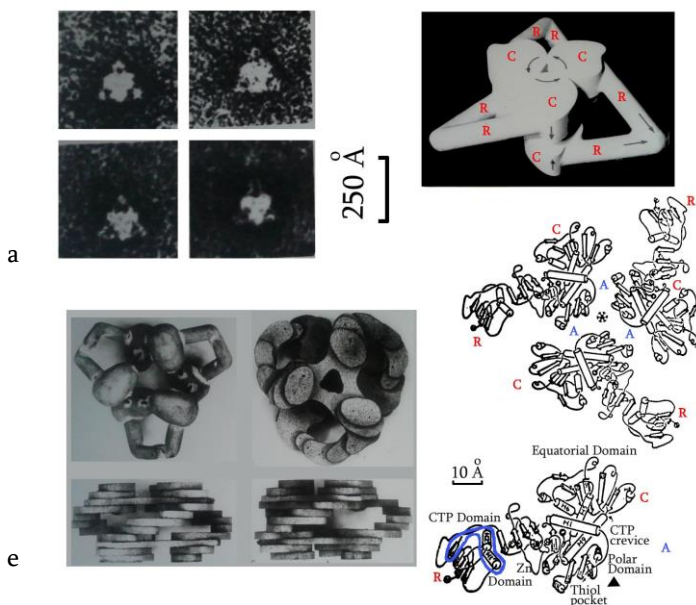
მაშ ასე, განვიხილოთ ჰემოგლობინში მიმდინარე პროცესები პუნქტებად:

1. თავიდან ჟანგბადი უკავშირდება ორ α-სუბერთეულს რათა გარდაქმნას რკინის მაღალსპინური ატომები დაბალსპინურებში. ეს ამცირებს რკინის გარსს 0,7 Å-ით და ჩატენის რკინის ატომს ჰემის სიბრტყეში. ჰისტიდინი, რომელიც რკინასთანაა დაკავშირებული გადაადგილდება და თან წაიყოლიებს მოლეკულის სუბერთეულის სპირალურ მონაკვეთს, რომელიც თავის მხრივ წაანაცვლებს შემდეგ მონაკვეთს (სურ. 85a,d).
2. ეს ტრიგერული ეფექტი იწვევს მოლეკულური მოძრაობების სერიას, რომელსაც მოყვება ორი მარილოვანი ხიდის დარღვევა.
3. მარილოვანი ხიდების დარღვევას მოყვება სუბერთეულების გადაადგილება. სქემატური დიაგრამა რომელზეც ილუსტრირებულია α<sub>2</sub>β<sub>2</sub> დიმერის ბრუნვა α<sub>1</sub>β<sub>1</sub> დიმერის მიმართ მოყვანილია სურ. 85e-ზე. ეს გადაადგილება თავის მხრივ საშუალებას აძლევს β-სუბერთეულში მყოფ ორ ცარიელ ჰემს გადაადგილდეს იმ ადგილზე, სადაც იქნება ჟანგბადისთვის უფრო ადვილად მისაწვდომი. ახლა ამ ორ ჰემს შეუძლიათ დაიკავშირონ მესამე და მეოთხე ჟანგბადები გაზრდილი შეთვისებადობით.
4. ჟანგბადის მიერთების ინჰიბიტორს წარმოადგენს დიფოსფოგლიცერატი. დიფოსფოგლიცერატის ერთი მოლეკულა კავდება მე-2-ე რიგის ღერძის გარდიგარდმო დეზოქსიჰემოგლობინის ორ β-ჯაჭვს შორის. ოქსიგენირების დროს β-ჯაჭვები

გაიწლება და დიფოსფოგლიცერატი გამონთავისუფლდება. ეს ერთადერთი ცნობილი შემთხვევაა, როდესაც ალოსტერული ეფექტორი კავდება ორ სუბერთეულს შორის.

### ჰექსამერები.

ფერმენტი ასპარტატრანსკარბამილაზა (ACT) (300 000) — წარმოადგენს 6 კატალიტიკური და 6 რეგულატორული სუბერთეულების კომპლექსს (6 პროტომერი). ელექტრონული მიკროსკოპიის მონაცემებით ერთ ერთ პროექციას აქვს სამკუთხედის სახე, რომლის შიგნით მოთავსებულია კიდევ ერთი, უფრო მკვრივი სამკუთხედი. იყო მოწოდებული მოდელი, რომლის თანახმად 6 კატალიტიკური სუბერთეული განლაგებულია სამწახნაგიანი პრიზმის წვეროებში (ერთი ტრიმერი ზუსტად მეორის ქვემოდაა მოთავსებული), ხოლო 6 რეგულატორული სუბერთეული, რომლებიც ჰქმნიან 3 V-მაგვარ დიმერს, აერთიანებენ მათ ერთმანეთთან.



სურ. 86. ასპარტატრანსკარბამილაზა (ACT). (a) ACT-ს ელექტრონული მიკროფოტოსურათები ფრონტალურ პროექციებში. (b) ACT-ს მოდელი. (c,d) ACT-ს რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი. (c) სამი ზედა სუბერთეული განლაგებულია მე 3-ე რიგის ღერძის ირგვლივ; (d) განცალკევებული სუბერთეული დატანილი სტრუქტურული თავისებურებებით. (e) ლეიციამინოპეპტიდაზა — მაკრომოლეკულის მოდელი.

აგრეთვე ჩატარდა ამ ცილის რენტგენოსტრუქტურული კვლევები 3, და მოგვიანებით 2,8 Å-ის გარჩევითობით, მაგრამ უკვე ინჰიბიტორთან – ციტიზინ ტრიფოსფატთან კომპლექსში (ცტფ). ორივე სტრუქტურა თითქმის ერთნაირი აღმოჩნდა. ACT კატალიზს უწევს კარბომაილ-L-ასპარტატის შექმნას. ეს რეაქცია წარმოადგენს პირველ საფეხურს პირიმიდინების ბიოსინთეზში. ამ ჯაჭვის საბოლოო პროდუქტს სწორეთაც რომ ცტფ წარმოადგენს, რომელიც ინჰიბირებას უწევს ამ ალოსტერიულ ფერმენტს რეგულატორულ ჯაჭვთან ურთიერთობით. ATP დადებით ეფექტორს წარმოადგენს.

კატალიტიკური მონომერები „C“ ჰქმნიან ორ „C<sub>3</sub>“ ტრიმერს (სურ. 86b), რომლებიც ოდნავ მობრუნებულია ერთმანეთის მიმართ მე 3-ე რიგის ღერძის ირგვლივ. ერთ ტრიმერში მყოფი ყოველი კატალიტიკური მონომერი უკავშირდება მეორე ტრიმერში მყოფ ასეთივე მონომერს რეგულატორული დიმერის „R<sub>2</sub>“ მეშვეობით. ამრიგად, „R<sub>2</sub>“-ით დაკავშირებული ორი „C“ მონომერი მობრუნებულია 120°-ით მე 3-ე რიგის ღერძის მიმართ.

სურ. 86c-ზე C<sub>3</sub>R<sub>3</sub> ტრიმერი ნაჩვენებია როგორც მოლეკულის ნახევარი. კატალიტიკურ სუბერთეულში ორი დომენია. „პოლარული“ დომენი (სპირალები H<sub>1</sub>-H<sub>4</sub> და β-შრე) იმყოფება მე3-ე რიგის ღერძის მახლობლად და ახორციელებს კავშირს დანარჩენ C-ჯაჭვებთან. ეკვატორიალური დომენი (სპირალები H<sub>6</sub>-H<sub>8</sub> და β-შრე) ახორციელებს შიდამო-

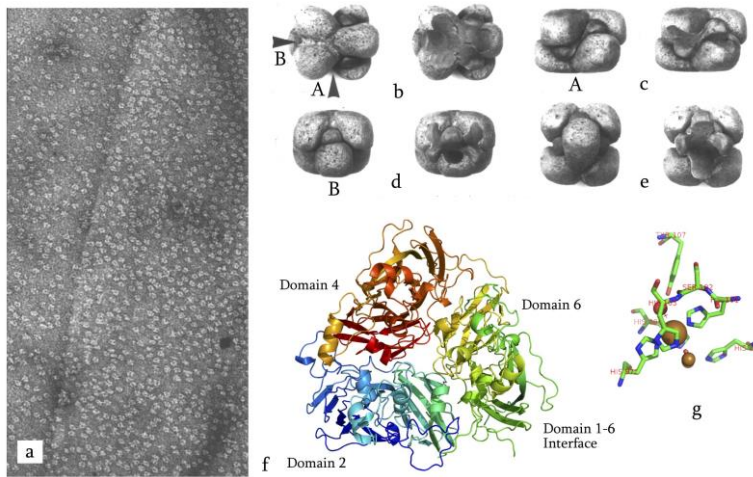
ლეკულურ ურთიერთობას  $C_3 - C_3$  ტრიმერებს შორის. ეს დომენები დაკავშირებულნი არიან  $H_5$  და  $H_9$  ( $COOH$ -ბოლოში) სპირალებით. რეგულატორულ ჯაჭვში იმყოფება დომენი, რომელიც მიიზავს ცტფ-ის მოლეკულას. ის მოიცავს  $H1'$  და  $H2'$  სპირალებს და  $\beta$ -შრეს (სურ. 86d-ზე შემოვლებულნი არიან ლურჯი ფერის ხაზით). დომენი ურთიერთობს სხვა რეგულატორული სუბერთეულის ასეთივე დომენტან. სწორედ ეს ორი დომენი გამოიკვეთება მიკროფოტოსურათებზე სამკუთხედის წვეროებში. იგივე დომენი უკავშირდება ცინკ-შემზოჭავ დომენს, რომელიც კატალიტიკურ სუბერთეულთან ურთიერთობს. აქტიური ცენტრი იმყოფება თიოლის ჯიბის მახლობლად, მეზობელი  $C$ -ჯაჭვების შუალედში. ვარაუდობენ, რომ ყოველი აქტიური ცენტრი შეიცავს მეზობელი კატალიტიკური ჯაჭვების ამინომჟავების ნაშტებს.

საინტერესოა, რომ დაბალი გარჩევითი უნარიანობის პირობებში მსგავსი, თავისებური ცილოვანი ხიდების მქონე სტრუქტურა, გააჩნია ფერმენტს ლეიცინამინოპეპტიდაზას (მოლ. მასა 320 000). ის შედგება ექვსი ერთნაირი ტიპის სუბერთეილისაგან, რომლებსაც არ გააჩნია რეგულატორული ფუნქცია (სურ. 86e). ერთ ერთ პროექციაში ლეიცინამინოპეპტიდაზის მოლეკულა არც თუ ისე განსხვავდება  $ACT$ -ს მოლეკულას. მაგრამ, ჩვეულებრივ შეინიშნებოდა სამი შიდა სტრუქტურული ერთეულის ორად გახლეჩა. ასეთი ტიპის გაყოფა უფრო კარგად შეინიშნებოდა თხელი კრისტალების გაფილტრულ გამოსახულებებზე. აგრეთვე იყო მიღებული მაკრომოლეკულის გვერდითი პროექციები. ამ ყველა მონაცემების საფუძველზე თავიდან იყო აგებული ჰიპოტეტიური მოდელი, რომელშიც 6 სუბერთეული განლაგებულია ერთმანეთის მიმართ მე 3-ე რიგის ღერძის გარშემო  $30^\circ$ -ით დატრიალებული ორი სამკუთხედის წვეროებში. შემდგომში მოდელი იყო დაზუსტებული სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მეთოდით. მოდელის თანახმად, მოლეკულის სტრუქტურა თითქოს ორფენოვანია: ორი ტრიმერი არ ეხება ერთმანეთს და ერთიანდებიან ცილოვანი ხიდების მეშვეობით. მიუხედავად იმისა, რომ ლეიცინამინოპეპტიდაზა, როგორც უკვე აღინიშნა, სტრუქტურულად ჰგავს  $ACT$ -ს მოლეკულას, ის შედგება ერთი ტიპის ექვსი სუბერთეულისაგან.

აქამდე ჩვენ განვიხილავდით სტრუქტურებს, რომლებსაც არა ჰქონდათ მნიშვნელოვანი გადახრები სიმეტრიისგან. გლიცილ- $tRNA$ -სინთეტაზა (მოლ. მასა 225 000) წარმოადგენს ამ გადახრის, ანუ ფსევდოსიმეტრიის არსებობის, ნათელ მაგალითს. ელექტრონულ მიკროსკოპიულ კვლევისას აღინიშნებოდა გამოსახულების რამოდენიმე ტიპი. მეტწილად ნაწილაკების ცქერა შეიძლებოდა მე 3-ე რიგის ფსევდოღერძის გასწვრივ. გარდა ამისა აღინიშნებოდა ჩხირისებრივი აგრეგატები, რომლებიც წარმოადგენდნენ ნაწილაკებზე გვერდიდან ცქერისას მიღებულ გამოსახულებებს. ყველა ამ გამოსახულების ახსნა შესაძლებელი იყო მოდელით, რომელშიც ექვსი სუბერთეული განლაგებულია ფსევდოსიმეტრიით 32. ეს კი ეწინააღმდეგებოდა მონაცემებს, რომ მოლეკულა შედგება ორი დიდი (80 000) და ორი პატარა (32 000) სუბერთეულისაგან. გამოითქვა მოსაზრება, რომ ყოველი დიდი სუბერთეული შედგება ორი ერთნაირი დომენისაგან. ამის შემდეგ შესაძლებელი გახდა ისეთი მოდელის აგება, რომელშიც აიხსნებოდა მოლეკულის შიდა ღრმულის კონფიგურაცია და ჭეშმარიტი სიმეტრიისაგან გადახრა. შემდგომში დომენების არსებობა დადასტურდა ბიოქიმიური მეთოდებითაც.

განსაკუთრებული ადგილი უნდა მიენიჭოს ცერულოპლაზმინის ( $CP$ ) მოლეკულას. ეს არის ცილა, რომელსაც დიდი მოლეკულური მასა (130 000) გააჩნია, თუ გავითვალისწინებთ რომ ის შედგება ერთი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისაგან. მაგრამ,  $CP$  ხასიათებს რამდენიმე იზოფორმა და ხასიათდება ქსოვილებში განაწილების რთული სურათით.  $CP$  ხასიათდება ორგანიზმში სპილენძის და რკინის მეტაბოლიზმში მონაწილეობის კოოპერატიული ფორმების მრავალფეროვნებით.  $CP$  იკავებს სისხლის შრატში მყოფი სპილენ-

მის მთელი მარაგის 95%-ზე მეტს. მისი მოლეკულა 1046 ამინომჟავების ნაშტისგან შედგება და შეიცავს დაახლოებით 8% ნახშირწყლებს და სპილენძის 6-7 ატომს. CP-ის სივრცული ორგანიზება და კატალიტიკური თვისებები განისაზღვრება მის სტრუქტურაში სპილენძის ყოფნით. CP – მულტიფუნქციონალური ცილაა და სწორედაც რომ სპილენძის ტრანსპორტი წარმოადგენს მის ერთ ერთ მთავარ ფუნქციას, რომლის რეალიზება ხდება პლაზმური მემბრანების გარე ზედაპირზე ლოკალიზებული სპეციფიური რეცეპტორებთან ურთიერთობისას. დადგენილია სპეციფიური  $\beta$ -რეცეპტორის არსებობა სხვადასხვა უჯრედების მემბრანებზე, მათ შორი ადამიანის ერითროციტების მემბრანებზე.



სურ. 87. (a) CP-ის ნაწილაკების ველის მიკროფოტოსურათი. კონტასტირება 2% ურანილაცეტატით. (b,c,d,e) CP-ის მოდელის მახასიათებელი პროექციები. მოდელები დაწყვილებულია: პირველი მოდელი ჩვეულებრივია, მეორე კი მასზე შიდა ღრუს მოდელის ზედდებისას. (f) რენტგენოსტრუქტურულმა ანალიზმა ასევე გამოავლინა მაკრომოლეკულის დომენური სტრუქტურა. (g) CP-ის გამარტივებული სტრუქტურული მოდელი. ჩანს ტრანსპორტირებადი ატომების დასმის ადგილები.

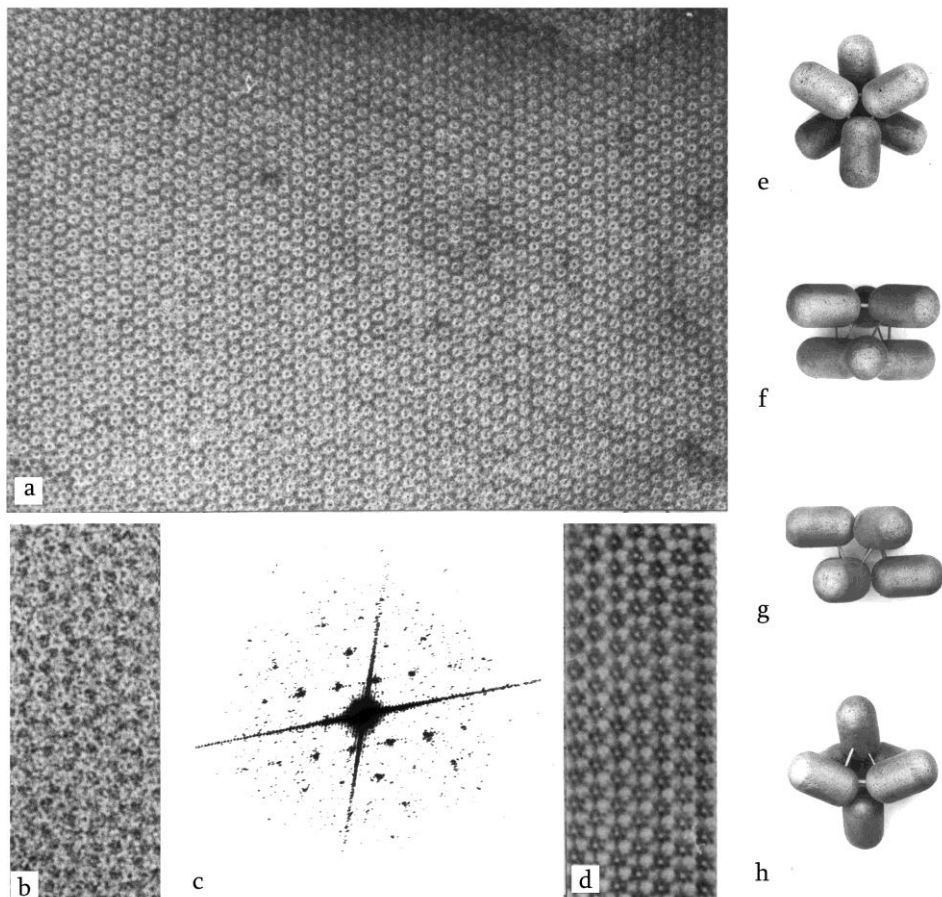
საინტერესო ფაქტს წარმოადგენს ის გარემოება, რომ ამ ცილის წინააღმდეგობრივი ბიოქიმიური მონაცემების მიუხედავად, ელექტრონული მიკროსკოპის მეთოდით იყო გამოვლენილი მისი დომენური აგებულება. სურ. 87a-ზე მოყვანილია ნაწილაკების ველის ნეგატიურად კონტრასტირებული პრეპარატის ელექტრონული მიკროფოტოსურათი. დამახასიათებელი პროექციების ანალიზმა უჩვენა, რომ მიუხედავად იმისა, რომ CP-ის მაკრომოლეკულა შედგება ერთიანი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისგან, მას ახასიათებს აგებულება, რომელიც ჩვეულებრივ სუბერთეულებიანი ად დომენური სტრუქტურის მატარებელი ცილებისთვისაა დამახასიათებელი. პროექციების ანალიზმა დაადგინა, რომ CP-ის მოლეკულის სტრუქტურა აღიწერება ფსევდოსიმეტრიის 32 წერტილოვანი ჯგუფით. ფსევდოსიმეტრია შეიძლება იყოს ახსნილი „სუბერთეულების“ არათანაბარი ზომებით. საინტერესოა, რომ ანალოგიური შემთხვევა იყო აღნიშნული გლიცილ-tRNA-სინთეტაზის მეოთხეული სტრუქტურის აღწერისას.

ყველა გამოსახულების ანალიზის შემდეგ იყო შეთავაზებული CP-ის ჰიპოტეტიური მოდელი. ის აგებულია ორ დონეზე სამ სამად განლაგებული ექვსი „სუბერთეულისაგან“. ყოველი დონის ორი „სუბერთეული“ მიახლოებულია ერთმანეთს. როდესაც მოდელი განიხილება მე 3-ე რიგის ფსევდოდერმის გასწვრივ (სურ. 87b), ის ემსგავსება პირველი ტიპის ნაწილაკებს. მსგავსობა მატულობს, თუ ყურად ვიღებთ იმ ფაქტს, რომ მოდელებს გააჩნია შიდა ღრუ, რომელიც რეალურ ნაწილაკებში შეიძლება იყოს შევსებული კონტრასტერით (ეს ღრუ გამოტანილია ზედახედაზე სურ. 87b-ზე მოყვანილი მოდელის მარჯვენა გამოსახულებაზე). თუ მოდელს უცქერით მე 2-ე რიგის ფსევდოდერმის გასწვრივ, მაშინ საჭიროა ორი შემთხვევის განხილვა. სურ. 87b-ზე აღნიშნულია მე 2-ე რიგის ფსევდოდერმების ორი მიმართულება (A და B). სურ. 87c-ზე განიხილება A-პროექცია, ხოლო სურ. 87d-ზე — B-პროექცია. მეორე შემთხვევაში ნაწილაკების სიგრძე ამ პროექციაში ნაკლებია ვიდრე პირველში. თუ ყურად ვიღებთ მაკრომოლეკულის მცირე

ზომებს, ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდით კვლევისათვის მიღებულ სტანდარტებთან მიმართებაში, შესაძლებელია სურ. 87e-ზე მოყვანილი მოლეკულის პოზიცია. მიუხედავად იმისა, რომ მოყვანილი მოდელი ჰიპოტეტიურია, ის საკმაოდ დამაჯერებლად მეტყველობს იმაზე, რომ CP-ის მოლეკულას ახასიათებს მეოთხეული სტრუქტურის მქონე ცილების ნიშნები, რომლებიც მოცემულ შემთხვევაში შეიძლება აიხსნას დომენების არსებობით.

უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდმა ბევრ კვლევებში შესაძლებლობა მისცა გამოვლენილიყო ცილების დომენური სტრუქტურა, რომელიც მომავალში დასტურდებოდა ანალიზის სხვა მეთოდებით. ასე იყო ცერულოპლაზმინის შემთხვევაშიც. განხილული მოდელი იყო შემოთავაზებული წინა საუკუნის 70-ან წლებში და მაშინვე დადასტურდა ბიოქიმიური მეთოდების გამოყენებით. 2017 წ ჩატარებულმა რენტგენოსტრუქტურულმა ანალიზმა 2,3 Å გარჩევით დაადასტურა მოყვანილი მოდელი. სურ. 87f-ზე მოყვანილია ამ კვლევის შედეგები. წარმოდგენილია სტრუქტურის ზედა ფენა: დომენები 2, 4, 6 და ნაჩვენებია მმართველი დომენი “Domain 1-6 Interface”. გვერდით (სურ. 87g) მოყვანილია ცილის გამარტივებული მოდელი, რომელზეც ჩანს მოლეკულის მიერ ტრანსპორტირებადი ატომის დასმის ადგილები.

შემდეგი, მაკრომოლეკულების სტრუქტურული ანალიზისათვის საინტერესო, ექვს სუბერთეულებიანი ფერმენტი – არის ჰისტიდინდეკარბოქსილაზა (HDC). ეს არის ფერმენტი, რომელიც კატალიზირებას უწევს L-ჰისტიდინის გარდაქმნას ჰისტამინში. *Micrococcus sp.n.* -დან გამოყოფილი HDC-ის მოლეკულური მასა 110 000-ის ტოლია.

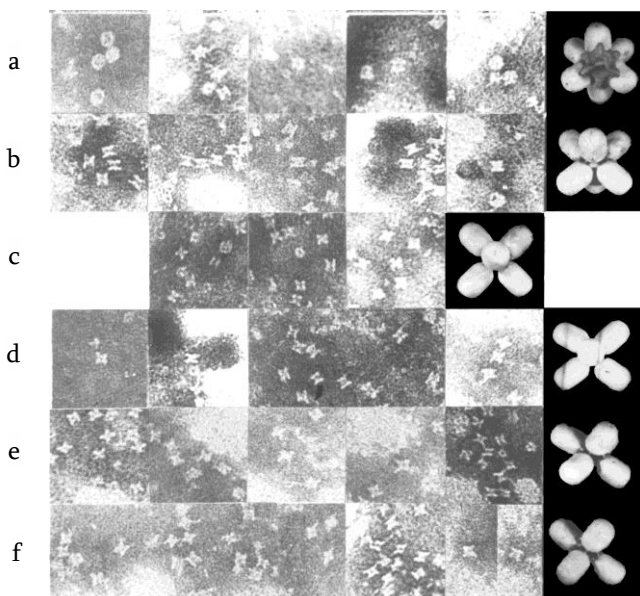


სურ. 88. (a) ნეგატიურად კონტრასტირებული (2%-ანი ურანილაცეტატი) HDC-ის კრისტალის მიკროფოტოსურათი. (b) HDC-ის კრისტალის ფრაგმენტი (ცილა ლიაფერისაა, გადიდება 50 000 ×), (c) მისი ოპტიკური დიფრაქცია, (d) ოპტიკური ფილტრაცია (ცილა მუქია, გადიდება 50 000 ×). (e-h) ფერმენტის ჰიპოტეტიური მოდელი სხვადასხვა პროექციაში.

ბიოქიმიური მონაცემებით მოლეკულა შეიცავს ერთმანეთთან არაკოვალენტურად დაკავშირებულ 3  $\alpha$  და 3  $\beta$  პოლიპეპტიდურ ჯაჭვებს.  $\beta$ -ჯაჭვის მოლეკულური მასა 8 500 და ის შეიცავს 78 ამინომჟავის ნაშტს, ხოლო  $\alpha$ -ჯაჭვის მოლეკულური მასა 29 000 და 256 ამინომჟავის ნაშტისგან შედგება. შემდგომში  $\alpha$ -ჯაჭვში იყო აღმოჩენილი გარკვეული შიდამოლეკულური ჰომოლოგია, რომელიც ასევე აღინიშნებოდა  $\alpha$  და  $\beta$  ჯაჭვებს შორის. ამრიგად, გაკეთდა დასკვნა, რომ HDC შედგება სამი იდენტური სუბერთეულისაგან (თითო 36 000). თითოეული სუბერთეული, თავის მხრივ, შედგება  $\alpha$  და  $\beta$  პოლიპეპტიდური ჯაჭვებისაგან. სუბერთეული შედგენილია ორი დომენისაგან: ერთ დომენში შედის  $\beta$  პოლიპეპტიდური ჯაჭვი მთლიანად და  $\alpha$ -ჯაჭვის ნაწილი, ხოლო მეორე დომენი –  $\alpha$  პოლიპეპტიდური ჯაჭვის დარჩენილი ნაწილითაა წარმოდგენილი.

ხსნარიდან მიღებული პრეპარატის ელექტრონული მიკროფოტოსურათების ანალიზის შედეგად გამოვლინდა ნაწილაკების სხვადასხვა პროექციები. ეს არის დაახლოებით მომრგვალო ან ექვსკუთხედიანი ნაწილაკები დიამეტრით 80 Å (სურ. 88e) კონტრასტერის ლაქით ცენტრალურ ნაწილში. ნაწილაკის სიგანე დაახლოებით 50 Å, ხოლო სიგრძე 80 Å-მდე (სურ. 88f).

HDC-ის კრისტალების კვლევისას (სურ. 88a) იყო მიღებული გამოსახულებების რამდენიმე ტიპი, რომლებიც წარმოადგენდნენ კრისტალური მესერის სხვადასხვა პროექციებს. მიკროფოტოსურათები იყო მიღებული ~10 Å გარჩევით, რაზეც მეტყველობენ დიფრაქციული სურათები (სურ. 88c). კრისტალის გამოსახულების ფილტრაცია საშუალებას იძლევა გაირკვეს სტრუქტურის დეტალები (სურ. 88d). ოპტიკურათ გაფილტრული გამოსახულება წინანდებურად შეიცავს საწყისი გამოსახულების ბევრ თავისებურებებს, მაგრამ მესერის პერიოდულობის ხასიათი და ცილის ცალკეული სუბერთეულების ფორმა მნიშვნელოვნად უკეთ არის გამოვლენილი. იყო გამოკვლეული კრისტალის სიმეტრიის პარამეტრები და გამოვლენილი მისი ელემენტარული უჯრედი. კრისტალის გამოსახულება ხასიათდება სიმეტრიის ბრტყელი ჯგუფით  $p6mm$  რომელშიც  $a \approx 110$  Å.



სურ. 89. ხლორელის GS-ის ნაწილაკების შენარჩევი. (a) პროექცია მე 3-ე რიგის ღერძის გასწვრივ. (b-d) ნაწილაკების სხვადასხვა პროექციები. მარჯვენა მხარეს მოყვანილია მოლეკულის მოდელო შესაბამისი ორიენტაციით. მოდელზე, რომელსაც უცქერით მე 3-ე რიგის ღერძის გასწვრივ, კონტრასტის იმიტირებისათვის, დადებულია შიდა ღრუს მოდელოური გამოსახულება.

ხსნარში და კრისტალურ მესერში მყოფი მოლეკულების გამოსახულების ანალიზმა პირველადი სტრუქტურის მონაცემებთან შეთავსებით, შესაძლებელი გახდა HDC-ის ჰიპოტეტიური მოდელის შემოთავაზება. მოდელი შედგება ექვსი ერთნაირი (ან მსგავსი) წაგრძელებული „სუბერთეულისაგან“ (სიგრძე სიგანის შეფარდება 1,7:1), რომლებიც განლაგებულია 32 სიმეტრით ორი ანტიპარალელური სამკუთხედის წვეროებში.

ხლორელის **გლუტამინსინთეტაზა (GS)** წარმოადგენს უფრო მომხიზლავ ობიექტს ელექტრონული მიკროსკოპიული კვლევისათვის, ვინაიდან მისი მოლეკულური მასა შეადგენს 320 კდალ. სულ 6 სუბერთეულია – თითო 53 კდალ.

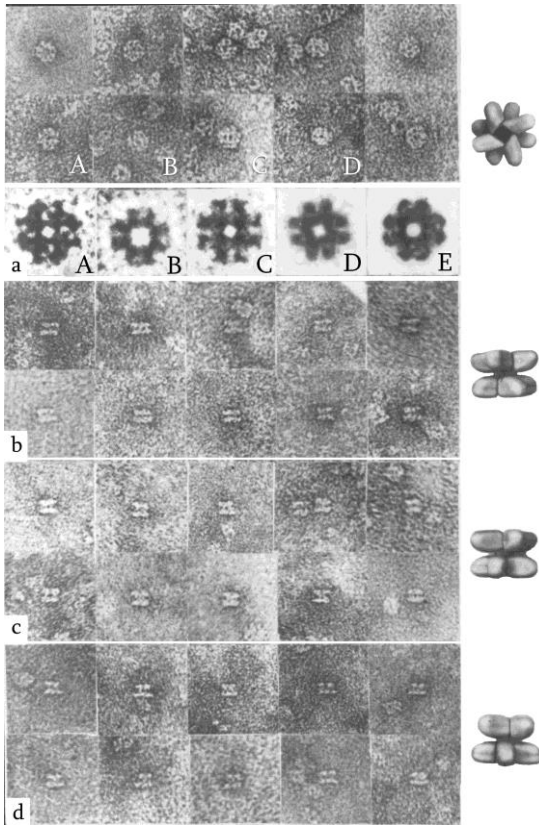
მიკროფოტოსურათების ანალიზმა, ამ შემთხვევაში, გამოავლინა ექვსი წაგრძელებული სუბერთეული (დიამეტრის შეფარდება სიგრძესთან – 1 : 1,4), რომლებიც განლაგებულია სიმეტრიით 32, დამახინჯებული ოქტაედრის წვეროებში. ეს მოდელი, სხვადასხვა პროექციებში მოყვანილია სურ. 89-ის მარჯვენა მხარეს.

მიკროფოტოსურათებზე აღრიცხული 100 – 110 Å-ის დიამეტრის მქონე რგოლისებრივი ან და ექვსკუთხა ნაწილაკები შეესაბამება მოდელს, რომელსაც უცქერით მე 3-ე რიგის ღერძის გასწვრივ (სურ. 89a). ცენტრალურ ნაწილში მყოფი მუქი ლაქა, რომელსაც ზოგჯერ ასევე ექვსკუთხა ფორმა გააჩნია, უკავშირდება კონტრასტებით შევსებულ მოლეკულის შიდა ღრუს. მოდელზე შიდა ღრუ ვლინდება მასში მოთავსებულ პლასტელინზე მიღებული ანაბეჭდის მეშვეობით. ეს ანაბეჭდი ედება მოდელს შესაბამისი ორიენტაციით, რითიც ხდება მოლეკულის ღრუში შესული კონტრასტერის იმიტირება. ნაწილაკების ერთ-ერთი ვარიანტი (სურ. 89b) გვაგონებს 180°-ზე შემოტრიალებულ და ერთმანეთზე დადებულ ორ სამკუთხედს. სხვა ვარიანტში ისინი ხასიათდება ცილის მასალის ორი ზოლით. პირველი ვარიანტის ნაწილაკების ზომა 80 × 95 Å და ისინი შეესაბამება მოდელზე ცქერისას მე 3-ე რიგის ფსევდოღერძის პერპენდიკულარულად. მეორე ვარიანტის ნაწილაკების ზომები (75 × 110 Å) უფრო შეესაბამება მოდელზე მე 3-ე რიგის ღერძის განივად ცქერისას. ჯვარისმაგვარი ნაწილაკები სურ. 89c,d-ზე შეესაბამება მოდელს, რომელსაც უყურებთ სუბერთეულის ღერძის გასწვრივ. ჯვარისმაგვარი ნაწილაკების კიდევ ორი ვარიანტი, როდესაც ორი სუბერთეული წაგრძელებულია (ჯამური სიგრძე 130 Å-მდე), ხოლო ორი უფრო მოკლეა, მოყვანილია სურ. 89e,f-ზე. ისინი შეესაბამება მოდელის პროექციას მე 2-რ რიგის ღერძის გასწვრივ.

### ოკტამერები.

ოკტამერული სტრუქტურების განხილვა დავიწყოთ ისევ გლუტამინსინთეტაზით მაგრამ უკვე სხვა წყაროდან: ბარდის ფოთლების ქლოროპლასტრიდან. მოლეკულური მასა 480 კდალ და ის შეიცავს 8 სუბერთეულს (თითო 60 კდალ).

პრეპარატის ელექტრონულ მიკროფოტოსურათზე გამოიკვეთება გამოსახულებების ოთხი ტიპი (მაკრომოლეკულის პროექცია გამოსახულების სიბრტყეზე). პირველ ტიპს მიეკუთვნება მომრგვალო ნაწილაკები დიამეტრით 115–125 Å (სურ. 90a). რიგი ნიშნების მიხედვით ეს გამოსახულებები ხასიათდება ბრუნვითი სიმეტრიით. ამიტომაც ბრუნვის ღერძის რიგის დასადგენათ იყო გამოყენებული მარკემის მეთოდი, რომლის მიხედვით ნაწილაკის გამოსახულების ფოტობეჭდისას ფოტოქაღალდს ატრიალებენ 360°/N კუთხეზე ცენტრალური წერტილის ირგვლივ N ჯერ (ქაღალდზე ექსპონირება ხდება ამავე რაოდენობით, ანუ N ჯერ), სანამ არ შეიკვრება სრული 360°. აქ, რა თქმა უნდა, N ბრუნვის ღერძის რიგია. ამ ოპერაციის შედეგად, მკაფიო სურათები იყო მიღებული მხოლოდ N = 4 შემთხვევაში (სურ. 90a). სხვა N-ის მნიშვნელობებისათვის, კერძოდ N = 8 შემთხვევაში, გამოსახულებაში იკარგებოდა ორიგინალისათვის დამახასიათებელი დეტალები. ნაწილაკების მიღებულ სურათებზე ჩანს დაწყვილებული შვერილები, თანაც კუთხე წყვილ შველირებს შორის შეადგენს ~ 40°. გამოსახულება ხასიათდება სიმეტრიით 4m.



სურ. 90. ბარდის ფოთლების ქლოროპლასტების GS-ის ნაწილაკების შენარჩევი. (a) პროექცია მე 4-ე რიგის ღერძის გასწვრივ (ქვემო რიგში ფოტომეთოდით გასაშუალებული ნაწილაკები). (b,c,d) გვერდითი პროექციები. მარჯვნივ მოყვანილია ფერმენტის მოდელები შესაბამის ორიენტაციაში.

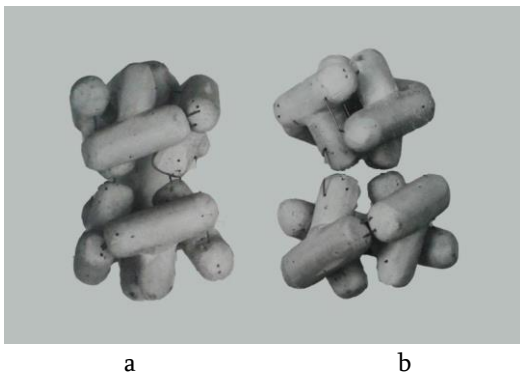
ნაწილაკთა გამოსახულების შემდეგ სამ ტიპში აღინიშნება კონტრასტერით გაყოფილი ცილის მასალის ორი გრძივი ზოლი. სამივე ტიპის ნაწილაკთა სიგანე ერთნაირია – 70-75 Å, მაგრამ ისინი განსხვავდებიან სიგრძით და გამოსახულების დეტალებით. მეორე ტიპის ნაწილაკები – მართკუთხედაა (სურ. 90b) და მათი სიგრძე ~100 Å. ხშირად ჩანს, რომ გრძივი ზოლები შეიცავენ სამ ერთეულს, ანუ ცილის მომატებული სიმკვრივის უბნებს. გამოსახულება ხასიათდება სიმეტრიით 2m. მესამე ტიპის ნაწილაკები (სურ. 90c) აგრეთვე ხასიათდება სიმეტრიით 2m, მაგრამ მეორე ტიპის ნაწილაკებთან შედარებით ისინი უფრო მოკლეა (~75 Å). გრძივი ზოლები მოლეკულის გამოსახულების ამ პროექციაში იყოფა ცილის სიმკვრივის ორ ერთეულად. და ბოლოს, მეოთხე ტიპის ნაწილაკებს (სურ. 90d) ტრაპეციის ფორმა გააჩნია, რომლის დიდი ფუზე 100-105 Å-ის ტოლია. გამოსახულება ხასიათდება სიმეტრიის სიბრტყით, ხოლო გრძივი ზოლები გამოიყურება როგორც ცილის სიმკვრივის ორი და სამი ერთეულისგან შემდგარი ნაწილები. მოლეკულების გამოსახულებების შედარებისას გაკეთდა დასკვნა, რომ გამოსახულების პირველი ტიპი შეესაბამება მოლეკულის ფრონტალურ პროექციას, იმ დროს როდესაც დანარჩენი – მის პერპენდიკულარულ გვერდით პროექციებს. გვერდითი პროექციების ხასიათი მიუთითებს იმაზე, რომ ეს სტრუქტურა ორფენოვანია. მიღებული პროექციების საფუძველზე იყო აგებული ბარდის ფოთლების ქლოროპლასტების გლუტამინსინთეტაზის მოლეკულის მოდელი. ამ მოდელში რვა წაგრძელებული მონომერი განლაგებულია ერთმანეთის მიმართ მე 4-ე რიგის ღერძის ირგვლივ ~40° დატრიალებულ ორი კვადრატის წვეროებში სიმეტრიით 42.

ნაწილაკთა სხვა და სხვა ორიენტაციის შესაბამისი მოდელის პროექციები მოყვანილია სურ. 90-ის მარჯვენა მხარეს. ფრონტალურ პროექციაში მონომერების ცენტრები არ ემთხვევა, რაც შესაძლებლობას იძლევა აიხსნას დაწყვილებული შვერილების არსებობა ნაწილაკების პირველ ტიპში. სურ. 90b,c-ზე მოყვანილი მოდელის პროექციები შეესაბამება ნაწილაკების ორიენტაციას მოლეკულაზე ცქერისას ორი მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ, რომლებიც განლაგებულია ერთმანეთის მიმართ 40° კუთხით. ნაწილაკების



გამოსახულება უნდა იყოს მართკუთხედის მოხაზულობის, როგორც ეს აღინიშნებოდა მიკროფოტოსურათებზე. მართკუთხა გამოსახულებები ხასიათდება სიმეტრიით  $2m$ . მეოთხე ტიპის ნაწილაკები (სურ. 90d) შეესაბამება მოლეკულის ორიენტაციას მასზე ორი მე-2-ე რიგის ღერძის შორის კუთხის ბისექტრისის გასწვრივ ცქერისას (მე-2-ე რიგის ღერძები ერთმანეთის მიმართ განლაგებულია  $45^\circ$ -ით). ამასთან, მოლეკულაში ორი ფენის მონომერების სხვა და სხვა ორიენტაციის გამო, ნაწილაკებს ტრაპეციის ფორმა გააჩნია.

**ფოსფოფრუქტოკინაზა (PFK, მოლ. მასა 800 კდალ)** შედგება დაახლოებით ერთნაირი მოლეკულური მასის მქონე  $4\alpha$  და  $4\beta$  სუბერთეულისაგან. სურ. 91a,b-ზე მოყვანილია ამ მოდელის ორი პროექცია. ცილის მოდელი რვა ერთნაირი სუბერთეულიდანაა აგებული. ყოველი მათგანი ორი წაგრძელებული ნაწილისაგანაა შემდგარი. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ სწორედ  $\alpha$  და  $\beta$  სუბერთეულები ეკონტაქტებიან ერთმანეთს, რათა შეიკრას პროტომერი. ოთხი ასეთი პროტომერი განლაგდება გაწეილი ტეტრაედრის წვეროებში სიმეტრიით 222.



სურ. 91. ფოსფოფრუქტოკინაზის (PFK) მოდელის ორი განსხვავებული ორიენტაცია.

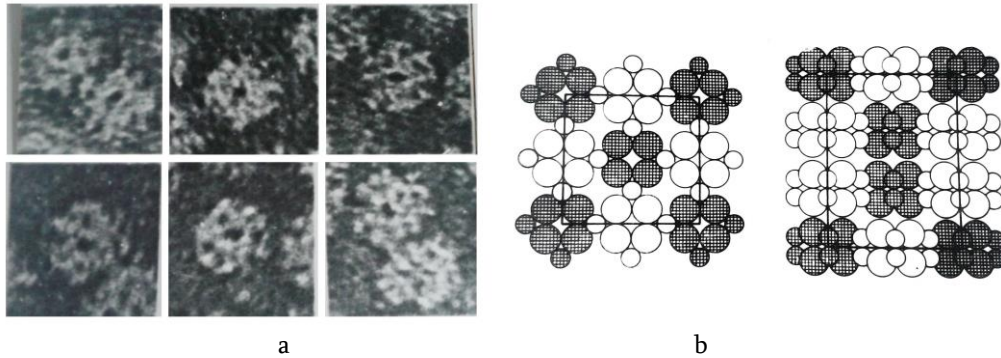
განსაკუთრებული ადგილი ოქტამერული წარმონაქმნების მეოთხეული სტრუქტურის კვლევის მოყვანილ მაგალითებში უკავია რიბულოზოდიფოსფატკარბოქსილაზას, ვინაიდან, ამ შემთხვევაში გამოყენებულ იქნა სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის ორიგინალური მეთოდი.

**რიბულოზოდიფოსფატკარბოქსილაზა (RuBisCO)** ბიფუნქციონალური ფერმენტი, რომელიც ჩვეულებრივ შედგება რვა დიდი (L) და რვა პატარა (S) სუბერთეულისაგან. უმაღლესი მცენარეების RuBisCO-ს მოლეკულური მასა შეადგენს 520 – 580 კდალ. L-სუბერთეულის მოლეკულური მასა შეადგენს 50 – 60 კდალ და ის კატალიტიკურად აქტიურია, ხოლო S-სუბერთეულის მოლეკულური მასა 12 – 20 კდალ და მას რეგულატორული ფუნქცია გააჩნია.

ფერმენტის სტრუქტურული ორგანიზების ერთ-ერთი ვერსიის თანახმად მოლეკულას გააჩნია  $L_8S_8$  სტრუქტურა, რომელშიც რვა დიდი სუბერთეული იმყოფება კუბის წვეროებში, ხოლო პატარა სუბერთეულები მის ექვს წახნაგზე. მაგრამ ეს მოდელი მიუღებელი აღმოჩნდა, ვინაიდან უმაღლესი სიმეტრია რომელიც შეიძლება გააჩნდეს რვა ჯაჭვისგან შემდგარ ოლიგომერს, ეს არის განმარტოებული მე-4-ე რიგის ღერძი მის პერპენდიკულარული ოთხი მე-2-ე რიგის ღერძებით (სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფი  $D_4$ ).

რიბულოზოდიფოსფატკარბოქსილაზას შეუძლია რამდენიმე სახის კრისტალების ფორმირება. თამბაქოს ფოთლებიდან გამოყოფილი RuBisCO-ს I-ლი ფორმის კრისტალის კვლევამ გამოავლინა, რომ ცილის 12 მოლეკულა ლაგდება კუბურ უჯრედში სიმეტრიით  $I 4_32$ . ელემენტარული უჯრედის ზომა  $a = 383 \text{ \AA}$ . ასიმეტრიული ერთეული – მოლეკულის ერთი მეოთხედი ნაწილი, ხოლო მინიმალური მოლეკულური სიმეტრია 222. ამ შემთხვევაში თავად მოლეკულას ექნება  $L_8S_8$  სტრუქტურა და მოლეკულის სიმეტრია იქნება 422. იგივე მონაცემები იყო მიღებული ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდით

(სურ. 92a). II-ე ფორმის კრისტალის კვლევამ აჩვენა, რომ რვა დიდი და რვა პატარა სუბერთეული მე-4-ე რიგის სიმეტრიის ღერძის პერპენდიკულარულ ორ ფენაშია ჩალაგებული, და ამ ღერძის გასწვრივ ცქერისას, მოლეკულას გააჩნია კვადრატული ფორმა. ამ კრისტალის მოდელის ორი პროექცია მოყვანილია სურ. 92b-ზე. რენტგენული მონაცემებით კრისტალს ტეტრაედრიული ელემენტარული უჯრედი გააჩნია, რომლის ზომებია  $a = b = 230 \pm 2 \text{ \AA}$ ;  $c = 315 \pm 3 \text{ \AA}$ , ხოლო ელექტრონული მიკროფოტოსურათების ოპტიკური დიფრაქციის მეთოდის მიხედვით  $a = b = 230 \text{ \AA}$ . ამ კრისტალის სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფი:  $P 4_21_2$ .



სურ. 92. (a) თამბაქოს ფოთლების RuBisCO-ს ცალკეული ნაწილაკების გამოსახულებები. (b) RuBisCO-ს კრისტალის ორი პროექცია.

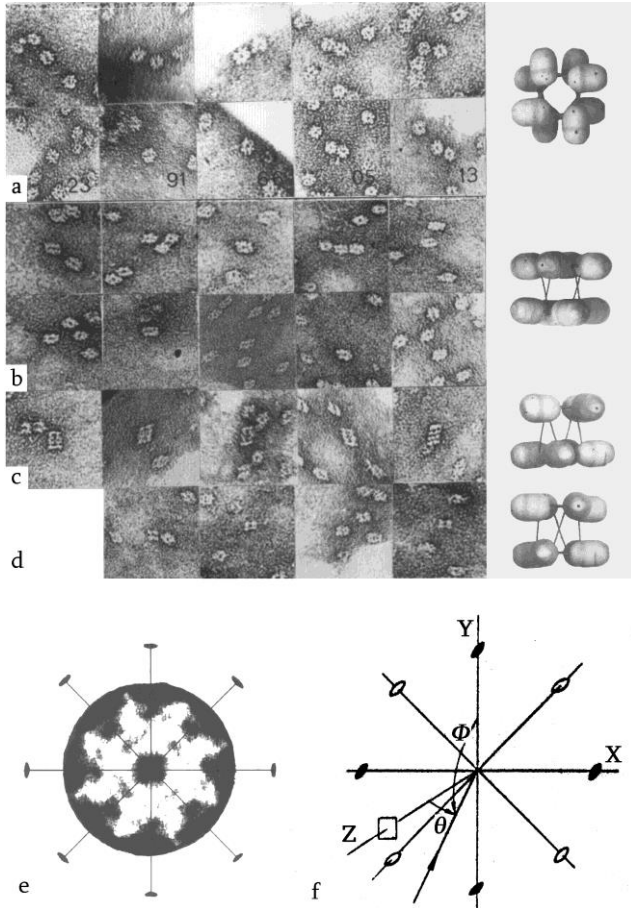
განვიხილოთ რიბულოზოდიფოსფატკარბოქსილაზის სტრუქტურა *Elymus (Psathyrostachys) junceus* ფოთლებიდან, რომლის მოლეკულური მასა 500 კდალ-ის ტოლია.

RuBisCO-ს პრეპარატის მიკროფოტოსურათებზე აღინიშნებოდა ნაწილაკების რამდენიმე დამახასიათებელი ტიპი. ერთ-ერთი მათგანი (სურ. 93a) წარმოადგენს 100 – 115  $\text{\AA}$  დიამეტრის მქონე, დაახლოებით მომრგვალო ფორმის ნაწილაკებს მცირე (10 – 15  $\text{\AA}$ ) ზომის მუქი ლაქით ცენტრალურ ნაწილში. ზოგჯერ ნაწილაკების პერიფერიაზე ვლინდება რვამდე მცირე ზომის შვერილი, რომლებიც, როგორც წესი, დაწყვილებულია ახლო მყოფ ერთეულებში. კუთხე წყვილ შვერილებს შორის შეადგენს  $\sim 40^\circ$ , ხოლო კუთხე ყოველ ოთხ წყვილს შორის  $90^\circ$ . ამრიგად ეს გამოსახულებები ხასიათდება სიმეტრიით 4m. ამ მოსაზრების შემოწმებისათვის და აგრეთვე უფრო მკაფიო გამოსახულების მიღების მიზნით, რამდენიმე ნაწილაკისათვის იყო გამოყენებული გამოსახულების შეჯამება დატრიალებით ცენტრალური წერტილის ირგვლივ. ამ წესით გასაშუალებული ერთ-ერთი ნაწილაკის გამოსახულება მოყვანილია სურ. 93e-ზე. გამოსახულება მიღებულია ფოტომეჯამებით დატრიალებით  $360^\circ/N$  კუთხეზე, სადაც  $N = 4$ .

გამოსახულებათა შემდეგ სამ ტიპს (სურ. 93b,c,d) მართკუთხედის მოხაზულობა გააჩნია. ყველა ეს გამოსახულება ხასიათდება ორი გრძივი ზოლით – ცილოვანი მატერიის „გამკვრივებით“. სამივე ტიპის ნაწილაკების სიგანე ერთნაირია — 65 – 70  $\text{\AA}$ , მაგრამ ისინი სიგრძით და გამოსახულების დეტალებით განსხვავდებიან. მართკუთხა ნაწილაკები სურ. 93b-ზე 100 – 115  $\text{\AA}$ -ის სიგრძისაა. თითოეული გრძივი ზოლი, ამ პროექციებში, ჩვეულებრივ სამი „სუბერთეულისაგანა“ შედგენილი. ამასთან შუაში მყოფი სუბერთეულები უფრო ნაკაფიოდ ვლინდება. გამოსახულებები ხასიათდება სიმეტრიით 2m.

სურ. 93c-ზე მოყვანილი ნაწილაკები განსხვავდებიან იმით, რომ გრძივი ზოლები გამოიყურება არაერთნაირად: ერთ ერთ მათგანში სამი „სუბერთეულია“ (ან წარმოგვიდგება როგორც უწყვეტი), მეორე კი ორი „სუბერთეულისაგან“ შედგება. სურ. 93d-ზე მოყვანილი ნაწილაკები წარმოგვიდგება მართკუთხედის წვეროებში მყოფი ოთხი

„სუბერთეულით“. მართკუთხედის სიგრძე დაახლოებით 85 Å-ია, სიგანე კი 65 – 70 Å. გამოსახულებები ხასიათდება სიმეტრიით 2m, და გამოსახულების ეს ტიპი სხვებთან შედარებით უფრო იშვიათია.



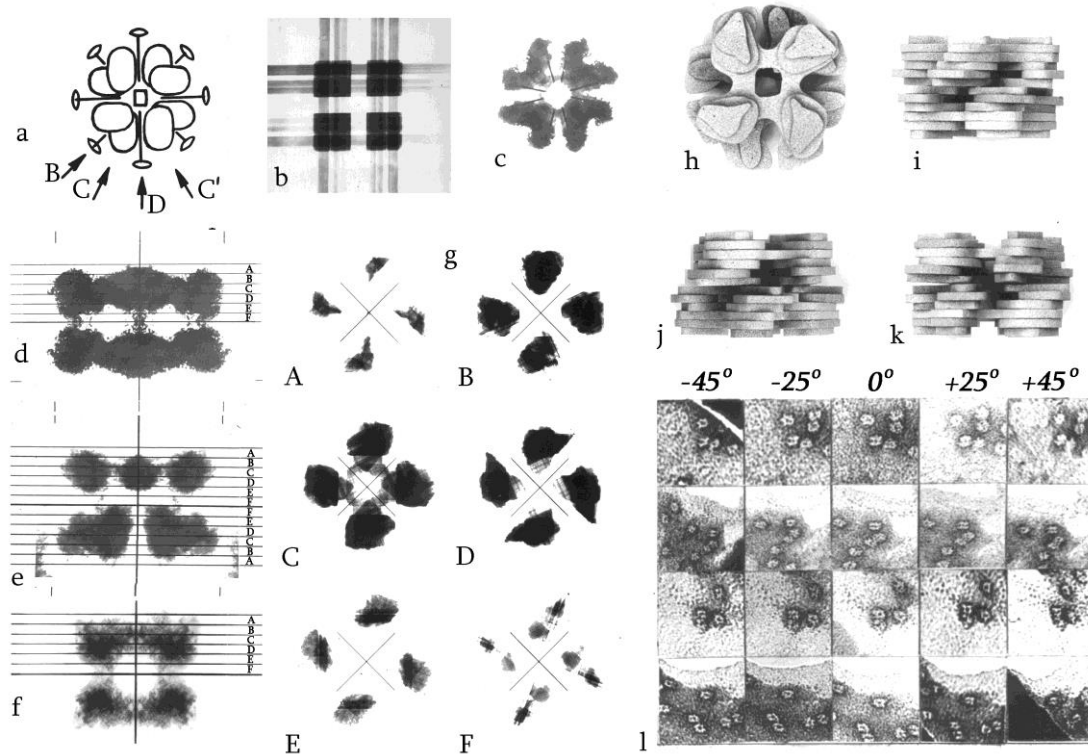
სურ. 93. RuBisCO-ს ნაწილაკების შენარჩევი სხვა და სხვა ორიენტაციებში: (a) მე 4-ე რიგის ღერძის გასწვრივ; (b,d) მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ; (c) ორი მე 2-ე რიგის ღერძების შუაში მყოფი მიმართულების გასწვრივ. მარჯვენა მხარეს მოყვანილია ჰიპოტეტური მოდელები შესაბამის ორიენტაციაში. (e) RuBisCO-ს ნაწილაკის პროექცია z ღერძის გასწვრივ, რომელიც გასაშუალებულია მე 4-ე რიგის ღერძის მიმართ ცენტრალური წერტილის ირგვლივ ბრუნვისას; პროექციაზე აღნიშნულია მე 2-ე რიგის ღერძები. (f) კოორდინატთა სისტემა, რომელზეც ილუსტრირებულია მოლეკულის სხვა და სხვა პროექციები; ცქერის მიმართულება მონიშნულია ისრით.

ლოგიკური იქნება იმის ვარაუდი, რომ გამოსახულების პირველი ტიპი შეესაბამება მოლეკულების ზედახედს, იმ დროს როდესაც დანარჩენი — მისი მე 4-ე რიგის ღერძის პერპენდიკულარული გვერდითი ხედებია. გვერდითი გამოსახულებების ხასიათი მიუთითებს მაკრომოლეკულის ორფენოვანობაზე. ყველაზე მეტად ალბათურია, რომ ყოველი ფენა შედგება ოთხი LS წყვილისაგან, რომლებიც ლაგდებიან მე 4-ე რიგის ღერძის მიმართ. ამოცანა მდებარეობს იმაში, რომ დეტალურად დავახასიათოდ ის, თუ როგორ ეწყობიან სუბერთეულები RuBisCO-ს მაკრომოლეკულაში.

სურ. 93a,b,c,d მარჯვენა მხარეს მოყვანილი RuBisCO-ს ჰიპოტეტური მოდელები აგებულია „სუბერთეულებისაგან“, რომელთა დიამეტრის სიგრძესთან შეფარდება = 1:1,5. სურ. 93e-ზე ნაჩვენებია ნაწილაკის ზედახედი, რომელიც მიღებულია გამოსახულების შეჯამებით ამავედროული ბრუნვით ცენტრალური ღერძის ირგვლივ მე 4-ე რიგის ღერძის მიმართ. სურ. 93f-ზე მოყვანილია კოორდინატთა სისტემა, რომელზეც ნაჩვენებია მოლეკულის სხვა და სხვა პროექციები (ისრით მითითებულია ცქერის მიმართულებები). მოყვანილი სურათების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნა. რვა LS დიმერი განლაგებულია 422 სიმეტრიით ორი კვადრატის წვეროებში, რომლებიც დატრიალებულია ერთმანეთის მიმართ 40°-ით საერთო მე 4-ე რიგის ღერძის ირგვლივ. შედეგად, ზედახედში სუბერთეულების ცენტრები არ ემთხვევა ერთმანეთს (სურ. 93a). ეს კი საშუალებას იძლევა აიხსნას წყვილ წყვილად დაახლივებული შვერილების არსებობა პირველი ტიპის ნაწილაკებში. მოდელი სურ. 93a-ზე განიხილება z ღერძის მიმართულებით ( $\theta = 90^\circ$ ). მიღებულია, რომ ამ დროს  $\Phi$  ასევე ნულის ტოლია.

z ღერძის პერპენდიკულარულად ( $\theta = 90^\circ$ ) ცქერისას,  $\Phi = 0$  მიმართულების გასწვრივ (სურ. 93f), რაც შეესაბამება B მიმართულებას სურ. 94a-ზე, მოდელი ემსგავსება მეორე ტიპის გამოსახულებებს (სურ. 93b), რომელზეც ორივე გრძივი ზოლი თითქოს სამი „სუბერთეულისაგან“ შედგება. ის რომ შუაში მყოფი „სუბერთეულები“ უფრო მკაფიოდ გამოიყურებიან, აიხსნება ამ პროექციაში ორი სუბერთეულის ზედდებით. სურ. 93c-ზე მოყვანილ მოდელზე, რომელსაც შეესაბამება  $\theta = 90^\circ$  და  $\Phi = 20^\circ$  მნიშვნელობები (სურ. 93f), ან C და C' მიმართულებები სურ. 94a-ზე, ის ემსგავსება მესამე ტიპის ნაწილაკებს (სურ. 93c). მართლაც, ამ შემთხვევაში მოდელის ერთი რიგი (ფენა) წარმოიქმნება ორი „სუბერთეულისაგან“, ხოლო მეორე – სამისგან.  $\theta = 90^\circ$ , და  $\Phi = 45^\circ$  მიმართულებით ცქერისას (სურ. 93f), რაც შეესაბამება D მიმართულებას სურ. 94a-ზე, მოდელი (სურ. 93d) ემსგავსება მეოთხე ტიპის ნაწილაკებს, რომელშიც თითო გრძივი ზოლი შეიცავს ორ „სუბერთეულს“.

RuBisCO მოლეკულის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციისათვის გამოყენებული იყო პროცირებადი ფუნქციების სინთეზის მეთოდი მათი ფოტოაჯამვის გზით. მეთოდის ეს „ოპტიკური“ ვარიანტი საკმაოდ ეფექტურია. სწორედ ამ მეთოდით იყო რეკონსტრუირებული ზემოდგანხილული ლეიციანამინოპეპტიდაზის მოლეკულაც.



სურ. 94. (a) RuBisCO მაკრომოლეკულის გრაფიკული წარმოსახვა მე 4-ე რიგის ღერძის გასწვრივ. ისრებით ნაჩვენებია ცქერის მიმართულება. (b) ფოტოშეჯამებით მიღებული ორგანზომილებიანი პროცირებადი ფუნქცია. (c) კვეთების (A–F) აჯამვა რეკონსტრუქციის შედეგების შემოწმების მიზნით. (d) გასაშუალებული პროექცია ერთ-ერთი მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ (მეორე ტიპის გამოსახულება). (e) გასაშუალებული პროექცია, რომელიც შეესაბამება მესამე ტიპის გამოსახულებას. (f) გასაშუალებული პროექცია ერთ-ერთი მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ (მეოთხე ტიპის გამოსახულება). (g) RuBisCO-ს სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია. ორგანზომილებიანი პროცირებადი ფუნქციების შეჯამების შედეგად მიღებული მოლეკულის კვეთები, რომლებიც იმყოფებიან სურათებზე d,e,f მონიშნულ დონეებზე. (h-k) RuBisCO-ს მოდელები შესაბამის პროექციებში. (l) RuBisCO-ს ნაწილაკები მიკროფოტოსურათები მიღებული ობიექტის სხვა და სხვა კუთხეზე დახრისას (მიკროსკოპზე ჰონიომეტრის გამოყენებით).

მე 4-ე რიგის ღერძის პეპენდიკულარული პროექციები წარმოქმნიან მე-2, მე-3 და მე-4 ტიპის გამოსახულებებს. მოლეკულის აზიმუტალური მდებარეობა (კუთხე  $\Phi$ ) საკმაოდ ხუსტადაა მოცემული, ვინაიდან, მოდელით რომ ვიმსჯელოთ, კუთხის მცირე გადახრაც კი ცვლის სპეციფიურ ზედდების სურათს. მეორე ტიპის გამოსახულებები (სურ. 93b) წარმოადგენენ მოლეკულის პროექციას ერთ-ერთი მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ. ამ გამოსახულებისათვის  $\theta = 90^\circ$ , და  $\Phi = 0$  (სურ. 93f). კონტრასტირების არაერთგვაროვნობის შესამცირებლად და სტრუქტურის ძირითადი დეტალების გასაძლიერებლად, სამი ნაწილაკის გამოსახულება ჯერ იყო აჯამებული ფოტომეთოდის ხერხით, შემდეგ კი აჯამებული მე 2-ე რიგის ღერძის ირგვლივ და სიმეტრიის სიბრტყის მიმართ დატრიალებით. შედეგად, მიღებული ამ პროექციაში მოლეკულის გამოსახულება ნაჩვენებია სურ. 94d-ზე. მოლეკულის სიმეტრიის გათვალისწინებით ის ორი პროექციის ეკვივალენტურია.

მესამე ტიპის ერთ-ერთი გამოსახულება (სურ. 93c), რომელიც წარმოადგენს მოლეკულის მე 4-ე რიგის ღერძის პეპენდიკულარულ პროექციას ( $\theta = 90^\circ$ ) და  $\Phi = 20^\circ$  კუთხით (იხ. სურ. 93f), იყო ფოტოაჯამების გამოყენებით გასაშუალებული პროექციის სიმეტრიის სიბრტყის მიმართ (სურ. 94e). მაგრამ ვინაიდან ეს პროექცია თავის ორ ფენაში ატარებს დამოუკიდებელ ინფორმაციას, ანუ იმის გამო, რომ ეს ორი ფენა დატრიალებულია ერთმანეთის მიმართ უკვე ცნობილ  $40^\circ$  კუთხეზე, ისინი ჰქმნიან ერთმანეთისაგან განსხვავებულ პროექციებს, და მოლეკულის სიმეტრიის გამო, მისი ეს პროექცია ოთხი პროექციის ეკვივალენტურია. უნდა აღინიშნოს, რომ პროექციის გასაშუალება სიმეტრიის სიბრტყის მიმართ ამცირებს კონტრასტირების არაერთგვაროვნობას და აძლიერებს სტრუქტურის ძირითად დეტალებს პროექციის დეტალების დაურღვევლად, ვინაიდან ამ პროექციის ორივე ფენას გააჩნია მე 2-ე რიგის სიმეტრიის ღერძი.

მეოთხე ტიპის გამოსახულება (სურ. 93d) წარმოადგენს მოლეკულის პროექციას ერთ-ერთი მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ. ამ გამოსახულებისათვის  $\theta = 90^\circ$ , და  $\Phi = 45^\circ$  (სურ. 93f). აქ, როგორც წინა შემთხვევებშიც, კონტრასტირების არაერთგვაროვნობის შესამცირებლად და სტრუქტურის ძირითადი დეტალების გასაძლიერებლად, ჩატარდა გასაშუალება ფოტოაჯამების გამოყენებით პროექციის მე 2-ე რიგის ღერძის ირგვლივ და პროექციის სიმეტრიის სიბრტყის მიმართ. ამის გარდა, ამ შემთხვევაში ფოტოაჯამების მეშვეობით გასაშუალდა ამ პროექციაში მყოფი ორი ნაწილაკის გამოსახულება. მაშ ასე, მიღებული სურ. 94f-ზე გამოსახულება, თავისი სიმეტრიის გამო, მოლეკულის ორი პროექციის ეკვივალენტურია. ასე რომ, სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია საბოლოო ჯამს განხორციელდა რვა პროექციის საფუძველზე. ვინაიდან მოლეკულის ორი ნახევარი დაკავშირებულია ერთმანეთთან მე 2-ე რიგის ღერძების მეშვეობით, მოლეკულის სტრუქტურის აღდგენა მიმდინარეობდა მხოლოდ მისი ერთი ნახევრისათვის.

რეკონსტრუქციისათვის სულ ექვსი ერთი სიგანის ზოლი (A-F) იყო გამოყენებული, რომლებიც შეესაბამებოდა კვეთების ერთგანზომილოვან პროექციებს. ცილების პროექციების ყოველი ზოლი იყო წრფიულად „გადლაზნილი“ ორგანზომილოვან პროეცირებად ფუნქციებში (სურ. 94b) ფოტოგამადიდებელზე ბეჭდვისას სპეციალური ურიკის მეშვეობით, რომელსაც პატარა ელექტროძრავა ამუშავებდა. ორგანზომილებიანი პროეცირებადი ფუნქციების ზედდება პროეცირების მიმართულების გასწვრივ ხორციელდებოდა ფოტოანაბეჭდის დატრიალებით შესაბამის კუთხეზე მე 4-ე რიგის ღერძის ირგვლივ. ყოველი პროექციისათვის მიღებული ორგანზომილოვანი პროეცირებადი ფუნქციების ზედდების სურათები, რომლებიც იყო მიღებული ერთ დონეზე მყოფი კვეთებისათვის, რეკონსტრუქციის შედეგების შემოწმების მიზნით, იყი პროეცირებული ერთმანეთზე შესაბამისი კუთხეზე დატრიალებით (იხ. სურ. 94c). მოდელის აგებაზე გადასვლისათვის

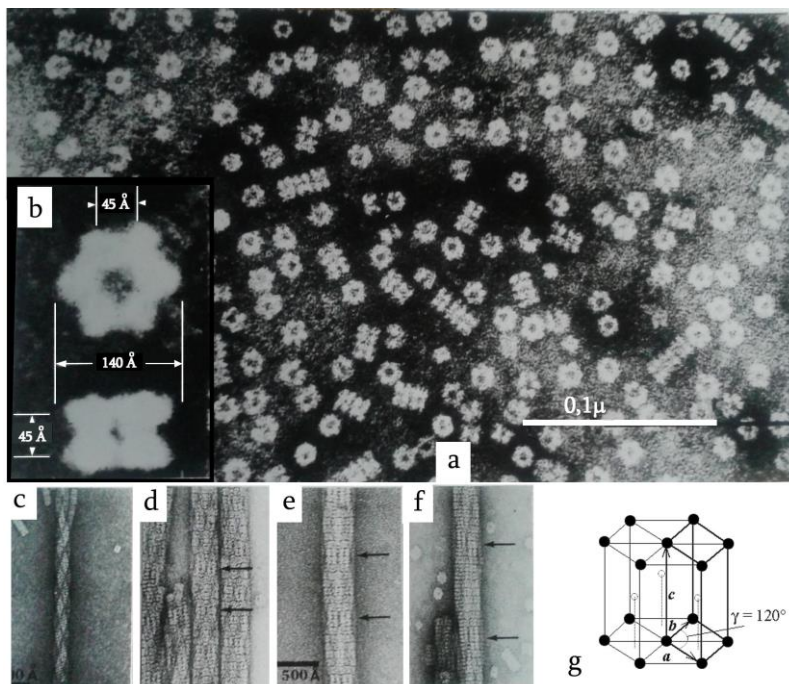
შეჯამებული კვებების საზღვრები (სურ. 94გ) მაქსიმალურად გაშავებულ უბნებზე იყო შემოხაზული.

RuBisCO მოლეკულის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის შედეგად მიღებული მოდელი მოყვანილია სურ. 94(h-k)-ზე. ამ მოდელში შეიძლება რვა რთული ფორმის „სუბერთეულის“ გამოყოფა. ლოგიკური იქნება ვივარაუდოთ, რომ ისინი წარმოადგენენ LS დიმერებს, მაგრამ გარჩევის არსებულ დონისათვის (~20-30 Å) იმის დადგენა თუ რომელი იქნება დიდი სუბერთეული და რომელი პატარა, შეუძლებელია. დიმერები, როგორც ადრე უკვე იყო აღნიშნული, ორ ფენად არიან დალაგებული. ყოველ ამ ფენაში დიმერები ეკონტაქტებიან ერთმანეთს (C და D კვებები). ფენების კონტაქტი ხორციელდება F კვებაში. მე 4-ე რიგის ღერძზე მთელ მოლეკულაში გადის არხი, რომელიც ვიწროვდება C კვებაში 15 Å-მდე.

ერთი გვერდითი პროექციიდან მეორეში გადასვლის კუთხეების სწორი არჩევანის კიდევ ერთი დასტური იყო ობიექტის გადაღება პროექციების სხვა და სხვა კუთხით, ელექტრონული მიკროსკოპის სპეციალური ჰონიომეტრული მისადგამით. ერთსა და იმავე ობიექტს უღებენ სურათს ობიექტის დახრისას კუთხეებზე:  $-45^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $0$ ,  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$ . ასეთი ოპერაციის შედეგები მოყვანილია სურ. 94 l-ზე.

## 12 სუბერთეულიანი ცილა.

*E.coli*-ის გლუტამინსინტეტაზაში (GS) (მოლ. მასა 600 000) 12 სუბერთეული განლაგებულია ჰექსაგონალური პრიზმის წვეროებში სიმეტრიით 62. ნეგატიურად კონტრასტირებული პრეპარატის მიკროფოტოსურათებზე აღინიშნება ნაწილაკთა პროექციების სამი ტიპი (იხ. სურ. 95a). ამ პროექციების ზედახედში აღინიშნება 6 სუბერთეული. ამასთან ერთად, სიმეტრიის დასაზუსტად და სტრუქტურის დეტალების გამოსაკვებად, აქაც იყო გამოყენებული გამოსახულებების გასაშუალების სპეციალური მეთოდი. ანალოგიურად მოქმედებდნენ გვერდითი პროექციების შემთხვევაშიც და მიიღეს სტრუქტურის მკაფიო, გადიდებული გამოსახულებები სამ ძირითად პროექციაში (სურ. 95b). მოლეკულის დიამეტრი 140 Å, სიმაღლე 90 Å. სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფი 622, ანუ  $D_6$  ნიშნავს მე 6-ე რიგის სიმეტრიის ღერძის და მის პერპენდიკულარულ ექვს მე 2-ე რიგის სიმეტრიის ღერძების არსებობას.



სურ. 95. (a) *E.coli*-ის GS-ის მიკროფოტოსურათი. (b) ორი პროექციის გადიდებული და გასაშუალებული გამოსახულება: მე 6-ე რიგის სიმეტრიის ღერძის გასწვრივ და ერთ-ერთი მე 2-ე რიგის სიმეტრიის ღერძის გასწვრივ. (c-f) GS-ის მოლეკულების წარმონაქმნები, რომლებსაც „ზაგირები“ უწოდეს. (c) ზაგირი, რომელიც GS-ის სამი ძაფისაგან შედგება. დახვევის კუთხე  $\alpha = 20^\circ$ . (d-f) ზაგირები, რომლებიც შეიქმნა GS-ის ჰექსაგონის წვეროებში ექვსი მოლეკულის მოთავსებით და ცენტრში მეშვიდე მოლეკულის ჩასმით. ანუ ფენაში იმყოფება 6+1 ტიპის სტრუქტურა, რომელიც იხვევა „ზაგირში“. თანაც ეს სამი ვარიანტი განსხვავდება ერთმანეთისაგან დახვევის კუთხით: (d)  $\alpha = 10,5^\circ$ ; (e)  $\alpha = 7,5^\circ$ ; (f)  $\alpha = 5,5^\circ$ . (g) ჰექსაგონის სქემატური გამოსახულება.

აგრეთვე აღინიშნება GS-ის კრისტალები, რომლებიც მიიღებოდა ცილის პრეპარატში (0,01 M იმიდაზოლური ბუფერი, pH 7,0) 5 mM MnCl დამატებისას. ხუთ წუთში იწყებოდა მოლეკულების ტორსებით აგრეგირება ღერძისებრივი სტრუქტურების შექმნით, რომლებშიც ათამდე მოლეკულა შედიოდა. 30 წუთში აღინიშნებოდა ღერძების აგრეგირება უფრო რთულ სტრუქტურებში.

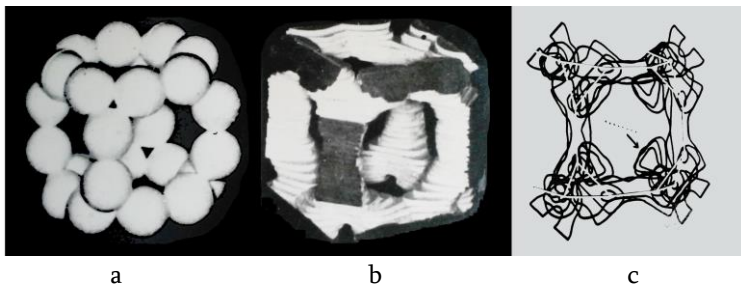
მოგვიანებით აღმოჩნდა, რომ *E.coli*-ის GS-ის პრეპარატის ხსნარში ორვალენტური კათიონების დამატებისას (მაგალითად, 10 mM  $Co^{2+}$ ), უკანასკნელი პოლიმერიზდება და ჰქმნის ეგრე წოდებულ „ბაგირებს“. ოპტიკური დიფრაქციის და სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მეთოდებით იყო ნაჩვენები, რომ შესაძლოა ბაგირების ორი ვარიანტი. პირველ ვარიანტში ბაგირი წარმოიქმნება სამი GS-ის მოლეკულის დახვევისას (სურ. 95c). მეორე ვარიანტში GS-ის ექვსი მოლეკულა თავსდება ჰექსაგონის წვეროებში რომლის ცენტრშიც მეშვიდე მოლეკულა იმყოფება (სურ. 95g). ანუ ფენაში იმყოფება 6+1 ტიპის სტრუქტურა, რომელიც იხვევა „ბაგირში“. თანაც ეს სამი ვარიანტი განსხვავდება ერთმანეთისაგან დახვევის კუთხეებით: (d)  $\alpha = 10,5^\circ$ ; (e)  $\alpha = 7,5^\circ$ ; (f)  $\alpha = 5,5^\circ$ . ყველა შემთხვევაში აღინიშნება მარჯვნივშემავლიანი სპირალი.

*Bacillus subtilis*-ის GS-ის შემთხვევაში (600 000) ეს მოლეკულაც სუბერთეულებად (მოლ. მასით 50 000) დისოცირებს. საინტერესოა, რომ მოცემულ შემთხვევაში GS-ის სტრუქტურა ჰგავს *E.coli*-დან მიღებულ GS-ის სტრუქტურას. ანუ, აღინიშნება 12 სუბერთეული, რომლებიც ექვს ექვსად თავსდება ერთმანეთის თავზე მყოფ ჰექსაგონებში. ანუ, ამ შემთხვევაშიც მოლეკულის სიმეტრია – 622.

უნდა აღინიშნოს, რომ სხვა წყაროდან მიღებული GS-ის სტრუქტურები ძალიან განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. *Candida utilis*-ის GS-ის მოლეკულა (394 000) შედგება რვა სუბერთეულისაგან (თითო 45 500), ანუ სუბერთეულები მოთავსებულია კუბის წვეროებში. სოიოს ფესვების ტუბერების ციტოზოლიდან მიღებული GS-ის შემთხვევაში, ანუ მცენარეული უჯრედიდან, მისი მოლეკულური მასა შეადგენს 360 000 და ის შეიცავს რვა სუბერთეულს (თითოეულის მოლ. მასით 47 300). სტრუქტურა კი *Candida utilis*-ის GS-ის ანალოგიურია, ანუ აქაც სუბერთეულები განლაგებულია კუბის წვეროებში.

### პოლიფუნქციონალური ფერმენტული კომპლექსები.

ასეთი ტიპის სისტემები შედგება სხვა და სხვა ფერმენტების სუბერთეულებისაგან, რომლებიც სივრცულად ისეთნაირად ლაგდებიან, რომ უზრუნველყოფენ რამდენიმე თანმიმდევრობითი რეაქციის კატალიზს.



სურ. 96. პირუვატდეჰიდროგენაზული და  $\alpha$ -კეტოგლუკორატდეჰიდროგენაზული კომპლექსების (*E.coli*) ლიპოილტრანსაქეტაზური ბირთვი. (a) ბურთულების, მარტივი მოდელი, და (b) სამგანზომილებიანი ელექტრონული მიკროსკოპის მეთოდით აგებული მოდელი. (c) რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი (10 Å-ის გარჩევით).

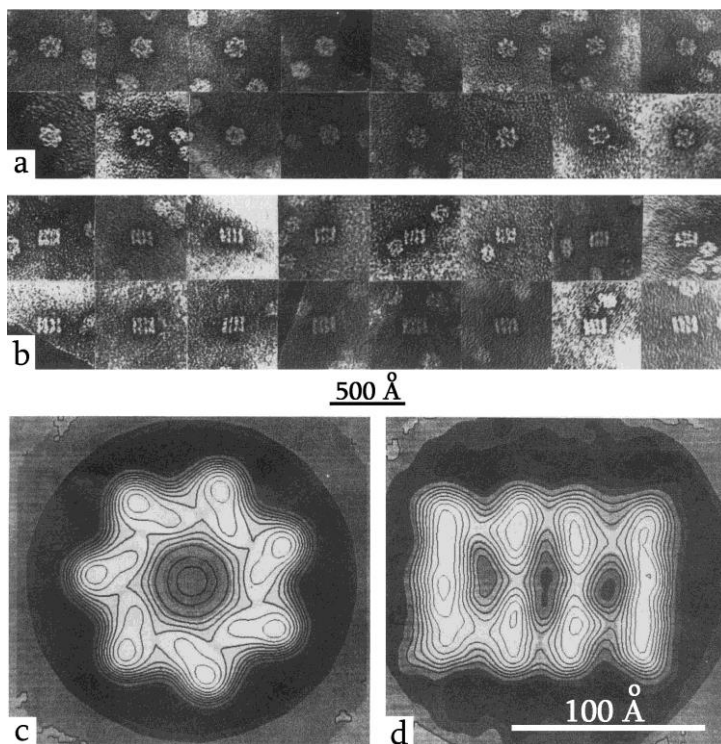
ელექტრონული მიკროსკოპის მეთოდით შესწავლილია *E.coli*-ის პირუვატდეჰიდროგენაზული და  $\alpha$ -კეტოგლუკორატდეჰიდროგენაზული კომპლექსები. ყოველი კომპლექსი შედგება ე.წ. ლიპოილტრანსაქეტაზის ან ლიპოილტრანსსუქცინელაზის ბირთვისაგან, რომლის გარშემო ლაგდება ორი სხვა ფერმენტის სუბერთეულები. უმარტივეს, ბურთულებიან მოდელზე (სურ. 96a) ჩანს, რომ ბირთვი შედგება 24 სუბერთეულისაგან, რომლებიც სამ სამად კუბის 8 წვეროშია მოთავსებული. აქ რეალიზდება სიმეტრიის

წერტილოვანი ჯგუფი 432. სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მეთოდით მიღებულ მოდელებზე, ცილოვანი მატერია თითქოს კუბის წიბოებს მისდევს, იმ დროს როდესაც კუბის წახნაგების ცენტრები – ცარიელია. ეს მონაცემები იყო დაზუსტებული და დადასტურდა რენტგენოსტრუქტურული ანალიზით ( $10 \text{ \AA}$  გარჩევადობით). ბირთვი თითქოს და კომპლექსის კარკასს, მის ორგანიზატორს წარმოადგენს. პირუვატდეკარბოქსილაზის 12 და ლიპოილდეჰიდროგენაზის 6 მოლეკულა განლაგდება კუბური ნაწილაკის გარედან შესაბამისად მის 12 წიბოზე და 6 წახნაგზე.

ფერმენტების მეოთხეული სტრუქტურის ანალიზირებისას შეიძლება აღინიშნოს, რომ ხშირად, ფერმენტები რომლებსაც განსხვავებული ბიოლოგიური თვისებები გააჩნიათ, მეოთხეული სტრუქტურის დონეზე ერთნაირად გამოიყურებიან. და პირიქით, ერთი და იგივე დანიშნულობის, მაგრამ სხვა და სხვა წყაროდან მიღებულ ფერმენტებს შეიძლება ჰქონდეთ სუბერთეულების განსხვავებული რაოდენობა და სხვაგვარი სივრცული სტრუქტურაც. მაგალითად, სხვა და სხვა წყაროდან მიღებული გლუტამინ-სინთეტაზა შედგება სუბერთეულების სხვა და სხვა რაოდენობისაგან.

#### 14 სუბერთეულებიანი ცილა.

ეს მაგალითი განიხილება პოლიფუნქციონალური ფერმენტული კომპლექსების შემდეგ იმის გამო, რომ მისი აქტივობა ვლინდება ჩვენს მიერ უკვე განხილულ ცილასთან – რიბულოზოდიფოსფატდეკარბოქსილაზასთან (RuBisCO) კომპლექსში.



სურ. 97. ბარდის ფოთლებიდან მიღებული მაღალმოლეკულური gro EL-მაგვარი ცილის მიკროფოტოსურათები. ნეგატიური კონტრასტირება 2%-ანი ურანილაცეტატის ხსნარით. გამოსაკვლევი ნაწილაკები ხასიათდებიან სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფით 72. წინამდებარე შენარჩევში მოყვანილია დამახასიათებელი პროექციები: (a) ფრონტალური – მე 7-ე რიგის ბრუნვის ღერძის გასწვრივ; (b) გვერდითი – მე 2-ე რიგის ღერძის გასწვრივ. (c,d) მიკროფოტოსურათების გასაშუალება ორ დამახასიათებელ პროექციაში. იზოხაზები უჩვენებენ განსხვავებული სიმკვრივის უბნებს და მკაფიოდ გამოყოფენ მე 7-ე რიგის ბრუნვის ღერძს. (c) ჩანს ცილის მაქსიმალური სიმკვრივის 7 უბანი 7-ქიმიანი ვარსკვლავის კუთხეებში. (d) გასაშუალებულ მიკროფოტოსურათზე ცილოვანი მატერიის უმაღლესი სიმკვრივეები პარალელურ ფენებშია განლაგებული და ავლენენ მე 2-ე რიგის სიმეტრიის ღერძს.

ცნობილია, რომ ოლიგომერული სტრუქტურის (RuBisCO) შექმნისათვის საჭიროა სპეციფიური, E.coli-ს gro EL-მაგვარი ცილის მონაწილეობა. გამოიკვლიეს RuBisCO-ს მეოთხეული სტრუქტურის კომპლექსი gro EL-მაგვარი უმაღლესი მცენარეების ცილასთან და აჩვენეს, რომ მაღალმოლეკულური ცილის უმეტესი რაოდენობა ჰქმნის კომპლექსს ფერმენტთან. RuBisCO-ს და მაღალმოლეკულური ცილის კომპლექსის დამახასიათებელი პროექციების კვლევა ავლენს მათ შორის არსებული კავშირის სპეციფიურობას. აღნიშნული ცილა უკავშირდება ფერმენტის ერთ, ორ და მეტ მოლეკულას. რაც ეხება თვით მაღალმოლეკულურ gro EL-მაგვარ პრეპარატს, მის მიკროფოტოსურათებზე ვლინ-



დება ორი ძირითადი პროექცია (იხ. სურ. 97a,b). ფრონტალურ პროექციაში (სურ. 97a) მათ აქვთ შვიდქიმიანი ვარსკვლავის სახე დიამეტრით დაახლოებით 130 Å, ხოლო გვერდითაში (სურ. 97b) – მართკუთხედის (130 x 90 Å), მისი მოკლე გვერდის პარალელური ოთხი ღია ფერის ზოლით. აღწერილი ცილა ხასიათდება სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფით 72 და შედგება 14, როგორც ჩანს იდენტური სუბერთეულისაგან, რომლებიც ორ ფენად არიან განლაგებული.

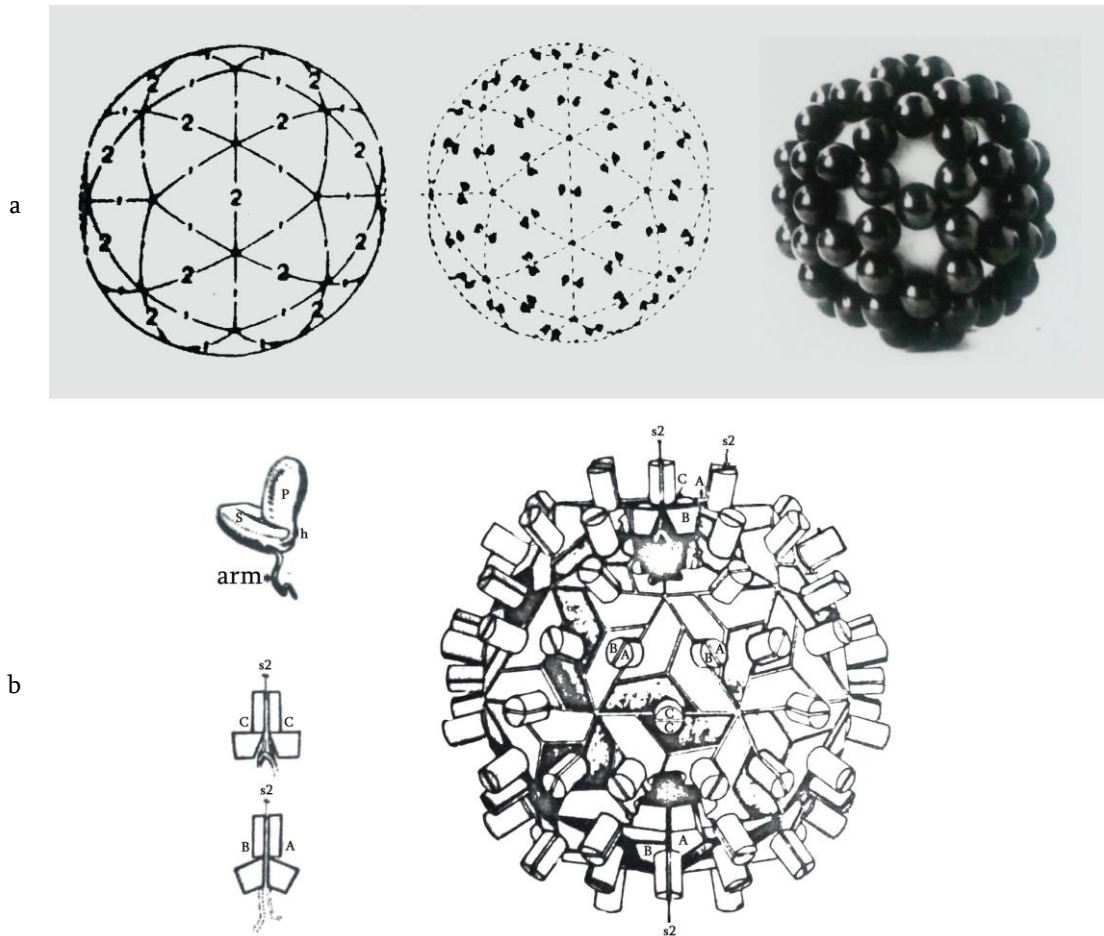
ზემოაღნიშნულ დამახასიათებელ პროექციებში ჩატარდა მიკროფოტოსურათების გასაშუალება (სურ. 97c,d). იზოხაზები ავლენენ განსხვავებული სიმკვრივის მქონე უბნებს და მიანიშნებენ მე-7-ე რიგის ბრუნვის ღერძს (სურ. 97c). ჩანს ცილის მაქსიმალური სიმკვრივის 7 უბანი შვიდქიმიანი ვარსკვლავის კუთხეებში. სურ. 97d-ზე მოყვანილ გასაშუალებულ მიკროფოტოსურათზე ცილის მატერიის მაქსიმალური სიმკვრივეები განლაგდებიან პარალელურ ფენებში და ავლენენ სიმეტრიის მე-2-ე რიგის ღერძს. მიღებული გამოსახულებები ადასტურებენ ადრე გაკეთებულ დასკვნებს ცილის ორფენოვანი სტრუქტურის შესახებ, რომელშიც ცილის 14 სუბერთეული განლაგდება სიმეტრიით 72.

განხილული სტრუქტურა საინტერესოა კიდევ სუფთა მეთოდური თვალსაზრისით. საქმე იმაშია, რომ საკმაოდ ხშირად წარმოიშვება ისეთი სიტუაცია, როდესაც გამოსაკვლევი სტრუქტურა არ ხასიათდება სპირალური სიმეტრიით, ანუ არ შეიძლება ნაწილაკების სხვა და სხვა პროექციების დაკავშირება გარკვეული მათემატიკური შეფარდებების მეშვეობით. მაგრამ ეს სულაც არ ნიშნავს, რომ ასეთი გამოსახულებების დამუშავება შეუძლებელია. აქ საჭიროა გამოსახულების დამუშავების სპეციალური მიდგომის გამოყენება – კორელაციის მეთოდის. მეთოდის არსი – ესაა პირდაპირ სივრცეში ჩატარებული გამოსაკვლევი ნაწილაკის გამოსახულებების სუპერპოზიცია კონკრეტულ, წინასწარ განსაზღვრულ პროექციაში. ამისათვის გამოსაკვლევი მიკროფოტოსურათები (მათი ანალოგური გამოსახულება) მიკროდენსიტომეტრის მეშვეობით გადაიყვანება ციფრულ ფორმატში, ისე რომ სკანირების ბიჯი (ობიექტის დონეზე) შეადგენდეს 5 Å. შემდეგ, გამოსახულების ანალიზის სისტემის მქონე სპეციალური პროგრამების მეშვეობით სრულდება მათი კორელაცია. ამისათვის, ინტერაქტიურ რეჟიმში დენსიტომეტრირებული მიკროფოტოსურათებიდან სპეციალურ საკონტროლო „საცერზე“ (პროგრამის ინტერფეისი) ხდება ცალკეული ნაწილაკების გამოსახულებების ამორჩევა. ამორჩეულ გამოსახულებებზე, ფონის მოშორების მიზნით, დაედება წრიული „მასკა“, ხოლო ამ „მასკის“ ფარგლებში მყოფი გამოსახულების საშუალო სიმკვრივე ნულდება (შეიცვლება ნულებით), იმისათვის რომ მოხდეს სიმკვრივის დისპერსიის ნორმალიზება. და მხოლოდ ამის შემდეგ ტარდება გასაშუალება კორელაციური მეთოდით.

### **14.3. სფერული და ჩხირისებრივი ვირუსების გარსი.**

ეხლა კი განვიხილოთ ობიექტი, რომელიც ფუნქციონალურად მკვეთრად განსხვავდება ფერმენტებისაგან — სფერული და ჩხირისებრივი ვირუსების გარსის მეოთხეული სტრუქტურა. ჯერ კიდევ უოტსონმა ტა კრიკმა იწინასწარმეტყველეს, რომ მცირე ზომის სფერული ვირუსების გარსები შედგება ერთნაირი ცილის სუბერთეულებისაგან და ხასიათდებიან იკოსაედრული სიმეტრიით 532. შემდგომში ეს მოსაზრებები დადასტურდა და ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდით იყო დადგენილი ბევრი იკოსაედრული კაფსულის მქონე ვირუსის სტრუქტურა. ამ კვლევებში დიდი ღვაწლი მიუძღვის ა.კლუგს, რომელმაც კერძოდ უჩვენა, რომ ერთნაირი სუბერთეულებისაგან სფერული გარსის ფორმირება შეიძლება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ დაუშვით მცირე გადახრები ამ სუბერთეულების გარემოცვის ეკვივალენტურობაში. მაგალითად, თალგამის ყვითელი მოზაიკის ვირუსის გარსი (სურ. 98a) აგებულია ცილის ერთნაირი სუბერთეულებისაგან,

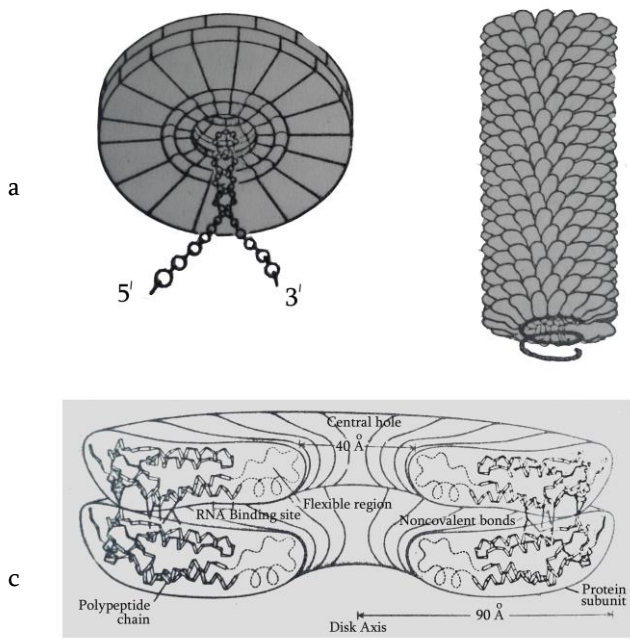
რომლებიც გარსის ზედაპირზე პენტამერებში და ჰექსამერებში ეწყობიან. ამ სუბერთეულების მდებარეობა პენტამერებში და ჰექსამერებში რამდენადმე განსხვავდებიან, ამბობენ, რომ ისინი იმყოფებიან ფსევდოეკვივალენტურ გარემოცვაში.



სურ. 98. (a) თაღამის ყვითელი მოზაიკის ვირუსის გარსი აგებულია ცილის ერთნაირი სუბერთეულები-საგან, რომლებიც აფორმირებენ პენტამერებს და ჰექსამერებს. (b) ტომატის ბუჩკოვანი ჯუჯობის ვირუსის გარსი. სუბერთეულები აგებულია ორი ხისტად ჩახვეულ დომენისაგან (S და P), რომლებიც h შარნირის მეშვეობით უკავშირდებიან ერთმანეთს.

სუბერთეულების პენტამერებში და ჰექსამერებში გაერთიანება არ წარმოადგენს სფერული გარსების ფორმირების ერთადერთ შესაძლებლობას. ტომატის ბუჩკოვანი ჯუჯობის ვირუსში, სუბერთეულები დიმერებს ჰქმნიან. ეს დიმერები კვლავ იმყოფებიან ერთმანეთის მიმართ კვაზიეკვივალენტურ მდებარეობაში: ერთი იმყოფებიან ჰექსამერიტ მე-2-ე რიგის ღერძებზე, მეორე კი – ფსევდოღერძებზე (სურ. 98b). წარმოიქმნება მნიშვნელოვანი სტრუქტურული კითხვა: როგორ მიიღწევა ერთნაირი ცილის სუბერთეულების ფსევდოეკვივალენტური ჩალაგება ვირუსის გარსში. რანაირად სუბერთეულების ერთი და იგივე ტიპი ახერხებს თავის მეზობლებთან ოდნავ განსხვავებული კავშირების შექმნას. ამ ვირუსის რენტგენოსტრუქტურულმა კვლევებმა, რომლებიც ჩატარდა 2,9 Å გარჩევადობით, შესაძლებელი გახადა ამ კითხვაზე პასუხის მიღება. აღმოჩნდა, რომ ვირუსის სუბერთეულები აღწევენ ასეთ მოქნილობას იმის გამო, რომ ისინი აიწყობიან შარნირით დაკავშირებული ორი ხისტად ჩახვეული დომენისაგან. სურ. 98b-ზე ეს დომენები აღნიშნულია როგორც P (“projection”) და S (“shell”). არსებობს დომენტაშორისი შარნირის ორი მდგომარეობა. A/B კონფიგურაცია (კონფიგურაცია, რომელშიც სუბერთეულები უკავშირდება ერთმანეთს ადგილობრივი მე-2-ე რიგის ღერძის მიმართ) და

C/C კონფიგურაცია (ჭეშმარიტი მე 2-ე რიგის ღერძის მიმართ) რომელშიც მიმდინარეობს ჭეშმარიტი გადაორიენტირება  $20^{\circ}$ -ით ერთიდან მეორეში გადასვლის დროს. ყოველ სუბერთეულს N-ბოლოზე მოქნილი ჯაჭვი (“arm”) გააჩნია. C - სუბერთეულებში ეს ჯაჭვები შეიცავენ 33 ამინომჟავის ნაშტს, ხოლო A ან B სუბერთეულებში — 80 – 90 ნაშტს. P-დომენი შედგება ორი  $\beta$ -შრისაგან: ერთში 6 ჭიმია, მეორეში კი – 4. S-დომენი ასევე შედგება ძირითადად  $\beta$ -შრებისაგან და ორი მოკლე  $\alpha$ -სპირალისაგან. შარნირი (h) შეიცავს მხოლოდ ორ ან სამ ამინომჟავის ნაშტს. სუბერთეულების ყველაზე საუცხოო თავისებურებას წარმოადგენს N-ბოლოების კონფიგურაცია. C-სუბერთეულებში პოლიპეპტიდური ჯაჭვი ტრიალდება და გაყვება დომენის შიდა კიდეს. მე 3-ე რიგის ღერძთან მიახლოებისას, ჯაჭვი დაეხვევა ამ ღერძს საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით. აქვე მოდის კიდევ ორი ასეთივე ჯაჭვი. ერთობაში ისინი  $\beta$ -ანულუსს ჰქმნიან. რაც შეეხება A და B სუბერთეულების N-ბოლოებს, ითვლება რომ მათ შეიძლება რამდენიმე შესაძლო ორიენტაცია გააჩნდეს, და რომ სწორედ ისინი უკავშირდებიან RNA-ს.



სურ. 99. თამბაქოს მოზაიკი ვირუსი (*Tobacco mosaic virus, TMV*). (a) შუალედური აგრეგატი, რომელიც წარმოიქმნება ვირუსის აწყობისას, ეგრედ წოდებული დაწყვილებული დისკო (20 s-აგრეგატი). (b) დაწყვილებული დისკოები აგრეგირებენ ერთმანეთთან და აყალიბებენ ჩხირისებრივ ნაწილაკებს. (c) 2,8 Å გარჩევის რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის მონაცემებით, დისკოების კალიცოები ეკონტაქტებიან ერთმანეთს მხოლოდ დიდ რადიუსებზე.

სრულიად სხვა ტიპის მეოთხეული სტრუქტურა აღინიშნება ჩხირისებრივ ვირუსებში. კარგად არის შესწავლილი თამბაქოს მოზაიკის ვირუსი (*Tobacco mosaic virus, TMV*). ის წარმოადგენს ჩხირისებრივ 3 000 Å სიგრძის და 180 Å დიამეტრის ნაწილაკს. სუბერთეულები სპირალურად 23 Å ბიჯით არიან ჩალაგებული, ხოლო ნაწილაკის ღერძის გასწვრივ, მის ცენტრში აღინიშნება გრძივი არხი. ვირუსის აწყობისას, შუალედური აგრეგატის სახით წარმოგვიდგება ე.წ. დაწყვილებული დისკო (20 s-აგრეგატი). დისკო ორი 17 სუბერთეულიანი კალიცოსაგან შედგება (სურ. 99a). დაწყვილებულ დისკოებს შეუძლიათ ერთმანეთთან აგრეგირება და ჩხირისებრივი ნაწილაკების შექმნა (სურ. 99b). შემდეგ, კარბოქსილურ ჯგუფებზე ორი პროტონის მიერთებისას დისკური სტრუქტურა გადაეწყობა სპირალურში. პროტონები, ამ შემთხვევაში, შეიძლება განიხილოს როგორც ალოსტერული ეფექტორი.

2,8 Å გარჩევით ჩატარებულმა რენტგენოსტრუქტურულმა ანალიზმა უჩვენა, რომ კალიცოები დისკოებში ეკონტაქტებიან ერთმანეთს მხოლოდ დიდ რადიუსებზე, იმ დროს როდესაც ცენტრისკენ მიმართული სუბერთეულის ბოლოები გაყოფილია და ჰქმნიან „ყბებს“, რომლებიც მზად არიან RNA-სთან ურთიერთობისათვის (სურ. 99c). აწყობა ინიცირდება დისკოს შუანაწილში RNA-ს შეყვანით, რომელიც სარჭის მაგვარად

არის შეკეცილი. სარჭის ბოლოზე იმყოფება ნუკლეოტიდური თანმიმდევრობა, რომლის-თვისაც განსაკუთრებულად ხელსაყრელია TMV-ის ცილასთან დაკავშირება. სარჭესთან ურთიერთობის შემდეგ, დისკოების კალიცოს მაგვარი განლაგებას სპირალური შეცვლის, ხოლო „ყბები“ შეიკვრება ცილასთან დაკავშირებულ RNA-სთან. ცილის მოქნილი უბნები მცირე რადიუსებზე იძენენ მოწესრიგებულ ხასიათს. ამრიგად, აღნიშნულ შემთხვევაში ალოსტერული ეფექტორის როლს თამაშობს RNA.

ამ გარდაქმნების დროს ცილოვანი კონტაქტები სუბერთეულებს შორის შენარჩუნებულია, იმ დროს როდესაც ღერძისებრივი კონტაქტები პირიქით, სრულიად იცვლება. აწყობის საწყის სტადიებზე დაცულია RNA-ს განსაკუთრებული უბანი, რომელიც 3' ბოლოს 1000 ნუკლეოტიდითაა დაშორებული. სწორედ რომ ეს უბანი წარმოადგენს იმ სარჭს, რომელზეც ჩვენ ზემოთ გვქონდა საუბარი. ნუკლეოტიდური თანმიმდევრობა ყულფთან ახლომდებარე უბანში TMV ცილის გენის ნუკლეოტიდური თანმიმდევრობის ჰომოლოგიურია. ადრე იყო ნაჩვენები, რომ ამ გენს გააჩნია TMV-ის ცილასთან კავშირის შექმნის შესაძლებლობა. TMV-ის მზარდი ღეროების მიკროფოტოსურათებზე ერთი მხრიდან მოჩანს RNA-ს ორი დაბოლოვება. ერთ-ერთი დაბოლოვება (5') გაივლის ფორმირებადი ვირუსული ნაწილაკის „ნახვრეტში“.

იმის შემდეგ რაც ჩვენ თითქოს და გავერკვიეთ ცილოვანი სისტემების სტრუქტურულ იერარქიაში და განვიხილეთ ცილების მეოთხეული სტრუქტურის ორგანიზება მისი გართულების მიხედვით დალაგებისას, დარჩა მთელი კლასი ჩვენს მიერ აღურიცხავი სტრუქტურებისა. ნაწილობრივ, ამ სახის წარმონაქმნებზე ჩვენ უკვე გვქონდა საუბარი E.coli-ს გლუტამინსინთეტაზის მეოთხეული სტრუქტურის განხილვისას. უფრო ზუსტად კი ზესტრუქტურული წარმონაქმნებზე საუბრისას, რომლებიც ჩვენს მიერ იყო იდენტიფიცირებული როგორც „ბაგირები“. საქმე იმაში მდგომარეობს, რომ გლუტამინსინთეტაზას უკვე გააჩნია მეოთხეული სტრუქტურა. ამიტომაც აღნიშნული „ბაგირები“ უნდა მივაკუთნოდ სტრუქტურული ორგანიზების შემდეგ დონეს — მეხუთეულ სტრუქტურას. ალბათ თქვენ მიაქციეთ ყურადღება, რომ ვირუსების სტრუქტურის განხილვისას რთული სპირალური სისტემები იგებოდა იდენტური, მეოთხეული სტრუქტურის არამქონე ელემენტებისაგან. ამიტომაც, ჯერ კიდევ საკამათოა საკითხი ამ სისტემების მეხუთეული სტრუქტურისადმი კუთვნილობის თაობაზე. უნდა აღინიშნოს, რომ არსებობს ცილების დიდი ჯგუფი, რომლებიც E.coli-ს გლუტამინსინთეტაზის მაგვარად აწყობენ ამდაგვარ რთულ სტრუქტურებს. ეს პირველყოვლისა კატალაზა და ფოსფორილაზაა, რომლებიც ჰქმნიან მილისებრივ კრისტალებს. მაგრამ, ხელოვნური წარმონაქმნების გარდა არსებობენ ბუნებრივი მილისებრივი სტრუქტურები. განვიხილოთ ეს წარმონაქმნები უფრო დაწვრილებით.

#### 14.4. მიკრომილაკები.

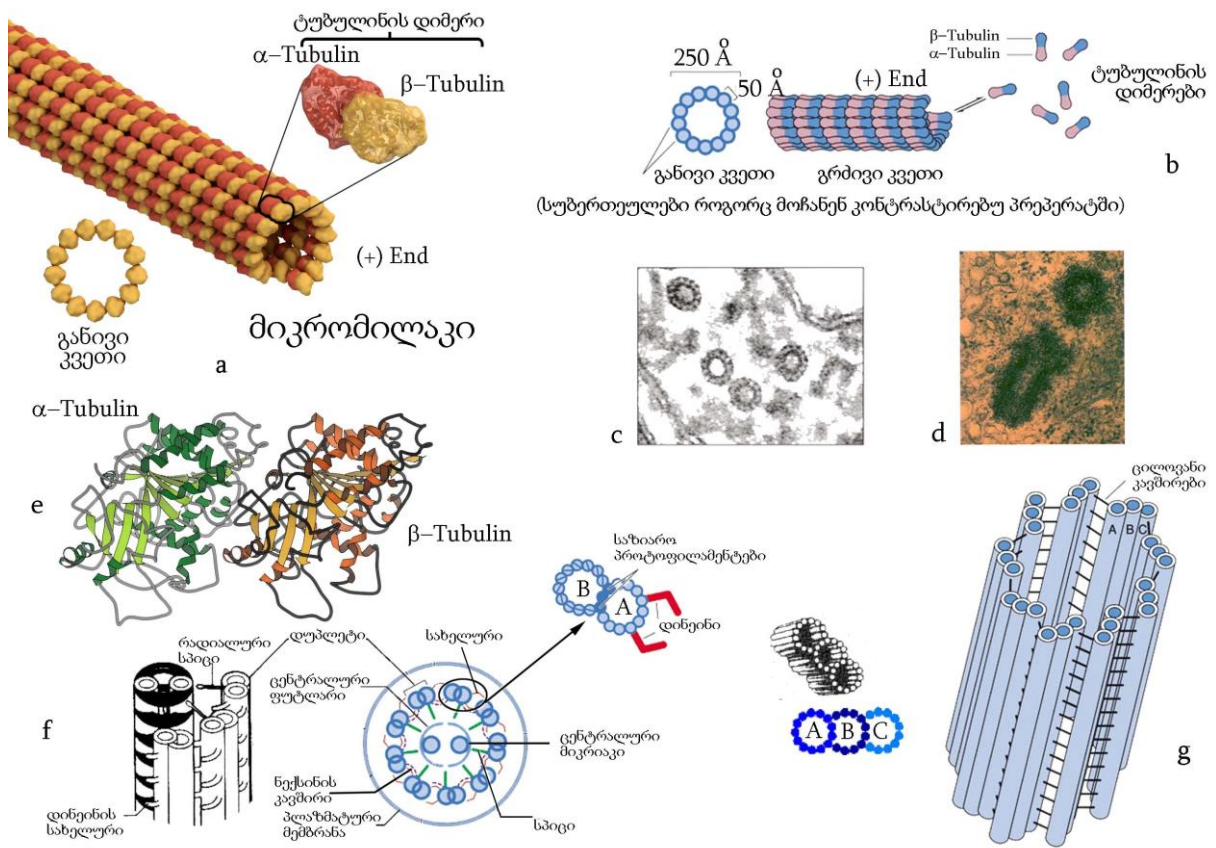
მიკრომილაკები (სურ. 100) წარმოადგენენ უჯრედის მუდმივ სტრუქტურულ კომპონენტს, რომელიც შეიძლება უჯრედულ ორგანოიდებს მივაკუთვნოთ

- მიკრომილაკები წარმოადგენენ ღრუ ცილინდრებს, რომლებშიც  $\alpha$ - და  $\beta$ -ტუბულინის გეტეროდიმერებიდან<sup>88</sup> შემდგარი 13 პროტოფილამენტი განლაგებულია ღრუ ცილინდრის წრეზე. ცილინდრის გარე დიამეტრი დაახლოებით 250 Å, ხოლო შიდა — დაახლოებით 150 Å. მათი სიგრძე შეიძლება იყოს რამდენიმე მიკრომეტრიდან და ალბათ რამდენიმე მილიმეტრამდე ნერვული უჯრედების აქსონებში. მიკრომი-

<sup>88</sup> **ჰომოდიმერი** წარმოიქმნება ორი ერთნაირი მოლეკულით. **ჰეტეროდიმერი** წარმოიქმნება ორი განსხვავებული მოლეკულით.

ლაკები აქტინის მიკროფილამენტების მაგვარად პოლარულია: ერთ წვეროზე მიმდინარეობს მილაკის თვითაწყობა, ხოლო მეორეზე – დაშლა.

- მიკრომილაკები მოთავსებულია ციტოპლაზმის ძირითად ნივთიერებაში, მათი განლაგების ხასიათი სხვა და სხვა უჯრედში არაერთნაირია. ისინი იმყოფებიან მჭიდრო კონტაქტში არა მხოლოდ გარე ციტოპლაზმურ მემბრანასთან, არამედ უჯრედის სხვა ორგანოებთანაც – მიტოქონდრიებთან, ცენტრიოლებთან, ბირთვთან, ქრომოსომებთან.
- მიკრომილაკები ასრულებენ ბევრ სხვადასხვაგვარ ფუნქციას. მათ შეუძლიათ განაპირობონ უჯრედის ფორმის შეცვლა, მათ ეკუთვნით საყრდენი როლი, ანუ ისინი წარმოადგენენ თავისებურ შიდა ჩონჩხს. ისინი გადიან ნერვული ბოჭკოების აქსონებში, უჯრედის გაყოფისას მონაწილეობენ თითისტარის წარმოქმნაში. მონაწილეობენ უჯრედების და ორგანოების გადაადგილებაში. აწარმოებენ საკვებ ნივთიერებათა ტრანსპორტს. მონაწილეობენ უჯრედთა კედლების სინთეზში.



სურ. 100. (a, b) მიკრომილაკი და ტუბულინის დიმერი. (c) მიკრომილაკის ელექტრონული მიკროფოტოსურათი. (d) ცენტრიოლის მიკროფოტოსურათი. (e) ტუბულინის დიმერის რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი. (f) შოლტების აგება ერთეული და ორმაგი მიკრომილაკებიდან. (g) ცენტრიოლის აგება სამმაგი მიკრომილაკებიდან.

მიკრომილაკის ერთ-ერთი დაბოლოვება, რომელსაც პლუს-ბოლოს უწოდებენ, გამუდმებით მიიერთავს თავისუფალ ტუბულინს. საპირისპირო დაბოლოვებიდან კი — მინუს-ბოლოდან — მიმდინარეობს ტუბულინის ერთეულების მოშორება.

მიკრომილაკის ფორმირებაში გამოყოფენ სამ ფაზას:

- შენელებული ფაზა, ანუ ნუკლეაცია. ეს მიკრომილაკის ჩასახვის ეტაპია, როდესაც ტუბულინის მოლეკულები იწყებენ უფრო დიდ წარმონაქმნებში გაერთიანებას. ასეთი გაერთიანება წარიმართება უფრო ნელა, ვიდრე ტუბულინის მიერთება უკვე აგებულ მიკრომილაკზე, ამიტომაც ამ ფაზას შენელებული ეწოდა.

- პოლიმერიზების, ანუ ელონგაციის ფაზა. თუ კი თავისუფალი ტუბულინის კონცენტრაცია მაღალია, მისი პოლიმერიზაცია მიმდინარეობს უფრო სწრაფად, ვიდრე დეპოლიმერიზაცია მინუს-ბოლოზე, რის გამოც მიკრომილაკი მატულობს სიგრძეში. მიკრომილაკის შენებისას ტუბულინის კონცენტრაცია ვარდება კრიტიკულამდე, და შენების სიჩქარეც მცირდება სანამ არ დაიწყება შემდეგი ფაზა.
- სტაბილური მდგომარეობის ფაზა. დეპოლიმერიზაცია აწონასწორებს პოლიმერიზაციას და მიკრომილაკის ზრდა ჩერდება.

ლაბორატორული კვლევები უჩვენებენ, რომ ტუბულინიდან მიკრომილაკების აწყობა მიმდინარეობს მხოლოდ გუანოზინტრიფოსფატის (GTP) და მაგნიუმის იონების თანხლებით.

მიკრომილაკის სტრუქტურულ ერთეულად წარმოგვიდგება ცილა **ტუბულინის** ჰეტეროდიმერი, რომელიც შედგება მსგავსი, მაგრამ არაიდენტური  $\alpha$ - და  $\beta$ -სუბერთეულებისაგან (53 და 55 კდალ) (სურ. 100e). ყოველ სუბერთეულს გააჩნია ნუკლეოტიდის დამაკავებელი საიტი.  $\alpha$ -ტუბულინი იკავებს GTP-ის მოლეკულას, რომელიც არ ჰიდროლიზდება,  $\beta$ -ტუბულინს შეუძლია დააკავოს GDP-ს ან GTP-ს მოლეკულები. ერთი ჰეტეროდიმერის  $\beta$ -ტუბულინი აკავებს GTP-ს და უკავშირდება სხვა ჰეტეროდიმერის  $\alpha$ -ტუბულინს, ამასთან GTP ჰიდროლიზირდება GDP-მდე.  $\alpha$ -ტუბულინი წარმოადგენს GDP-აქტივირების ცილას და კატალიზს უწევს  $\beta$ -ტუბულინზე მყოფ GTP-ის ჰიდროლიზს. ამრიგად, ჰეტეროდიმერები წარმოქმნიან წრფივ ჯაჭვებს – პროტოფილამენტებს, 13 პროტოფილამენტი ჰქმნიან სპირალურ ციკლურ კომპლექსს, ასეთი რგოლები პოლიმირიზდება მილაკებში. ტუბულინის ფოსფორილირება აძლიერებს პოლიმერიზაციას.

მიკრომილაკები ციტოჩონჩხის გარდა შედიან ცენტრიოლების შემადგენლობაში და აქტიურად მონაწილეობენ უჯრედის გაყოფის პროცესში.

ცენტრიოლების თხელი სტრუქტურის შესწავლა მოხერხდა სწორედ ელექტრონული მიკროსკოპის მეშვეობით. ზოგ ობიექტში შესაძლებელი გახდა ისეთი ცენტრიოლების მოინახა, რომლებიც ჩვეულებრივ დაწყვილებულია (დიპლოსომა) და გარშემორტყმულია უფრო ნათელი ციტოპლაზმის ზონით, რომლიდანაც რადიალურად გამოდის თხელი ფიბრილები (ცენტროსფერო). დიპლოსომაში ცენტრიოლები ლაგდებიან ერთმანეთის პერპენდიკულარულად (სურ. 100d). ცენტრიოლების და ცენტროსფეროს ერთობლიობას უჯრედის ცენტრს უწოდებენ.

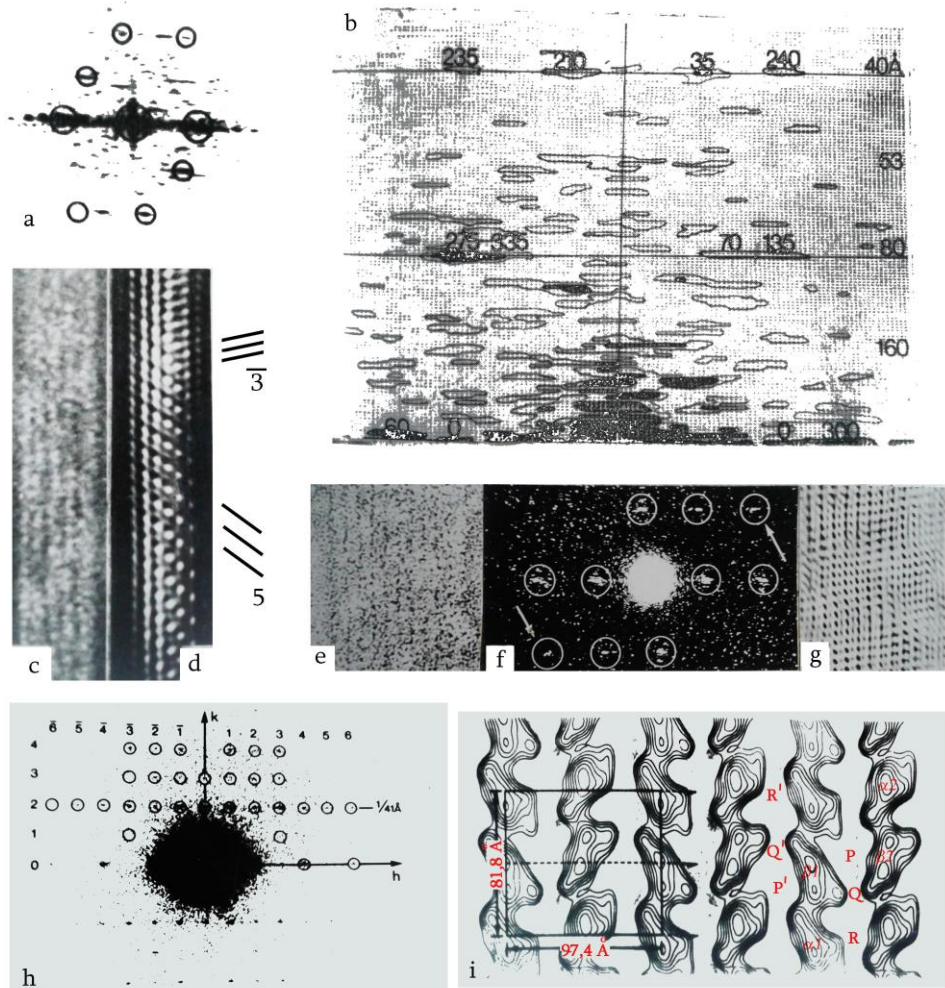
ყველაზე ხშირად ცენტრიოლების წყვილი ბირთვის ახლოს იმყოფება. ყოველი ცენტრიოლი აგებულია 27 მიკრომილაკისაგან, რომლებიც დაჯგუფებულია 9 ტრიპლეტში. ეს ტრიპლეტები განლაგებულია წრიულად და ღრუ ცილინდრს ჰქმნიან. მისი სიგრძე — 0,3 – 0,5 მკმ (ყოველი ტრიპლეტის სიგრძის ტოლია), ხოლო დიამეტრი — დაახლოებით 0,15 მკმ. ყოველი ტრიპლეტის პირველი მიკრომილაკის (A-მიკრომილაკის) დიამეტრი დაახლოებით 250 Å, კედლის სისქე 50 Å და ის 13 პროტოფილამენტს შეიცავს. მეორე და მესამე მიკრომილაკები (B და C) განსხვავდებიან A-მიკრომილაკისგან იმით, რომ ისინი არ არიან დასრულებული, შეიცავენ 11 პროტოფილამენტს და მჭიდროდ მიეკვრება თავის მეზობლებს. ყოველი ტრიპლეტი ორიენტირებულია ცენტრიოლის რადიუსის მიმართ დაახლოებით 40° კუთხით.

საინტერესოა, რომ იგივე 9, ოღონდ ეხლა უკვე დუპლეტების ჯგუფი მონაწილეობს ბაქტერიული წამწამების და შოლტების სტრუქტურაში (სურ. 100f). რაც ეხება თვით მიკრომილაკს, ის ყოველთვის 13 ჭიმბიდან (პროტოფილამენტებიდან) შედგება.

იმის გამო, რომ მიკრომილაკებს გააჩნია სპირალური სიმეტრია, ისინი საკმაოდ დიდ ინტერესს წარმოადგენენ სტრუქტურული ანალიზის სპეციალისტებისათვის. შეგახსენებთ, რომ სპირალური სიმეტრია შესაძლებლობას იძლევა მივიღოთ დიდი რაოდენობით

მასში შემავალი სტრუქტურული ელემენტების პროექციები. მიკრომილაკების შემთხვევაში პროექციების რაოდენობა 13-ია (13 პროტოფილამენტი). ამიტომაც, კვლევების საკმაოდ დიდი რაოდენობა მიეძღვნა როგორც მიკრომილაკების სტრუქტურის, აგრეთვე თვით ტუბულინის მოლეკულის სტრუქტურის შესწავლას.

ასე, ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდით ჩატარებულ პირველ ნაშრომებში  $\sim 40 \text{ \AA}$  გარჩევით იყო ნაჩვენები, რომ ტუბულინს გააჩნია განტელისმაგვარი სტრუქტურა (სურ. 101d) ზომებით  $80 \text{ \AA} \times 40 \text{ \AA}$ . ამ დროს მიკრომილაკების დიფრაქციულ სურათებზე აღინიშნებოდა ერთი ეკვატორიალური რეფლექსი (1,0) და ორი რეფლექსი (0,1) და  $(\bar{1}, 1)$  (ერიქსონის აღნიშვნებში) (იხ. სურ. 101h), რომლებიც განლაგდებოდნენ  $40 \text{ \AA}$  შესაბამის ფენოვან ხაზზე. ცოტა მოგვიანებით ჩატარებულ ციტოპლაზმური მიკრომილაკების კვლევებში აღინიშნებოდა რამოდენიმე დამატებითი რეფლექსი  $40 \text{ \AA}$  შესაბამის ფენოვან ხაზზე. ოპტიკური ფილტრაცია და სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია ამ დროს იძლეოდა ტუბულინის მოლეკულის „8“-ის მაგვარ გამოსახულებას. ასეთივე სტრუქტურა (სურ. 101e,f,g) აღინიშნებოდა ტუბულინის მონოფენების ანალიზისას, როდესაც გაიშვებოდა რეფლექსები: (1,0), (2,0), (0,1),  $(\bar{1}, 1)$ ,  $(\bar{2}, 1)$ . იმ შემთხვევაში თუ რეფლექსი  $(\bar{2}, 1)$  არ ტარდებოდა, მსგავსობაც იკარგებოდა.



სურ. 101. (a) ოპტიკური დიფრაქციული სურათი (c)-ზე მოყვანილი მიკრომილაკის ფრაგმენტისა და მისი ოპტიკური ფილტრაცია (d). (b) გათვლითი დიფრაქცია მასზე დატანილი ძირითადი რეფლექსების ფაზების მნიშვნელობებით. (e) ტუბულინის მოლეკულების მონოფენა და მისი ოპტიკური დიფრაქციული სურათი (წრებით მონიშნულია ძირითადი რეფლექსები) (f). (g) აღნიშნული მონოფენის ოპტიკური ფილტრაცია. (h) ცინკის თანხლებით მიღებული ტუბულინის მოლეკულთა ფენის ოპტიკური დიფრაქციული სურათი, და ამ ფენის კომპიუტერული ფილტრაცია (i).

რაც შეეხება მიკრომილაკების სპირალის პარამეტრებს (ისევე როგორც ნებისმიერი სპირალური სტრუქტურის კვლევისას) შეიძლება როგორც ამ სპირალების ოპტიკური დიფრაქციული სურათის აგრეთვე გამოთვლითი დიფრაქციის გამოყენება. კიდევ ერთხელ გავიხსენოთ ადრე განხილული სპირალური სტრუქტურების დიფრაქციის თეორია.

სპირალური ზედაპირული მესერი განისაზღვრება პარალელური სპირალების (რალაცა) ორი ოჯახის ზედდებით. მიკრომილაკების შემთხვევაში ერთ-ერთი ოჯახის ჭეშმარიტ ნაკრებს წარმოადგენს ნაკრები, რომელიც განისაზღვრება თავად პროტოფილამენტებით. თუ კი გვაქვს ასეთი სპირალების  $n_\ell$  რაოდენობა, და ასევე გვაქვს დახრილი სპირალების ოჯახი  $n_p$ , მაშინ უნდა არსებობდეს სპირალების სხვა ოჯახიც  $n_q$ , მაგრამ საწინააღმდეგო შემავლიანობის. ანუ, თუ კი  $n_p$  მარჯვნივშემავლიანი სპირალებია,  $n_q$  იქნება მარცხნივშემავლიანი, და მათი რიცხვი იქნება  $n_q = n_\ell - n_p$ . განსაკუთრებულ შემთხვევაში, როდესაც სიგრძეში გაჭიმული სპირალები  $n_\ell$  წარმოადგენენ სპირალური სტრუქტურის ღერძის ზუსტად პარალელურ წრფეებს, როგორც მაგალითად მიკრომილაკებშია, მაშინ ორი დახრილი სპირალების ოჯახები  $n_p$  და  $n_q$  მოგვცემენ რეფლექსებს ერთსა და იმავე ფენოვან ხაზზე. შეიძლება სპირალური ჩალაგების ძირითადი ფორმის განსაზღვრა რეფლექსების ორი რიგის საფუძველზე, რომლებიც იმყოფებიან 40 Å-ის პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე.

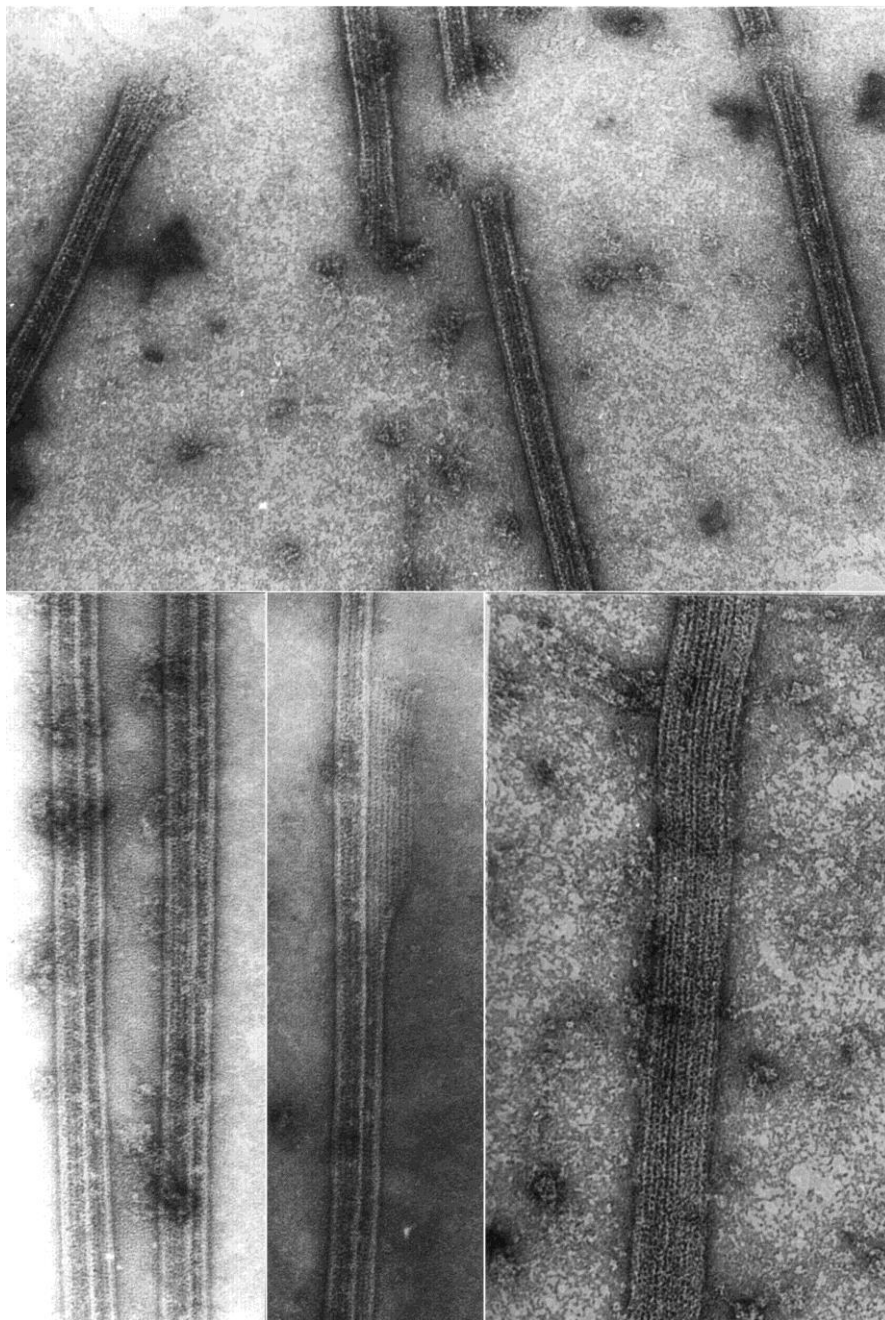
სინამდვილეში ყოველი  $n$ -ის ჯერადი სპირალების ოჯახი იწვევს მერიდიანიდან თანაბარდაშორებულ ორ ძირითად დიფრაქციულ მაქსიმუმს (რეფლექსს). ამასთან ერთ რეფლექსს გამოიწვევს სპირალის ახლომდებარე მხარე, ხოლო მეორეს კი მისი შორეული ნაწილი. ვინაიდან ყოველი რეფლექსის განლაგება ბესელის ფუნქციასთან არის დაკავშირებული  $J_n(2\pi Rr)$ , სადაც  $r$  – სპირალის რადიუსია, ამიტომ  $n$ -ის სიდიდე, რომელიც რეფლექსების წყვილებს უკავშირდება, შეიძლება იყოს მიახლოებით დათვლილი ამ რეფლექსის მერიდიანიდან დაშორების მიხედვით უკუ სივრცეში ( $R$ ). გარდა ამისა ორი რეფლექსის შეფარდებითი ფაზა უჩვენებს ლუწია თუ კენტია  $n$ -ის მნიშვნელობა. ვინაიდან თუ კი  $n$  ლუწია, მაშინ რეფლექსები უნდა იმყოფებოდნენ ფაზაში და პირიქით, კენტი  $n$ -ის შემთხვევაში რეფლექსები საწინააღმდეგო ფაზაში უნდა იმყოფებოდნენ.

$n_\ell$  პარამეტრის მოძებნა პროტოფილამენტების რიცხვის განსაზღვრასთანაა დაკავშირებული, და მოიძიება ეკვატორიულ (ნულოვან) ფენოვან ხაზზე რეფლექსების განლაგების ანალიზის საფუძველზე. სურ. 101a-ზე მოყვანილი დიფრაქციული სურათის ანალიზის საფუძველზე, შეიძლება დადგინდეს, რომ  $n_\ell$  იმყოფება 11 და 14 შორის, ხოლო გათვლით დიფრაქციას თუ გამოვიყენებთ (სურ. 101b), შეიძლება მივიღეთ იმ დასკვნამდე, რომ ეს რეფლექსები პრაქტიკულად საწინააღმდეგო ფაზაში იმყოფებიან ( $300^\circ - 60^\circ = 240^\circ$ ), ესე იგი  $n_\ell$ -ს შეუძლია მიიღოს ან 11-ის ან 13-ის მნიშვნელობები. მაგრამ ნეგატიურად კონტრასტირებულ მიკრომილაკების მიკროფოტოსურათებზე აღირიცხვება ნაფი, რაც წარმოადგენს მილის წინა და უკანა მხარეების ზედდების შედეგს. თანაც ეს ძაფები ასიმეტრიულად არიან განლაგებული მილაკის ღერძის მიმართ. ამ ყველაფრის გათვალისწინებით შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ პროტოფილამენტების რაოდენობა 13-ის ტოლია.

სპირალის დანარჩენი პარამეტრების განსაზღვრისათვის  $n_p$  და  $n_q$  საჭიროა გაანალიზდეს სიმეტრიული რეფლექსები რომლებიც იმყოფებიან 40 Å-ის პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე. ფენოვანი ხაზების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება ჩაიწეროს, რომ თუ  $n_\ell = 13$ , მაშინ  $n_p = 3$  და  $n_q = 10$ . ისევ და ისევ ძირითადი რეფლექსები აქაც საწინააღმდეგო ფაზაში იმყოფებიან ( $210^\circ - 35^\circ = 175^\circ$ ). ფენოვანი ხაზისათვის, რომელიც შეესაბამება 80 Å-ის პერიოდულობას შეიძლება მივიღოთ მნიშვნელობები  $n_p = 8$  და  $n_q = 5$ .



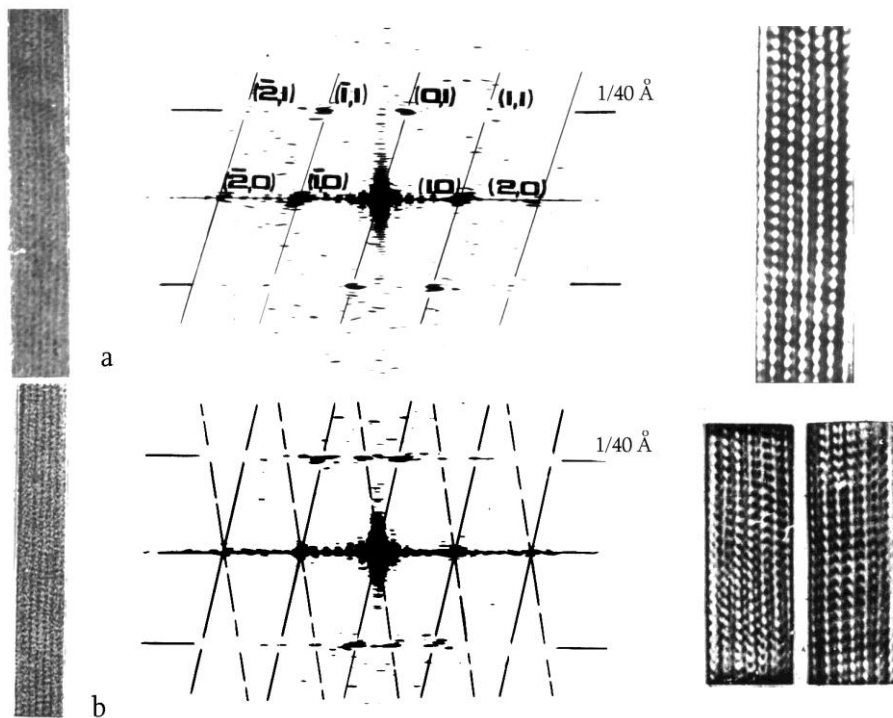
რიგ შრომებში იყო ნაჩვენები, რომ ცინკის თანდასწრებით ტუბულინის მოლეკულები ჰქმნიან დიდ ფენოვან წარმონაქმნებს. თანაც, მიღებული ფენების მესერი მნიშვნელოვნად განსხვავდება ჩვეულებრივი მიკრომილაკების კედლებით წარმოქმნილი მესერისგან. იყო ნაჩვენები, რომ ასეთ ფენებში გვერდითმყოფი ფილამენტები საწინააღმდეგო მიმართულებითაა პოლარიზებული. წარმოიშვება ფენები, რომლებშიც მოლეკულები იმყოფებიან გვერდით პროექციებში და ჰქმნიან მესერს უჯრის ზომებით  $97 \text{ \AA} \times 82 \text{ \AA}$ , სადაც  $82 \text{ \AA}$  უნდა იყოს მანძილი პროტოფილამენტში  $\alpha$  და  $\beta$  სუბერთეულებს შორის, ხოლო  $97 \text{ \AA}$  – მანძილი ერთი მიმართულებით ორიენტირებულ პროტოფილამენტებს შორის (ანუ ერთის გამოტოვებით). ეს ფენა წარმოადგენს კრისტალს, რომლის სიმეტრიის სივრცული ჯგუფი  $P2_1$  და რომელიც შეიცავს ტუბულინის ერთ ჰეტეროდიმერს ყოველ ასიმეტრიულ ჩალაგების ერთეულზე (სურ. 101i).



სურ. 102. ბაქტერიული წამწამების მიკრომილაკები და ტუბულინის მოლეკულების ფენები, კონტრასტირება 2% ურანილფორმატის და 2% ალუმინიფორმატის ხსნარით, 4:1 შეფარდებით. (გადიდება  $200\,000 \times$ )

ელექტრონული მიკროსკოპია და განსაკუთრებით კი მაღალგარჩევიანი ელექტრონული მიკროსკოპია დიდ შესაძლებლობებს იძლევა ბიოლოგიური სისტემების სტრუქტურული ორგანიზების განსაზღვრისას (მესამეული, მეოთხეული და მეხუთეული სტრუქტურები). ზემოთქმული რა თქმა უნდა მიკრომილაკებსა და ტუბულინის მოლეკულებსაც ეხება. ასე, სურ. 102-ზე მოყვანილ მიკროფოტოსურათებზე შეიძლება ვნახოთ: ორმაგი მიკრომილაკები, A-მილაკები, ცალკეული ან ორმაგი მილების შემადგენლობაში, და აგრეთვე ბრტყელი ფენები, რომლებიც აგებულია ტუბულინის მოლეკულის ცალკეული ჭიმებისაგან.

ამ მიკროფოტოსურათების ანალიზმა, რომელიც ოპტიკურ დიფრაქტომეტრზე იყო ჩატარებული, გამოავლინა ტუბულინის მოლეკულების ფენების დიფრაქციულ სურათებზე, ადრე აღნიშნულთან შედარებით დამატებითი რეფლექსები. სურ. 103a-ზე მოყვანილია ტუბულინის მოლეკულების მონოფენის დიფრაქციული სურათი. ამ სურათზე აღინიშნება ძლიერი მეორე ეკვატორიალური რეფლექსი (2, 0), რომელიც შეესაბამება 20 Å პერიოდულობას, და ასევე რეფლექსები (2, 1) და (1, 1) ერიქსონის აღნიშვნებში. ამ ფენების ფილტრაციის შემდეგ აღნიშნული დამატებითი რეფლექსების გამოყენებით ტუბულინის მოლეკულის გამოსახულება იძენდა „8“-ის ფორმას. მოლეკულის ზომები 80 Å × 40 Å. მისი გვერდითი პროექციის სისქე განისაზღვრება მიკრომილაკის კედლის სისქით, რომელიც 40 Å-ის ტოლია.



სურ. 103. (a) ტუბულინის მოლეკულების ბრტყელი ფენა (გადიდება 250 000 ×), მისი ოპტიკური დიფრაქცია და ფილტრაცია (ცილა მუქია, გადიდება 500 000 ×). ძირითადი რეფლექსები მონიშნულია ისევე როგორც სურ. 101h-ზე. (b) მიკრომილაკის ფრაგმენტი (გადიდება 250 000 ×), მისი ოპტიკური დიფრაქცია და ფილტრაცია (ცილა მუქია, გადიდება 400 000 ×).

ცალკეული, A-მიკრომილაკის ფრაგმენტის კვლევისას (იხ. სურ. 103b), ასევე აღინიშნება მეორე ეკვატორიალური რეფლექსი, რომელიც შეესაბამება პერიოდულობას 20 - 25 Å და დამატებითი რეფლექსები 40 Å-ის პერიოდულობის შეესაბამის ფენოვან ხაზზე. ამ რეფლექსების ფილტრაციაში ჩასმისას ჩალაგების ერთეულები გამოიყურება ისევე, როგორც ფენებში და გვაგონებენ დეფორმირებულ „8“.

მიკრომილაკების პარამეტრების მოსაძებნად საჭიროა ძირფესვიანად შევისწავლოთ მათი დიფრაქციული სურათები. საჭიროა გამოვლინდეს რეფლექსების ურთიერთგანლაგება და იდენტიფიცირებული იყოს მათი მაქსიმალურად დიდი რაოდენობა.

იმისათვის რომ მოინახოს სპირალის პერიოდი ( $c$ ) საჭიროა, როგორც უკვე აღინიშნა, მილის ( $D$ ) დიამეტრის და პირველი რეფლექსის და ვერტიკალურ ღერძს შორის წარმოქმნილი ( $\alpha$ ) კუთხის ტანგენსის ცოდნა. და ამრიგად, ელემენტარული გაზომვების საფუძველზე შეიძლება ჩაიწეროს, რომ

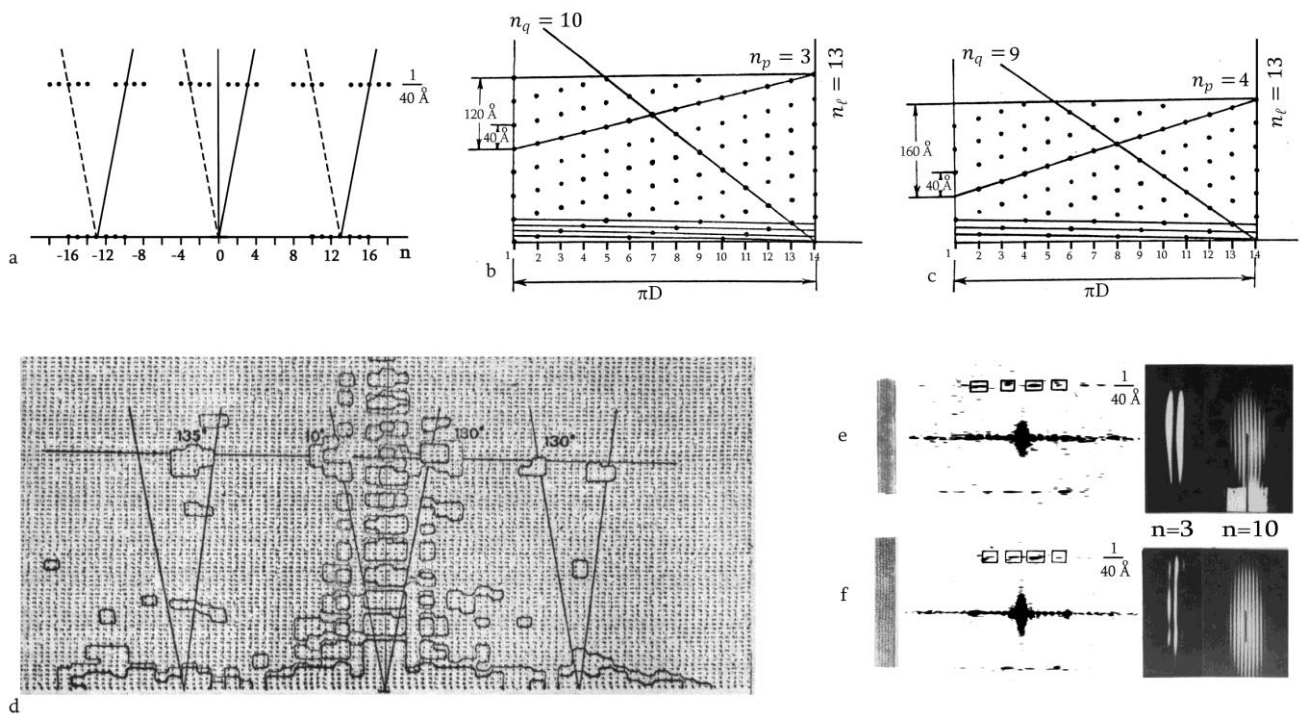
$$c = \pi D \tan \alpha \approx \pi \cdot 200 \text{ \AA} \approx 120 \text{ \AA}$$

მაგრამ რეფლექსების გაჭიმულობის გამო  $c$  პერიოდის ეს მნიშვნელობა საკმაოდ მიახლოებითია, ვინაიდან შეუძლებელია  $\alpha$  კუთხის ცალსახად გაზომვა, ამიტომაც სპირალის პერიოდი შეიძლება იმყოფებოდეს  $100 - 170 \text{ \AA}$  ფარგლებში.

რაც შეეხება  $p$  და  $q$  პარამეტრებს, ისინი, როგორც უკვე აღინიშნა, შეიძლება დადგინდეს შერჩევის წესის საფუძველზე (იხ. ფორმულა (101)), რომელსაც ჩვენი ერთშემავლიანი სპირალის შემთხვევაში ექნება შემდეგი სახე:

$$\ell = nq + mp$$

სადაც,  $\ell$  – ფენოვანი ხაზის ნომერია,  $n$  – ბესელის ფუნქციის რიგი,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  – მთელი რიცხვი. უფრო სწორედ კი ყველა შესაძლო მნიშვნელობებიდან მინიმალური.



სურ. 104. (a) გრაფიკულათ გამოსახული „დიფრაქციული სურათი“ ბესელის ფუნქციების რიგების გამოთვლილი მნიშვნელობების საფუძველზე. მიკრომილაკების რადიალური პროექციები, რომლებიც ასახავენ მათ სპირალურ სივრცულ მესერს ახლომდებარე მერიდიანალური რეფლექსების ბესელის ფუნქციის რიგის ( $n$ ) ორი განსხვავებული მნიშვნელობებისათვის. (b)  $n = 3$  ( $p = 13$ ,  $q = 4$ ); (c)  $n = 4$  ( $p = 13$ ,  $q = 3$ ). ბაქტერიული მიკრომილაკების გათვლილი დიფრაქციული სურათი; ნაჩვენებია ყველაზე მნიშვნელოვანი რეფლექსების კონტურები და მათი ფაზები (გრადუსებში). (e, f) ბესელის რიგების კენტი ან ლუწი მნიშვნელობების განსაზღვრა; (e) ბაქტერიული მიკრომილაკებისათვის; (f) ციტოპლაზმური მიკრომილაკებისათვის. მოყვანილია მიკრომილაკების ფრაგმენტების მიკროფოტოსურათები, მათი ოპტიკური დიფრაქციები და ინტერფერენციის სურათები ორი წყვილი სიმეტრიული რეფლექსებისათვის  $n = 3$  და  $n = 10$ .

ბესელის ფუნქციის რიგების დასადგენად საჭიროა წინასწარ გამოითვალოს ფუნქციის არგუმენტი „X“ (იხ. ფორმულა (102)). ჩვენი შემთხვევისათვის:

$$X = 2\pi Rr$$

აქ,  $2R$  – მანძილი მერიდიანის მიმართ სიმეტრიულად განლაგებულ ძირითად რეფლექსების შორის, ხოლო  $r$  – სპირალის რადიუსი.

მაგრამ, ვინაიდან შეუძლებელია ზუსტად გაიზომოს არც მანძილი რეფლექსებს შორის და არც სპირალის რადიუსი, ბესელის არგუმენტის გამოთვლილი სიდიდე, და მისი რიგის მნიშვნელობა იქნება დაახლოებითი, ანუ იმყოფებიან გარკვეულ საზღვრებში.

აღწერილი მეთოდით ძირითადი რეფლექსების ბესელის ფუნქციის არგუმენტების დათვლისას, შეიძლება შევადგინოთ „დიფრაქციული სურათის“ გრაფიკული გამოსახვა გამოვლენილი ბესელის ფუნქციის რიგების მნიშვნელობების მიხედვით. შედეგად ყოველ რეფლექსისათვის მივიღებთ  $n$  -ის მნიშვნელობების გარკვეულ ნაკრებს. სურ. 104a-ზე მოყვანილია თავისებური „დიფრაქციული სურათი“, რომელზეც ძირითადი „რეფლექსები“ შედგენილია ბესელის ფუნქციის რიგების მნიშვნელობების მიხედვით. როგორც ამ სურათიდან ჩანს,  $n$ -ის მნიშვნელობები მერიდიანთან ახლომდებარე რეფლექსებისათვის იმყოფებიან ინტერვალში 2-დან 4-მდე, ანუ  $n_1$  შეიძლება მიიღოს მნიშვნელობები: 2, 3 ან 4. შემდეგი „რეფლექსებისათვის“  $n_2$  შეიძლება მიიღოს მნიშვნელობები: 8, 9, 10, 11. პირველი ეკვატორიული რეფლექსებისათვის  $n_3$  შეიძლება მიიღოს მნიშვნელობები: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16. როგორც უკვე აღინიშნა, პროტოფილამენტების რაოდენობა მიკრომილაკში შეადგენს 13-ს, მაშასადამე  $n_3$  -ის მნიშვნელობა შემოიფარგლება ამ რიცხვით, ანუ  $n_3 = 13$ . მეორეს მხრივ, როგორც ცნობილია (იხ. სურ. 104b,c)

$$n_3 = n_1 + n_2$$

ამიტომ  $n_1$  და  $n_2$  შეუძლიათ ერთდროულად მიიღონ მხოლოდ შემდეგი მნიშვნელობები: a)  $n_1 = 2, n_2 = 11$ ; b)  $n_1 = 3, n_2 = 10$ ; c)  $n_1 = 4, n_2 = 9$ .

ამ მნიშვნელობებს შეესაბამება სპირალური განლაგების შემდეგი ( $p, q, c$ ) პარამეტრები (იხ. სურ. 104b,c):

- a)  $n_1 = 2, n_2 = 11; p = 13; q = 6; c = 80\text{\AA};$
- b)  $n_1 = 3, n_2 = 10; p = 13; q = 4; c = 120\text{\AA};$
- c)  $n_1 = 4, n_2 = 9; p = 13; q = 3; c = 160\text{\AA};$

მაგრამ, როგორც უკვე აღინიშნა, სპირალის პერიოდი ( $c$ ) 100 – 170  $\text{\AA}$  ინტერვალში იმყოფება. მაშასადამე ჩვენ გვრჩება სპირალის აგების მხოლოდ ორი ვარიანტი:  $p/q = 13/4$  და  $p/q = 13/3$  (სურ. 104b,c), და ჩვენი ამოცანა დაიყვანება მათგან ერთის ამორჩევამდე. მიღებული ამოცანის ამოსახსნელად ჩვენ დაგვჭირდება დამატებითი ინფორმაცია. ამ ინფორმაციის მიღება შეგვიძლია რეფლექსების ფაზების ცოდნის საფუძველზე, უფრო სწორედ კი საჭიროა სიმეტრიული მერიდიანალური რეფლექსების ფაზების ცოდნა. როგორც უკვე ავღნიშნეთ, სიმეტრიული რეფლექსების ბესელის ფუნქციების ლუწი რიგებისათვის ( $n = 2k$ ) ფაზები ემთხვევა, ხოლო კენტებისათვის ( $n = 2k + 1$ ) განსხვავდება  $\pi$ -ით. ამიტომ, რეფლექსების ფაზათა სხვაობის ცოდნა გვაძლევს ზუსტ ინფორმაციას  $n$  -ის ლუწობის ან კენტობის შესახებ, რაც საშუალებას გვაძლევს ცალსახად გავნსაზღვროთ ბესელის ფუნქციის რიგის მნიშვნელობა. ანუ ორი დარჩენილი ვარიანტიდან ( $n_1 = 3$  ან 4) ერთი, რომელიც შეესაბამება რეალურ სტრუქტურას.

ფაზების დათვლის ერთ-ერთი ვარიანტი ესაა, როგორც უკვე აღინიშნა, სტრუქტურული ამპლიტუდების მოდულების და ფაზების გამოთვლა კომპიუტერზე, მიკროდენსიტომეტრით გაზომილი გამოსახულების ოპტიკური სიმკვრივეების ( $D$ ) მიხედვით.

მეთოდის გარჩევადობა განისაზღვრება დენსიტომეტრიების ბიჯით. რა თქმა უნდა, ნებისმიერად მცირე ბიჯის არჩევას, რომელიც იქნება მიკროფოტოსურათის გარჩევაზე მცირე, ჩვენ მაინც ვერ მივიღებთ უკეთეს გარჩევადობას ვიდრე მიკროფოტოსურათს ჰქონდა. ამიტომ, დენსიტომეტრიების ბიჯი უნდა აირჩეს ოდნავ მცირე ვიდრე მიკროფოტოსურათის გარჩევადობა. ამის შემდეგ მონაცემათა მასივი შეიყვანება კომპიუტერში, წინასწარ მოპოვებული სტრუქტურის პარამეტრების ინფორმაციასთან ერთად. თვლის შემდეგ კომპიუტერი გასცემს ინფორმაციას ცხრილის სახით, რომელშიც მოყვანილია ამპლიტუდები და ფაზები. ამპლიტუდების პიკების (მათი უდიდესი მნიშვნელობების) გამოყოფის შემდეგ, მიიღება ოპტიკური დიფრაქციის ანალოგიური სურათი, იმ განსხვავებით, რომ ყოველ „რეფლექსს“ თან დაყვება ინფორმაცია მის ფაზის შესახებ. სურათზე (სურ. 104d) მოყვანილია ამ წესით მიღებული ფურიეს გარდაქმნის გამოსახულება, რომლიდანაც ჩანს, რომ მერიდიანთან ახლომდებარე რეფლექსები იმყოფებიან საწინააღმდეგო ფაზაში, შემდეგი რეფლექსები კი – ფაზაში. ამრიგად შეიძლება გაკეთეს დასკვნა, რომ  $n_1 = 3$ , ხოლო  $n_2 = 10$ , და სპირალური განლაგების ორი დარჩენილი ვარიანტიდან რჩება ერთი (სურ. 104b), რომელიც ხასიათდება შემდეგი პარამეტრებით:

$$p = 13; \quad q = 4; \quad c = 120\text{\AA}$$

ეს დასკვნა, მეთოდის შრომატევადობის გამო, გაკეთდა მხოლოდ ერთი მიკრომილაკის ფაზების გათვლისას. მაგრამ შეიძლება წავიღეთ უფრო მარტივი გზით და გამოვიკვლიოთ გაცილებით მეტი ობიექტი. ეს გზა მდგომარეობს სიმეტრიული რეფლექსების ფაზების შედარებაში ოპტიკურ დიფრაქტომეტრზე. ამასთან, თუ შესაძარებელი რეფლექსები საწინააღმდეგო ფაზებში იმყოფებიან, მიღებულ ინტერფერენციულ სურათზე გაქრება ცენტრალური მაქსიმუმი (ინტერფერენციული ზოლების რაოდენობა იქნება ლუწი). თუ კი შესაძარებელი რეფლექსები ფაზაში იქნებიან, მაშინ ინტერფერენციულ სურათზე აღინიშნება ცენტრალური მაქსიმუმი (ინტერფერენციული ზოლების რაოდენობა იქნება კენტი). მართლაც, სურ. 104e,f-ზე მოყვანილი ინტერფერენციული სურათების საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ბაქტერიული და ციტოპლაზმური მიკრომილაკების ახლომერიდიანალური რეფლექსები საწინააღმდეგო ფაზებში იმყოფებიან (ორი ზოლი). რაც კი შეეხება რეფლექსების შემდეგ წყვილს, ისინი უკვე ფაზაში არიან (ცხრა ზოლი). ასე რომ შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, მაგრამ უკვე დიდი რაოდენობის მიკრომილაკების ანალიზის საფუძველზე, რომ ახლომერიდიანალური რეფლექსები იმყოფებიან საწინააღმდეგო ფაზაში, ხოლო მომდევნო – ფაზაში, ანუ ფურიეს გარდაქმნის საფუძველზე (სურ. 104d) გაკეთებული დასკვნა იმის თაობაზე, რომ  $n_1 = 3$ ,  $n_2 = 10$  და მაშასადამე  $p/q = 13/4$  მართებულია.

სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია შეიძლება ჩატარდეს როგორც ტუბულინის მთელი მოლეკულისათვის (ამ დროს შემდეგი პარამეტრებია:  $p = 6,5$ ;  $q = 4$ ;  $c = 40\text{\AA}$ ), ასევე მისი ნახევრისათვის (მაშინ:  $p = 13$ ;  $q = 4$ ;  $c = 40\text{\AA}$ ). განვიხილოთ ეს შემთხვევები ცალ ცალკე.

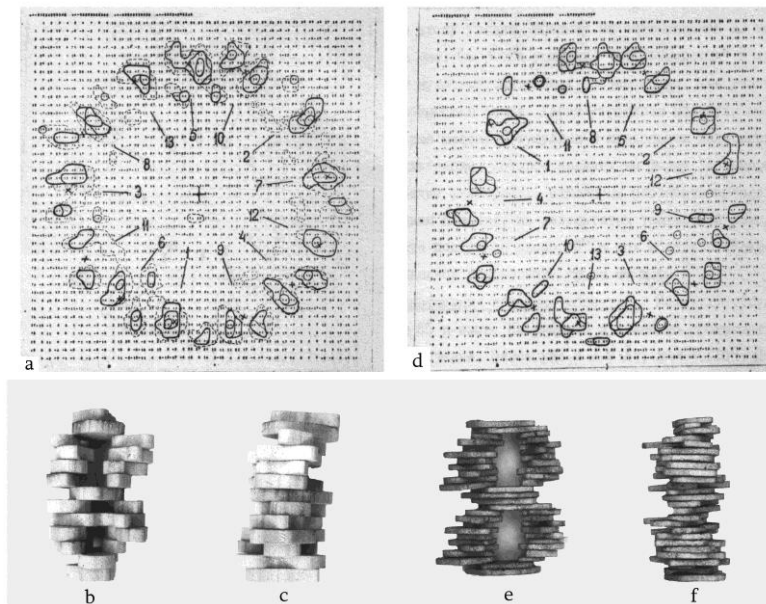
**მთელი მოლეკულის რეკონსტრუქცია.** ელემენტარული დისკოს მიღებულ კვეთაში (სურ. 105a) გამოიყოფებოდა მოლეკულა (სიმკვრივის მაქსიმუმების მიხედვით). მისი სიგანე საშუალოდ შეადგენდა  $40 \pm 5 \text{\AA}$ , რაც ემთხვევა მიკრომილაკის კედლების სისქეს. გამოთვლის შედეგად მიღებული მიკრომილაკის სტრუქტურა შეიძლება იყოს წარმოდგენილი როგორც ასეთი ელემენტარული დისკოების შეკვრა. ამ დისკების სისქე:

$$\Delta = c/p = 6 \text{\AA}$$

და ისინი ერთმანეთის მიმართ დატრიალებულია კუთხით:

$$\alpha = 2\pi q/p \approx 220^\circ$$

დათვლის შედეგების მიხედვით შეიძლება აიგოს მოლეკულის მოდელი 6 მმ სისქის დისკოებიდან, რომელიც მოყვანილია სურ. 105b,c-ზე. ეს მოდელი შეესაბამება იზოხაზის გავლებას 38-ზე მეტ დონეზე<sup>89</sup>. იზოხაზის 30-ზე მეტ დონეზე გავლებას (ჰუნქტირის ხაზი) „ნახვრეტი“ სუბერთეულში ქრება, მაგრამ ამ ადგილას, გარე მხრიდან, ნათლად აღინიშნება ღრმული. ამ დონეზე გავლებას გამოვლინდება სიმკვრივეები, რომლებიც აშკარად ატარებენ ფონურ ხასიათს და არა აქვთ არანაირი კავშირი თავად ტუბულინის სტრუქტურასთან. ეს კი ართულებს მოდელის აგებას. ამიტომაც გადაწყდა სურათზე მოყვანილ მოდელზე შეჩერება, იმ პირობით, რომ „ნახვრეტები“ მოდელში უნდა განიხილოს როგორც ცილოვანი მასალის შემცირებული რაოდენობის უბნები. ტუბულინის მოლეკულის ასეთი აგებულებით შეიძლება იყოს ახსნილი ოპტიკურ ფილტრაციებზე მისი გრძივი მიმართულებით გაყოფა, რაც ანიჭებთ მათ „8“-ის ფორმას. ფილტრაციის სურათების ანალოგიურად ტუბულინის სუბერთეულების სიმკვრივის მაქსიმუმები, ასეთი დაყოფის შედეგად სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მიხედვით მოთავსდებიან 50°კუთხით მოლეკულის ღერძის მიმართ. მოლეკულის ზომები რადიალური მიმართულებით: 80 × 40 Å.



სურ. 105. (a,b,c) ტუბულინის მთელი მოლეკულის რეკონსტრუქცია; (a) ელემენტარული დისკოს კვეთი  $p = 6, 5$ ;  $q = 4$ ; შემთხვევაში; (b) მოლეკულის მოდელი რადიალურ პროექციაში; (c) მოლეკულის მოდელი გვერდითი პროექციაში. (d,e,f) ტუბულინის ნახევარი მოლეკულის რეკონსტრუქცია; (d) ელემენტარული დისკოს კვეთი  $p = 13$ ;  $q = 4$ ; შემთხვევაში; (e) მოლეკულის მოდელი რადიალურ პროექციაში; (f) მოლეკულის მოდელი გვერდითი პროექციაში. მოდელი აგებულია ორი იდენტური 40 Å სუბერთეულიდან.

**ნახევარი მოლეკულის რეკონსტრუქცია.** ტუბულინის მოლეკულა გამოიყოფოდა იზოხაზების 55-ზე მეტ დონეზე გავლებას. სურ. 105d-ზე მოყვანილია შესაბამისი ელემენტარული კვეთა. აქ უკვე  $\Delta = 3 \text{ \AA}$ , ხოლო  $\alpha \approx 110^\circ$ . მიღებული მონაცემების საფუძველზე დისკოებიდან სისქით 3 მმ აიგო მოლეკულის მოდელი (სურ. 105e,f). ამ მოდელზეც „ნახვრეტები“ ასევე წარადგენენ მოლეკულის მონაკვეთებს ცილოვანი მასალის შემცირებული რაოდენობით.

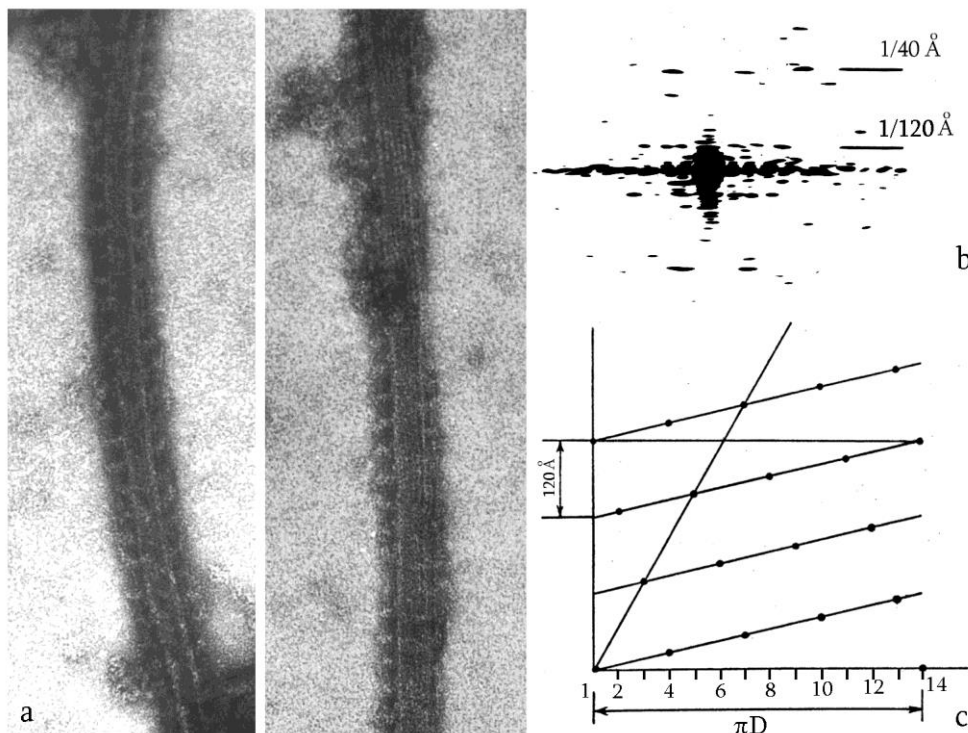
<sup>89</sup> დათვლის შედეგად მიღებულ ცხრილში სიმკვრივეები იმყოფება -100 დან +100 ფარგლებში. ეს კი ნიშნავს, რომ დონე 38 შესაბამება 76% სიმკვრივეს (0% – თეთრი ფერი; 100%– შავი).

### მიკრომილაკები დინეინით.

გარკვეულ ინტერესს წარმოადგენენ უფრო რთული წარმონაქმნები, რომლებსაც შეუძლიათ ფორმირება მიკრომილაკების და სხვა ფუნქციონალური ცილის – დინეინის მონაწილეობით. სურ. 106a-ზე მოყვანილია მიკროფოტოსურათები, რომლებზეც მიკრომილაკზე სწორედ ეს მოლეკულებია მიბმული. მათი სიგრძე 150 Å, ხოლო სისქე – 50 Å. ამ შემთხვევაში დიფრაქციულ სურათებზე აღინიშნება დამატებითი რეფლექსები 120 Å-ის შესაბამის ფენოვან ხაზზე (სურ. 106b). სავარაუდოთ ამ რეფლექსების დაკავშირება შეიძლება დინეინის მოლეკულების სპირალურ განლაგებას მილაკის გარე ზედაპირზე. შესაძლოა, რომ ისინი ჰქმნიან ერთშემავლიან სპირალს პარამეტრებით:

$$p = 13; \quad q = 4; \quad c = 360\text{Å}.$$

დინეინიანი მიკრომილაკების რადიალური პროექციები, რომლებზეც ნაჩვენებია მისი განთავსება მიკრომილაკის ზედაპირზე, მოყვანილია სურ. 106c-ზე.



სურ. 106. (a) მიკრომილაკები მიერთებული დინეინის მოლეკულებით (გადიდება 250 000 ×). (b) დინეინიანი მიკრომილაკების მახასიათებელი დიფრაქციული სურათი. ნაჩვენებია ფენოვანი ხაზი, რომელიც შეესაბამება დინეინის მიერთების პერიოდულობას რომელიც 120Å-ის ტოლია. (c) დინეინიანი მიკრომილაკების რადიალური პროექცია. წერტილებით ნაჩვენებია მიკრომილაკზე დინეინის მოლეკულის მიბმის ადგილები.

შეიძლება აღინიშნოს, რომ ზოგიერთ დიფრაქციულ სურათზე აღინიშნება რეფლექსები, რომლებიც შეესაბამება უფრო დიდ პერიოდულობას: 120, 240 და 360 Å, და რომლებიც წარმოადგენენ ბაქტერიული მიკრომილაკებისათვის დამახასიათებელი პერიოდულობის 960 Å-ის რიგებს.

### **14.5. მეოთხეული სტრუქტურის ფუნქციონალური დანიშნულება.**

რაში მდგომარეობს მეოთხეული სტრუქტურის დანიშნულება? ფერმენტებისათვის მეოთხეული სტრუქტურის არსებობა წარმოადგენს კოოპერატიული თვისებების გამოვლენის წინაპირობას. მრავალფერმენტიან პოლიფუნქციონალურ კომპლექსებში ის

უზრუნველყოფს რეაქციების გარკვეულ თანმიმდევრობას. გარდა ამისა არსებობენ ფერმენტები, რომლებსაც არ გააჩნია კოოპერატიულობა. ამასთან დაკავშირებით გამოითქმევა შემდეგი დაპირისპირებული მოსაზრებები:

1. თუ კოოპერატიულობა არ არის, ესე იგი ის უბრალოდ ჯერ არ დაადგინეს.
2. მეოთხეული სტრუქტურა ასრულებს მასტაბილიზირებულ ფუნქციას.
3. ჰეტეროლოგიურ სუბერთეულებს, მეოთხეული სტრუქტურის წყალობით, შეუძლიათ ერთი აქტიური ცენტრის ფორმირება.
4. შეიძლება იყოს ფერმენტების მეოთხეული სტრუქტურის რაიმე ფუნქციები რომლებიც, ჯერ კიდევ, არ არიან მკაფიოდ განსაზღვრული.
5. შესაძლებელია იყოს შემთხვევები, როდესაც მეოთხეულ სტრუქტურას არ გააჩნია ბიოლოგიური მნიშვნელობა.

ვირუსულ გარსებში მეოთხეული სტრუქტურა მნიშვნელოვან როლს ასრულებს თვითონ ნაწილაკების ფორმირებაში და ნუკლეინის მჟავის დაცვაში. ზოგიერთ სხვა ცილათა ასოციატებში მეოთხეული სტრუქტურის დანიშნულება ბოლო ხანს ასე თუ ისე ირკვევა. მაგალითად, აქტინში იქმნება სივრცული სტრუქტურა, რომელიც აუცილებელია შეკუმშვის მექანიზმის რეალიზებისათვის.



## 15. უჯრედების სტრუქტურის ბიოფიზიკური ასპექტი.

### 15.1. ზოგადი აღწერა.

ბიოლოგიური ორგანიზმების შემდეგი დონე წარმოდგენილია უჯრედის სახით, რომელიც წარმოადგენს ცოცხალი ორგანიზმის სტრუქტურულ და ფუნქციონალურ ერთეულს. ესაა ღია თერმოდინამიკური სისტემა, რომელიც იმყოფება დინამიურ წონასწორობაში, სითბური წონასწორობის მდგომარეობიდან შორს. უჯრედი ინარჩუნებს თავის სტრუქტურას გარემოსთან ენერჯის ნივთიერების და ინფორმაციის მიმოცვლის შედეგად.

ორგანიზმის მიერ საკვების სახით მიღებულ ნივთიერების სტრუქტურაში არსებულ ქიმიურ ენერჯიას, უჯრედი ხარჯავს მრავალგვარი (ქიმიური, მექანიკური, ოსმოსური) სახის მუშაობისა და სხვა ფუნქციების შესასრულებლად. როგორც ყველა სხვა სისტემა, უჯრედის ფუნქციონირებაც განპირობებულია მისი სტრუქტურით. მიუხედავად იმისა, რომ უჯრედები ერთობ სპეციალიზირებულია და ამდენად მკვეთრად განსხვავებული, არსებობენ გარკვეული პრინციპები, რომლის მიხედვითაც აიგება ყოველა უჯრედი.

ყველა მრავალუჯრედიანი ორგანიზმის უჯრედი შეიცავს შემდეგ ელემენტებს:

1. **ბირთვი** – უჯრედის მართვის ცენტრი. ყველა ინფორმაცია და სიგნალი, რომლებიც შეეხებიან სასიცოცხლო პროცესებს და უჯრედის გამრავლებას, ინახება ბირთვში DNA-ს თანმიმდევრობაში ჩაწერილი გენეტიკური ინფორმაციის სახით.
2. **რიბოსომები** – ცილის ფაბრიკები. აქ მიმდინარეობს ცილის სინთეზი.
3. **მიტოქონდრიები** – უჯრედის „ენერჯოსადგური“. აქ ხდება მაღალენერგეტიკული ფოსფატური ბმების აღდგენა.
4. **გოლჯის აპარატი** – ეუკარიოტული (ბირთვიანი) უჯრედის მემბრანული (დისკოსებრივი ტომრები) სტრუქტურები, რომლის დანიშნულებაცაა ენდოპლაზმურ რეტიკულუმში სინთეზირებული ნივთიერებების უჯრედიდან გამოყვანა.
5. **ენდოპლაზმური რეტიკულუმი (ER)** – წარმოადგენს მემბრანით შემოსულ ღრმულებს, ბუშტუკებს და არხებს. გრანულარულ ER-ზე დიდი რაოდენობითაა ჩალაგებული რიბოსომები. ER-ის მემბრანის ფართობი შეადგენს მთელი უჯრედის მემბრანის ფართობის ნახევარს. და ა.შ.

ყოველი უჯრედი შედგება ციტოპლაზმისაგან, რომელიც თავის მხრივ შედგება: წყლისაგან (75-85%), ცილებისაგან (19-20%), ლიპიდებისაგან (2-3%), ნახშირწყლებისაგან (1%) და ა.შ. წყალი უჯრედში წარმოქმნის განსაკუთრებულ დინამიურ მიკროფაზურ სტრუქტურას და იყოფა თავისუფალ (90-95%) და შებოჭილ ფრაქციებად.

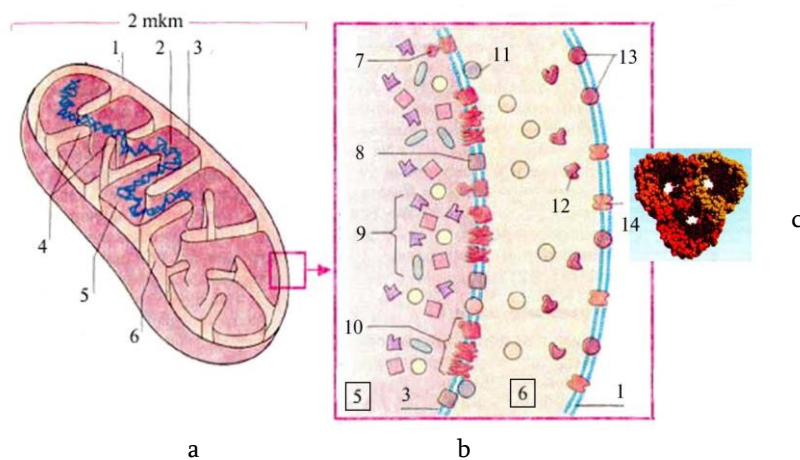
### 15.2. მიტოქონდრიების სტრუქტურა და ფუნქცია.

მიტოქონდრიები – ბაქტერიის ზომის ორგანოლებია (დაახლოებით  $1 \times 2$  მკმ). ისინი დიდი რაოდენობით ნაპოვნია თითქმის ყველა ეუკარიოტულ უჯრედში. ჩვეულებრივ უჯრედი შეიცავს დაახლოებით 2000 მიტოქონდრიას, რომელთა საერთო მოცულობა შეადგენს უჯრედის საერთო მოცულობის 25%. მიტოქონდრია შემოფარგლულია ორი მემბრანით – გლუვი გარე და დაკეცილი შიდათი, რომელსაც ძალზე დიდი ზედაპირი გააჩნია. შიდა მემბრანის ნაკეციები ღრმად შედიან მიტოქონდრიის მატრიქსში და ჰქმნიან გარდიგადმო ტიხრებს – კრისტებს. სივრცეს გარე და შიდა მემბრანებს შორის ჩვეულებრივ მემბრანათაშორისე სივრცეს უწოდებენ.

უჯრედების სხვადასხვა ტიპები განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან როგორც მიტოქონდრიების რაოდენობით და ფორმით, ასევე კრისტების რაოდენობითაც. განსაკუთრებულად ბევრი კრისტები აქვთ მიტოქონდრიებს ქსოვილებში, რომლებშიც აქტიურად

მიმდინარეობენ ჟანგვის პროცესები, მაგალითად გულის კუნთში. მიტოქონდრიების ფორმის ვარიაციები, რომელიც მის ფუნქციონალურ მდგომარეობაზეა დამოკიდებული, შეიძლება აღინიშნებოდეს ერთი ტიპის ქსოვილებში. მიტოქონდრიები – ცვალებადი და პლასტიკური ორგანოებია.

მიტოქონდრიების მემბრანები შეიცავენ ინტეგრალურ მემბრანულ ცილებს. გარეთა მემბრანაში შედიან პორინები, რომლებიც ჰქმნიან ფორებს და გამჭირვალეს ხდიან მემბრანებს ნივთიერებებისათვის მოლეკულური მასით 10 კდალ-მდე (სურ. 107c). მიტოქონდრიის შიდა მემბრანა კი უმრავლესი მოლეკულისათვის გაუმტარია; გამონაკლის წარმოადგენენ  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ . მიტოქონდრიების შიდა მემბრანა ხასიათდება ცილების უჩვეულოდ მაღალი შემცველობით (75%). მათ რიცხვში შედიან **სატრანსპორტო ცილა-გადამტანები**, **ფერმენტები**, **სუნთქვითი ჯაჭვის კომპონენტები** და **ATP-სინთაზა**. მატრიქსი ასევე ცილებითაა გამდიდრებული, განსაკუთრებით კი ციტრატის ციკლის ფერმენტებით.



სურ. 107. მიტოქონდრიის სქემატური გამოსახულება (a), მისი ორმაგი მემბრანის გადიდებული გამოსახულება (b) და ტრიმერული ფორმირებული პორინის არხის გადიდებული გამოსახულება (ზედახედი) (c).

1 – გარე მემბრანა; 2 – DNA; 3 – შიდა მემბრანა; 4 – კრისტები; 5 – მატრიქსი; 6 – მემბრანათაშორისე სივრცე; 7 – ATP-სინთაზა; 8 – გადამტანი; 9 – ჟანგვითი მეტაბოლიზმის ფერმენტები; 10 – „სუნთქვითი ჯაჭვი“; 11 – კრეტინკინაზა; 12 – ნუკლეოტიდკინაზა; 13 – ლიპიდური ცვლის ფერმენტები; 14 – პორინის ტრიმერი.

მიტოქონდრიები უჯრედის „ძალსადგურებს“ წარმოადგენენ, ვინაიდან საკვები ნივთიერებათა ჟანგვითი დეგრადირების ხარჯზე, მათში სინთეზირდება უჯრედისათვის აუცილებელი ATP-ს უმეტესი ნაწილი. მიტოქონდრიაში ლოკალიზებულია შემდეგი მეტაბოლური პროცესები: პირუვატის გადაქცევა აცეტილ-KoA-ში, რომელიც კატალიზირდება პირუვატდეჰიდრიგენაზული კომპლექსით; **ციტრატული ციკლი**; **სუნთქვითი ჯაჭვი**, შეუღლებული **ATP-ის სინთეზთან** (ამ პროცესების შეუღლება ატარებს „ჟანგვადი ფოსფორილირების“ სახელს); ცხიმოვანი მჟავების დაშლა  **$\beta$ -ჟანგვით** და ნაწილობრივ **შარდოვანას ციკლი**. მიტოქონდრიები აგრეთვე ამარაგებენ უჯრედს შუალედური მეტაბოლიზმის პროდუქტებით და მოქმედებენ ER-თან ერთობლივად როგორც კალციუმის იონების დეპოები, რომლებიც იონური ტუმბოების წყალობით უზრუნველყოფენ უჯრედში  $Ca^{2+}$ -ის კონცენტრაციის მუდმივ დაბალ დონეს ( $< 1$  მკმოლ/ლ).

მიტოქონდრიის მთავარ ფუნქციას წარმოადგენს *ენერგიით მდიდარი სუბსტრატების* (ცხიმოვანი მჟავები, პირუვატი, ამინომჟავების ნახშირბადის ჩონჩხი) ციტოპლაზმიდან *მიტაცება* და მათი, ATP-ის სინთეზთან შეუღლებული, ჟანგვადი დაშლა  $CO_2$  და  $H_2O$  შექმნით.

ციტრატული ციკლის რეაქციებს მივყევართ ნახშირბადშემცველი შენაერთების (CO<sub>2</sub>) სრულ ჟანგვამდე და აღდგენილი ეკვივალენტების შექმნამდე, ძირითადად აღდგენილი კოფერმენტების სახით. ამ პროცესების მეტი წილი მიედინება მატრიქსში. **სუნთქვის ჯაჭვის ფერმენტები**, რომლებიც რეჟანგავენ აღდგენილ კოფერმენტებს, ლოკალიზებულია მიტოქონდრიების შიდა მიმბრანაში. ელექტრონების დონორის როლში, ჟანგბადის აღდგენისათვის და წყლის შექმნისათვის გამოიყენება NADH და ფერმენტთან დაკავშირებული FADH<sub>2</sub><sup>90</sup>. ეს მაღალ ენერჯული რეაქცია მრავალსაფეხურიანია და შიდა მემბრანის გავლით მატრიქსიდან მემბრანათაშორისე სივრცეში პროტონების (H<sup>+</sup>) გადატანასთან არის შეუღლებული. შედეგად, შიდა მემბრანაზე წარმოიქმნება **ელექტროქიმიური გრადიენტი**. მიტოქონდრიებში ელექტროქიმიური გრადიენტი გამოიყენება ADP და არაორგანული ფოსფატიდან (P<sub>i</sub>) ATP-ის სინთეზისათვის, *ATP-სინთაზის* კატალიზით. ელექტროქიმიური გრადიენტი აგრეთვე რიგი სატრანსპორტო სისტემის მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს.

### 15.3. მემბრანა და მისი სტრუქტურა.

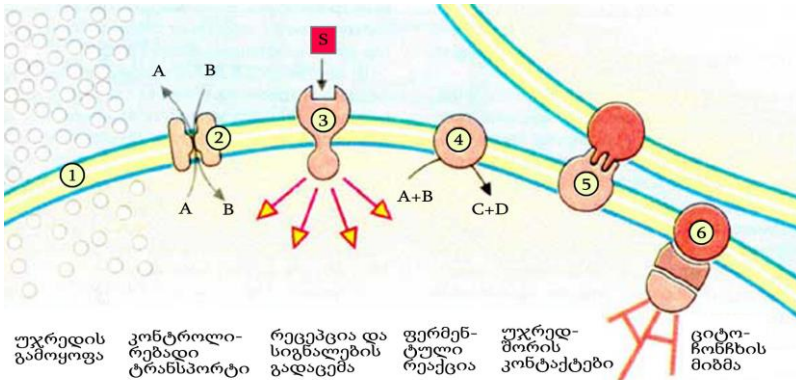
უჯრედი გარემოსგან გამოყოფილია პლაზმური (უჯრედული) მემბრანით. ეს გაცილებით უფრო მნიშვნელოვანი წარმონაქმენია, ვიდრე უბრალო საზღვარი. მემბრანის გავლით, რომლის სისქე  $\approx 100 \text{ \AA}$ , იონები იტუმბება უჯრედში, სხვა ნივთიერებები კი პირიქით გარეთ გამოიდევენებიან, და ეს ყველაფერი ხდება კონცენტრაციის გრადიენტის გადალახვით. ამ რიგად უჯრედის მემბრანა – ეს ღრმად ფუნქციონალური და მაღალ-ორგანიზებული სტრუქტურაა. ცხოველმოქმედ უჯრედში მემბრანა უწყვეტია და ქმნის ჩაკეტის სივრცეს. ამავე დროულად ის არასიმეტრიულია – შიდა და გარე ზედაპირები სხვადასხვაგვარადაა აგებული და განსხვავებულად ფუნქციონირებს. ცხოველთა უჯრედებში ყველაზე მნიშვნელოვან მემბრანებს წარმოადგენენ პლაზმური მემბრანები, შიდა და გარე ბირთვის მემბრანები, ენდოპლაზმური რეტიკულუმის და გოლჯის აპარატის მემბრანები, შიდა და გარე მიტოქონდრიული მემბრანები. ლიზოსომები, პეროქსისომები, სხვა და სხვა ვეზიკულები ასევე გამოყოფილია ციტოპლაზმისაგან მემბრანებით. მცენარეთა უჯრედები შეიცავენ დამატებით ქლოროპლასტების, ლეიკოპლასტების და ვაკუოლების მემბრანებს. ეს მემბრანები ძალიან განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, თუმცა სტრუქტურულად ბევრი საერთო აქვთ – წარმოადგენენ ცილებისაგან და ლიპიდებისაგან შემდგარ ორმაგ ფენას რომელიც სტაბილიზირებულია ჰიდროფობული ბმებით.

ბიომემბრანები და მათში შემავალი ელემენტები შემდეგ ფუნქციებს ასრულებენ (იხ. სურ. 108):

1. უჯრედების და ორგანოების შემოფარგვლა და განცალკევება. უჯრედების განცალკევება უჯრედშორისი გარემოსაგან პლაზმური მემბრანით ხორციელდება, რომელიც იცავს უჯრედებს მექანიკური და ქიმიური ზეგავლენისაგან. პლაზმური მემბრანა ასევე უზრუნველყოფს მეტაბოლიტების და არაორგანული იონების კონცენტრაციების სხვაობას შიდა და გარე გარემოებს შორის.
2. მეტაბოლიტების და იონების კონტროლირებადი ტრანსპორტი განსაზღვრავს შიდა გარემოს, რაც მნიშვნელოვანია ჰომეოსტაზისათვის, ანუ მეტაბოლიტების და არაორ-

<sup>90</sup> ნიკოტინამიდადენინდინუკლეოტიდი (*Nicotinamide adenine dinucleotide, (NAD)*) — კოფერმენტი, რომელიც ყველა ცოცხალ უჯრედს გააჩნია. NAD წარმოადგენს დინუკლეოტიდს, და შედგება ორი ნუკლეოტიდისაგან, რომლებიც თავისი ფოსფატური ჯგუფებით არიან დაკავშირებული. NAD ორ ფორმაში არსებობს: დაჟანგულში (NAD<sup>+</sup>) და აღდგენილი (NADH). **ფლავინადენინდინუკლეოტიდი** (*Flavin adenine dinucleotide, (FAD)*) — კოფერმენტი, რომელიც მონაწილეობს ბევრ ჟანგვა-აღდგენით ბიოქიმიურ პროცესში. FAD ორ ფორმაში არსებობს: დაჟანგულში (FAD) და აღდგენილი (FADH<sub>2</sub>).

განული იონების მუდმივი კონცენტრაციის და სხვა პარამეტრების შენარჩუნებისათვის. მეტაბოლიტების და არაორგანული იონების რეგულირებადი და ამორჩევითი ტრანსპორტი ფორებში და გადამტანების მეშვეობით შესაძლებელი ხდება უჯრედების და ორგანოების განცალკევების გამო მემბრანული სისტემის გამოყენებით.



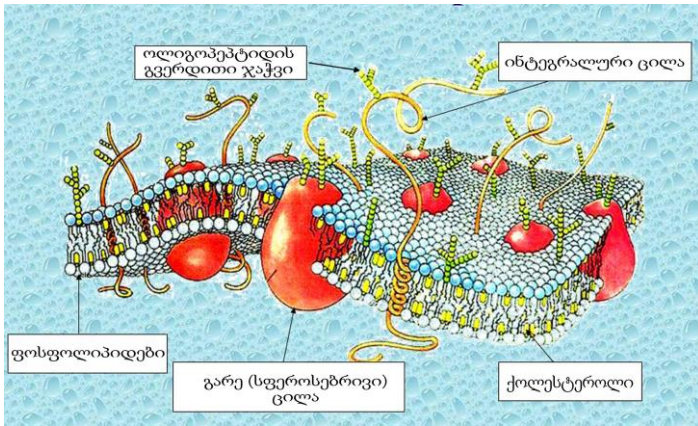
სურ. 108. მემბრანების ფუნქციები.

3. უჯრედგარეშე სიგნალების მიღება და მათი გადაცემა უჯრედში, და ასევე სიგნალების ინიცირება.
4. ფერმენტული კატალიზი. ბევრი ფერმენტი მემბრანებშია ლოკალიზებული, საზღვარზე ლიპიდური და წყლის ფაზებს შორის. სწორედ აქ წარიმართება რეაქცია არაპოლარულ სუბსტრატებთან. მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ ლიპიდების ბიოსინთეზი და არაპოლარული ქსენობიოტიკების მეტაბოლიზმი. მემბრანებში ლოკალიზებულია ენერგეტიკული ცვლის ყველაზე მნიშვნელოვანი რეაქციები, ისეთი, როგორც ჟანგვადი ფოსფორილირება (სუნთქვის ჯაჭვი) და ფოტოსინთეზი.
5. კონტაქტური ურთიერთობა უჯრედშორისი მატრიქსთან და ურთიერთობა სხვა უჯრედებთან უჯრედების გაერთიანების და ქსოვილების შექმნის დროს.
6. ციტოჩონჩხის მიბმა, რომელიც უზრუნველყოფს უჯრედების და ორგანოების ფორმის შენარჩუნებას და უჯრედის მოქნილობას.

### ბიომემბრანების შემადგენლობა.

უჯრედული მემბრანა წარმოადგენს ორმაგ შრეს, რომელიც აგებულია ლიპიდების კლასის მოლეკულებისაგან, რომელთა უმეტესობა წარმოადგენს ე.წ. რთულ ლიპიდებს – ფოსფოლიპიდებს (სურ. 109). ლიპიდების მოლეკულებს გააჩნია ჰიდროფილური („თავი“) და ჰიდროფობული („კუდი“) ნაწილები. მემბრანის წარმოქმნისას მოლეკულების ჰიდროფობული ნაწილები აღმოჩნდებიან შიგნით მიმართულნი, ხოლო ჰიდროფილური – ექსპონირებულია გარე მხარეს. მემბრანები – ინვარიანტული<sup>91</sup> სტრუქტურებია – ძალზე მსგავსი სხვადასხვა ორგანიზმებისათვის. მემბრანის სისქე შეადგენს დაახლოებით 80 Å. გარდა ამისა მემბრანის შემადგენლობაში შედიან ცილები და ნახშირწყლები. ამ კომპონენტების შეფარდება ვარირებს ერთი მემბრანიდან მეორემდე. მთავარი კომპონენტები ჩვეულებრივ ცილებია, რომლებიც შეადგენენ მემბრანის მასის თითქმის ნახევარს. ნახშირწყლები მონახულია მხოლოდ მემბრანის გარე შრეში; ისინი მემბრანის სრული მასის სულ რამდენიმე პროცენტს შეადგენენ. მემბრანის არაჩვეულებრივი შემადგენლობის მაგალითად შეიძლება ვარირება მოვიყვანოთ ნერვული უჯრედების მიელინის გარსი, რომლის სამ მეოთხედს შეაგენენ ლიპიდები. პირიქით, მიტოქონდრიების შიდა მემბრანა ხასიათდება ლიპიდების დაბალი შემცველობით და ცილების დიდი რაოდენობით.

<sup>91</sup> ინვარიანტული – არ ექვემდებარება ცვლილებას.



სურ. 109. უჯრედის მემბრანის გამოსახულება. პატარა ცისფერი და თეთრი ბურთულები შეესაბამება ლიპიდების ჰიდროფილურ „თავეებს“, ხოლო მათზე მიერთებული ხაზები – ჰიდროფობულ „კუდებს“. სურათზე ნაჩვენებია მხოლოდ ინტეგრალური მემბრანული ცილები (წითელი გლობულები და ყვითელი სპირალები). ყვითელი ოვალური წერტილები მემბრანის შიგნით – ქოლესტეროლის მოლეკულებია.

ბიოლოგიურმა მემბრანამ შეიძლება ჩაირთოს სხვადასხვა პროტეინები: ინტეგრალური (მემბრანის გამჭოლ თავსდება), ნახევრად ინტეგრალური (ერთი მხარით ჩაძირულია გარე ან შიდა ლიპიდურ შრეში), ზედაპირული (განლაგებულია ზედა მემბრანაზე ან აკრავს მემბრანის შიდა მხარეს). ზოგიერთი პროტეინები წარმოადგენენ უჯრედის მემბრანის კონტაქტის წერტილებს ციტოზონთან უჯრედის შიგნით, და უჯრედის კედელთან (თუ კი ის არსებობს) მის გარეთ. ზოგი ინტეგრალური პროტეინი ასრულებს იონური არხების, სხვადასხვა ტრანსპორტიორების და რეცეპტორების ფუნქციას.

მემბრანები შედგება სამი სახის ლიპიდებისაგან: ფოსფოლიპიდებისაგან, გლიკოლიპიდებისაგან და ქორესტეროლისაგან. ფოსფოლიპიდები და გლიკოლიპიდები შედგება ორი გრძელი ჰიდროფობული ნახშირწყალბადის „კუდებისაგან“, რომლებიც დამუხტულ ჰიდროფილურ „თავთან“ არიან დაკავშირებული. ქორესტეროლი იკავებს თავისუფალ სივრცეს ლიპიდების ჰიდროფობულ „კუდებს“ შორის და არ აძლევს მათ მოხრის საშუალებას, რითიც მემბრანას სიხისტეს ანიჭებს. ამიტომაც მემბრანები ქორესტეროლის დაბალი შემცველობით უფრო მოქნილია, ხოლო მაღალით – უფრო ხისტი და მყიფე.

უჯრედული მემბრანები ხშირად ასიმეტრიულია – ანუ ფენები განსხვავდებიან ლიპიდების შემადგენლობით. გამწვანებულია ცალკეული მოლეკულის ერთი ფენიდან მეორეში გადასვლა (ე.წ. ფლიპ-ფლოპი). განსხვავდება მემბრანული ცილების შემადგენლობა და ორიენტაცია.

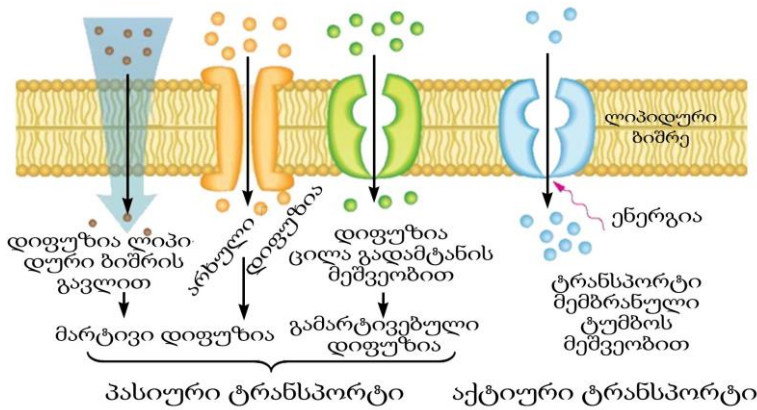
საჭიროა გამოიყოს ეგრე წოდებული მემბრანული ორგანელები – ესაა შეკრული ცალკეული ან ერთმანეთთან დაკავშირებული ციტოპლაზმის უბნები, რომლებიც გიალოპლაზმისაგან მემბრანებითაა გამოყოფილი. ერთმემბრანიან ორგანელებს მიეკუთვნებიან: ენდოპლაზმური ბადე, გოლჯის აპარატი, ლიზოსომები, ვაკუოლები, პეროქსიომები; ორმემბრანიანებს კი: ბირთვი, მიტოქონდრიები, პლასტიდები. გარედან უჯრედი შემოფარგლულია პლაზმატური მემბრანით. სხვადასხვა ორგანელების მემბრანების აგებულება განსხვავდება ლიპიდების და მემბრანული ცილების შემადგენლობით.

ნორმალური უჯრედის მემბრანა, როგორც ითქვა, ყოველთვის მთლიანია. ცნობილია, რომ რიგი პათოლოგიური მდგომარეობის დროს მემბრანის მთლიანობა დარღვეულია, ანუ მიმდინარეობს სტრუქტურის რღვევა, და სისტემა ვეღარ ახერხებს ნორმალურ დონეზე შეინარჩუნოს დინამიური წონასწორობა.

როგორც უკვე აღინიშნა, მემბრანის ერთ ერთ ფუნქციას სატრანსპორტო ფუნქცია წარმოადგენს. არსებობს ეგრე წოდებული პასიური (ენერგიის ხარჯვის გარეშე) და აქტიური (ენერგიის ხარჯვით) ტრანსპორტი (იხ. სურ. 110).

**პასიური ტრანსპორტი** ეფუძნება დიფუზიის მოვლენას. ამასთან ერთად განასხვავებენ უბრალო, და გამარტივებულ დიფუზიას. **უბრალო დიფუზია** ხორციელდება უშუალოდ მემბრანის გარსის გავლით (ბილიპიდურ ფენაში), ან სპეციალურ პატარა არხებში. უბრალო დიფუზიის მიმართულებას განსაზღვრავს მხოლოდ კონცენტრაციების სხვაობა

მემბრანის ორივე მხარეს შორის. უბრალო დიფუზიის გზით უჯრედში აღწევენ ჰიდროფობული ნივთიერებები ( $O_2$ ,  $N_2$ , ბენზოლი) და პოლარული მცირე ზომის მოლეკულები ( $CO_2$ ,  $H_2O$ , შარდოვანა). ვერ აღწევენ პოლარული შედარებით დიდი მოლეკულები (ამინომჟავები, მონოსახარიდები), დამუხტული ნაწილაკები (იონები) და მაკრომოლეკულები (DNA, ცილები).



სურ. 110. ნივთიერებათა ტრანსპორტის სქემა პლაზმატურ მემბრანაში.

უბრალო დიფუზია წარმოადგენს პროცესს, რომლის დროსაც აირი ან გახსნილი ნივთიერებები გავრცელდებიან და შეავსებენ უჯრედის მთელ მოცულობას. სითხეში გახსნილი მოლეკულები ან იონები, ქაოტიურ მდგომარეობაში ყოფნისას, ეჯახებიან უჯრედის მემბრანის კედლებს, რამაც შეიძლება გამოიღოს ორმაგი შედეგი: მოლეკულა ან აირეკლება, ან განჭვალავს მემბრანას. თუ კი ბოლო შემთხვევის ალბათობა მაღალია, ამბობენ რომ მემბრანა გამტარია მოცემული ნივთიერებისათვის.

თუ მოცემული ნივთიერების კონცენტრაცია მემბრანის ორ მხარეს შორის განსხვავდება, წარმოიქმნება პროცეცი, რომელიც ხელს შეუწყობს კონცენტრაციების გათანაბრებას. უჯრედულ მემბრანაში გადიან როგორც კარგად ხსნადი (ჰიდროფილური), ასევე არახსნადი (ჰიდროფობული) ნივთიერებები.

იმ შემთხვევაში როდესაც მოცემული ნივთიერებისათვის მემბრანა ძნელადაა გამტარი ან და სულაც გაუმტარია, ის მოექცევა ოსმოსური ძალების ქმედების ქვეშ. უჯრედში ნივთიერების უფრო დაბალ კონცენტრაციაზე ის იკუმშება, ხოლო უფრო მაღალ კონცენტრაციაზე – უშვებს მის მიერ შემოფარგლულ არეში წყალს.

არხიანი დიფუზიის შემთხვევაში, რომელიც ასევე წარმოადგენს უბრალო დიფუზიის ნაირსახეობას, მაგალითის სახით შეიძლება მოვიყვანოთ პროტონული არხები. თვით დასახელებიდან ჩანს, რომ ამ შემთხვევაში საუბარია უკვე დამუხტული ნაწილაკების (იონების) გადატანაზე.

პასიური ტრანსპორტის ნაირსახეობას წარმოადგენს ეგრე წოდებული გამარტივებული დიფუზია, ან და დიფუზია მემბრანაში ჩაძირული ცილა გადამტანების მეშვეობით. ყველა სატრანსპორტო ცილა ჰქმნის უწყვეტ ცილოვან გასასვლელს მემბრანაში. ცილა გადამტანების მეშვეობით ხორციელდება ნივთიერებების როგორც პასიური, ასევე აქტიური ტრანსპორტები. პოლარული ნივთიერებები (ამინომჟავები, მონოსახარიდები), დამუხტული ნაწილაკები (იონები) მემბრანაში გადიან გამარტივებული დიფუზიის მეშვეობით, ცილა-არხების ან და ცილა-გადამტანების მონაწილეობით. ცილა-გადამტანების მონაწილეობა უზრუნველყოფს გამარტივებული დიფუზიის უფრო მაღალ სიჩქარეს უბრალო პასიური დიფუზიასთან შედარებით. გამარტივებული დიფუზიის სიჩქარე რიგ მიზეზზეა დამოკიდებული: გადასატანი ნივთიერების ტრანსმემბრანულ კონცენტრაციულ გრადიენტზე, გადამტანის რაოდენობაზე, რომელიც უკავშირდება გადასატან

ნივთიერებას, ნივთიერების და გადამტანის დაკავშირების სიჩქარეზე მემბრანის ერთ ზედაპირზე (ვთქვათ გარეთაზე), კონფორმაციული ცვლილებების სიჩქარეზე გადამტანის მოლეკულაში, რომლის შედეგადაც ნივთიერება გაედინება მემბრანაში და განთავისუფლდება მის მეორე მხარეს. გამარტივებული დიფუზია არ მოითხოვს სპეციალურ ენერგეტიკულ დანახარჯებს ATP-ის ჰიდროლიზის ხარჯზე. ეს თავისებურება განასხვავებს გამარტივებულ დიფუზიას აქტიური ტრანსმემბრანული ტრანსპორტისაგან.

ბიოლოგიური მემბრანების გავლით ჩვეულებრივი დიფუზიის გზით უჯრედში მრავალი ნივთიერება აღწევს. მაგრამ ნივთიერებებს, რომლებსაც მაღალი პოლარობა და ორგანული ბუნება ახასიათებთ, არ შეუძლიათ მემბრანაში ჩვეულებრივი დიფუზიის გზით გავლა, ეს ნივთიერებები აღწევენ უჯრედში გამარტივებული დიფუზიის მეშვეობით. ნივთიერების გამარტივებულ დიფუზიას უწოდებენ დიფუზიას მისი კონცენტრაციის გრადიენტით, რომელიც სპეციალური ცილა-გადამტანებით ხორციელდება.

ამ სახის ტრანსპორტის დამახასიათებელ თვისებებს წარმოადგენენ:

1. ნივთიერებათა გადატანის მაღალი სიჩქარე.
2. დამოკიდებულება ნივთიერებათა აგებულებაზე.
3. გაჯერების უნარი.
4. კონკურენტუნარიანობა და სპეციალურ ნივთიერებების (ინჰიბიტორების) მიმართ მგრძობიარობა.

ყველა ზემოდჩამოთვლილი თვისებები წარმოადგენენ სპეციალური ცილა-გადამტანების მოქმედების, და აგრეთვე უჯრედში მათი დაბალი შემცველობის შედეგს. გადასატანი ნივთიერებათა მაქსიმალური რიცხვის მიღწევისას, როდესაც ყველა გადამტანი დაკავებულია, ნივთიერებათა შემდგომ ზრდას არ მოყვება გადასატანი ნივთიერებების რაოდენობის გაზრდა — გაჯერების მოვლენა. ნივთიერებებს, რომლებიც მუდმივად გადაიტანება ერთი და იგივე გადამტანით, ექნებათ კონკურენცია ამ გადამტანის მიმართ — კონკურენციის მოვლენა.

არსებობს ტრანსპორტის რამდენიმე სახე. **უნიტრანსპორტი** – როდესაც მოლეკულები ან იონები გადაიტანება მემბრანაში სხვა ნივთიერების მიუხედავად. **სიმპორტი** – ორი სხვადასხვა ორგანული მოლეკულის ან იონის დაწყვილებული ტრანსპორტი უჯრედის მემბრანაში აქტიური ტრანსპორტის წყალობით, რომელიც ხორციელდება მემბრანის შიგნით განლაგებული სპეციფიური ცილებით. **ანტიპორტი** – ეს არის ნივთიერების გადატანა თავისი კონცენტრაციის გრადიენტის საწინააღმდეგოთ, რომლის დროსაც სხვა ნივთიერება გადაიტანება თავისი კონცენტრაციის გრადიენტის საწინააღმდეგო მიმართულებით (ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბო).

ცილა-გადამტანები — ტრანსმემბრანული ცილებია, რომლებიც სპეციფიურად აკავშირებს ტრანსპორტირებადი ნივთიერების მოლეკულას და, კონფორმაციის შეცვლით, ახორციელებენ ამ მოლეკულის გადატანას მემბრანის ლიპიდურ შრეში. ყველა ტიპის ცილა-გადამტანებში არსებობს ტრანსპორტირებადი მოლეკულის დაკავშირების გარკვეული უბნები. მათ შეუძლიათ განახორციელონ როგორც პასიური, ასევე აქტიური მემბრანული ტრანსპორტი.

აქტიური ტრანსპორტის შემთხვევაში ნივთიერების გადატანა ხორციელდება ATP-ის ენერჯის ხარჯზე, და ასპარეზზე გამოდიან მემბრანული ტუმბოები. მათი მონაწილეობით ხორციელდება მოლეკულების და იონების უჯრედში გადატანა ელექტროქიმიური გრადიენტის გადალახვით. არსებობენ ნატრიუმის, კალიუმის, კალციუმის და სხვა ტუმბოები.

## 15.4. აქტიური ტრანსპორტი.

დადგა დრო გავიხსენოთ თუ რატომაა, რომ ნატრიუმის და კალიუმის იონები მოქმედებენ უჯრედის სხვადასხვა მხარეს და რითია საინტერესო პოტენციალთა სხვაობა, რომელიც წარმოიქმნება ორგანიზმში მყოფ ხსნარებში (უჯრედებში და მათ ფარეთ).

კალიუმის იონები უპირატესად უჯრედის შიგნით იმყოფებიან, ხოლო ნატრიუმის – უჯრედგარე სივრცეში. სწორედ ეს ფაქტი წარმოადგენს ერთ ერთ საოცარ და ჯერ ჯერობით ბოლომდე ვერ ახსნილ ცხოვრებისეულ ფენომენს. თითქოს და ყველაფერი პირიქით უნდა ყოფილიყო: ნატრიუმის იონი კალიუმის იონზე ხომ 1,5 ჯერ უფრო პატარაა, ის უფრო ადვილად აღწევს მემბრანებში და მამასადამე, თვითონ უჯრედში უნდა ყოფილიყო მეტი რაოდენობით ვიდრე მოუქნელი კალიუმის იონები. მაგრამ ნატრიუმის იონები უფრო ადვილად იზიდავენ წყლის მოლეკულებს, რითიც თავის გარშემო ჰქმნიან სქელ ჰიდრატულ გარსს, რომელიც ეწინააღმდეგება მემბრანაში გაღწევას.

ეტყობა ამიტომაც უჯრედი მიისწრაფის ნატრიუმის განდევნას, რათა მასში არ დაგროვდეს წყალი და არ მოხდეს ოსმოსური შოკი. სისხლში, მაგალითად ერიტროციტებში, კალიუმის რაოდენობა თითქმის 15 ჯერ მეტია ვიდრე ნატრიუმის, მაშინ როდესაც პლაზმაში მისი რაოდენობა 20 ჯერ ნაკლებია. მხოლოდ ორგანიზმის დაღუპვის შემდეგ უჯრედის შიგნით და გარეთ მყარდება კალიუმის და ნატრიუმის იონების კონცენტრაცია მათი დიფუზიის კოეფიციენტების შესაბამისად. მაგრამ რისთვისაა საჭირო იონების კონცენტრაციის ასეთი განსხვავება? თურმე ეს ყველაფერი საჭიროა პოტენციალთა სხვაობის შესაქმნელად, რომელიც, როგორც ცნობილია, ხელს უწყობს მუხტების გადაადგილებას.

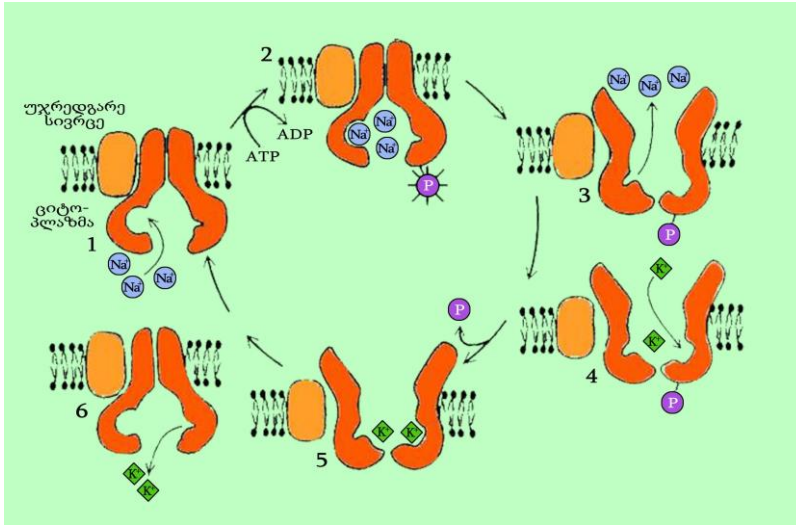
ცოცხალი ორგანიზმის საოცარმა და პირველი ხედვით სადღაც არაბუნებრივმა უნარმა არეგულიროს კალიუმის და ნატრიუმის იონების ნაკადები წარმოშვა ბევრი მითქმა მოთქმა ამ პროცესის მექანიზმის შესახებ. თვლიდნენ კიდევაც, რომ საქმეა უჯრედში მყოფი წყლის განსაკუთრებულ თვისებებში, მაგრამ თანდათან ბევრი მოსაზრება მოიხსნა. სადღეისოდ ამ მოვლენის მთელი მრავალსახეობა განიხილება მოდელის სახით, რომელსაც დაარქვეს იონური ან და ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბო. ეს ძალზე ზუსტი დასახელებაა ცოცხალი მოწყობილობისა, რომელიც „გადატუმბავს“ იონებს „დინების საწინააღმდეგოდ“, კონცენტრაციის გრადიენტის გადალახვით.

პირველმა ვინც გააცნო ქვეყანას ორგანიზმში ელექტრული პოტენციალთა სხვაობის არსებობა და შეისწავლიდა მის ელექტრულ აქტივობას, იყო XIX საუკუნის ცნობილი გერმანელი ფიზიოლოგი ე.დუბუა-რეიმონი. მისი საყვარელი კვლევის „ინსტრუმენტი“ ამ საქმეში იყო ჩვეულებრივი ბაყაყის ტყავი. სწორედ ის წარმოადგენს მშვენიერ იარაღს როგორც ბიოლოგიური მემბრანების, ასევე ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოების კვლევისას.

როგორც აღმოჩნდა, თუ კი მოვათავსებთ ბაყაყის ტყავს სუფრის მარილის ხსნარში, აღმოჩნდება, რომ მას შეუძლია იონების გადატუმბვა თავისი გარე ზედაპირის მხრიდან შიდა მხარის მიმართულებით. ეს პროცესი მაშინაც გრძელდება, როესაც მარილის კონცენტრაცია ხსნარში კანის შიგნითა მხრიდან გახდება  $10^5$  ჯერ მეტი ვიდრე გარედან. ბუნებრივია, რომ ბაყაყის ტყავი გაცილებით რთულია ვიდრე უბრალოდ მემბრანა, მაგრამ ის წარმოადგენს მოხერხებულ მოდელს ექსპერიმენტებისათვის. იონური ტუმბოების კვლევები ტარდება ცხოველების სხვადასხვა ორგანოებზე, ისეთზე როგორცაა ოქროს თევზების ნაღვლის ბუშტი, გომბეშოების შარდის ბუშტი, კალმარების და კიბორჩხალეების ნერვული ბოჭკოები... იონების ტრანსპორტს ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოების მეშვეობით აქტიური ტრანსპორტი დაარქვეს. ბუნებრივია, რომ აქტიური ტრანსპორტი გულისხმობს ენერგეტიკულ ხარჯვებს: მისი მუშაობის ენერჯის წყაროდ წარმოგვიდგება იგივე ადენოზინტრიფოსფატი — ATP.



როგორც ვარაუდებენ, ცოცხალი ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბო წარმოადგენს ATP-ის გამხლეობის ფერმენტს, რომელიც თავად მემბრანაშია ჩანერგილი – ე.წ. ნატრიუმ-კალიუმის ATP-აზას. ასეთი მანქანა ამოქმედდება უჯრედის შიგნით  $\text{Na}^+$ -ის ან უჯრედის გარედ  $\text{K}^+$ -ის იონების კონცენტრაციის გაზრდის შემთხვევაში.



სურ. 111. მუშაობის ერთი ციკლის განმავლობაში  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ის ტუმბო ამოტუმბავს უჯრედიდან 3  $\text{Na}^+$ -ის და ჩატუმბავს 2  $\text{K}^+$ -ის იონს ATP-ის მოლეკულის ერთი მაკროერგული გავშირის საფასურად.

ვინაიდან ნატრიუმ-კალიუმის ATP-აზის ფუნქციონირების შედეგს წარმოადგენს იონების მიმოცვლა უჯრედის გარე და შიდა სივრცეებს შორის, შეიძლება ითქვას რომ ეს ფერმენტი-ტუმბო „მუშაობს“ ეტაპობრივად, ანუ „ნაბიჭების გადადგმით“ (იხ. სურ. 111):

1. მემბრანის შიდა მხარეზე 3  $\text{Na}^+$ -ის იონის მიერთება – ATP-აზის აქტიური ცენტრის კონფორმაციის შეცვლა.
2. ATP-ის ჰიდროლიზი, თანაც ფოსფატ-იონი ფიქსირდება მემბრანის შიდა მხრიდან.
3. თავად ATP-აზის კონფორმაციის ცვლილება. შედეგად  $\text{Na}^+$ -ის 3 იონი აღმოჩნდება მემბრანის გარეთა მხარეზე. ამასთან იონი (ფოსფატი) ჯერ კიდევ მიერთებულია უჯრედის შიდა მხარეზე.
4. ATP-აზის აქტიურ ცენტში, რომელიც ამ ყველაფრის შედეგად გაიხსნა, შეაღწევს 2  $\text{K}^+$ -ის იონი. ამასთან იონი (ფოსფატი) ჯერ კიდევ უჯრედის შიდა მხარეზეა მიერთებული.
5. ATP-აზის აქტიური ცენტრი მიერთებს  $\text{K}^+$ -ის ორ იონს – იცვლება მისი კონფორმაცია. ამასთან იონი (ფოსფატი) გამოედინება მემბრანიდან (გადის უჯრედის ფარგლებს გარედ).
6. თავად ATP-აზის კონფორმაციის ცვლილება. შედეგად  $\text{K}^+$ -ის 2 იონი აღმოჩნდება მემბრანის შიდა მხარეზე.

ამრიგად, ერთი ATP-ის მოლეკულის ჰიდროლიზის შედეგად უჯრედიდან გამოიღვენება სამი  $\text{Na}^+$ -ის იონი (სამი დადებითი მუხტი), ხოლო უჯრედში შეაღწევს ორი  $\text{K}^+$ -ის იონი (ორი დადებითი მუხტი). შედეგად ჯამური ელექტრული მუხტი (-1)-ით იცვლება.

ეხლა კი ვნახოთ შემდეგ რა ხდება. უჯრედის შიდა და გარე სივრცეები თერმოდინამიური პოზიციებიდან გამომდინარე ეკვივალენტური რომ ყოფილიყო,  $\text{Na}^+$ -ის იონების კონცენტრაცია ბოლო ბოლო გადააჭარბებდა  $\text{K}^+$ -ის იონების კონცენტრაციას. მაგრამ, უჯრედი შეიძლება განვიხილოთ როგორც გარკვეული სახით ჩაკეტილი სივრცე, იმ დროს როდესაც უჯრედის გარედ სივრცე სრულიად ღიაა. იქიდან გამუდმებით გამოედინება და პირიქით, იქ გამუდმებით შედის სხვადასხვა იონი. სხვაგვარად რომ აიხსნას, შეიძლება ითქვას, რომ უჯრედსაც და უჯრედის გარე სივრცესაც გააჩნია ეგრე წოდე-

ბული ბუფერული ზონები. მაგრამ უჯრედგარე სივრცის ბუფერული მოცულობა ბევრად დიდია ვიდრე თავად უჯრედის ბუფერული მოცულობა. ამ ყველაფრის შედეგად,  $K^+$ -ის იონების კონცენტრაცია უჯრედის შიგნით მის გარე კონცენტრაციაზე 20:1-დან 50:1-მდე შეფარდებით მეტია (უჯრედის ტიპიდან გამომდინარე). რაც შეეხება  $Na^+$ -ის იონების კონცენტრაციას უჯრედგარე სივრცეში, ის მეტია მისი უჯრედშიდა კონცენტრაციაზე შეფარდებით 4:1-დან 10:1-მდე (ისევ და ისევ უჯრედის ტიპიდან გამომდინარე).

საინტერესოა, რომ ორგანიზმის დაბერებისას, კალიუმის და ნატრიუმის იონების კონცენტრაციების გრადიენტი უჯრედის საზღვარზე ვარდება, ხოლო სიკვდილისას სულაც გათანაბრდება.

დაგვრჩენია იმის დამატება, რომ ამ ფერმენტის მოქმედება, რომელსაც ეწოდება ნატრიუმ-კალიუმ დამოკიდებული ATP - აზა, ითრგუნება სხვადასხვა საწამლავებით, რომლებიც ამუხრუჭებენ ტუმბოს მუშაობასაც. სწორედ რომ ამ გარემოებამ უფლება მოგვცა გაგვეკეთებინა დასკვნა იმის თაობაზე რომ ATP-აზა წარმოადგენს ჩვენი ტუმბოს ენერჯის გენერატორს.

უნდა აღინიშნოს, რომ ნატრიუმის ტუმბოდან შეიძლება გენერატორის გაკეთება იმის მსგავსად, როგორც ჰიდროელექტროსადგურებშია, თუ კი ვაიძულებთ მას იონების ნაკადში ტრიალს. მართლაც, ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ თუ კი გავატარებთ ნატრიუმის და კალიუმის იონებს თავისი კონცენტრაციის გრადიენტით, და არა საწინააღმდეგო მიმართულებით, როგორც ეს ცოცხალ უჯრედში ხდება, დაიწყება ATP-ის სინთეზი.

გავჩერდეთ ნატრიუმის ტუმბოს ერთ ტიპზე, რომელიც გვხვდება მხოლოდ ჰალობაქტერიებში – მიკროორგანიზმებში, რომლებიც ბინადრობენ ძალიან მლაშე წყალსატევებში. მათ შეუძლიათ განვითარება მხოლოდ წყალში, რომელშიც ნატრიუმის ქლორიდის შემცველობა არანაკლებ 12%-საა. მარილების კონცენტრაციის ყველანაირი შემცირება მაგათთვის დამღუპველია (იწყება ოსმოსური შოკი). ამიტომაც პირველად ეს ბაქტერიები აღმოაჩინეს სწორედ ამართქლებელ აუზებში, რომლებშიც მარილს მოიპოვებენ. ჰალობაქტერიუმის ნატრიუმის ტუმბო მუშაობს, ყველაფერ ამის გარდა კიდევ სინათლის ენერჯის ხარჯზე, ვინაიდან ხშირად მათ არ ყოფნით ჟანგვის, ანუ სუნთქვის ენერჯია, რისთვისაც განპირობებულია სპეციალური ცილა – ბაქტერიოროდოფსინი.

როდოფსინი – ესაა შუქმგრძნობიარე რთული ცილა, რომელიც თვალის ბადურაში ჩხირების უჯრედებში იმყოფება მხედველობის პიგმენტის სახით. სინათლის კვანტის შთანთქმისას, როდოფსინი იშლება, რითიც იწვევს მხედველობის ნერვის აღზნებას. სიბნელეში კი ის კვლავ სინთეზირდება. ასე რომ, ჰალობაქტერიებში ნაპოვნ ანალოგიურ ცილას დაარქვეს ბაქტერიოროდოფსინი. ამ ბაქტერიებში როდოფსინი დამატებითი ტუმბოს სახით გვევლინება, რომელიც ამოქმედდება სინათლის კვანტების მეშვეობით.

და აი ისევ მარილის სარგებლობის შესახებ, რომელსაც ჩვენ საკვებთან ერთად ვღებულობთ: ის ხელს უწყობს სისხლის პლაზმაში ნატრიუმის იონების გარკვეული კონცენტრაციის შექმნას, ანუ უჯრედგარე სივრცეში, თუ კი უჯრედებთან ერთობლივად განვიხილავთ. სწორედ ამიტომაც სისხლი მლაშე გემოსია... ნატრიუმის იონების გამო შექმნილი ელექტროქიმიური პოტენციალების სხვაობა კი, წარმოადგენს ენერჯის წყაროს უჯრედების საკვები ნივთიერებებით მომარაგებისას, რასაც უზრუნველყოფს ნატრიუმის ტუმბო.

ბუნებრივია, რომ ნატრიუმის ( $Na^+$ , Sodium) და კალიუმის ( $K^+$ , Potassium) იონები უნდა მოხვდნენ ორგანიზმში გარედან, კვების პროდუქტებთან ერთად, და ამიტომ შესაძლებელია რომელიმე კომპონენტის გადამეტება. ზუსტად რომ ვთქვათ, ნატრიუმის უსაფრთხო რაოდენობა კალიუმის მოწოდებაზეა დამოკიდებული. ჯამრთელობისთვის მნიშვნელოვანია კვების პროდუქტებში ნატრიუმის და კალიუმის სწორი შეფარდება.

სწორედ ეს შეფარდება განსაზღვრავს ძალიან ბევრ მაჩვენებელს: საეთო ტონუსიდან დაწყებული ჯანსაღი ძვლებით და ნორმალური არტერიული წნევით დამთავრებული.

ნატრიუმი აუცილებელია ნევროლოგიური და კუნთოვანი ფუნქციონირებისათვის; მის გარეშე შეუძლებელია ცხოველმყოფელობა. იგივე შეიძლება ითქვას კალიუმის შესახებ, მაგრამ ამ ორ ელემენტს შორის, ორგანიზმი აქტიურად ინარჩუნებს მხოლოდ ნატრიუმს. როდესაც ნატრიუმის დონე ორგანიზმში მცირდება, თირკმელზედა ჯირკვალის ქერქი გამოყოფს ჰორმონს, რომელსაც ალდისტერონი ეწოდება, და რომელიც თირკმელებს კვლავ აიძულებს ცირკულირებადი ნატრიუმის შთანთქმას. ორგანიზმი მომჭირნედ გამოიყენებს ნატრიუმს და პირიქით მფლანგველია კალიუმის მიმართ. მას გააჩნია ნატრიუმის დაკავების მძლავრი მექანიზმები და პირიქით არ გააჩნია კალიუმის აქტიური შენახვის და ზედმეტი ნატრიუმის გამოყვანის მექანიზმები. ამიტომ ნატრიუმის ნაკლებობა უფრო ადვილად ასატანია ვიდრე მისი სიჭარბე. მიუხედავად იმისა, რომ კალიუმი ასევე აუცილებელია ცხოველმყოფელობისათვის, ორგანიზმს არ გააჩნია მისი შეკავების რთული ფიზიოლოგიური მექანიზმები. ის გამუდმებით გამოიდევენება ორგანიზმიდან შარდთან ერთად, განსაკუთრებით კი სტრესის დროს.

კალიუმი ჩვეულებრივ მცენარეულ საჭმელში იმყოფება, კერძოდ კი ხილში. დღევანდელ სამყაროში ნატრიუმი ყველგანაა და ჩვენ, როგორც წესი, მოვიხმართ მას გაცილებით მეტი რაოდენობით ვიდრე ეს ჩვენ გვჭირდება. თანამედროვე ადამიანი არ მოიხმარს ბევრ მცენარეულ საკვებს, და თუ კი მოიხმარს, მაშინ ან ძალიან მცირე რაოდენობით, ან გადამუშავებული სახით, ნატრიუმის დამატებით (იგივე პური და ა.შ.). შედეგად კალიუმის დონე ორგანიზმში მინიმალურია, ხოლო კალიუმ-ნატრიუმის შეფარდება შებრუნებული.

მაგრამ საჭიროა გვახსოვდეს კალიუმ-ნატრიუმის ბალანსის შესახებ. საქმე იმაში მდგომარეობს, რომ კალიუმით მდიდარი საკვები იწვევს ნატრიუმის გაძლიერებულ გამოყოფას და პირიქით. თუ ადამიანი მოიხმარს უპირატესად მცენარეული წარმოშობის კალიუმით მდიდარ პროდუქტებს, მას არ უნდა ავიწყდებოდეს მარილის მიღება. თუ კი სპორტით დაკავებული ვეგანი არ ამარილებს თავის საჭმელს, მას ერთ ორ კვირაში სერიოზული ნატრიუმის დეფიციტი ელოდება.

კალიუმი ადამიანის ორგანიზმში წარმოადგენს ნატრიუმის ანტიპოდს. ეს ორი ელემენტი მონაწილეობს ერთსა და იგივე ბიოქიმიურ პროცესებში, მაგრამ განსხვავებული ვექტორით. ერთი ელემენტის უკმარისობა იწვევს მეორე ელემენტის სიჭარბეს და შედეგად ორგანიზმის გარკვეული სისტემების მოშლას. ნატრიუმის და კალიუმის ბალანსი ორგანიზმში ძალზე მნიშვნელოვანია ადამიანის ჯამრთელობის ფორმირების პროცესში.

### **15.5. უჯრედის ორგანიზება.**

ზემოთ ჩვენ ავღნიშნეთ, რომ უჯრედს როგორც ღია დისიპატიურ სისტემას, თავისი სტრუქტურის შესანარჩუნებლად ესაჭიროება ენერჯისა და ინფორმაციის მუდმივი მოდინება. აქ, რა თქმა უნდა, არ იგულისხმება ნებისმიერი ტიპის ენერჯია ან ინფორმაცია. ინფორმაცია შეიძლება იყოს როგორც პათოგენური (ანუ დადებითი ენტროპიის მატარებელი – სისტემის სითბური წონასწორობისაკენ გადამყვანი), ასევე “სასარგებლო” (ანუ უარყოფითი ენტროპიის მატარებელი – სისტემის ორგანიზების ხარისხის ასამაღლებლად). ენერჯია შეიძლება ინფორმაციის ცნებამდე დავიყვანოთ და მის შესახებ იგივე ითქვას, რაც ინფორმაციაზე. კერძოდ არსებობს ენერჯის ზოგი სახე (ან დოზა), რომელსაც შეუძლია ბიოსტრუქტურის რღვევა, და არსებობს სხვა ენერჯია (ან მისი გარკვეული რაოდენობა) – რომელიც ხელს უწყობს სისტემის სტრუქტურული მთლიანობის შენარჩუნებას.

ცოცხალ ორგანიზმს დიდი არჩევანი არ გააჩნია. სულ ორი ტიპის ენერგიაა მისთვის სასარგებლო (სასარგებლო უჯრედშიდა ენერგეტიკულ ეკვივალენტად გარდაქმნის თვალსაზრისით). ეს ენერგიებია:

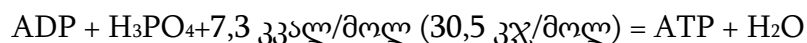
1. ელექტრო-მაგნიტური ველის ენერგია ხილულ დიაპაზონში, მზის სინათლის სახით.
2. საკვები ნივთიერების ქიმიური ბმების ენერგია.

ენერგიის ორივე ეს ტიპი გარკვეული შუალედური გარდაქმნის გზით, გარდაიქმნება უჯრედშიდა ენერგეტიკულ ეკვივალენტად. ამ პროცესების ერთობლიობას, რომლებიც მიმდინარეობენ უჯრედში და რომლის შედეგადაც სინთეზირდება ბიოლოგიური მაკრომოლეკულები და ენერგია ATP-ის სახით, ხშირად უწოდებენ მეტაბოლიზმს. თუმცა მეტაბოლიზმი უფრო ფართო მცნებაა და მარტო ენერგეტიკული უზრუნველყოფით არ შემოიფარგლება.

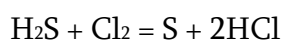
ბიოენერგეტიკული პროცესები, რომლებშიც ხდება ATP-ის სინთეზი, ანუ როგორც ამბობენ “ბიოლოგიური აკუმულატორების დამუხტვა”, მიმდინარეობს მიტოქონდრიების მემბრანებში (აქ ცხადია მცენარეებს არ ვგულისხმობთ). მიტოქონდრიების მემბრანებში ლოკალიზებულია და სივრცულად ორგანიზებული ცოცხალი ორგანიზმის ენერგეტიკული უზრუნველყოფის მოლეკულური სისტემები. ATP-ის სინთეზი მემბრანაში შეუღლებულია ელექტრონულ და იონურ ტრანსპორტთან.

### 15.6. ენერგიის მომარაგება უჯრედში.

ATP-ის მოლეკულის შექმნა, რომელიც ბიოლოგიურ სისტემებში მუშაობისათვის საჭირო ენერგიის მთავარ წყაროს წარმოადგენს, სადღეისოდ ვერ აღიწერება ელემენტარული სტადიების ზუსტი ქიმიური მექანიზმის ტერმინებში, მაგრამ, ნათელია, რომ პროცესის მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს მიტოქონდრიების შიდა მემბრანაზე არსებული ელექტრული ველის ენერგია. წარმოიქმნება ბუნებრივი კითხვა: რა არის ამ ენერგიის წყარო? ყველაზე საერთო სახით ამ კითხვაზე პასუხის გაცემა შეიძლება შემდეგნაირად. საკვები ნივთიერებები (ცილები, ცხიმები, ნახშირწყლები) საბოლოო ჟამს გადაიქცევიან განსაზღვრული რაოდენობის დაბალმოლეკულური ნაერთების (ორგანული მჟავების) ნაკრებში. ნახშირბადის ატომები, რომლებსაგანაც არის აგებული ეს მჟავები, იჟანგება (აერობულ ორგანიზმებში ჟანგბადის მეშვეობით) ნახშირორჟანგამდე და წყლამდე. ორგანული მჟავების ჟანგვის პროცესი ჟანგბადით მიმდინარეობს მიტოქონდრიებში – უჯრედულ ორგანელებში, რომლებიც უზრუნველყოფენ უჯრედში მიმდინარე ATP-ის სინთეზის უმეტეს ნაწილს. მჟანგვის როლში ჟანგბადის მოხმარებას ჩვეულებრივ შიდაუჯრედულ სუნთქვას უწოდებენ. ენერგია, რომელიც თავისუფლდება ჟანგვის ქიმიური რეაქციის შედეგად, გარდაიქმნება ელექტროქიმიურში, და ამ სახით გამოიყენება ADP-დან ATP-ის სინთეზში.



ნებისმიერ ჟანგვა-აღდგენით რეაქციაში მონაწილეობს ორი შეუღლებული ჟანგვა-აღდგენადი წყვილი, რომელთა შორის მიმდინარეობს კონკურენცია ელექტრონებისათვის. შედეგად მივიღებთ ორ ნახევრულ რეაქციას: ერთი რეაქცია დაკავშირებულია ელექტრონების მიერთებით, ანუ აღდგენით (სისტემის შიდა ენერგია მატულობს), ხოლო მეორე – ელექტრონების გაცემით, ანუ ჟანგვით (სისტემის შიდა ენერგია კლებულობს). მაგალითის სახით განვიხილოთ მარტივი რეაქცია:



აქ,  $H_2S$  – ამლდგენია,  $S$  – მისი დაჟანგული ფორმა (შეუღლებელი მჟანგავი),  $Cl_2$  – მჟანგავი,  $HCl$  – მისი აღდგენილი ფორმა (შეუღლებელი ამლდგენი) [უფრო ზუსტად კი, რათქმაუნდა, არა  $HCl$  არამედ  $Cl^-$  იონები].

ჟანგვის ენერჯის ტრანსფორმირება ხორციელდება მიტოქონდრიების შიდა მემბრანაზე მყოფი ფერმენტებით, რომლებიც მუშაობენ როგორც გენერატორები და ელექტრული მუხტის მატარებლად წყალბადის იონს ( $H^+$ , პროტონს) გამოიყენებენ. საერთოდ, როგორც განისაზღვრება, ჟანგვის (უფრო ზუსტად ჟანგვა-აღდგენით) რეაქციებს უწოდებენ ისეთ რეაქციებს, რომლებშიც ხდება ელექტრონის გადატანა მოლეკულა-დონორიდან (აღსადგენიდან) მოლეკულა-აქცეპტორზე (დასაჟანგზე). ეს რეაქციები ძალზე გავრცელებულია ცოცხალ სისტემებში და კატალიზდება ფერმენტებით, რომლებსაც ოქსიდორედუქტაზები დაარქვეს. ოქსიდორედუქტაზების ერთობლიობა, რომელიც აკატალიზებს შიდა სუნთქვის პროცესს, ჩვეულებრივ სუნთქვით ჯაჭვს უწოდებენ.

უმეტეს შემთხვევაში უჯრედშიდა სუნთქვის პროცესის აღწერისას ამბობენ, რომ ჟანგბადი იხარჯება კვების პროდუქტებიდან წარმოიქმნილი შეზღუდული რაოდენობის ორგანული ნივთიერებების ჟანგვაზე. ჟანგვა შეიძლება განიხილოს როგორც ორი წყალბადის ატომის მოხლეჩა, რომლებშიც ყოველი მათგანი შეიცავს თითო პროტონს და ელექტრონს. პროტონი წყლის ხსნარში არსებობს კათიონის  $H^+$  სახით. ელექტრონებს თავისუფალ მდგომარეობაში წყლის ხსნარებში არსებობა არ შეუძლიათ, ამიტომაც რეაქციის მსვლელობისათვის ცილა-კატალიზატორები უნდა შეიცავდნენ ელექტრონების მახეს. ასეთი მახის როლში ფერმენტ-დეჰიდროგენაზებში მოგვევლინება არც თუ ისე დიდი (ცილის ზომებთან შედარებით) სხვადასხვა ქიმიური ბუნების ორგანული ან არაორგანული მოლეკულები ან ატომები. ამ მოლეკულებს ჩვეულებრივად კოფაქტორებს ან პროსტეტიკურ ჯგუფებს<sup>92</sup> უწოდებენ. ამრიგად, ნებისმიერი ცილა, რომელიც კატალიზს უწევს ჟანგვა-აღდგენით რეაქციას, შეიცავს კოფაქტორს, რომელსაც შეუძლია ჟანგვა-აღდგენითი შექცევადი გარდაქმნა. არსებობს კოფაქტორების სხვა, არანაკლებ მნიშვნელოვანი როლიც. თუ კი უჯრედში თავისუფალ, ანუ ცილასთან კავშირში არა მყოფ მდგომარეობაში იმყოფებიან რაიმე კოფაქტორის მოლეკულები (საკმარისი რაოდენობით), მაშინ ორგანული მოლეკულებიდან დეჰიდროგენაზების მოქმედების შედეგად მოხლეჩილი წყალბადის ატომები შეიძლება იყოს მომარაგებული კოფაქტორის აღდგენილი ფორმის სახით. ეს ხორციელდება ან ფერმენტთან დაკავშირებული კოფაქტორის აღდგენილი ფორმის მის დაჟანგულ ფორმაზე შეცვლით, ან დაკავშირებული კოფაქტორის ჟანგვით მისივე თავისუფალი ფორმით. არსებობს თავისუფალი კოფაქტორების რამოდენიმე ტიპი. ძირითად კოფაქტორად მოგვევლინება საკმარისად რთული ქიმიური აგებულების მოლეკულა – ნიკოტინამიდადენინდინუკლეოტიდი (NAD).

<sup>92</sup> **პროსტეტიკური ჯგუფი** – არაცილოვანი (და არც ამინომჟავების წარმოებული) კომპონენტი, კოვალენტურად დაკავშირებული ცილასთან, რომელიც თამაშობს მნიშვნელოვან როლს შესაბამისი ცილის ბიოლოგიურ აქტივობაში. პროსტეტიკური ჯგუფები შეიძლება იყოს ორგანული (ვიტამინები, ნახშირწყლები, ლიპიდები) ან არაორგანული (მაგალითად, მეტალების იონები). პროსტეტიკური ჯგუფები მტკიცედ უკავშირდებიან ცილებს (უერთდებიან მათ კოვალენტურად) და ხშირად მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ ფერმენტის ფუნქციონირებაში. პროსტეტიკური ჯგუფის გარეშე მყოფ ცილას „აპოცილას“ უწოდებენ, ხოლო ცილას მიერთებული ჯგუფით — „ჰოლოცილა“ (ან შესაბამისად ფერმენტების შემთხვევაში — **აპოფერმენტი** და **ჰოლოფერმენტი**). მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ ჰემი, რომელიც ჰემოგლობინის მოლეკულაში პროსტეტიკურ ჯგუფს წარმოადგენს. პროსტეტიკური ჯგუფები – ეს კოფაქტორების ქვეკლასია. ისინი კოფერმენტებისაგან იმით განსხვავდებიან, რომ პროსტეტიკური ჯგუფები გამუდმებით არიან დაკავშირებული ფერმენტებთან კოვალენტური კავშირებით, იმ დროს, როდესაც კოფერმენტები უკავშირდებიან ფერმენტებს არამუდმივად, არაკოვალენტური მოლეკულთაშორისი ძალებით.

აღდგენის პროცესში საწყისად დაჟანგული NAD-ის მოლეკულა (აღინიშნება NAD<sup>+</sup>, რეაქციაში მონაწილე ჯგუფის მუხტის მიხედვით) ორ ელექტრონსა და ერთ პროტონს ღებულობს. უხეშ მიახლოებაში შეიძლება ჩაითვალოს, რომ დეჰიდროგენაზებით კატალიზირებული ყველა ჟანგვით რეაქციას მივყევართ წყალბადის მოხლეჩილი ატომების უნივერსალიზაციამდე და მათ დამარაგებამდე NADH-ის სახით. NAD<sup>+</sup> და NADH კარგად იხსნებიან წყალში და მნიშვნელოვანი რაოდენობით იმყოფებიან ციტოპლაზმაში და მიტოქონდრიაში. სუნთქვითი ჯაჭვი, რომელიც მიტოქონდრიების შიდა მემბრანასთან მყარად დაკავშირებულ რამოდენიმე ფერმენტს შეიცავს, ახორციელებს მიტოქონდრიალური NADH-ის ჟანგვას ჟანგბადით.

ჟანგბადის მახლობლად NADH-ის ორი ელექტრონი ისწრაფვის მის (ჟანგბადის) მოლეკულაზე გადასვლას, რასაც თან ახლავს ენერგიის გამონთავისუფლება. NADH-ის აღდგენილი ფორმა მდგრადია და ფერმენტების გარეშე ჟანგბადით არ იჟანგება. „წყალბადი“ (ორი ელექტრონი და ერთი პროტონი) NADH-ის მოლეკულაში ისევე ქიმიურად მდგრადია, როგორც ქიმიურად ინერტულია აირისებრი წყალბადი (H<sub>2</sub>) აირისებრი ჟანგბადთან (O<sub>2</sub>) ნარევიში. მაგრამ ასეთი ნარევი ცნობილია „მგრგვინავი აირის“ სახელით და მისი აფეთქებისათვის ნაპერწკალიც კი საკმარისია – ერთბაშად წარმოიქმნება წყალი რასაც თან ახლავს უზარმაზარი ენერგიის გამოყოფა სითფოს სახით. ამოცანა, რომელიც დგას სუნთქვის ჯაჭვის ფერმენტების წინ, შემდეგნაირია: აუცილებელია აფეთქების ისეთნაირი ჩატარება, რომ გამონთავისუფლებული ენერგია იყოს მომარაგებული მუშაობის შესრულებისათვის გამოსადეგ ფორმაში — ATP-ის სინთეზში. მართებულია ავლნიშნოთ, რომ სუნთქვითი ჯაჭვის ფერმენტები შესანიშნავია არა იმდენად იმით, რომ ისინი, როგორც ნებისმიერი სხვა კატალიზატორები აჩქარებენ ქიმიური რეაქციის სიჩქარეს (ბევრი ჟანგვა-აღდგენითი რეაქცია წყლის ხსნარებში მყისიერად გაედინება ფერმენტების გარეშეც), რამდენად იმით, რომ მათ მოწესრიგებულად გადააქვთ ელექტრონები ერთი კომპონენტიდან მეორეზე (საბოლოოდ კი ჟანგბადზე), „წყალბადის“ თანდათანობითი პოტენციალის შემცირებით და ენერგიის მომარაგებით.

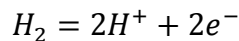
ეხლა კი დავაკვირდეთ ორი ელექტრონის გზას NADH-დან ჟანგბადზე გადასვლისას, მაგრამ ჯერ არ შევეხოთ ამ პროცესის ენერგეტიკას. ჯამური პროცესი სამ სტადიად არის დაყოფილი. ყოველი სტადია კატალიზირდება სამი ლიპოპროტეიდული კომპლექსით, რომლებიც მიტოქონდრიების შიდა მემბრანაშია ჩანერგული. ყოველი კომპლექსი (I, III და IV) წარმოადგენს საკმაოდ მსხვილ წარმონაქმენს, რომელიც ბევრი პოლიპეპტიდური ჯაჭვისგან არის აგებული. კომპლექსი I, მაგალითად, 40-ზე მეტი ასეთი ტიპის ჯაჭვისაგან შედგება (სუბერთეულისაგან) და მისი მოლეკულური მასა დაახლოებით 10<sup>6</sup>. კომპლექსები დაცურავენ მემბრანის ფოსფოლიპიდურ ზღვაში, ასე რომ ამ „ისბერგების“ წვეროები და ბსკერები ეკონტაქტებიან მიტოქონდრიების მატრიქსის და მემბრანათაშორისი სივრცის წყლიან ფაზებს. თხიერი ლიპიდური ფაზა ნებას რთავს კომპლექსების ორგანოზომილებიანი დიფუზიის ჩატარებას მემბრანის სიბრტყეში, ასე რომ კომპლექსებს ერთმანეთთან შეხვედრა შეუძლიათ. ყოველი კომპლექსი აკატალიზებს ჟანგვა-აღდგენით რეაქციას – ელექტრონების გადატანას, და მაშასადამე, როგორც უკვე აღინიშნა, შეიცავს თავის შემადგენლობაში პროსტეტიკურ ჯგუფებს, რომლებსაც შეუძლიათ ელექტრონების მიღება და გაცემა. ასეთ კომპლექსებს ჰემებს უწოდებენ, ხოლო ჰემების და პოლიპეპტიდური ჯაჭვების კომპლექსებს კი – ციტოქრომებს. კომპლექსი IV-ის შემადგენლობაში (ვარბურგის სუნთქვითი ფერმენტი, ციტოქრომოქსიდაზა) ორი განსხვავებული ჰემის გარდა შედის სპილენძის რამდენიმე ატომი, რომლებიც მყარად უკავშირდება ცილას. ამ სამი გიგანტური წარმონაქმნის გარდა სუნთქვითი ჯაჭვის შემადგენლობაში შედის კიდევ ორი კომპონენტი. ერთ-ერთი მათგანი წარმოდგენილია კოვალენტურად დაკავშირებული



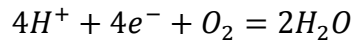




იმისათვის რომ გასაგები გახდეს მიტჩელის მიერ შემოთავაზებული ქემიოსმოსური შეუღლების პრინციპი, ვისარგებლოთ ელექტრონერგიის ქიმიური გენერატორის პრინციპით, რომელიც ტექნიკაში გამოიყენება. წარმოვიდგინოთ ორად გაყოფილი ავზი, რომლის ტიხარი გამტარია წყლისთვის და გაუმტარია ყველანაირი იონებისათვის. ტიხარში ჩამონტაჟებულია ელექტროგამტარი – მეტალი (M). გამტარის ტორსების ზედაპირები, რომლებიც მიმართულია ერთი მარცხენა ხოლო მეორე მარჯვენა ნაკვეთურებისკენ, დაფარულია რაიმე ქიმიური კატალიზატორით (წვრილად დისპერგირებული პლატინა, ნიკელი). ეხლა კი განვახორციელოთ წყალბადის ( $H_2$ ) მიწოდება გამტარის მარცხენა ზედაპირის მხარეს, ხოლო ჟანგბადის ( $O_2$ ) – მარჯვენაზე. სიტუაცია ანალოგიურია იმისა, რომელიც წარმოიქმნება მგრგვინავ აირში (ჟანგბადის და წყალბადის ნარევი), ოღონდ რეაგირებად მოლეკულებს შორის შესაძლებელია მხოლოდ ელექტრული კონტაქტი (მეტალის გამტარით). სითბური მოძრაობის და კატალიზატორის მოქმედების შედეგად გამტარის მარცხენა ზედაპირზე წარიმართება რეაქცია:



პროტონები ( $2H^+$ ) დარჩებიან ხსნარში (ტიხარი იონებისთვის გაუმტარია). ელექტრონები გაემართებიან გამტარით მის მარჯვენა ზედაპირისაკენ, სადაც აქტივირებულ მარჯვენა ზედაპირზე ჟანგბადთან შეხვედრისას წარიმართება რეაქცია:



ჟანგბადით წყალბადის ასეთი კონტროლირებადი ჟანგვის ჯამური პროცესი (წყლის წარმოქმნა) მიგვიყვანს იქამდე, რომ ტიხარი აღმოჩნდება ელექტრულად დამუხტული (ორი უარყოფითი მუხტი მარცხნიდან მარჯვნივაა გადატანილი) და წარმოიქმნება წყალბადის იონების კონცენტრაციების სხვაობა ავზის ორივე ნაკვეთურში: მარცხენა მხარეს წარმოიქმნება მჟავა ( $H^+$ ), ხოლო მარჯვენაში – ტუტე ( $OH^-$ ).

შეიძლება განტოლების შედგენა რეაქციის ენერგეტიკული ბალანსის აღწერისათვის:

$$D_{mH^+} = D_y + D_{Osmos}$$

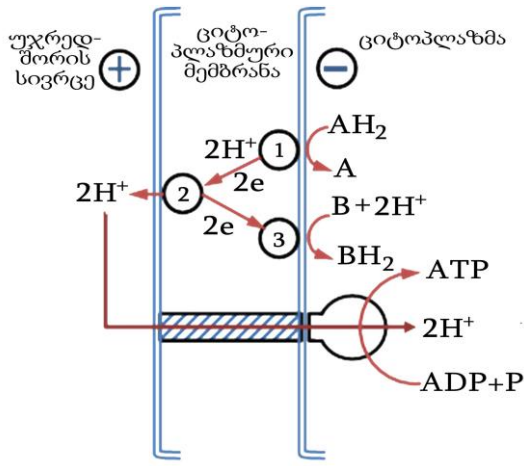
რეაქციის ენერგეტიკული ბალანსის ტოლობაში მარჯვენა მხარეს მყოფი პირველი წევრი ( $D_y$ ) – მომარაგებული ენერგიის ელექტრულ მდგენელს წარმოადგენს, მეორე კი – ოსმოსურს ( $D_{Osmos}$ ). ცხადია, რომ, იმის შემდეგ რაც ტიხარი დაიმუხტება (მარცხნივ +, მარჯვნივ -), პროცესი შეწყდება – ელექტრონები ვერ გადაინაცვლებიან გამტარში ელექტრული ველის საწინააღმდეგოდ. თუ ტიხარზე მყოფი მუხტები მოიხსნება (მიუერთოდ ენერგიის მომხმარებელი მოწყობილობა, მაგალითად ნათურა), ჟანგვა გაგრძელდება, ხოლო ნათურის ნათებას მოყვება მჟავას დაგროვება მარცხნივ, ტუტის კი მარჯვნივ. მომარაგებული ენერგიის ხარჯვა შეიძლება სხვაგვარადაც: მოვაწყოთ ტიხარში პროტონების არხები. ამ შემთხვევაში პროტონების მარცხნიდან მარჯვნივ ნაკადის ხარჯზე, შეიძლება მუშაობის შესრულება. სწორედ ამნაირად (პროტონების დინების ხარჯზე) მოწყობილია ATP-ის სინთეზის მოლეკულური მანქანა.

გავმეორდეთ: ვინაიდან  $H^+$  – დადებითი მუხტის მატარებელი ქიმიური ნაწილაკებია, მათი არათანაბარი დაგროვება მემბრანის ორივე მხარეს მიგვიყვანს ამ ნაწილაკების არა მარტო ქიმიური (კონცენტრაციული) გრადიენტის შექმნამდე, არამედ მემბრანის გარდიგარდმო ორიენტირებული ელექტრული ველის შექმნამდეც (ჯამური დადებითი მუხტი, სადაც გროვდება  $H^+$ , და უარყოფითი მუხტი მემბრანის მეორე მხარეს). ამრიგად, ელექტრონების გადატანისას ციტოპლაზმურ მემბრანაზე იქმნება წყალბადის იონების ტრანსმემბრანული ელექტროქიმიური გრადიენტი, რომელიც აღინიშნება  $D_{mH^+}$  სიმბოლოთი და იზომება ვოლტებში (ვ, მვ). ეს პოტენციალი ელექტრული (ელექტრული

პოტენციალების ტრანსმემბრანული სხვაობა  $D_y$ ) და ქიმიური (კონცენტრაციული) კომპონენტებისაგან ( $H^+$ -ის კონცენტრაციების გრადიენტი —  $D_{gradH^+}$ ) შედგება.

$$D_{mH^+} = D_y + D_{gradH^+}$$

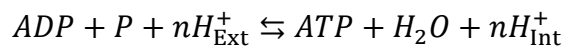
გაზომვებმა უჩვენა, რომ პროკარიოტების შემაუღლებელ<sup>93</sup> მემბრანებზე სუნთქვითი და ფოტოსინთეზის ელექტრონ-სატრანსპორტო ჯაჭვების მუშაობისას  $D_{mH^+}$  აღწევს 200 – 250 მვ, ამასთან ყოველი კომპონენტის შენატანი არამუდმივია. ის დამოკიდებულია ორგანიზმის ფიზიოლოგიურ თავისებურებებზე და მისი კულტივირების პირობებზე.



სურ. 112. ელექტრონების და პროტონების გადატანის სქემა ელექტროსატრანსპორტო ჯაჭვით და პროტონული ATP-სინთაზით:  $AH_2$  და  $B$  – ელექტრონების დონორი და აქცეპტორი შესაბამისად; 1, 2, 3 – ელექტროსატრანსპორტო ჯაჭვის კომპონენტები. ახსნა იხ. ტექსტში.

მაშ ასე, მიტჩელის ქემოსმოსური თეორიის მიხედვით, ენერგია, რომელიც განთავისუფლდება ელექტრონ-სატრანსპორტო ჯაჭვის მუშაობისას, თავდაპირველად გროვდება წყალბადის იონების ტრანსმემბრანული გრადიენტის ფორმით. შექმნილი  $D_{mH^+}$ -ის განმუხტვა მიმდინარეობს იმავე მემბრანაში ლოკალიზებული პროტონული ATP-სინთაზური კომპლექსის მონაწილეობით:  $D_{mH^+}$ -ის გრადიენტით  $H^+$  ATP-სინთაზის გავლით  $H^+$  უბრუნდებიან საწყის მდგომარეობას; ამ დროს, რაიმე შუალედური მაღალ-ენერგეტიკული შენაერთების წარმოქმნის გარეშე, ADP და არაორგანული ფოსფატიდან წარმოიქმნება ATP-ის მოლეკულა (სურ. 112). თავად დამაკავშირებელი მემბრანები ინტაქტურ მდგომარეობაში შეუღწევადია იონებისთვის (განსაკუთრებით კი  $H^+$  და  $OH^-$ ). სავარაუდოდ, ATP-ის ერთი მოლეკულის სინთეზისათვის საკმარისია ორი პროტონის გადატანა, ანუ  $H^+/ATP = 2$ . მაგრამ გამორიცხული არ არის რომ  $H^+/ATP$  მეტიც იყოს.

მემბრანაში ლოკალიზებული  $H^+$  – კატალიზს უწევს ATP-ის სინთეზის და ჰიდროლიზის რეაქციებს შემდეგ განტოლებასთან შესაბამისობაში:



აქ,  $H_{Ext}^+$  – გარე, ხოლო  $H_{Int}^+$  – შიდა პროტონებია (რეაქციის მსვლელობის გარემოს მიმართ).

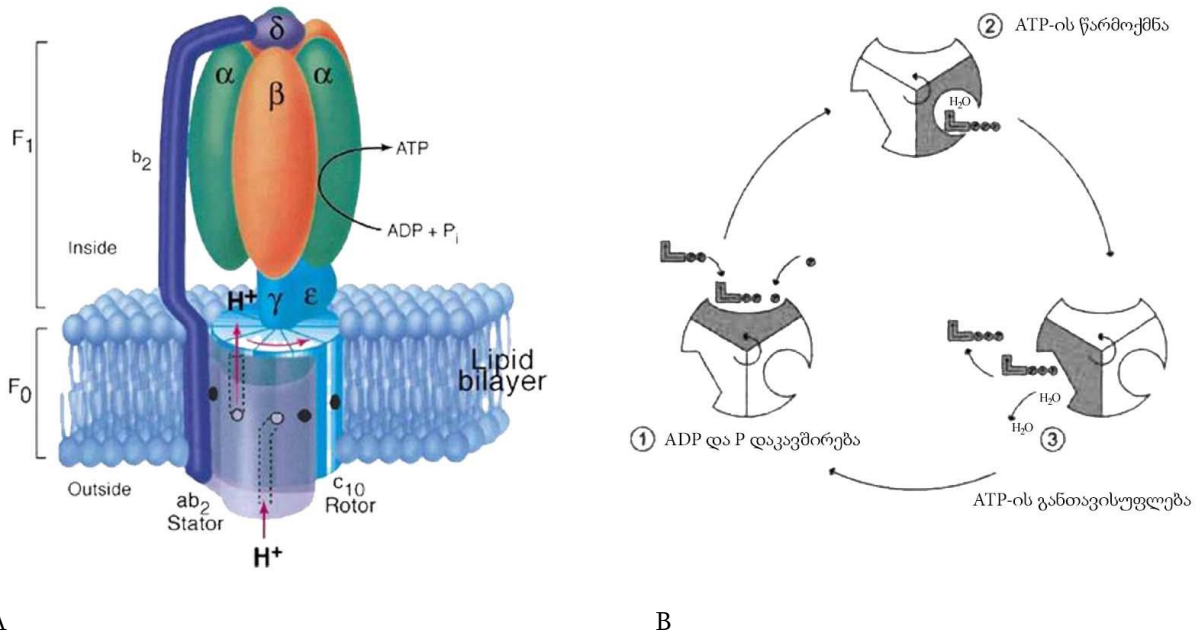
რეაქცია, რომელიც მარცხნიდან მარჯვნივ მიედინება, შეუღლებულია  $H^+$ -ის ტრანსპორტთან  $D_{mH^+}$  გრადიენტით, რასაც მოსდევს სისტემის განმუხტვა და ATP-ის სინთეზი. საწინააღმდეგო მიმართულებით მიმდინარე ATP-ის ჰიდროლიზის რეაქციას,  $H^+$  -ის გრადიენტის საწინააღმდეგო გადატანის თანხლებით, მივყვართ მემბრანაზე  $D_{mH^+}$  -ის შექმნამდე (ან და გაზრდამდე). ამრიგად, ATP-სინთაზური ფერმენტული კომპლექსი წარმოადგენს უჯრედული ენერჯის ორი ფორმის ურთიერთგარდაქმნის ( $D_{mH^+} \leftrightarrow ATP$ )

<sup>93</sup> მემბრანებს, რომლებიც ფოსფორილირებას და სუნთქვას შეუღლებულად (შეუღლება – რაიმეს რაიმესთან ურთიერთკავშირი) ახორციელებენ, შემაუღლებელს უწოდებენ (მიტოქონდრიების შიდა მემბრანები, ზოგიერთი აერობული ბაქტერიის უჯრედული მემბრანები, ფოტოსინთეზირებადი ბაქტერიების ქრომატოფორების მემბრანები).

უზრუნველყოფის მექანიზმს, მოწყობილობას, რომელიც შეაუღლებს ჟანგვითი ბუნების პროცესებს ფოსფორილირებასთან.

ATP-ის სინთეზის აღწერილი მექანიზმის გასაგებათ, საჭიროა ATP-სინთაზის სტრუქტურის განხილვა.

ATP-სინთაზა ( $H^+$ -ATP-აზა) – მიტოქონდრიის შიდა მემბრანის ინტეგრალური ცილა. ის განლაგებულია სუნთქვითი ჯაჭვის უშუალო სიახლოვეში. ATP-სინთაზა შედგება ორი ცილოვანი კომპლექსისაგან, რომლებიც აღინიშნება როგორც  $F_0$  და  $F_1$  (იხ. სურ. 113).



A

B

სურ. 113. ATP-სინთაზის აგებულება და მუშაობის მექანიზმი. A — ATP-სინთაზის  $F_0$  და  $F_1$  კომპლექსები.  $F_0$ -ის შემადგენლობაში შედიან პოლიპეპტიდური ჯაჭვები, რომლებიც მემბრანის გამჭოლ არხს ჰქმნიან. ამ არხით პროტონები მემბრანათაშორისი სივრციდან მატრიქსში ბრუნდებიან.  $F_1$  ცილა მატრიქსშია გამოწეული მემბრანის შიგნითა მხარედან, და შეიცავს ცხრა სუბერთეულს, რომლებსგანაც ექვსი სამ წყვილს  $\alpha$  და  $\beta$  („თავი“) ჰქმნიან, რომლებიც გადაფარავენ სამი სუბერთეულიდან შემდგარ ( $\gamma$ ,  $\delta$  და  $\epsilon$ ) ღეროსებრივ ნაწილს.  $\gamma$  და  $\epsilon$  მოძრავია და თვით ღეროს ჰქმნიან, რომელიც ბრუნავს უძრავი თავის შიგნით და  $F_0$  კომპლექსთანაა დაკავშირებული.  $\alpha$  და  $\beta$  სუბერთეულების წყვილებიდან შექმნილ აქტიურ ცენტრებში მიმდინარეობს ADP-ის, არაორგანული ფოსფატის ( $P_i$ ) და ATP-ის დაკავშირება.

B — ATP-ის სინთეზის კატალიტიკური ციკლი სამ ფაზას მოიცავს. ყოველი მათგანი რიგ რიგობით სამ აქტიურ ცენტრში მიედინება: 1 – ADP-ის და  $H_3PO_4$ -ის დაკავშირება; 2 – ATP-ის ფოსფორილირებული კავშირის შექმნა; 3 – საბოლოო პროდუქტის გამონთავისუფლება.

ჰიდროფობული კომპლექსი  $F_0$  მემბრანაშია ჩადირული. ის წარმოგვიდგება როგორც საძირკველი, რომელიც ATP-სინთაზას მემბრანაში აფიქსირებს. კომპლექსი  $F_0$  რამდენიმე სუბერთეულისაგან შედგება. ეს სუბერთეულები ჰქმნიან არხს, რომლითაც პროტონები გადაიტანება მატრიქსში.

კომპლექსი  $F_1$  მიტოქონდრიულ მატრიქსშია გამოწეული. ის 9 სუბერთეულისგან შედგება ( $3\alpha$ ,  $3\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ).  $\alpha$  და  $\beta$  სუბერთეულები წყვილ წყვილად არიან ჩალაგებული და ჰქმნიან „თავს“. ამ „თავში“ 3 აქტიური ცენტრია მოთავსებული ( $\alpha$  და  $\beta$  სუბერთეულებს შორის), რომლებშიც მიმდინარეობს ADP-ის და არაორგანული ფოსფატის ( $P_i$ ) დაკავშირება და ATP-ის სინთეზი.  $\gamma$  და  $\epsilon$  სუბერთეულები მოძრავია და თავად ღეროს ჰქმნიან რომელიც ბრუნავს უძრავი თავის შიგნით და  $F_0$  კომპლექსთანაა დაკავშირებული. ამრიგად  $\gamma$ -,  $\epsilon$ -,  $\delta$ - სუბერთეულები აკავშირებენ  $F_1$  და  $F_0$  კომპლექსებს.

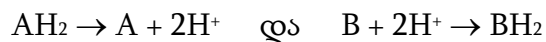
ATP-ის სინთეზის კატალიტიკური ციკლი სამ ფაზას მოიცავს. ყოველი მათგანი რიგ რიგობით სამ აქტიურ ცენტრში მიედინება: 1 – ADP-ის და  $H_3PO_4$ -ის დაკავშირება;

2 -ATP-ის ფოსფოანჰიდრიდული კავშირის შექმნა; 3 – საბოლოო პროდუქტის გამონთავისუფლება.

უჯრედშორის სივრცეში პროტონების კონცენტრაციის ზრდა ATP-სინთაზის აქტივობას იწვევს. ელექტროქიმიური პოტენციალი  $D_{mH^+}$  აიძულებს პროტონებს იმოძრაონ ATP-სინთაზის არხით მატრიქსში. პარალელურად,  $D_{mH^+}$ -ის ქმედებით წარმართება კონფორმაციული ცვლილებები  $F_1$  ცილის  $\alpha$ ,  $\beta$ -სუბერთეულების წყვილებში, რის შედეგადაც ADP-სა და არაორგანული ფოსფორისაგან წარმოიქმნება ATP. ელექტროქიმიური პოტენციალი, რომელიც გენერირდება ელექტრონების გადამტანი სამ პუნქტიანი ჯაჭვის (ეგჯ) ყოველ პუნქტში, გამოიყენება ATP-ის ერთი მოლეკულის სინთეზისათვის.

ყოველი პროტონის გადატანისას  $F_0$  არხით მატრიქსში სამივე აქტიური ცენტრი ციკლის მორიგი ფაზის კატალიზატორია. ელექტროქიმიური პოტენციალის ენერჯია იხარჯება ღერძის მოტრიალებაზე, რის შედეგადაც ციკლურად იცვლება  $\alpha$ - და  $\beta$ -სუბერთეულების კონფორმაცია და წარმართება ATP-ის სინთეზი.

ეხლა კი მოვიყვანოთ სუნთქვის ენერჯიის მომარაგების ქემოსმოსური მექანიზმის გამარტივებული სქემა. ასე რომ, მიტჩელის სქემის მიხედვით (იხ. სურ. 112) წყალბადის დონორი  $AH_2$  (მაგ. ასკორბატი) იჟანგება ელექტრონის გადამტანის მიერ (ციტოქრომი C) მემბრანის გარე ზედაპირზე. მემბრანაში გადადის ორი ელექტრონი და მემბრანის შიდა ზედაპირზე გადაეცემა აქცეპტორს – ჟანგბადს. სქემაზე ეს რეაქციები ასე გამოიყურება:



იქმნება პროტონების გრადიენტი და იწყება პროტონების გადატანა მემბრანაში საწინააღმდეგო მიმართულებით, რასაც თან ერთვის ფოსფორილირება მემბრანის სტრუქტურაში ჩართული ფერმენტის ATP-სინთაზის მეშვეობით:  $ATP \rightarrow ADP + P_H$ .

ასე რომ ATP-ის სინთეზი მიმდინარეობს გარე ფაზიდან ორი პროტონის შთანთქმით. ქემოსმოსური თეორია ამტკიცებს, რომ სუნთქვის პროცესში ქიმიურიდან ელექტრულ და ოსმოსურ ფორმაში ტრანსფორმირებული ენერჯია შეიძლება კვლავ იქნეს გადაყვანილი ქიმიურ ფორმაში ATP-ის სინთეზის მეშვეობით.

ამრიგად, ენერჯია რომელსაც დებულობს უჯრედი, მისაწვდომი ფორმით ინახება ATP-ის მოლეკულის სახით და, როგორც ამბობენ, წარმოადგენს უჯრედის ენერგეტიკულ ვალუტას. რეაქციებში ATP-ის მონაწილეობისას იგი გადასცემს ბოლო ფოსფატურ ჯგუფს სხვა მოლეკულებს, რითიც ჰქმნის ფოსფორილირებულ წარმოებულებს, რომლებსაც გააჩნიათ რეაქციისათვის აუცილებელი თავისუფალი ენერჯია. ცოცხალი სტრუქტურა ხასიათდება ენერგეტიკული პროცესების შეუღლებით, რაც იმაში გამოიხატება, რომ ერთ პროცესში გამონთავისუფლებული ენერჯია ხელს უწყობს მეორე პროცესის წარმართვას.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ზემოთ მოყვანილ პასიურ და აქტიურ ტრანსპორტებს შორის გადაულახავი ზღვარი არ არსებობს. ერთის მხრივ, პასიური ტრანსპორტი მიმდინარეობს გრადიენტის მიმართულებით, რომელიც წარმოიქმნება აქტიური ტრანსპორტის შედეგად. მეორეს მხრივ, თვით აქტიური ტრანსპორტი (გრადიენტის საწინააღმდეგო პროცესი) შეუღლებულია უფრო მაღალი რიგის გრადიენტულ პროცესებთან, რომლებიც მიმდინარეობენ თავისუფალი ენერჯიის გამონთავისუფლებით ATP-ის ჰიდროლიზის ხარჯზე. საბოლოო ანგარიშით, როგორც ეს თერმოდინამიკის II კანონითაა განპირობებული, ჯამური პროცესი გრადიენტულია, მაშასადამე მიმდინარეობს თავისუფალი ენერჯიის შემცირებითა და ენტროპიის ზრდით. თავისუფალი ენერჯიის შემცირება, როგორც ითქვა, კომპენსირდება გარემოდან მისი მოდინებით. საკვები პროდუქტების ჟანგვა, შემდეგ ATP-ის ჰიდროლიზი და როგორც შედეგი თავისუფალი ენერჯიის გამონთავისუფლება, წამოადგენენ იმ გრადიენტულ პროცესებს, რომლებიც, საბოლოო

ჟამს, განაპირობებენ უჯრედში გრადიენტის საწინააღმდეგო პროცესებს. ერთ-ერთი ამათთავანია აქტიური ტრანსპორტი.

ATP-ის სტრუქტურაში მომარაგებული ენერგია შეიძლება მხოლოდ სპეციალური ფერმენტული რეაქციების კასკადში იქნეს გამონთავისუფლებული. ეს ფერმენტები (ATP-აზები) შესაძლებელს ხდიან ATP-ის ჰიდროლიზის პროცესში ეტაპობრივად გამონთავისუფლებული ენერგია შეინახონ თავის კონფორმაციაში, შემდეგ კი საჭიროების შემთხვევაში, მოახდინონ მისი გაცემა. მაგალითად კუნთის შეკუმშვის მექანიზმის რეალიზაციის დროს.

### **15.8. ბიოპოტენციალების წარმოშობა და გავრცელება.**

ორგანიზმის ცხოველმოქმედების ყველა პროცესს თან ახლავს უჯრედებსა და ქსოვილებში ელექტრომომარაგებელი ძალების შექმნა. მნიშვნელოვანია იმის აღნიშვნა, რომ ეს მოვლენები მჭიდროთაა დაკავშირებული მეტაბოლურ პროცესებთან, ორგანიზმის ფიზიოლოგიურ მდგომარეობასთან და იმიტომაც ადვიდალ შეიძლება მათი რეგისტრირება. ბიოპოტენციალებს უაღრესად დიდი სადიაგნოსტიკო მნიშვნელობა გააჩნიათ, რითიც ფართოდ სარგებლობენ კლინიკებში პაციენტების გამოკვლევის დროს.

ზოგადად ხსნარებში წარმოქმნილი **პოტენციალები** ორი ტიპისაა: **ელექტრონული** და **იონური**. პირველი ტიპის პოტენციალები წარმოიშობა მეტალების მიერ ელექტრონების გაცემა მილების შედეგად და ნორმალურ პირობებში (გარედან ჩარევის გარეშე) ბიოლოგიურ პროცესებში არ მონაწილეობენ. მეორე ტიპის პოტენციალები (იონური) თავის მხრივ იყოფა სამ ტიპად: **დიფუზური**, **მემბრანული** და **ფაზათშორისი**. საერთოდ ყველაზე პოტენციალების წარმოშობა გულისხმობს მუხტების (იონების) ასიმეტრიულ განაწილებას. განვიხილოთ ეს პოტენციალები:

1. **დიფუზური** პოტენციალის შემთხვევაში ეს ასიმეტრია მიიღწევა ერთი და იგივე ელექტროლიტის განსხვავებული კონცენტრაციის ხსნარების ურთიერთქმედებით მათი გაყოფის საზღვარზე.
2. **მემბრანული** პოტენციალიც ფაქტიურად იგივეა, ოღონდ გამყოფი საზღვარი ნახევრად გამჭვირვალე მემბრანაა, ანუ ისეთი სტრუქტურა, რომელიც სხვადასხვაგვარად ატარებს იონებს.
3. პრინციპულად ასეთივეა **ფაზადშორისი** პოტენციალიც, რომელიც აღიძვრება ჰეტეროგენულ<sup>94</sup> გარემოში იონების ასიმეტრიული განაწილების შედეგად.

ბიოლოგიურ ობიექტებში დიფუზიური პოტენციალი მხოლოდ რაიმე დაზიანების შემთხვევაში თუ წარმოიქმნება (მაგალითად, მემბრანის დაზიანება), როცა დაზიანებული ადგილიდან მოხდება იონების დიფუზია გარემოში. ფაზური პოტენციალები შეიძლება წარმოიშვას ციტოპლაზმაში მიკროჰეტეროგენული ფაზების გაყოფის ზედაპირზე. რაც შეეხება მემბრანულ პოტენციალებს, ისინი თან ახლავენ პრაქტიკულად ნებისმიერ ბიოლოგიურ პროცესებს.

მემბრანები, და მათ შორის პლაზმურიც, პრინციპში გაუმტარია დამუხტული ნაწილაკებისათვის. მაგრამ მემბრანაში იმყოფება  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATP-აზა, რომელიც ახორციელებს აქტიურ ტრანსპორტს  $\text{Na}^+$ -ის იონების უჯრედიდან  $\text{K}^+$ -ის იონების სანაცვლოდ. ეს ტრანსპორტი ენერგოდამოკიდებულია, და ATP-ის ჰიდროლიზთანაა შეუღლებული. „ $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -ტუმბოს“ მუშაობის შედეგად უჯრედი ინარჩუნებს  $\text{Na}^+$  და  $\text{K}^+$  იონების არათანაბარ განაწილებას უჯრედსა და უჯრედგარე გარემოს შორის. ვინაიდან ATP-ის ერთი

<sup>94</sup> არაერთგვაროვანი, შედგენილი სხვადასხვა შემადგენლობის ნაწილებისაგან. ჰეტეროგენული პროცესი მიმდინარეობს სხვადასხვა გარემოების გაყოფის საზღვარზე.

მოლეკულის გახლეჩა უზრუნველყოფს  $\text{Na}^+$ -ის სამი იონის უჯრედიდან გატანას და  $\text{K}^+$ -ის ორი იონის შემოტანას, ეს ტრანსპორტი ელექტროგენულია, ანუ უჯრედის ციტოპლაზმა უარყოფითადაა დამუხტული უჯრედგარე სივრცესთან შეფარდებით.

ზემოთ უკვე აღინიშნა, რომ  $\text{K}^+$ -ის იონების კონცენტრაცია უჯრედში საკმაოდ მნიშვნელოვანია, რაც გულისხმობს ამ იონების კონცენტრაციის გრადიენტის არსებობას. ჩვენ უკვე ვიცით, რომ მემბრანების სტრუქტურის გამო (მათში სპეციალური კალიუმის არხების არსებობის გამო) იწყება  $\text{K}^+$ -ის იონების პასიური ტრანსპორტი უჯრედიდან. უჯრედს ტოვებენ დადებითად დამუხტული ნაწილაკები, რაც მას ხდის კიდევ უფრო ელექტროუარყოფითს.

მემბრანული პოტენციალები ყველა ტიპის უჯრედებისათვისაა დამახასიათებელი, მაგრამ თავისი სპეციფიურობიდან გამომდინარე შედარებით მაღალი პოტენციალები წარმოიქმნება ნერვულ უჯრედებში. ეს იმის გამო ხდება, რომ ნერვული იმპულსი გადაიცემა ელექტრონების მეშვეობით და მემბრანული პოტენციალების ფორმირება, ანუ დამუხტული ნაწილაკების დაგროვება მათ ზედაპირზე, ხელს უწყობს ამ პროცესს. გარდა ამისა, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, მემბრანული პოტენციალების ცვლილებები საკმაოდ დაბალინერციულია, პოტენციალთა ცვლილებები რაღაც მილიწამებში ხდება. ეს კი, რა თქმა უნდა, ასევე ხელს უწყობს იმას, რომ ბიოლოგიური სისტემები ნერვული იმპულსის გადაცემისას ნერვული უჯრედების გასწვრივ, გამოიყენებენ ზუსტად რომ მემბრანულ პოტენციალებს. მაგრამ ამ პროცესების სპეციფიკა ყველა უჯრედში ერთი და იგივეა. ამიტომაც მომავალ მსჯელობებში ჩვენ ავლწერთ ნერვულ უჯრედებში მიმავალ პროცესებს ბიოპოტენციალების წყაროს დაზუსტების გარეშე.

ამრიგად, უჯრედის შიგთავსი უარყოფითადაა დამუხტული უჯრედგარე სივრცის მიმართ, და მემბრანაზე ელექტრული პოტენციალის წარმოქმნის ძირითად მიზეზს (მემბრანული პოტენციალის  $\Delta\Psi$ ) სწორედაც რომ სპეციფიური იონური არხები წარმოადგენენ. იონების ტრანსპორტი არხების გავლით მიმდინარეობს კონცენტრაციის გრადიენტით ან მემბრანული პოტენციალის გამო, რომელსაც განსაზღვრავს ნერნსტის განტოლება:

$$\Delta\Psi_G = \frac{RT}{Fn} \ln \frac{C_{Outside}}{C_{Inside}} \quad (108)$$

სადაც,  $R$  – აირის უნივერსალური მუდმივა;  $T$  – ტემპერატურა (K);  $F$  – ფარადეის მუდმივა;  $n$  – პროცესში მონაწილე ელექტრონების რაოდენობა, ანუ იონების ვალენტობა (მაგალითად,  $\text{K}^+$ -ის იონებისათვის  $n = 1$ );  $C_{Outside}$  – იონების კონცენტრაცია უჯრედის გარედ;  $C_{Inside}$  – იონების კონცენტრაცია უჯრედის შიგნით.

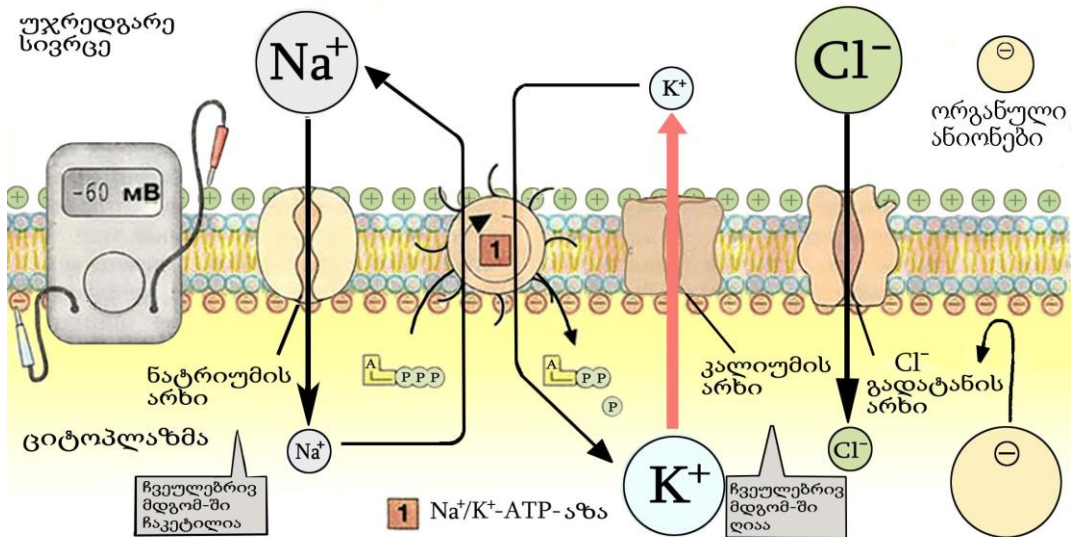
$$F = N_A e$$

$N_A$  – ავოგადროს მუდმივა;  $e$  – ელემენტალური მუხტი.

ვინაიდან ავოგადროს რიცხვი წარმოადგენს ფიზიკურ სიდიდეს, რომლის რიცხობრივი მნიშვნელობაც 1 მოლ ნივთიერებაში მყოფი სპეციფიციური სტრუქტურული ერთეულების (ატომების, მოლეკულების, იონების, ელექტრონების, ან ნებისმიერი სხვა ნაწილაკების) ტოლია, ფარადეის მუდმივა წარმოადგენს აღებული სტრუქტურული ერთეულების საერთო მუხტი.

$$\begin{aligned} R &= 8,3144598(48) && \text{ჯ}/(\text{მოლ} \cdot \text{K}) \\ F &= 96485,309(29) && \text{კულ}/\text{მოლ} \\ N_A &= 6,02214179 \cdot 10^{23} && \text{მოლ}^{-1} \\ e &= 1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19} && \text{კულ} \end{aligned}$$

მოყვანილი მოვლენის ილუსტრირებისათვის მოვიყვანოთ სურ. 114.



სურ. 114. მოსვენების პოტენციალის ფორმირება.

აუგზნებელ უჯრედში  $K^+$ -ის არხების ნაწილი იმყოფება ღია მდგომარეობაში და  $K^+$ -ის იონები გამუდმებით დიფუნდირებენ უჯრედიდან გარემოში (კონცენტრაციის გრადიენტით). უჯრედის დატოვებისას  $K^+$ -ის იონებს დადებითი მუხტი გააქვთ, სწორედ ეს ჰქმნის მოსვენების პოტენციალს, რომელიც  $-60$  მვ ტოლია. სხვა და სხვა იონების შეღწევადობის კოეფიციენტებიდან გამომდინარე (იხ. ცხრილი 23) ჩანს, რომ  $Na^+$  და  $Cl^-$  გამტარი არხები უპირატესად დახურულია. ფოსფატის იონები და ორგანული ანიონები, მაგალითად ცილები, პრაქტიკულად ვერ გადიან მემბრანებში. ნერნსტის განტოლების მეშვეობით შეიძლება უჩვენოთ, რომ უჯრედის მემბრანული პოტენციალი პირველყოფლისა განისაზღვრება  $K^+$ -ის იონებით, რომლებსაც შეაქვთ ძირითადი წვლილი მემბრანის გამტარობაში.

ცხრილი 23

იონი	კონცენტრაცია (მმოლ/ლ)		შეღწევადობის კოეფიციენტი $10^9$ სმ/წამ
	უჯრედში	უჯრედგარე	
$K^+$	139	4	500
$Na^+$	12	145	5
$Cl^-$	4	116	10
ორგანული ანიონები	138	34	0

ზემოდაღნიშნულის ანალიზის შედეგად შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ მოსვენების პოტენციალის ფორმირება ორ ეტაპად მიმდინარეობს.

**პირველი ეტაპი:** უჯრედის შიგნით უმნიშვნელო უარყოფითობის ( $-10$  მვ) შექმნა  $Na^+$  და  $K^+$  პირველი ასიმეტრიული გაცვლის შედეგად, 3 : 2 შეფარდებაში. ამის შედეგად უჯრედს ტოვებს ნატრიუმთან ერთად მეტი დადებითი მუხტი, ვიდრე კალიუმთან ერთად უბრუნდება. ნატრიუმ კალიუმის ტუმბოს მუშაობის ასეთი თავისებურება, რომელიც განახორციელებს ამ იონების გაცვლას მემბრანის გავლით ATP-ის ენერჯიის ხარჯვით, უზრუნველყოფს მის ელექტროგენულობას.

მოსვენების პოტენციალის ფორმირების პირველ ეტაპზე მემბრანული, იონური მიმოცვლის ტუმბოების ქმედების შედეგები ასეთია:

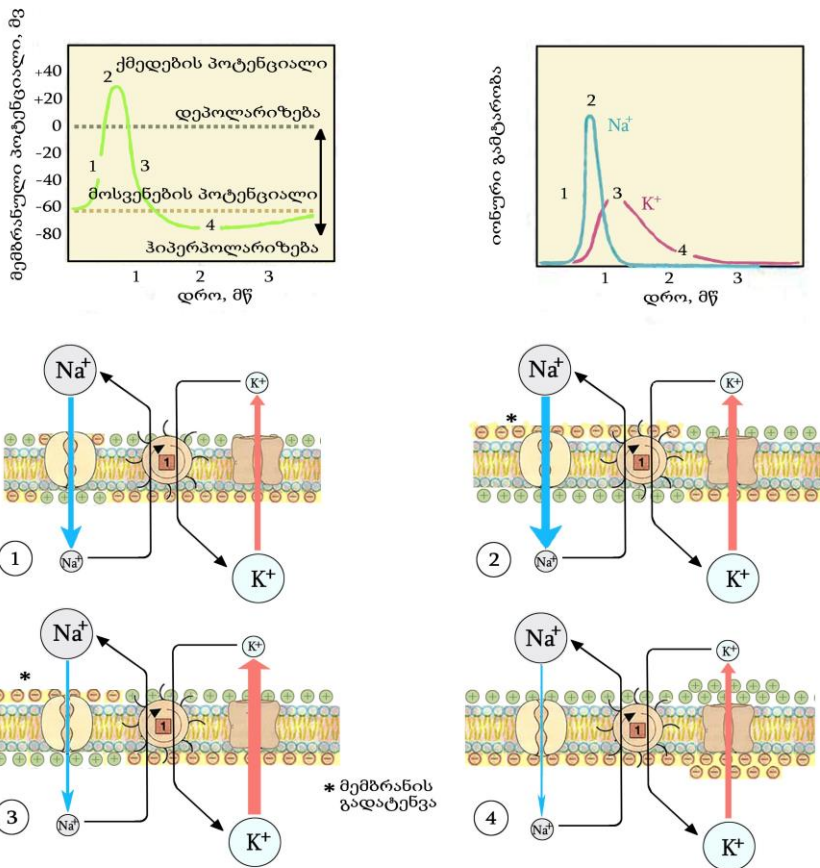
1. უჯრედში ნატრიუმის იონების ( $\text{Na}^+$ ) დეფიციტი.
2. უჯრედში კალიუმის იონების ( $\text{K}^+$ ) სიჭარბე.
3. მემბრანაზე სუსტი ელექტროპოტენციალის წარმოქმნა ( $-10$  მვ).

**მეორე ეტაპი:** უჯრედის ფარგლებში მნიშვნელოვანი უარყოფითობის ( $-60$  მვ) შექმნა  $\text{K}^+$ -ის იონების გადინების შედეგად (მემბრანის გავლით).  $\text{K}^+$ -ის იონები ტოვებენ უჯრედს და თან დადებითი მუხტები გააქვთ, რითიც დაჰყავთ უარყოფითობა  $-70$  მვ-მდე.

ამრიგად, მემბრანული მოსვენების პოტენციალი – ესაა უჯრედში დადებითი ელექტრული მუხტების დეფიციტი, რომელიც წარმოიქმნება კალიუმის დადებითი იონების გადინების, და ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოს ელექტროგენური ქმედების გამო.

უჯრედულ მემბრანებს გააჩნია არხები, რომლებიც შელწევადია  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  და  $\text{Cl}^-$ -ის იონებისათვის. უფრო ხშირად ეს არხები ჩაკეტილ მდგომარეობაში იმყოფებიან და მხოლოდ მცირე დროით იხსნებიან. არხები იყოფა *პოტენციალ-მართვადებზე* (ანუ ელექტროალზნებადებზე), მაგალითად სწრაფი  $\text{Na}^+$ -არხები, და ლიგანდ-მართვადებზე (ანუ ქემოალზნებადებზე), მაგალითად ნიკოტინური ქოლინერგიული რეცეპტორები. არხები წარმოადგენენ ინტეგრალურ მემბრანულ ცილებს, რომლებიც ბევრ სუბერთეულს შეიცავენ. მემბრანული პოტენციალის ცვლილებიდან გამომდინარე, ან და შესაბამის ლიგანდთან (ნეირომედიატორებთან და ნეირომოდულატორებთან) ურთიერთობის გამო, ცილა-რეცეპტორები შეიძლება იმყოფებოდნენ ორიდან რომელიმე ერთ კონფორმაციაში, რაც განაპირობებს მემბრანის გამტარიანობას („ღია“ — „ჩაკეტილი“ — და ა.შ.)

ეხლა კი ვნახოთ, თუ როგორ ყალიბდება ქმედების პოტენციალი (იხ. სურ. 115).



სურ. 115. ქმედების პოტენციალის ფორმირების ეტაპები.



ნებისმიერი უჯრედის აგზნება ქიმიური სიგნალის მოქმედების შედეგად (იშვიათად კი ელექტრული იმპულსის გამო) იწვევს **ქმედების პოტენციალის წარმოქმნას**. ეს ნიშნავს, რომ მოსვენების პოტენციალის მნიშვნელობა (-60 მვ) ნახტომისებურად იცვლება +30 მვ მნიშვნელობამდე და 1 მწმ გავლის შემდეგ უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას. პროცესი იწყება  $\text{Na}^+$ -ის არხის გახსნით (1).  $\text{Na}^+$ -ის იონები უჯრედში მიედინებიან (კონცენტრაციის გრადიენტით), რაც იწვევს ლოკალურად მემბრანული პოტენციალის ნიშნის შეცვლას (2). ამასთან ერთად  $\text{Na}^+$ -ის არხები იმავდროულად იკეტება, ანუ  $\text{Na}^+$ -ის იონების ნაკადი უჯრედში მიმდინარეობს ძალზე მცირე დროის განმავლობაში (3). მემბრანული პოტენციალის ცვლილების გამო იხსნებიან (რამდენიმე მწმ) პოტენციალ-მართვადი  $\text{K}^+$ -ის არხები (2) და  $\text{K}^+$ -ის იონები გაემართებიან უკუ მიმართულებით – უჯრედიდან. შედეგად მემბრანული პოტენციალი იღებს საწყის მნიშვნელობას (3), და მოკლე ხნით კიდევაც აღემატება მოსვენების პოტენციალს (4). ამის შემდეგ ნერვული უჯრედი კვლავ აგზნებადი ხდება.

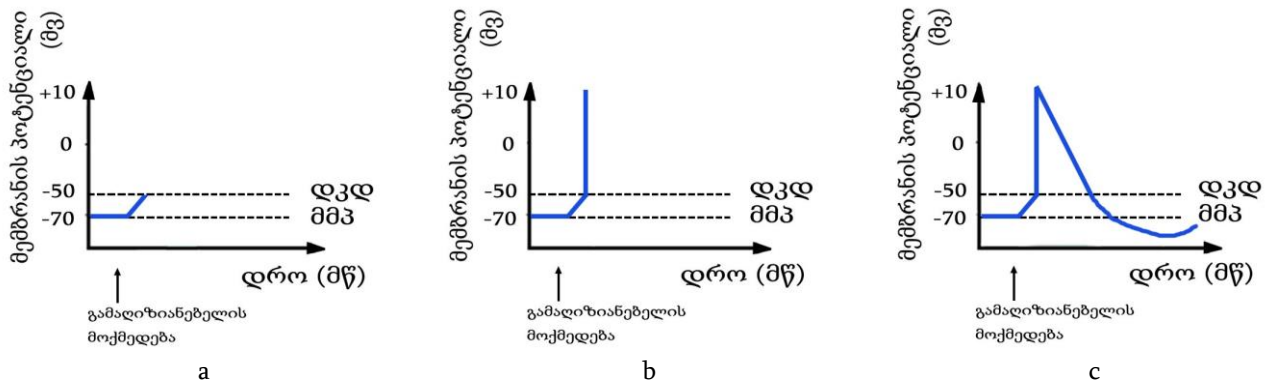
ერთი იმპულსის განმავლობაში მემბრანაში გადის  $\text{Na}^+$  და  $\text{K}^+$  იონების მცირე ნაწილი და ორივე იონის კონცენტრაციული გრადიენტები შენარჩუნებულია (უჯრედში მეტია  $\text{K}^+$ , ხოლო უჯრედგარეთ კი  $\text{Na}^+$ ). ამიტომ, უჯრედის მიერ ახალი იმპულსების მიღებისას მემბრანული პოტენციალის ნიშნის ლოკალური ცვლილება შეიძლება მრავალჯერ მეორდებოდეს. ქმედების პოტენციალის გავრცელება ნერვული უჯრედის ზედაპირზე ეფუძნება იმას, რომ მემბრანული პოტენციალის ლოკალური ცვლილება ასტიმულირებს მეზობელი პოტენციალ-მართვადი იონური არხების გახსნას, რის შედეგადაც აგზნება ვრცელდება *დეპოლარიზაციული ტალღის* სახით მთელ უჯრედზე.

ამრიგად, უჯრედის აგზნება (მოსვენებულიდან აქტიურ მდგომარეობაში გადასვლა) წარმოიქმნება იონური არხების შეღწევადობის გაზრდის შედეგად ნატრიუმის და ზოგჯერ კალციუმის იონების მიმართ. შეღწევადობის ცვლილების მიზეზი შეიძლება იყოს ან მემბრანის პოტენციალის ცვლა – აქტივირდება ელექტროაღზნებადი არხები, ან მემბრანული რეცეპტორების ურთიერთობა ბიოლოგიურად აქტიურ ნივთიერებასთან – რეცეპტორ-მართვადი არხები, ან და მექანიკური ზეგავლენა. ნებისმიერ შემთხვევაში აგზნების განვითარებისათვის აუცილებელია ამგზნების ქმედებით გამოწვეული **საწყისი დეპოლარიზაცია – მემბრანის უარყოფითი მუხტის მცირე შემცირება**. გამაღიზიანებლად შეიძლება მოგვევლინდეს ორგანიზმის გარე ან შიდა გარემოს ნებისმიერი პარამეტრის ცვლილება: სინათლე, ტემპერატურა, ქიმიური ნივთიერებები (გემოვნების და ყნოსვის რეცეპტორებზე ზეგავლენა), გაჭიმვა, წნევა. ნატრიუმი მიემართება უჯრედში, წარმოიქმნება იონური დენი და მცირდება მემბრანული პოტენციალი – მემბრანის **დეპოლარიზაცია**.

მიაქციეთ ყურადღება იმას, რომ უჯრედში ნატრიუმის შეღწევა ხორციელდება როგორც კონცენტრაციის, აგრეთვე ელექტროქიმიური გრადიენტებით: უჯრედში ნატრიუმის კონცენტრაცია 10 ჯერ უფრო დაბალია ვიდრე უჯრედის გარეთ, და მუხტიც გარეთასთან შედარებით – უარყოფითია. ერთდროულად აქტივირდება კალიუმის არხებიც, მაგრამ ნატრიუმის (სწრაფი) არხები აქტივირდება და ინაქტივირდება 1 – 1,5 მწმ (მილიწამის) განმავლობაში, ხოლო კალიუმისას უფრო დიდი დრო სჭირდება.

მიღებულია მემბრანული პოტენციალის ცვლილებების გრაფიკული გამოსახვა. ასე, სურ. 116a-ზე მოყვანილია მემბრანის საწყისი დეპოლარიზაცია – პოტენციალის ცვლილება გამაღიზიანებლის მოქმედების საპასუხოდ. ყოველი ამგზნებადი უჯრედისათვის არსებობს მემბრანული პოტენციალის განსაკუთრებული დონე, რომლის მიღწევისას მკვეთრად იცვლება ნატრიუმის არხების თვისებები. ამ პოტენციალს დაარქვენ **დეპოლარიზაციის კრიტიკული დონე (დკდ)**. მემბრანული პოტენციალის ცვლილებისას **დკდ**-მდე იხსნებიან სწრაფი, პოტენციალდამოკიდებული ნატრიუმის არხები, და ნატრიუმის იონების ნაკადი გაემართება უჯრედში. დადებითად დამუხტული იონების უჯ-

რედში შესვლისას, ციტოპლაზმაში იზრდება დადებითი მუხტი. ამის შედეგად მცირდება ტრანსმემბრანული პოტენციალთა სხვაობა, მემბრანული პოტენციალის (მპ) აბსოლუტური მნიშვნელობა ნულამდე მცირდება, ამის მერე კი, ნატრიუმის უჯრედში შემდგომი მიწოდებისას, მოხტება მემბრანის გადამუხტვა და მუხტის რევერსია (ოვერშუტი) – ეხლა მემბრანის ზედაპირი ციტოპლაზმასთან მიმართებაში ელექტროუარყოფითი ხდება – მემბრანა სრულად **დეპოლარიზებულია** – სურ. 116b. მუხტის შემდგომი ცვლილება აღარ მიმდინარეობს, ვინაიდან **ნატრიუმის არხები ინაქტივირდება** – ნატრიუმს უჯრედში შეღწევა აღარ შეუძლია, თუმცა კონცენტრაციის გრადიენტი საკმარისად უმნიშვნელოდ იცვლება. თუ გამაღიზიანებელს ისეთი ძალა გააჩნია, რომ ახერხებს მემბრანის დეპოლარიზაციას **დკდ**-ს მნიშვნელობამდე, მას ზღურბლურს უწოდებენ, და ის იწვევს უჯრედის აგზნებას. პოტენციალის რევერსის წერტილი – იმის მანიშნებელია, რომ ნებისმიერი მოდალობის გამაღიზიანებლების სრული გამა ნერვული სისტემის ენაზეა გადაყვანილი – აგზნების იმპულსებში. ასეთ იმპულსებს, ანუ აგზნების პოტენციალებს, ქმედების პოტენციალებს უწოდებენ. **ქმედების პოტენციალი (ქპ)** – ესაა **მემბრანული პოტენციალის სწრაფი ცვლილება ზღვრული სიძლიერის გამაღიზიანებლის მოქმედების საპასუხოდ**. ქპ-ს გააჩნია სტანდარტული ამპლიტუდა და დროის პარამეტრები, რომლებიც არაა დამოკიდებული სტიმულის სიძლიერეზე – წესი „ყველაფერი ან არაფერი“. შემდეგი ეტაპი – მემბრანული სიმშვიდის პოტენციალის აღდგენა – **რეპოლარიზაცია** (სურ. 116c) ძირითადად აქტიური იონური ტრანსპორტითაა განპირობებული. აქ ყველაზე მნიშვნელოვანია აქტიური ტრანსპორტის პროცესი – ეს არის Na/K-ის ტუმბოს მუშაობა, რომელიც ამოქაჩავს ნატრიუმის იონებს უჯრედიდან, ამავედროული კალიუმის იონების უჯრედში შემოტანით. მემბრანული პოტენციალის აღდგენა შესაძლებელი ხდება უჯრედიდან კალიუმის იონების გამოდინების გამო – კალიუმის არხები აქტივირდებიან და იწყებენ კალიუმის იონების გატარებას კალიუმის წონასწორული პოტენციალის მიღწევამდე. ეს პროცესი იმის გამოა მნიშვნელოვანი, რომ იქამდე, სანამ არ აღდგება **მპ** უჯრედს არ შეეძლება აგზნების ახალი იმპულსის აღქმა.

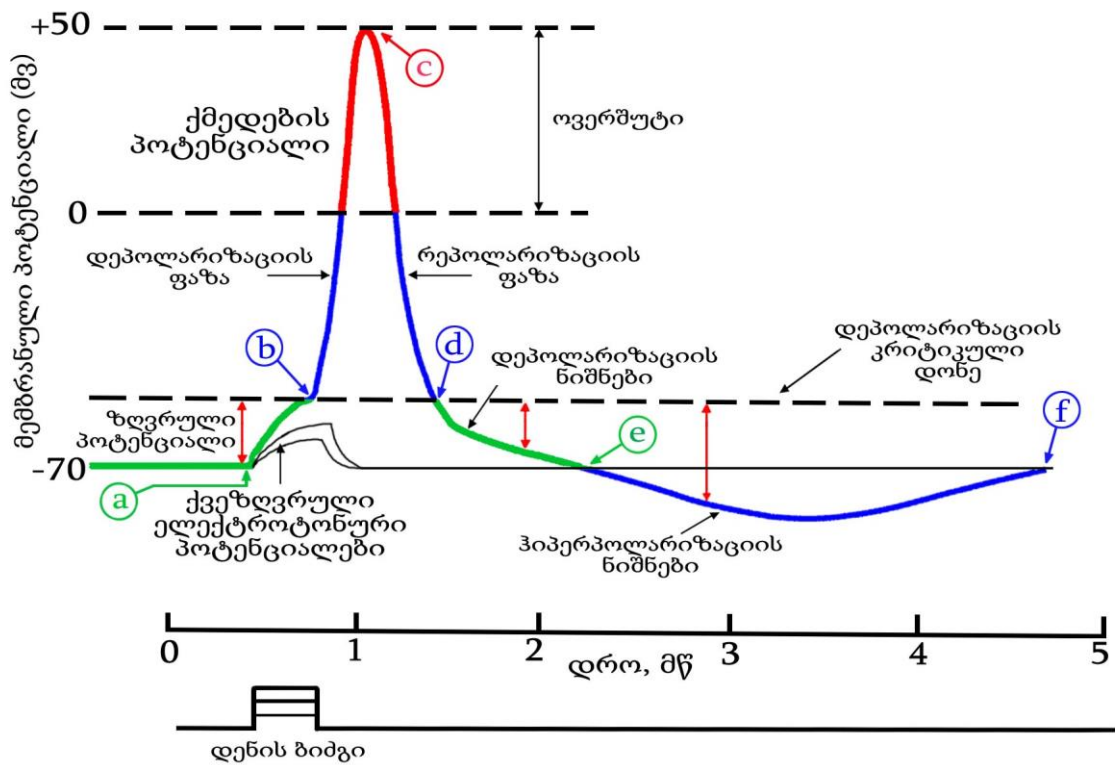


სურ. 116. მემბრანული პოტენციალის ეტაპობრივი (a, b, c) ცვლილება უჯრედის აგზნების დროს.

ეხლა კი პუნქტებათ გავწეროთ მემბრანული პოტენციალის ცვლილება უჯრედის აგზნებისას:

1. გამაღიზიანებლის ქმედებით გამოწვეული მემბრანის საწყისი დეპოლარიზაცია.
2. თუ გამაღიზიანებლის სიძლიერე საკმარისია მემბრანის დეპოლარიზაციისათვის **დკდ**-ს მნიშვნელობამდე, იხსნება სწრაფი პოტენციალ-დამოკიდებული ნატრიუმის არხები. უჯრედში ნატრიუმის მოდინება მიიყვანს მემბრანას გადამუხტვამდე – უჯრედი აგზნებულია – წარმოიქმნა ნერვული იმპულსი.
3. მემბრანის მშვიდობის პოტენციალის აღდგენა – მემბრანის რეპოლარიზაცია.

უნდა აღინიშნოს, რომ უჯრედული მემბრანა ძალზე ინერციული სისტემაა, რაც ვლინდება ჰიპერპოლარიზაციის მოვლენაში – მკ-ის ხანმოკლე ზრდაში მისი აღდგენის შემდეგ, რომელიც განპირობებულია მემბრანის გამტარობის გაზრდით კალიუმის და ქლორის იონების მიმართ. ჰიპერპოლარიზაცია შეიძლება მოხდეს მხოლოდ ქკ-ის შემდეგ და ყველა უჯრედისათვის როდესა დამახასიათებელი. კიდევ ერთხელ ვცადოთ გრაფიკულად წარმოვაჩინოთ ქმედების პოტენციალის ფაზები და იონური პროცესები, რომლებიც საფუძვლად უდევს მემბრანის პოტენციალის ცვლილებებს (სურ. 117). აბსცისის ღერძზე დავიტანოთ მემბრანული პოტენციალის მნიშვნელობები მილივოლტებში (მვ), ორდინატების ღერძზე – დრო მილიწამებში (მწმ). მემბრანული პოტენციალის მოყვანილი მრუდი შეიძლება დაიყოს სეგმენტებათ (სურათზე სხვა და სხვა ფერით მონიშნება). გარდა ამისა ქმედების პოტენციალის ფორმირებისას შეიძლება გამოიყოს ხუთი ძირითადი ეტაპი: a–b, b–c, c–d, d–e, e–f. უნდა აღინიშნოს, რომ c წერტილი წარმოადგენს განსაკუთრებულ წერტილს, რომელშიც ქმედების პოტენციალი თავისი მაქსიმალური მნიშვნელობის მიღწევას იწყებს ვარდნას. b–d მონაკვეთს ხშირად სპაიკს უწოდებენ.



სურ. 117. ქმედების პოტენციალის ფაზები. წრებში ჩასმული ასოებით (a,b,c,d,e,f) მონიშნულია ის წერტილები, რომლებსაც ქმედების პოტენციალის ფორმირებაში განსაკუთრებული მნიშვნელობა გააჩნიათ.

ქვემოთ მოყვანილია აღნიშნული ფრაგმენტების აღწერა:

1. მემბრანის დეპოლარიზაცია დკდ-ს მნიშვნელობამდე (a–b) — ამ დროს შეიძლება გაიხსნას ნატრიუმის ნებისმიერი არხები, ზოგჯერ კალციუმისაც – სწრაფი და ნელი არხები, პოტენციალ-დამოკიდებული და რეცეპტორ-მართვადი არხები. ეს დამოკიდებულია გამაღიზიანებლის სახეობაზე და უჯრედის ტიპზე
2. ნატრიუმის სწრაფი შემოტანა უჯრედში (b–c) — ამ დროს იხსნება სწრაფი პოტენციალ-დამოკიდებული ნატრიუმის არხები, და დეპოლარიზაცია აღწევს პოტენციალის რევერსის წერტილს – მოხდება მემბრანის გადამუხტვა, მუხტის ნიშანი საწინააღმდეგოზე იცვლება.

3. კონცენტრაციის გრადიენტის აღდგენა (კალიუმით) (c-d) — ტუმბოს მუშაობა. აქტივირებულია კალიუმის არხები, კალიუმი უჯრედიდან უჯრედგარე სივრცეში გაედინება – რეპოლარიზაცია, იწყება მმპ-ს (მოსვენების პოტენციალის) აღდგენა.
4. ნარჩენი (ნაკვალევ) დეპოლარიზაცია, ანუ უარყოფითი ნარჩენი პოტენციალი — მემბრანა ჯერ კიდევ დეპოლარიზებულია მმპ-ს მიმართ.
5. ნარჩენი (ნაკვალევ) ჰიპერპოლარიზაცია — კალიუმის არხები ღია რჩება და კალიუმის დამატებითი ნაკადი იწყებს მემბრანის ჰიპერპოლარიზებას. ამის შემდეგ უჯრედი უბრუნდება მმპ-ს საწყის დონეს. **ქმედების პოტენციალის (ქპ) ხანგრძლივობა შეადგენს 1-დან 3 – 4 მწმ-მდე.**

მიაქციეთ ყურადღება პოტენციალის სამ სიდიდეს, რომლებიც მნიშვნელოვანია და მუდმივია ყველა უჯრედისათვის და წარმოადგენენ მის ელექტრულ მახასიათებლებს.

1. **მმპ – მემბრანის მოსვენების პოტენციალი** — უჯრედული მემბრანის ელექტროუარყოფითობა მოსვენებულ მდგომარეობაში, რომელიც უზრუნველყოფს აგზნების უნარს – აგზნებადობას. მოყვანილ ნახატზე – 70 მვ.
2. **დკდ – დეპოლარიზაციის კრიტიკული დონე** (ანუ, მემბრანის ქმედების პოტენციალის გენერირების ზღურბლი) — ეს მემბრანული პოტენციალის ისეთი სიდიდეა, რომლის მიღწევასაც იხსნება სწრაფი, პოტენციალ-დამოკიდებული ნატრიუმის არხები და ხდება მემბრანის გადამუხტვა უჯრედში დადებითი ნატრიუმის იონების შემოტანის ხარჯზე. რაც მეტია მემბრანის ელექტროუარყოფითობა, მით უფრო რთულია მისი დეპოლარიზაცია **დკდ-ს** დონემდე, მით უფრო ნაკლებად აგზნებადია ასეთი უჯრედი.
3. **პოტენციალის რევერსის წერტილი (ოვერშუტი)** — ეს არის დადებითი მემბრანული პოტენციალის ის მნიშვნელობა, რომლისა და დადებითად დამუხტული იონები უკვე ვეღარ აღწევენ უჯრედში – მოკლევადიანი წონასწორული ნატრიუმის პოტენციალი. მოყვანილ ნახატზე +50 მვ. მემბრანის პოტენციალის ჯამური ცვლილება – 70-დან +50 მვ-მდე მოცემულ უჯრედისათვის შეადგენს 120 მვ, სწორედ ეს სიდიდე წარმოადგენს ქმედების პოტენციალს. თუ კი ეს პოტენციალი ნეირონში წარმოიქმნა, ის ნერვული ბოჭკოთი გავრცელდება, თუ ეს მოხდა კუნთოვან უჯრედებში – გავრცელდება კუნთის ბოჭკოს მემბრანით და შეკუმშვამდე მიგვიყვანს, სპეციფიურ ეგრე წოდებულ რკინისებრი უჯრედებში სეკრეციამდე (სეკრეტის გამოყოფამდე) – უჯრედის მოქმედებამდე. სწორედ ეს წარმოადგენს უჯრედის სპეციფიურ პასუხს გამაღიზიანებლის ქმედებაზე, ანუ აგზნებაზე.

**ქვეზღვრული ძალის** მქონე გამაღიზიანებლის შემთხვევაში წარმოიქმნება არასრული დეპოლარიზაცია – **ლოკალური პასუხი (ლპ)**. არასრული ან და ნაწილობრივი დეპოლარიზაცია – ეს მემბრანის მუხტის ისეთი ცვლილებაა, რომელიც არ აღწევს **დკდ-ს**.

**ლპ-ს** ძირითადად იგივე მექანიზმი გააჩნია რაც ქმედების პოტენციალს (**ქპ**) – მისი აღმავალი ფაზა განისაზღვრება ნატრიუმის იონების შემოტანით, დამავალი ფაზე კი – კალიუმის იონების გამოტანით. მაგრამ **ლპ-ს** ამპლიტუდა ქვეზღვრული ძალის მქონე აგზნების პროპორციულია და არასტანდარტულია, როგორც **ქპ-ის** შემთხვევაში.

როგორც უკვე აღინიშნა, მოსვენების და ქმედების პოტენციალთა მუშაობის ნათელი მაგალითია ნერვული უჯრედები. ნერვული იმპულსის ძირითადი გადამცემი ხაზია **აქსონი**, ანუ ნერვული ბოჭკო, რომელიც გამოდის ყოველი პერიფერიული ნერვული უჯრედიდან. ზოგჯერ აქსონს ელექტროკაბელს ადარებენ, თანაც კაბელის იზოლაცია აქსონში წარმოდგენილია **მიელინის** ცხიმოვანი ნივთიერებით. აღზნება ან ნერვული იმპულსის გადაცემა მეორე აქსონზე ხდება სპეციალური წარმონაქმენებით **სინაპსებით**.

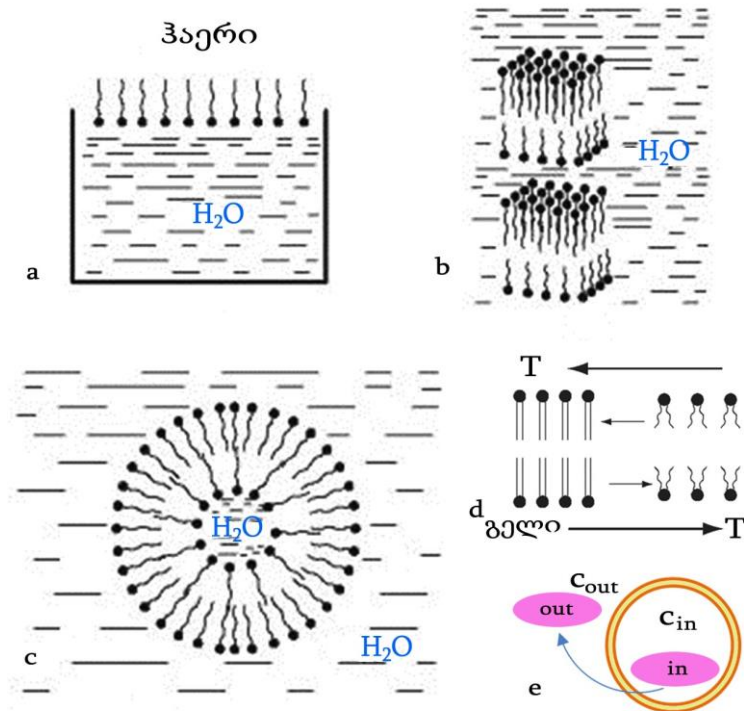
### 15.9. მემბრანული გამტარობის ფიზიკა.

ჩვენს მიერ უკვე აღწერილ უჯრედში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს ესაჭიროება განმარტება, ვინაიდან იყო გამოყენებული ძალზე ვრცელი ინფორმაცია პოტენციალების, გამტარობის, დიფუზიის და ა.შ. შესახებ. ამიტომ ამ თავის მასალა იქნება სასარგებლო უჯრედის ბიოფიზიკის უფრო ღრმა შესწავლისათვის.

პირველყოვლისა დავიწყოთ მემბრანების მოდელების განხილვით ვინაიდან ბიომემბრანების აგებულობის დაზუსტება და მათი თვისებების შესწავლა ხორციელდება ფიზიკო-ქიმიური მოდელების გამოყენებით, და ავლნიშნოთ მათი ძირითადი თვისებები.

**პირველი მოდელი** — *მონოფენა*. ფოსფოლიპიდების მოლეკულები თავსდება იან წყალი – ჰაერის (ან წყალი – ცხიმის) გაყოფის საზღვარზე, ეწყობიან ერთ ფენად ისე, რომ ჰიდროფილური (ანუ პოლარული) თავები იძირებიან წყალში, ხოლო ჰიდროფობული (არაპოლარული) „კუდები“ წყალთან კონტაქტში არ შედიან და ჰაერში (ან ცხიმში) რჩებიან. ფოსფოლიპიდების მოლეკულები თითქოს და „აშრევდებიან“ წყლისაგან. სანამ მოლეკულების რაოდენობა არც თუ ისე დიდია, ისინი თავსდება იან ზედაპირზე – „მიეკრობიან“ წყალს თავებით, კუდებს კი გარეთ გამოსწევენ (სურ. 118a).

**მეორე მოდელი** — *ბრტყელი ორმაგი ფენა (ბიფენა)*. თუ წყლის ხსნარში ლიპიდური მოლეკულების რაოდენობა მატულობს, ისინი ერთად გროვდებიან ისე რომ ჰიდროფობული ნახშირწყალბადური ჯაჭვები წყალს ეფარებიან, პოლარული თავები კი, პირიქით, წყალში გამოიწევენ (სურ. 118b). ასეთი მოდელი საშუალებას იძლევა შევისწავლოთ იონური შეღწევადობა, და მემბრანაზე ელექტრული პოტენციალის გენერირება.



სურ. 118. ფოსფოლიპიდების მოდელები წყალში: (a) მონოფენა. (b) ბრტყელი ორმაგი ფენა, (c) ერთფენოვანი ლიპოსომა. (d) მემბრანული ფოსფოლიპიდების სქემატური წარმოდგენა ტემპერატურის ცვლილების დროს (e) ნივთიერების განაწილება (კონცენტრაციების) უჯრედის გარეთ ( $C_{out}$ ) და უჯრედის შიგნით ( $C_{in}$ ).

**მესამე მოდელი** — *ერთფენოვანი ლიპოსომა*. ლიპიდური ბიფენები, თუ კი მათ დიდი განფენილობა ახასიათებთ, თავის თავზე შეკვრას ცდილობენ, რათა მოაშორონ წყალს ჰიდროფობული „კუდები“. ამ დროს წარმოიქმნება ფოსფოლიპიდური ვეზიკუ-

ლები – ერთფენოვანი ლიპოსომები (სურ. 118c). ისინი წარმოადგენენ ბილიპიდური მემბრანიდან შემდგარ უწყვილეს ბუმბუკებს (ვეზიკულებს). ლიპოსომები ფაქტიურად წარმოადგენენ ბიომემბრანას, რომელიც სრულიად მოკლებულია ცილის მოლეკულებს. ლიპოსომებზე ხშირად აყენებენ ექსპერიმენტებს მემბრანის თვისებებზე სხვადასხვა ფაქტორების გავლენის შესახებ, ან პირიქით, მემბრანული გარემოცვის გავლენას ჩაშენებული ცილების თვისებებზე.

მედიცინაში ლიპოსომები გამოიყენება გარკვეულ ორგანოებში და ქსოვილებში წამლის მისაწოდებლათ. ამ წესით მზადდება ლიპოსომალური კრემები და მალამოები დერმატოლოგიაში და კოსმეტოლოგიაში. თვით ლიპოსომები არატოქსიურია, სრულად ითვისებიან ორგანიზმით და წარმოადგენენ სანდო ლიპიდურ მიკროკაფსულას წამლის მიზნობრივი მიწოდებისათვის.

ჩამოვთვალოთ მემბრანების ყველაზე მნიშვნელოვანი ფიზიკური თვისებები. ქვემო-ჩამოთვლილიდან ზოგი თვისება ჩვენ ადრე უკვე გავარჩიეთ, მაგრამ, აქ ამ მასალას უკვე ერთიანად მოვიყვანოთ.

ლიპიდური ბიფენის სიმკვრივე შეადგენს  $800 \text{ კგ/მ}^3$ , რაც წყლისაზე დაბალია.

ზომები. ელექტრონული მიკროსკოპიის მონაცემებით, მემბრანის სისქე ( $L$ ) ვარირებს 40-დან  $130 \text{ \AA}$ -მდე, თანაც სხვადასხვა უჯრედის მემბრანებს ახასიათებს სხვადასხვა სისქე.

სიმტკიცე. მემბრანის გარღვევისადმი სიმტკიცის ზღვარი დაბალია. ორგანიზმის პირობებში დეფორმაციების საშუალო დონე შეადგენს დაახლოვებით  $0,01\%$ . მემბრანის გასარღვევად საკმარისია  $100 \text{ პა}$  ოდენობის შიდა წნევა. ცოცხალი უჯრედის ოსმორეგულაციის განხორციელება შესაძლებელია მხოლოდ მემბრანის ფორმის შეცვლის ხარჯზე, და არა მისი გაწელებით.

დეფორმირება. უჯრედული მემბრანა ადვილედ ექვემდებარება წანაცვლების დეფორმაციას. მაგალითად, ერიტროციტების ნაკადში, სიჩქარის გრადიენტის პირობებში, ადგილი აქვს მემბრანის ტრიალს უჯრედის შიგთავსის ირგვლივ. ამ მოვლენამ მიიღო „ტანკის მუხლუხის ფენომენის“ სახელი. მემბრანას გააჩნია მაღალი მოქნილობა. მემბრანის მექანიკური თვისებების შეფასებისას დრეკადობის ეფექტური მოდული მიიღება  $0,45 \text{ პა}$ -ის ტოლი.

სიბლანტე. მემბრანის ლიპიდური ფენის სიბლანტე  $\eta = 30 - 100 \text{ მპა}\cdot\text{წმ}$  (რაც შეესაბამება მცენარეული ზეთის სიბლანტეს).

ზედაპირული დაჭიმულობა უდრის  $0,03 - 3 \text{ მნ/მ}$ , რაც წყლისაზე  $2 - 3$  რიგით დაბალია ( $73 \text{ მნ/მ}$ ).

მემბრანული ნივთიერების შეღწევადობის კოეფიციენტი წყლის მიმართ შეადგენს  $25 - 33 \cdot 10^{-4} \text{ სმ/წმ}$ .

მემბრანა – კონდენსატორია. ორმაგი ფოსფოლიპიდური ფენა ამსგავსებს მემბრანას ბრტყელ კონდენსატორს, რომლის შემონაფენები წარმოდგენილია ელექტროლიტებით, უჯრეთგარე და შიდაუჯრედული (ციტოპლაზმა) ხსნარების სახით, მათში ჩადირული მემბრანის ზედაპირული ცილებით და ლიპიდური მოლეკულების თავებით. შემონაფენები გაყოფილია დიელექტრიკის ფენით რომელსაც ჰქმნიან ლიპიდური მოლეკულების არაპოლარული ნაწილები – მათი კუდების ორმაგი ფენის სახით.  $1 \text{ სმ}^2$  ფართის მემბრანის ელექტროტევადობა შეადგენს  $0,5 - 1,3 \text{ მკვ}$ . ელექტრული ველის დამაბულობა მემბრანაში შეადგენს დაახლოვებით  $20 \cdot 10^6 \text{ ვ/მ}$  (გამოთვლა შესრულებულია მიტოქონდრიების მემბრანებისათვის ქვემოდმოყვანილ მე 2-ე ამოცანაში).

მემბრანის დიელექტრიკული შეღწევადობა შეადგენს: ფოსფოლიპიდურ გარემოცვაში  $\epsilon = 2,0 - 2,2$ ; ჰიდროფილურში კი  $\epsilon = 10 - 20$ .

მემბრანის  $1 \text{ სმ}^2$  ზედაპირის ელექტრიწინალობა შეადგენს  $10^2 - 10^5 \Omega$  (რაც ათობით მილიონჯერ მეტია უჯრადგარე სითხის ან ციტოპლაზმის წინალობისა). მემბრანის საიზოლაციო თვისებები ბევრად აღემატება ტექნიკური იზოლატორების თვისებებს.

თხევადკრისტალური მდგომარეობა. მოლეკულები მემბრანაში უწყესრიგოთ კი არ არიან განლაგებული, როგორც შეიძლება გგონიათ, მათ განლაგებაში აღინიშნება შორეული წესრიგი<sup>95</sup>. ფოსფოლიპიდური მოლეკულები ორმაგ ფენაში იმყოფებიან, ხოლო მათი ჰიდროფობული კუდები ერთმანეთის თითქმის პარალელურია. არსებობს მოწესრიგებლობა პოლარული ჰიდროფილური თავების ორიენტირებაშიც. ფიზიკური მდგომარეობა, რომლისას მოლეკულების ურთიერთ ორიენტირებაში და განლაგებაში აღინიშნება შორეული წესრიგი, მაგრამ აგრეგატული მდგომარეობა თხევადია, თხევადკრისტალურ მდგომარეობას უწოდებენ.

თხევადკრისტალური სტრუქტურები ძალზე მგრძნობიარეა ტემპერატურის ცვლილების მიმართ. მემბრანულ ფოსფოლიპიდებში ტემპერატურის შემცირებისას აღინიშნება გადასვლა თხევადკრისტალურიდან გელის მდგომარეობაში. ამასთან ერთად იცვლება ჰიდროფობული კუდების ურთიერთგანლაგება (სურ. 118d) და იზრდება ორმაგი ფენის სისქე.

გელ-მდგომარეობაში გადასვლისას ბიფენაში წარმოიქმნება  $10 - 30 \text{ \AA}$  რადიუსის გამჭოლი არხები, რომლებითაც მემბრანაში შეიძლება იონების და დაბალმოლეკულური ნივთიერებების გადატანა. ამის შედეგად იზრდება მემბრანის იონური გამტარობა. მემბრანების იონური გამტარობის გაზრდამ შესაძლებელია გადაარჩინოს უჯრედი კრიოდაზიანებისაგან, წყლის და მარილების გამოსვლის გამო, რაც ეწინააღმდეგება წყლის კრისტალიზებას უჯრედის ფარგლებში.

ეხლა კი განვიხილოთ უჯრედული მემბრანის ის ფიზიკური პარამეტრები, რომელთა გათვალისწინება აუცილებელია მასში მოლეკულების (ატომების) ან ნებისმიერი ფორმის ენერჯის გადატანისას.

განმარტებიდან გამომდინარე, გადატანას უწოდებენ თვითნებურ, შეუქცევად პროცესებს, რომლებშიც მოლეკულური მოძრაობის შედეგად სისტემის ერთი ნაწილიდან მეორეში გადაიტანება რაიმე ფიზიკური სიდიდე (მასა, მუხტი, ენერჯია).

გადატანის მოვლენებს, კერძოდ, მიეკუთვნებიან დიფუზია (მასის გადატანა) და ელექტროგამტარობა (ელექტრული მუხტის გადატანა). ბიოფიზიკაში ნაწილაკების გადატანის სინონიმად გამოიყენებენ ტერმინს ნაწილაკების ტრანსპორტი.

ენერჯის გადაცემა ერთი სხეულებიდან მეორეებზე ხორციელდება ამ სხეულების ურთიერთობის შედეგად. ჩვენს მიერ უკვე აღინიშნებოდა, რომ სადღეისოთ გამოყოფენ ურთიერთობის ოთხ ფუნდამენტალურ სახეობას: ელექტრულს, გრავიტაციულს, ძლიერს (ბირთვულს) და სუსტს. დადგენილია, რომ მატერიის მოძრაობის არსებული ფორმები და ენერჯის შესაბამისი სახეობები წარმოადგენენ მაკროსკოპიულ დონეზე იმ ურთიერთობების გამოვლენას, რომლებიც წარმართება მიკროსკოპულ დონეზე. ფუნდამენტალური მიკროსკოპული ურთიერთობების მაკროსკოპული გამოვლენების დიდ მრავალსახეობას მივყვართ დიდ განსხვავებამდე ცვლილებებში, რომლებიც ხორციელდება სხეულებში განსხვავებული წესებით ენერჯის გადაცემისას. მაგრამ დადგენილია, რომ თერმოდინა-

<sup>95</sup> შორეული წესრიგი და ახლო წესრიგი – მყარ სხეულებში და სითხეებში არსებული მოწესრიგებლობა ატომების ან მოლეკულების ურთიერთგანლაგებაში. მოწესრიგებლობას ატომთაშორისი მანძილებთან შემდარებად მანძილებზე ახლო წესრიგი ეწოდება, ხოლო მოწესრიგებლობას რომელიც მეორდება განუსაზღვრელად დიდ მანძილებზე – შორეული წესრიგი. შორეული წესრიგის ძირითადი ნიშნებია – სიმეტრია და ნაწილაკების განლაგების კანონზომიერება, რომელიც მეორდება მოცემული ატომისგან ნებისმიერ მანძილზე. შორეული და ახლო წესრიგების არსებობა განპირობებულია ნაწილაკთა შორისი ურთიერთობებით.

მიური ურთიერთობების ყველა სახეობა, ანუ ენერჯის მიმოცვლის ყველა ფორმა, დაიყვანება ორ პრინციპულად განსხვავებულ წესზე: მუშაობის შესრულებაზე და თბოცვლაზე.

მუშაობის ყველაზე თვალსაჩინო სახეობას მექანიკური მუშაობა წარმოადგენს, რომელსაც ასრულებს მექანიკური ძალა მაკროსკოპული სხეულის, ან რაიმე მისი ნაწილის სივრცეში გადაადგილებისას. გარდა ამისა არსებობს არამექანიკური მუშაობების დიდი მრავალსახეობა: ელექტრული, მაგნიტური და ა.შ.

ყველა სახის მუშაობის საერთო თვისებას წარმოადგენს მათი ერთმანეთში სრული რაოდენობრივი გარდაქმნის პრინციპული შესაძლებლობა. ეს კი ნიშნავს, რომ სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეში მუშაობის რაიმე ფორმით ენერჯის გადაცემისას, ერთი სახის ენერჯია შეიძლება სრულად ტრანსფორმირდეს სხვა სახის ენერჯიაში. მაგალითად, ATP-ის მაკროერგული კავშირის ქიმიური ენერჯია გარდაიქმნას მაკრომოლეკულის კონფორმაციულ ენერჯიაში (უფრო ენერჯოტევად კონფორმაციაში, შეყენებული ჩახმახის მსგავსად), რომელსაც, თავის მხრივ, შეუძლია მუშაობის შესრულება.

თვითცვლის შემთხვევაში ხორციელდება მიკრონაწილაკების ქაოტიური, არამიზნობრივი მოძრაობის მიმოცვლა. ამ შემთხვევაში გადაცემული ენერჯის რაოდენობას ეწოდება სითბოს რაოდენობა, ან უბრალოდ სითბო. თბოცვლის განხორციელებისათვის სხეულებს შორის უნდა არსებობდეს ე.წ. სითბური კონტაქტი, რომელიც შეიძლება იყოს უზრუნველყოფილი ან სხეულების უშუალო შეხებით, ან ელექტრომაგნიტური რხევების ენერჯის გადატანით.

თუ განვიხილავთ ენერჯის გადაცემას ელექტრომაგნიტური ტალღით, მაშინ მისი რაოდენობრივი დახასიათებისათვის საჭიროა გარკვეულ ზედაპირზე გადინებული ენერჯის ნაკადის გათვალისწინება. ორივე შემთხვევაში სხეულებს უნდა ჰქონდეთ განსხვავებული ტემპერატურა.

უმოგმა, რომელმაც პირველმა ჩამოაყალიბა ენერჯის გადატანის საერთო განტოლების კლასიკური ფორმულა, სქემატურად დაასურათა ეს შემდეგნაირად. ჩაკეტილ მოცულობაში ზედაპირის გავლით შემოდის პირვანდელი ენერჯია, შემდეგ კი გამოდის უკვე გარდაქმნილი სახით (რა თქმა უნდა, ენერჯის შენახვის კანონის ფარგლებში). ამ დროს ენერჯის ნაკადის სიმკვრივე ( $S_u$ ) გარემოს ფიზიკური თვისებებითაა განსაზღვრული, რომელშიც ის გაედინება.

ტალღური პროცესები უკავშირდება ენერჯის ( $E$ ) გავრცელებას სივრცეში. ამ პროცესის რაოდენობრივ ენერჯეტიკულ დახასიათებას წარმოადგენს ენერჯის ნაკადი. ენერჯის ნაკადი ( $\Phi$ ) ეწოდება ენერჯის რაოდენობას, რომელიც გაედინება ტალღის მიმართულების პერპენდიკულარულ ზედაპირის ელემენტში დროის ერთეულში. თუ კი ენერჯის გადატანა ხორციელდება თანაბრად, მაშინ:  $\Phi = E/t$ , ხოლო საერთო შემთხვევაში ნაკადი წარმოადგენს ენერჯის წარმოებულს დროში –  $\Phi = \frac{dE}{dt}$ . ენერჯის ნაკადის ერთეული სიმძლავრის ერთეულს ემთხვევა: ჯ/წმ = ვტ.

დაუბრუნდეთ ნივთიერების გადატანას და დიფუზიის მოვლენას, მითუმეტეს, რომ ტერმინი დიფუზია შეიძლება იყოს გამოყენებული ენერჯის მიმართაც. დავიწყოთ დიფუზიის მოვლენის გარჩევა ერთგვაროვან გარემოსათვის და ვცადოთ მისი განტოლების ჩაწერა. განვიხილოთ სიტუაცია, როდესაც ერთგვაროვან თხევად (აირისებრივ) გარემოში შეტანილია უცხო ნივთიერების რაღაცა რაოდენობა. თავიდან ამ ნივთიერების განაწილება სითხის მოცულობაში იქნება არათანაბარი. მაგრამ დროთა განმავლობაში, გადატანის მოვლენების გამო, ამ ნივთიერების კონცენტრაცია სითხის სხვა და სხვა უბნებში გათანაბრდება.



**დიფუზია ერთგვაროვან გარემოში** – ეს არის ნივთიერების მასის თვითნებური გადატანა მაღალი კონცენტრაციის მიდამოებიდან დაბალი კონცენტრაციის ადგილას. ასეთ გადატანას, როგორც უკვე ვიცით, ეწოდება პასიური ტრანსპორტი.

რაოდენობრივად დიფუზია აღიწერება სპეციალური პარამეტრების მეშვეობით.

**1. ნივთიერების ნაკადი** რაიმე ზედაპირში.

სივრცეში, რომელიც შევსებულია დიფუნდირებადი ნივთიერების ნაწილაკებით, გამოვყოთ რაღაც OX მიმართულება, რომლის გასწვრივაც იცვლება ნაწილაკების კონცენტრაცია, და ამ მიმართულების პერპენდიკულარული ზედაპირის მცირე ელემენტი.

**ნივთიერების ნაკადი** ( $\Phi$ ) ეწოდება ნივთიერების რაოდენობას, რომელიც გაედინება დიფუზიის მიმართულების პერპენდიკულარულ ზედაპირის ელემენტში დროის ერთეულში.

გადატანილი ნივთიერების რაოდენობა შეიძლება გაიზომოს *კილოგრამებში* ან *მოლებში* ( $\nu$ ). აქედან გამომდინარე ნაკადი განისაზღვრება ფორმულებით:

$$\Phi = m/t = dm/dt \quad [\text{კგ/წმ}] \quad \text{ან} \quad \Phi = \nu/t = d\nu/dt \quad [\text{მოლ/წმ}] \quad (109)$$

ნათელია, რომ ნაკადი გამოყოფილი ელემენტის ფართის ( $S$ ) პროპორციულია. გარდა ამისა შეიძლება უჩვენოთ, რომ ნაკადი OX მიმართულებით დიფუნდირებული ნივთიერების კონცენტრაციის გრადიენტის ( $dc/dx$ ) პროპორციულია. ამიტომაც ადგილი ექნება ნაკადის გამოთვლის შემდეგ ფორმულას:

$$\Phi = -DS \frac{dc}{dx} \quad (110)$$

ფორმულაში მყოფი პროპორციულობის კოეფიციენტს ( $D$ ) **დიფუზიის კოეფიციენტი** ეწოდება. უარყოფითი ნიშანი ( $-$ ) გვიჩვენებს, რომ ნაკადი მიმართულია ნივთიერების კონცენტრაციის კლებისაკენ (ესე იგი გადატანა ხორციელდება მეტი კონცენტრაციის მქონე უბნიდან ნაკლები კონცენტრაციის უბანში).

მოყვანილ (110) ფორმულაში შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც მასური, აგრეთვე მოლარული სიმკვრივე. სწორედ ამითი განისაზღვრება ნაკადის ერთეული (კგ/წმ ან მოლ/წმ). სიმკვრივის ერთეულების მიუხედავად დიფუზიის კოეფიციენტის განზომილება  $D - [\text{მ}^2/\text{წმ}]$ .

**2. დიფუზიის კოეფიციენტი  $D$**  დამოკიდებულია როგორც სითხის და, დიფუნდირებადი ნაწილაკების თვისებაზე, ასევე ტემპერატურაზე. მისი რიცხობრივი მნიშვნელობა გამოსახება ფორმულით:

$$D = \sigma^2 / 3\tau$$

სადაც,  $\sigma$  – მოლეკულების საშუალო გადაადგილება (საშუალო მანძილი მოლეკულებს შორის),  $\tau$  – მოლეკულების „ბინადარი ცხოვრების“ საშუალო დრო.

შეიძლება დიფუზიის კოეფიციენტს მიეცეს შემდეგი განმარტება:

**დიფუზიის კოეფიციენტი** ეწოდება ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც რიცხობრივად იმ დიფუნდირებული ნივთიერების რაოდენობის ტოლია, რომელიც დროის ერთეულში გაედინება ზედაპირის ფართის ერთეულში, თუ კი სიმკვრივეთა სხვაობა სიგრძის ერთეულის ტოლ მანძილზე მყოფ ორ ზედაპირს შორის ერთის ტოლია.

**3. ნივთიერების ნაკადის სიმკვრივე.**

ნივთიერების ნაკადის სიმკვრივეს ( $J$ ) უწოდებენ ზედაპირის ელემენტში გასული ნივთიერების ნაკადის ( $\Phi$ ) შეფარდებას ამ ელემენტის ფართობთან ( $S$ ):

$$J = \Phi/S \quad (111)$$

ნაკადის სიმკვრივეს ერთეულია – [კგ/მ<sup>2</sup>·წმ] ან [მოლი/მ<sup>2</sup>·წმ].

ნაკადის სიმკვრივე ერთგვაროვან გარემოში გამოისახება დიფუზიუის განტოლებით (ფიკის განტოლებით):

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (112)$$

უარყოფითი ნიშანი (–) გვიჩვენებს, რომ ნივთიერების ნაკადის ჯამური სიმკვრივე დიფუზიის დროს მიმართულია კონცენტრაციის გრადიენტის ( $\frac{dc}{dx}$ ) საწინააღმდეგოდ.

ნივთიერების ნაკადის სიმკვრივეს მსგავსად შემოყავთ **ენერგიის ნაკადის სიმკვრივის** (ანუ **ტალლის ინტენსივობის**) ცნება ( $I$ ) როგორც ენერგიის ნაკადის და ტალლის გავრცელების მიმართულების პერპენდიკულარული ზედაპირის ფართის ( $S$ ) შეფარდება. ტალლის გადინების ზედაპირზე ენერგიის თანაბარი განაწილებისას  $I = \Phi/S$ , ხოლო საერთო შემთხვევაში —  $I = \frac{d\Phi}{dS}$ . ინტენსივობის ერთეულია ვტ/მ<sup>2</sup>.

უნდა აღინიშნოს, რომ ინტენსივობა წარმოადგენს იმ ფიზიკურ პარამეტრს, რომელიც საწყის დონეზე განსაზღვრავს ტალღური პროცესით გამოწვეულ ფიზიოლოგიური შეგრძნების ხარისხს (მაგალითად, ბგერით ან სინათლით).

წარმოვიდგინოთ  $l$  სიგრძის პარალელეპიპედის სახით იმ გარემოს მონაკვეთი, რომელშიც ვრცელდება ტალღა. პარალელეპიპედის წახნაგის ფართობი, რომელიც ტალღის  $v$  სიჩქარის პერპენდიკულარულია, ავლნიშნოთ  $S$ -ით (იხ. სურ. 119a). შემოვიღოთ რხევითი მოძრაობის ენერგიის მოცულობითი სიმკვრივის ცნება ( $w$ ), რომელიც წარმოადგენს ენერგიის რაოდენობას მოცულობის ერთეულში:

$$w = E/V$$

$t$  დროში  $S$  ფართის ზედაპირში გაივლის ენერგია, რომელიც წარმოადგენს მოცულობის  $V = lS = vtS$  მნიშვნელობის ნამრავლს ენერგიის მოცულობით სიმკვრივეზე:

$$E = wvtS \quad (113)$$

განტოლება (113) ორივე მხარის დროზე გაყოფისას მივიღებთ ენერგიის ნაკადს ( $\Phi$ ), ხოლო ფართობზე გაყოფის შემდეგ, მივიღებთ ენერგიის ნაკადის ინტენსივობას ( $I$ ). მიღებული გამოსახულება დააკავშირებს ტალღის ინტენსივობას მისი გავრცელების სიჩქარესთან. ვექტორი  $\vec{I}$ , რომლის მოდულიც ტალღის ინტენსივობის ტოლია, მიმართულება კი ემთხვევა მის გავრცელების მიმართულებას, **უმოვის ვექტორის** სახელს ატარებს:

$$\vec{I} = w\vec{v} \quad (114)$$

ფორმულა (113) შეიძლება განსხვავებული სახით წარმოვადგინოთ. თუ გავითვალისწინებთ, რომ ჰარმონიული რხევების ენერგია (იხ. ფორმულა (16))

$$E = \frac{mA_0^2\omega_0^2}{2}$$

და თუ გამოვსახებთ მასა  $m$  ნივთიერების სიმკვრივის  $\rho$  და მოცულობის  $V$  მეშვეობით, ენერგიის მოცულობითი სიმკვრივისათვის მივიღებთ:

$$w = \frac{\rho A_0^2\omega_0^2}{2}$$

და მაშინ ფორმულა (114) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\vec{I} = \frac{\rho A_0^2\omega_0^2}{2} \vec{v} \quad (115)$$

ასე რომ, დრეკადი ტალღის ინტენსივობა, რომელიც უმოვის ვექტორით განისაზღვრება, პირდაპირ პროპორციულია მისი გავრცელების სიჩქარის, ნაწილაკების რხევის ამპლიტუდის და სიხშირის კვადრატებისა.

ნაკადის სიმკვრივის ცნება იყო შემოღებული 1870-ანი წლების დასაწყისში რუსი ფიზიკოსის უმოვის მიერ. მან გამოაქვეყნა რამდენიმე ნაშრომი ენერჯის გადატანის პრინციპებზე, რომლებშიც განავითარა წარმოდგენები გარემოს მოცემულ წერტილში ენერჯის სიმკვრივის შესახებ, ენერჯის გავრცელების სიჩქარეზე და მიმართულებაზე, და აგრეთვე ენერჯის ნაკადის ლოკალიზებაზე სივრცეში. უმოვმა შეადგინა ენერჯის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები მუდმივი დრეკადობის მქონე მყარ სხეულებში და სითხეებში. ამ განტოლებების ინტეგრირებისას და მათი მისადაგებით დრეკად გარემოში ტალღების გავრცელების პრობლემებზე, უმოვი მივიდა დასკვნამდე, რომ ენერჯია სრულად გადაიტანება ტალღის მიერ ერთი წერტილიდან მეორეში.

ზედაპირის ელემენტში დროის ერთეულში გასული ენერჯის რაოდენობა, ტოლია ამ ელემენტზე მოქმედი წნევის ძალის ან დაჭიმულობის ნამრავლისა ელემენტის მოძრაობის სიჩქარეზე — ამ წესს **უმოვის თეორემა** ეწოდება.

თავისუფალ სივრცეში მოქმედი უწყვეტობის განტოლება მოძრავი დრეკადი გარემოსა და ბლანტი სითხეებისათვის გამოიყურება შემდეგნაირად:

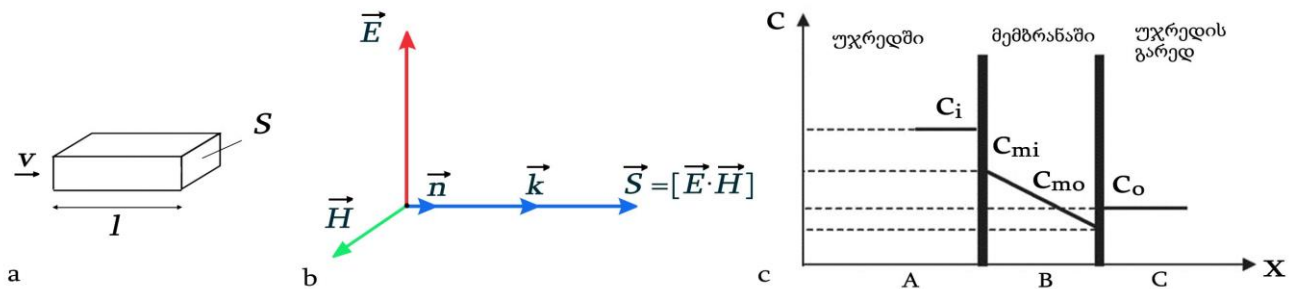
$$\frac{dw}{dt} + \text{div} \vec{S}_u = 0 \quad (116)$$

აქ

$$\vec{S}_u = wv\vec{n} \quad (117)$$

$\vec{S}_u$  – უმოვის ვექტორია,  $w$  – ენერჯის სიმკვრივე,  $v$  – გარემოს მოძრაობის სუჩქარე, ხოლო  $\vec{n}$  – ნორმალი (ზედაპირის პერპენდიკულარული ერთიანი ვექტორი).

მიაქციეთ ყურადღება, რომ (114) და (117) წარმოადგენენ სხვა და სხვა ფორმით ჩაწერილ ერთსა და იგივე ცნებას – ენერჯის ნაკადის სიმკვრივის ვექტორს. უბრალოდ, იმისათვის რომ არ ვიყოთ მიბმულები ტალღის გავრცელების სიჩქარის მიმართულებას, შემოიტანება ნორმალური ვექტორი  $\vec{n}$ , რომელიც განსაზღვრავს ენერჯის გავრცელების მიმართულებას (სურ. 119b).



სურ. 119. (a) ტალღის გავრცელების გარემო. (b) უმოვის ვექტორი. (c) მემბრანაში გადინებული ნაწილაკების კონცენტრაციის განაწილება.

1884 წელს ინგლისელმა ფიზიკოსმა დ.პოინტიგმა, უმოვისაგად დამოუკიდებლად (თანაც მას წარმოდგენაც არა ჰქონდა უმოვის შრომებზე), მიიღო მსგავსი გამოსახულება კერძო შემთხვევისათვის – ელექტრომაგნიტური ველისათვის (განივი ელექტრომაგნიტური ტალღებისათვის).

ამიტომ უმოვის ვექტორს ( $\vec{S}_u$ ) ხშირად პოიტინგის ვექტორს უწოდებენ ( $\vec{S}_p$ ).

$$\vec{S}_p = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$$

$\vec{E}$  და  $\vec{H}$  – ელექტრული და მაგნიტური ველების დამაბულობებია, პოიტინგის ვექტორი კი ( $\vec{S}_p$ ) წარმოადგენს მათ ვექტორულ ნამრავლს.

აუცილებელია გვახსოვდეს პრინციპული განსხვავება –  $S_u$  და  $S_p$  ცნებებს შორის. პოიტინგის ვექტორის გამოყენება შეიძლება მხოლოდ ელექტრომაგნიტური ველების განხილვისას, იმ დროს როდესაც უმოვის ვექტორი გამოიყენება უკლებლივ ყველა ძალოვან ველისათვის, ვინაიდან თვით ენერგიის მოძრაობის განტოლებები უმოვის მიერ იყო მიღებული ყველა სახის ენერგიის მოძრაობისათვის, რომელიც ხორციელდება ნებისმიერ გარემოში, ანუ ატარებენ საერთო ხასიათს.

#### ფიკის განტოლება მემბრანისათვის.

ფიკის განტოლება აღწერს დიფუზიას ერთგვაროვან გარემოში. გადავამუშაოთ ეს განტოლება მემბრანაში დიფუზიის აღწერისათვის. საჭიროა ყურადღების მიქცევა შემდეგ ცნობილ ფაქტზე: ორი გარემოს გამყოფ საზღვარზე (მაგალითად, წყალი და ცხიმი) აუცილებელია ადგილი ჰქონდეს დიფუნდირებად ნაწილაკთა კონცენტრაციის ნახტომისებრივ ცვლილებას. მაგალითად, თუ ჭურჭელში, რომელშიც წყლის ზემოდან ასხია ზეთი, ჩავყარეთ მარილი, მისი კონცენტრაცია ამ ორ გარემოში იქნება განსხვავებული.

**4. ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტი** ( $K$ ) – ეს არის სიდიდე, რომელიც შეესაბამება მოსაზღვრე გარემოებში მყოფი ნაწილაკების კონცენტრაციას შეფარდებას:

$$K = c_1/c_2 \quad (118)$$

სადაც,  $c_1$  და  $c_2$  – ნაწილაკთა კონცენტრაცია შესაბამისად პირველ და მეორე გარემოებში.

#### ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტი – უგანზომილო სიდიდეა.

განვიხილოთ დაუმუხტავი ნაწილაკების დიფუზია (მოლეკულების ან ატომების) მემბრანის ზედაპირების გავლით. სურ. 119c-ზე აღნიშნულია შემდეგნაირად:

$c_i$  – ნაწილაკების კონცენტრაცია უჯრედში ( $i$  — *in*)

$c_{mi}$  – ნაწილაკების კონცენტრაცია მემბრანაში მის შიდა ზედაპირთან

$c_{mo}$  – ნაწილაკების კონცენტრაცია მემბრანაში მის გარე ზედაპირთან

$c_o$  – ნაწილაკების კონცენტრაცია უჯრედის გარეთ ( $o$  — *out*)

ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტი მემბრანასა და გარემოს შორის უდრის ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტს მემბრანასა და უჯრედს შორის:

$$K = c_{mo}/c_o = c_{mi}/c_i$$

აქედან მიიღება გამოსახულებები ნაწილაკთა კონცენტრაციისათვის მემბრანის შიგნით:

$$c_{mo} = K c_o \quad c_{mi} = K c_i$$

სიდიდეები  $c_o$  და  $c_i$  შეიძლება გაიზომოს.

მემბრანის მცირე სისქის ( $L$ ) გათვალისწინებით, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ დიფუნდირებადი ნივთიერების კონცენტრაცია მის ფარგლებში წრფიული კანონით იცვლება. ამიტომ დიფუნდირებადი ნივთიერების კონცენტრაციის გრადიენტი მუდმივია:

$$\frac{dc}{dx} = \frac{c_{mo} - c_{mi}}{L} = -K \frac{c_i - c_o}{L} \quad (119)$$

ჩავსვათ გრადიენტის მნიშვნელობა (119) დიფუზიის განტოლებაში (112), მივიღებთ

$$J = DK \frac{c_i - c_0}{L} \quad (120)$$

სიდიდეს

$$P = \frac{DK}{L} \quad (121)$$

ეწოდება მემბრანის შეღწევადობის კოეფიციენტი, [მ/წმ].

აქ,  $D$  – დიფუზიის კოეფიციენტი,  $K$  – ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტი მემბრანასა და გარემოს შორის,  $L$  – მემბრანის სისქე.

ფორმულა (121) გათვალისწინებით (120) ფორმულიდან მივიღებთ ფიკის განტოლებას მემბრანისათვის, რომელიც აღწერს მემბრანებში მიმდინარე პასიურ ტრანსპორტს:

$$J = P(c_i - c_0) \quad (122)$$

აქ  $P$  – პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელიც ასახავს მემბრანის უნარს გაატაროს ესა თუ ის ნივთიერებები.

ბიფენოვან ლიპიდურ მემბრანებისათვის:  $P_{წყალი} \approx 10^{-4}$  სმ/წმ;  $P_{იონები} \approx 10^{-14}$  სმ/წმ

მემბრანული შეღწევადობის, უფრო სწორედ კი შეღწევადობის კოეფიციენტის გამოთვლა წარიმართება შემდეგი ფორმულით:

$$P = \frac{D\beta}{b}$$

სადაც,  $P$  – შეღწევადობის კოეფიციენტი,  $D$  – დიფუზიის კოეფიციენტი,  $\beta$  – ამა თუ იმ ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტი წყალსა და ლიპიდს შორის,  $b$  – ლიპიდური მემბრანის სისქე.

ნივთიერების ნაკადის (ტრანსპორტის) აღწერა ლიპიდურ ფენაში შესაძლებელია კოლენდერის-ბერნულდის განტოლების მეშვეობით:

$$\frac{dm}{dt} = -PS \frac{dc}{dx} \approx -PS(c_1 - c_2) \quad (123)$$

სადაც,  $c_1$  და  $c_2$  – ნივთიერების კონცენტრაცია მემბრანის სხვადასხვა მხარეს,  $S$  – ფართი რომელშიც მიმდინარეობს ნივთიერების გადატანა,  $P$  – (121) ფორმულაში უკვე აღწერილი შეღწევადობის კოეფიციენტი, რომელიც დიფუზიის კოეფიციენტის ანალოგურია. ავლნიშნოთ, რომ უკანასკნელისაგან განსხვავებით, რომელიც დამოკიდებულია მხოლოდ ნივთიერების ბუნებაზე და ტემპერატურაზე, შეღწევადობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია აგრეთვე მემბრანის თვისებებსა და მის ფუნქციონალურ მდგომარეობაზე.

როდესაც ტრანსპორტირებადი ნივთიერებების უკვე განხილული პარამეტრების (ელექტრულად ნეიტრალური ნაწილაკები) გარდა ჩაირთვებიან ელექტრული ურთიერთობების ძალებიც, ამოცანა ცოტა უფრო რთულდება. წინა თავში ჩვენს მიერ უკვე აღინიშნა, რომ იონების ტრანსპორტი მემბრანული არხების გავლით მიმდინარეობს ან კონცენტრაციის გრადიენტით, ან მემბრანული პოტენციალის ქმედებით, რომელიც აღიწერება ნერნსტის განტოლებით (108). ამ თავში კი ჩვენ ვნახეთ, რომ ფიკის განტოლება აღწერს როგორც დაუმუხტავი ასევე დამუხტული ნაწილაკების პასიურ ტრანსპორტს ელექტრული ველის არ არსებობის პირობებში. ეხლა კი დროა განვიხილოთ იონების ტრანსპორტი თვით მემბრანებში ელექტრული ველის გათვალისწინებით.

ცალკეულ იონზე ელექტრულ ველში მოქმედებს ძალა  $f_0 = qE$ , სადაც  $E$  – ელექტრული ველის დამაბულობაა, ხოლო  $q = Ze$  – იონის მუხტი ( $Z$  – იონის ვალენტობა). ველის დამაბულობა გამოისახება ელექტრული პოტენციალის გრადიენტის მეშვეობით:

$$E = -grad\varphi = -\frac{d\varphi}{dx}$$

ამიტომაც შეიძლება ჩავწეროთ:

$$f_0 = -Ze \frac{d\varphi}{dx} \quad (124)$$

განტოლება (124) შეიძლება მიეცეს უფრო მოხერხებული სახე თუ გავამრავლებთ მის ორივე მხარეს ავოგადროს მუდმივაზე ( $N_A$ ):

$$f = -ZF \frac{d\varphi}{dx} \quad (125)$$

აქ,  $f = f_0 N_A$  – იონების ერთ მოლზე მოქმედი ძალა;  $F = e N_A$  – ფარადეის მუდმივა.

ელექტრული ძალის გარდა, იონებზე მოქმედებენ წინაღობის ძალები. ამიტომაც საშუალოდ მათი მოძრაობა შეიძლება თანაბრად ჩაითვალოს და დახასიათდეს საშუალო სიჩქარით  $v$ , რომელიც  $f$  ძალის პროპორციულია:

$$v = U_m f \quad (126)$$

$U_m$  – პროპორციულობის კოეფიციენტი და მას იონების მოძრაობის უნარს უწოდებენ.

ჩავსვათ (126) ფორმულაში  $f$  ძალის გამოსახულება (125) ფორმულიდან, მივიღებთ:

$$v = -U_m ZF \frac{d\varphi}{dx} \quad (127)$$

ნივთიერების ნაკადი გამოისახება მისი ნაწილაკების მოძრაობის საშუალო სიჩქარიდან ცნობილი ფორმულით:

$$\Phi = cSv \quad (128)$$

ამ ფორმულაში, ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარის ნამრავლი დინების მილის კვეთის ფართზე ( $Sv$ ) შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც დინების ელემენტალური მოცულობის ცვლილება. მართლაც,  $V = Sh$  და თუ  $h$  შევცვალეთ  $v$ -თი, მივიღებთ:

$$\Delta V = Sv$$

შემდეგ კი, ამ გამოსახულების ნივთიერების კონცენტრაციაზე გამრავლებისას, მივიღებთ ნივთიერების რაოდენობას დინების მილში, ანუ ნაკადს.

თუ ჩავსვათ (128) ფორმულაში საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობას (127)-დან, მივიღებთ განტოლებას დამუხტული ნაწილაკების ნაკადისათვის ელექტრულ ველში:

$$\Phi = -cS U_m ZF \frac{d\varphi}{dx}$$

ნაკადის სიმკვრივეს კი მისი განმარტებიდან გამომდინარე ( $J = \Phi/S$ ) გამოვსახავთ:

$$J = -cU_m ZF \frac{d\varphi}{dx} \quad (129)$$

საერთო შემთხვევაში კი ნაწილაკების გადატანა განისაზღვრება როგორც კონცენტრაციის გრადიენტით, აგრეთვე ელექტრული ველის ზეგავლენით:

$$J = -D \frac{dc}{dx} - cU_m ZF \frac{d\varphi}{dx} \quad (130)$$

მიღებულ გამოსახულებას ეწოდება ნერნსტ-პლანკის განტოლება (ელექტროდი-ფუზური განტოლება). იგი ასახავს იონების დიფუზური ნაკადის სიმკვრივის დამოკიდებულებას თვით იონების კონცენტრაციაზე და პოტენციალის გრადიენტზე ( $\frac{d\varphi}{dx}$ ).

ნეიტრალური ნაწილაკებისათვის ( $Z = 0$ ) განტოლება (130) გარდაიქმნება ფიკის განტოლებაში (112).

ცნობილი ნერნსტის განტოლება (108) შეიძლება იყოს მოდიფიცირებული და ჩაწერილი პროცესში მონაწილე ძირითადი იონებისათვის ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ). ამ შემთხვევაში მიიღება ცნობილი გოლდმან-ჰოჯკინ-კატცის განტოლება ელექტრული მემბრანული პოტენციალისათვის:

$$\varphi_M = -\frac{RT}{F} \ln \left( \frac{P_K[K^+]_i + P_{Na}[Na^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_o}{P_K[K^+]_o + P_{Na}[Na^+]_o + P_{Cl}[Cl^-]_i} \right) \quad (131)$$

ვინაიდან მოსვენების მდგომარეობაში  $P_{Na} \ll P_K$  და  $P_{Cl} \ll P_K$  (131) განტოლებიდან მივიღებთ ნერნსტის განტოლებას (108), და თუ გავიხსენებთ რომ  $K^+$  იონებისათვის  $n = 1$ , (108) ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\varphi_M = -\frac{RT}{F} \ln \left( \frac{P_K[K^+]_i}{P_K[K^+]_o} \right)$$

ქვემოთ მოყვანილია ცხრილი, რომელშიც წარმოდგენილია ყველა ამ თავში განხილული ფორმულა

ნივთიერების ნაკადი ( $\Phi$ ) დიფუზიის მიმართულების პერპენდიკულარულ ზედაპირის ელემენტში	მოცემულ ელემენტში დროის ერთეულში გატანილი ნივთიერების რაოდენობა: $\Phi = m/t = dm/dt$ [კგ/წმ] ან $\Phi = v/t = dv/dt$ [მოლ/წმ] (109)
ნაკადის გამოსათვლელი ფორმულა	$\Phi = -DS \frac{dc}{dx}$ (110) $dc/dx$ – კონცენტრაციის გრადიენტი, $S$ – ზედაპირის ფართი, $D$ – დიფუზიის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია სითხის და დიფუნდირებადი ნაწილაკების თვისებებზე, და ასევე ტემპერატურაზე.
ნივთიერების ნაკადის სიმკვრივე ( $J$ )	ზედაპირის ელემენტში გასული ნივთიერების ( $\Phi$ ) ნაკადის და ამ ელემენტის ფართის ( $S$ ) შეფარდება: $J = \Phi/S$ , [კგ/(მ <sup>2</sup> ·წმ)] ან [მოლ/(მ <sup>2</sup> ·წმ)] (111)
ფიკის გან-ბა დიფუზიისათვის ერთგვაროვან გარემოში.	$J = -D \frac{dc}{dx}$ (112)
ნივთიერების განაწილების კოეფიციენტი ( $K$ )	ნაწილაკების კონცენტრაციის შეფარდება მოსაზღვრე გარემოებში: $K = C_{გარემო1} / C_{გარემო2}$ (118)
მემბრანის შეღწევადობის კოეფიციენტი	$P = DK/L$ [მ/წმ] (121)
ფიკის განტოლება მემბრანებში პასიური ტრანსპორტისათვის	$J = P(c_i - c_o)$ (122) $c_i$ – ნაწილაკების კონცენტრაცია უჯრედში, $c_o$ – ნაწილაკების კონცენტრაცია უჯრედის გარეთ
კოლენდერ-ბერნულის გ-ბა მემბრანაში ნივთიერების ნაკადის აღწერისათვის	$\frac{dm}{dt} = -PS \frac{dc}{dx} \approx -PS(c_1 - c_2)$ (123) $c_1$ და $c_2$ – ნივთიერების კონცენტრაცია მემბრანის ორ მხარეს, $S$ – ფართი, რომელშიც გაედინება ნივთიერება, $P$ – შეღწევადობის კოეფიციენტი.

ნაკადის გამოთვლა ნაწილაკების მოძრაობის საშუალო სიჩქარის საფუძველზე	$\Phi = cSv \quad (128)$ <p><math>c</math> – ნაწილაკების კონცენტრაცია, <math>v</math> – მოძრაობის სიჩქარე, <math>S</math> – ზედაპირის ფართობი.</p>
ნერნსტის გან-ბა მემბრანული პოტენციალის აღწერისათვის	$\varphi_M = \frac{RT}{Fn} \ln \frac{C_{Outside}}{C_{Inside}} = -\frac{RT}{F} \ln \left( \frac{P_K[K^+]_i}{P_K[K^+]_o} \right) \quad (108)$ <p><math>R</math> – აირის მუდმივა; <math>T</math> – ტემპერატურა (K); <math>F</math> – ფარადეის მუდმივა; <math>n</math> – იონების ვალენტობა (<math>K^+ n = 1</math>); <math>C_{Outside}</math> – იონების კონცენტრაცია გარედან; <math>C_{Inside}</math> – იონების კონცენტრაცია შიგნით.</p>
ნერნსტ-პლანკის გან-ბა	$J = -D \frac{dc}{dx} - cU_mZF \frac{d\varphi}{dx} \quad (130)$
გოლდმან-ჰოჯკინ-კატცის გან-ბა ელექტრული მემბრანული პოტენციალისათვის	$\varphi_M = -\frac{RT}{F} \ln \left( \frac{P_K[K^+]_i + P_{Na}[Na^+]_i + P_{Cl}[Cl^-]_o}{P_K[K^+]_o + P_{Na}[Na^+]_o + P_{Cl}[Cl^-]_i} \right) \quad (131)$ <p><math>R</math> – აირის მუდმივა; <math>T</math> – ტემპერატურა (K); <math>F</math> – ფარადეის მუდმივა; <math>P_K[K^+]_o</math> – <math>K^+</math>-ის იონების კონცენტრაცია გარედან; <math>P_K[K^+]_i</math> – <math>K^+</math>-ის იონების კონცენტრაცია შიგნით...</p>

### ამოცანები

1. ჟანგბადის მოლარული კონცენტრაცია ატმოსფეროში  $c_a = 9$  მოლ/მ<sup>3</sup>. ჟანგბადი დიფუნდირებს მწერების სხეულში ზედაპირიდან სპეციალური მილების (ტრახეების) მეშვეობით. საშუალო ტრახეის სიგრძე დაახლოვებით  $h = 2$  მმ ტოლია, ხოლო მისი განივკვეთი  $S = 2 \cdot 10^{-9}$  მ<sup>2</sup>. გამოთვალეთ დიფუზიის ნაკადი ტრახეაში, თუ ჟანგბადის კონცენტრაცია მწერის სხეულში ( $c$ ) მისი ატმოსფეროში კონცენტრაციაზე ორჯერ დაბალია. ჟანგბადის დიფუზიის კოეფიციენტი  $D = 10^{-5}$  მ<sup>2</sup>/წმ.

*ამოხსნა*

ჩავწეროთ დიფუზიის ნაკადის (110) განტოლება:  $\Phi = -DS \frac{dc}{dx}$ .

კონცენტრაციის გრადიენტი  $\frac{dc}{dx} = \frac{c-c_a}{h} = \frac{0,5c-c}{h} = -\frac{0,5c}{h} = \frac{0,5 \cdot 9}{0,002} = 225$  მოლ/მ<sup>4</sup>

რიცხოზრივი მნიშვნელობების ჩასმის შემდეგ მივიღებთ:

$$\Phi = 10^{-5} \times 225 \times 2 \times 10^{-9} = 4,5 \times 10^{-12} \text{ მოლ/წმ.}$$

*პასუხი:*

$$\Phi = 4,5 \times 10^{-12} \text{ მოლ/წმ.}$$

2. ორმაგი ფოსფოლიპიდური შრე ბიოლოგიურ მემბრანას კონდენსატორს ამსგავსებს. მემბრანის ნივთიერება წარმოადგენს დიელექტრიკს, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა  $\epsilon = 4$ . თუ მემბრანის სისქე  $d = 10$  ნმ-ის ტოლია, პოტენციალთა სხვაობა მის ზედაპირებს შორის იქნება  $U = 0,2$  ვ. გამოთვალეთ 1 მ<sup>2</sup> მემბრანის ელექტროტევადობა და მასში ელექტრული ველის დამაბულობა.

*ამოხსნა*

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d = 4 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 10^{-6} = 3500 \text{ პფ}$$

$$E = U/d = 0,2/10^{-8} = 20 \times 10^6 \text{ ვ/მ}$$

*პასუხი:*

$$C = 3500 \text{ პფ} \quad E = 20 \times 10^6 \text{ ვ/მ}$$



3. უჯრედის ზედაპირის ფართი დაახლოვებით  $S = 5 \times 10^{-10} \text{ მ}^2$  ტოლია. მემბრანის კუთრი ელექტროტევადობა (ერთეული ზედაპირის ტევადობა) შეადგენს  $C_{sp} = 10^{-2} \text{ ფ/მ}^2$ . ამ დროს უჯრედში ორისი პოტენციალი შეადგენს  $U = 70 \text{ მვ}$ . მონახეთ: ა) მუხტი მემბრანის ზედაპირზე; ბ) ამ მუხტის შემქმნელი ერთვალენტიანი იონების რაოდენობა.

*ამოხსნა*

$$C = C_{sp}S = 10^{-2} \times 5 \times 10^{-10} = 5 \times 10^{-12} \text{ ფ}$$

$$\text{ა) } q = CU = 5 \times 10^{-12} \times 70 \times 10^{-3} = 3,5 \times 10^{-13} \text{ კულ}$$

$$\text{ბ) } n = q/e = 3,5 \times 10^{-13} / 1,6 \times 10^{-19} = 2,2 \times 10^6$$

*პასუხი:*

$$\text{ა) } q = 3,5 \times 10^{-13} \text{ კულ} \quad \text{ბ) } n = 2,2 \times 10^6$$

4. უჯრედული მემბრანის შეღწევადობა წყლის მიმართ დაახლოვებით 10 ჯერ მეტია ვიდრე იონებისათვის. რა მოხდება, თუ წყლის იზოტონურ ხსნარში, რომელშიც ერთორციტები იმყოფებიან, გავზრდით ოსმოსურად აქტიური ნივთიერების (მაგალითად, იონების) კონცენტრაციას?

*ამოხსნა*

ხსნარში  $\text{Na}^+$ -ის იონების კონცენტრაციის ზრდას მოყვება წყლის დიფუზია უჯრედისგან მის გარშემო მყოფ ხსნარში  $\text{Na}^+$ -ის კონცენტრაციის უჯრედში და უჯრედის გარედ დარღვეული შეფარდების აღსადგენად. შედეგად უჯრედები „დაიჭიმუქნება“.

რა მოხდება, თუ უჯრედი წყალში მოვათავსეთ?

*ამოხსნა*

ამ შემთხვევაში აღმოჩნდება, რომ წყლის მოლეკულების კონცენტრაცია უჯრედის გარეთ მეტია, ვიდრე უჯრედში. წყლის მოლეკულა დიფუნდირებს უჯრედში. უჯრედის შიდა წნევა იწყებს ზრდას, სანამ ის არ გასკდება.

### 15.10. უჯრედის დიფერენციაცია და მორფოგენეზი.

ნებისმიერი ბიოლოგიური სისტემა (ორგანიზმი) ხასიათდება ენერჯის გარდაქმნის გარკვეული ზღვრული ეფექტურობით, ე.ი. დროის ერთეულში იგი ნებისმიერი რაოდენობის ენერჯის გარდაქმნას და მოხმარებას ვერ შეძლებს. ამდენად, ენერჯის მიღებული რაოდენობა უნდა იქნეს მოხმარებული მომჭირნეობით ორი ძირითადი გზით:

1. მეტაბოლურ პროცესებში, რომლებიც ორგანიზმის ფიზიკურ არსებობას განაპირობებს
2. გამრავლების პროცესში.

გასაგებია, რომ თუ მთელი ენერჯია მეტაბოლიზმს მოხმარდება, გამრავლება შეწყდება. სიცოცხლისათვის კი ორივე თანაობა აუცილებელია, ასე რომ უნდა არსებობდეს გარკვეული ბალანსი მათ შორის. იმისათვის, რომ ენერჯია უფრო ეფექტურად იქნეს გამოყენებული მეტაბოლიზმის პროცესს შესაძლებელია ორი გზა:

1. ორგანიზმში ინტეგრირებული ერთობლიობის წარმოქმნა, რომელშიც ზოგიერთი მათი კომპონენტი ინარჩუნებენ უნარს მოახდინონ არაორგანული ენერჯეტიკული წყაროდან საკვების სინთეზი.
2. უჯრედების სპეციალიზაცია, ანუ ფუნქციების განაწილება. ამ შემთხვევაში იქმნება სპეციალური გამრავლებისათვის განპირობებული უჯრედები, ხოლო ყველა დანარჩენი უჯრედი იქნება დამოკიდებული ერთმანეთზე.

ერთი უჯრედიდან მრავალუჯრედიანი ორგანიზმის ფორმირება და განვითარება **ონტოგენეზი**<sup>96</sup> თავის თავში გულისხმობს ორ ეტაპს:

1. უჯრედების დიფერენციაციას;
2. უჯრედების მორფოგენეზს – ორგანოების და ორგანიზმის ნაწილების ფორმირების პროცესი ონტოგენეზის და ფილოგენეზის<sup>97</sup> დროს, რომელსაც თან ახლავს ქსოვილების დიფერენცირება.

ასე რომ საბოლოოთ შეიძლება ითქვას, რომ:

1. ფილოგენეზში ხდება ინფორმაციის შერჩევა და მისი ფასეულობის ზრდა.
2. ონტოგენეზში ხდება საწყის ბიოსტრუქტურაში ჩადებული ინფორმაციის და სტრუქტურის შესაბამისობაში მოყვანა – დიფერენცირება, ორგანიზირება, სპეციალიზაცია.

### **15.11. ნერვული იმპულსის გადაცემის ალტერნატიული მექანიზმები.**

საყოველთაოდ მიღებულია, რომ ცოცხალ ორგანიზმში ინფორმაცია რეცეპტორებიდან თავის ტვინის ნეირონებამდე და ნეირონებიდან კუნთებში გადაიცემა ელექტრული ნერვული იმპულსების მეშვეობით (ქმედების პოტენციალებით). ქმედების პოტენციალი იყო აღმოჩენილი მოსვენების პოტენციალზე ადრე. ლუიდიჟი გალვანიმ მე XVIII-ე საუკუნის ბოლოს აღმოაჩინა, რომ პრეპარირებული ბაყაყის კიდურების კუნთების შეკუმშვა შეიძლება იყოს გამოწვეული ელექტრული იმპულსის მეშვეობით. მე XIX-ე საუკუნეში დამკვიდრდა პრიმიტიული მოსაზრება თითქოს ელექტრული დენი ნერვებში ვრცელდება ისევე როგორც მავთულეებში. მაგრამ ჰელმჰოლცმა (მე XIX-ე საუკუნის მეორე ნახევარი) უჩვენა, რომ ნერვული იმპულსის გავრცელების სიჩქარე შეადგენს მხოლოდ 1-100 მ/წმ, რაც მავთულით გადაცემული ელექტრული იმპულსის სიჩქარეზე ( $3 \cdot 10^8$  მ/წმ) მნიშვნელოვნად ნაკლებია. ამიტომაც მე XIX-ე საუკუნის ბოლოსათვის ჰიპოტეზა ნერვული იმპულსის ელექტრული ბუნების შესახებ უმეტესი ფიზიოლოგების მიერ იყო უარყოფილი. გამოითქვა მოსაზრება ნერვული ბოჭკოებით ქიმიური რეაქციის გავრცელების შესახებ. ის მოსაზრება, რომ ნერვული იმპულსი წარმოადგენს ელექტრული დენის იმპულსს კვლავ დამკვიდრდა მხოლოდ მე XX-ე საუკუნის შუა წლებში, ძირითადად ინგლისელი ფიზიოლოგის ჰოჯკინის და მისი თანამშრომლების შრომების გამო. რაც შეეხება ქმედების და მოსვენების პოტენციალების ფორმირებას, ჩვენ ამაზე უკვე საკმარისად ვისაუბრეთ წინა თავებში.

სანამ შეუდგებით ნერვული იმპულსის გადაცემის ახალი თეორიის წარდგენას, საჭიროა შემოვიღოთ ფონონის ცნება.

**ფონონი** — კვაზინაწილაკი, რომელიც წარმოადგენს კრისტალის ატომების რხევითი მოძრაობის კვანტს. ტერმინი ფონონი იყო შემოღებული ფიზიკოს თეორეტიკოსის ნობელის პრემიის ლაურეატის ი.ტამის მიერ.

**კვაზინაწილაკი** (ლათ. *quas(i)* „მაგვარი“, „რაც მაგვარი“) — კვანტური მექანიკის ცნება, რომლის შემოღება საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად გამარტივდეს ურთიერთობაში მყოფი რთული კვანტური სისტემების აღწერა, ისეთი როგორცაა მყარი სხეულები და კვანტური სითხეები.

მაგალითად, ელექტრონების მოძრაობა ნახევარგამტარებში რომელიც აღწერისათვის საკმაოდ რთულია, შეიძლება გამარტივდეს, თუ შემოვიღეთ კვაზინაწილაკი სახელად

<sup>96</sup> ონტოგენეზი – ორგანიზმის განვითარება დაბადებიდან სიკვდილამდე.

<sup>97</sup> ფილოგენეზი – ორგანიზმის ევოლუციური განვითარება.

**გამტარობის ელექტრონი**, რომელიც ელექტრონისგან მასით განსხვავდება, და ამასთან ერთად თავისუფალ სივრცეში მოძრაობს. ურთიერთქმედებაში მყოფი სპინების სისტემაში ელემენტარული მაგნიტური აგზნებების გადატანის აღწერისას — **მაგნეტონები**, ხოლო კრისტალური მესერის კვანძებში მყოფი ატომების რხევების აღწერისათვის — **ფონონები**.

ფონონის კონცეპცია აღმოჩნდა საკმაოდ ნაყოფიერი მყარი სხეულის ფიზიკაში. კრისტალურ მასალებში ატომები ერთმანეთთან საკმაოდ აქტიურად ურთიერთობენ და ამიტომაც მათში მიმდინარე ასეთი თერმოდინამიური მოვლენების განხილვა როგორცაა ცალკეული ატომების რხევები, საკმაოდ რთულია — მიიღება ტრილიონობით ერთმანეთთან დაკავშირებული წრფიული დიფერენციალური განტოლებების უზარმაზარი სისტემები, რომელთა ანალიტიკური ამოხსნა შეუძლებელია. კრისტალებში ატომების რხევები შეიცვლება ნივთიერებაში ბგერების ტალღების სისტემის გავრცელებით, რომელთა კვანტებს სწორეთაც რომ ფონონები წარმოადგენენ. ფონონი მიეკუთვნება ბოზონების რიცხვს და აღიწერება ბოზე-აინშტაინის სტატისტიკით. ფონონის სპინი იღებს 0-ის მნიშვნელობას ( $\hbar$ -ის ერთეულებში). ფონონები და მათი ურთიერთობა ელექტრონებთან ფუნდამენტალურ როლს თამაშობენ ზეგამტარობის ფიზიკის თანამედროვე წარმოდგენებში, თბოგამტარობის პროცესებში, მყარ სხეულებში მიმავალ განზნევის პროცესებში. მეტალის კრისტალის მოდელი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ჰარმონიულ ურთიერთობაში მყოფი ოსცილატორების ერთობლიობა, თანაც მათ საშუალო ენერგიაში უდიდეს შენატანს იძლევიან დაბალი სიხშირის რხევები. ამ რხევებს შეესაბამება დრეკადი ტალღები, რომელთა კვანტებს სწორედ ფონონები წარმოადგენენ.

**აკუსტიკური ფონონი** მცირე ტალღური ვექტორების შემთხვევაში ხასიათდება დისპერსიის წრფიული კანონით და ელემენტალურ უჯრედში მყოფი ყველა ატომის პარალელური წანაცვლებით. დისპერსიის ასეთი კანონი აღწერს მესერის ბგერით რხევებს (ამიტომაც ფონონს აკუსტიკური ეწოდება). საერთო სიმეტრიის მქონე სამგანზომილებიანი კრისტალისათვის არსებობს აკუსტიკური ფონონების სამი განტოტება. მაღალი რიგის სიმეტრიის კრისტალებისათვის ეს სამი განტოტება შეიძლება დაიყოს განსხვავებული პოლარიზაციის მქონე განივი ტალღების ორ განტოტებათ და გრძივ ტალღაზე. ბრილუენის ზონის<sup>98</sup> ცენტრში (გრძელტალღოვანი რხევებისათვის) დისპერსიის კანონები აკუსტიკური ფონონებისათვის ატარებენ წრფიულ ხასიათს.

$$\omega_i = s_i k$$

სადაც,  $\omega$  – რხევის სიხშირე,  $k$  – ტალღური ვექტორი, ხოლო კოეფიციენტები  $s_i$  – აკუსტიკური ტალღების გავრცელების სიჩქარეებია კრისტალში, ანუ ბგერის სიჩქარე.

**ოპტიკური ფონონები** არსებობენ მხოლოდ კრისტალებში რომელთა ელემენტარული უჯრედი შეიცავს ორ და მეტ ატომს. ტალღური ვექტორების მცირე მნიშვნელობებისათვის ეს ფონონები ხასიათდებიან ატომების ისეთი რხევებით, რომლის დროსაც ელემენტარული უჯრედის სიმძიმის ცენტრი უძრავი რჩება. ოპტიკური ფონონების ენერგია ჩვეულებრივ საკმაოდ მაღალია ( $\sim 500$  სმ<sup>-1</sup>) და სუსტადაა დამოკიდებული ტალღურ ვექტორზე.

ელექტრონებთან ერთად, აკუსტიკურ და ოპტიკურ ფონონებს შეაქვთ თავისი წვლილი კრისტალის თბოტევადობაში. აკუსტიკური ფონონებისათვის დაბალ ტემპერა-

<sup>98</sup> ბრილუენის ზონა – ეს არის იზოენერგეტიკული გარემო, ანუ გარემო, რომელშიც ელექტრონის ენერგია დეზულობს ერთნაირ მნიშვნელობას. ბრილუენის ზონა შეიცავს იმდენ ნებადართულ ტალღურ ვექტორს  $k$ , რამდენ ელემენტარულ უჯრედსაც შეიცავს კრისტალი.

ტურებზე ეს წვლილი, დებაის მოდელის თანახმად, კუბურად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

მემბრანაში, თერმოდინამიკის და მოლეკულური ფიზიკის თვალსაზრისით, შეიძლება აღმოჩნდეს „კრისტალური“ სტრუქტურის მქონე უბნები, რომლებიც მყარი კრისტალური სხეულებისათვისაა დამახასიათებელი. იყო შემოთავაზებული ბიოლოგიური მემბრანების აგებულების და ფუნქციონირების მოლეკულურ-მექანიკური მოდელი (შემდგომში „მოდელი“). „მოდელი“ გვიჩინასწარმეტყველებს, რომ მემბრანაში მიმდინარე მოლეკულთაშორის ურთიერთობებს თან უნდა სდევდეს მექანიკური ურთიერთობების კვანტების – ფონონების გამოსხივება ან პირიგით შთანთქმა. მემბრანული ცილების სტრუქტურისა და თვისებების დამოკიდებულებამ თვით მემბრანის მექანიკურ თვისებებზე ნება მისცა მკვლევარებს ევარაუდათ, რომ ცილოვანი სისტემების ფუნქციონირების პროცესებს თან ახლავს მათი ურთიერთობების კვანტის, ფონონების შთანთქმა ან გამოსხივება. ესე იგი გარე ზეგავლენით გამოწვეულ მემბრანული ცილების აქტივაციის პროცესში, მაგალითად, მემბრანული ფერმენტის გარემოს ხსნარში მყოფ სუბსტრატთან დაკავშირებისას, და ფერმენტ-სუბსტრატული კომპლექსის შექმნისას, გამოიყოფა ენერგია. შემდეგ კი, ეს ენერგია, ცილის მოლეკულის დაბრუნებისას საწყის (არააღზნებულ) მდგომარეობაში შეიძლება იყოს გამოსხივებული მემბრანული ფონონის სახით. გამოყოფილ ფონონს კვლავ შეუძლია მემბრანაში სხვა ცილათა სისტემის აქტივირება, ამ სისტემის მიერ მისი შთანთქმის შედეგად, ანუ განახორციელოს ინფორმაციის გადაცემა მემბრანის გასწვრივ და მემბრანის სხვა და სხვა ცილათა სისტემის მოქმედების კოორდინირება. თანაც სულაც არაა აუცილებელი, რომ ეს მემბრანული სისტემები იყვნენ „სივრცულად“ ახლოს განთავსებული ერთმანეთთან, ან ჰქონდეთ რაიმე სხვა „თვალში საცემი“ კავშირი. სავარაუდოთ არც კი აღინიშნება სხვა და სხვა მემბრანული ცილების ერთმანეთთან შესამჩნევი შეუღლება. ჩვენ უბრალოდ ვიხილავთ მოვლენას, რომელიც ჩვეულებრივ იწვევს რაღაც ეფექტს (ან ეფექტებს), მათ შორის სხვა ბუნებისაც, ბიომემბრანის გარკვეულ მოშორებულ უბანში. მთავარია, მემბრანაში არსებობდეს კრისტალის სტრუქტურის მაგვარი მოწესრიგებული სტრუქტურა, რომელიც უზრუნველყოფს ფონონური ინფორმაციის გადაცემას. სწორედ ასეთი სტრუქტურები, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, არსებობენ ბიოლოგიურ მემბრანებში. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ფონონს შეუძლია უბრალოდ გაიბნეს მემბრანაში და დახარჯოს თავისი ენერგიის მის გათფობაზე.

ამრიგად, ბიოლოგიური მემბრანები – კვანტური სისტემებია, ხოლო ამ სისტემაში ურთიერთკავშირის გადამცემ კვანტებს წარმოადგენენ ფონონები – ბგერითი კვანტები. სწორედ ფონონები ახორციელებენ ბიოლოგიური მემბრანების სტრუქტურაში მყოფი მოლეკულების ერთმანეთში სიგნალების მიმოცვლას. სიგნალების მიმოცვლა და შესაბამისად მათ ქმედების კოორდინირება მიმდინარეობს არა მხოლოდ მეზობელ მოლეკულებს შორის, არამედ მოლეკულებშიც, რომლებიც იმყოფებიან ბიომემბრანების სხვა და სხვა უბნებში. სხვა სიტყვებით რომ ითქვას, მემბრანები, როგორც ერთიანი კვანტური სისტემები, ხასიათდებიან თავისი სპეციფიური კვანტური ენერგეტიკული დონეებით ( $kT$ -ს სიზუსტით, სადაც  $k$  – ბოლცმანის მუდმივაა, ხოლო  $T$  – ტემპერატურა კელვინის გრადუსებში), რომლებიც განპირობებულია მათი ლიპიდური შემადგენლობით და მემბრანული ცილოვანი სისტემების მოლეკულური სტრუქტურის თავისებურებებით.

სიგნალის გავრცელებისას შეიძლება მივიღოთ მისი ჩახშობა და/ან დამახინჯება, ამიტომაც სიგნალების გადაცემის ხაზზე საჭიროა პერიოდული გამამლიერებლების არსებობა, რომლებსაც შეუძლიათ შეასრულონ სიგნალის კორექტირება, გამამლიერება და შემდგომი მისი გადაცემა. ბუნებრივია, რომ ბიომემბრანის შემთხვევაში ეს იქნება მოლეკულური გამამლიერებლები, რომლებიც უნდა ავტომატიურად გაიშენენ ფონონური

სიგნალის მიღებისას და გამოირთვნენ ამ სიგნალის შემდგომი გადაგზავნისას. ნათელია, რომ სიგნალის გაძლიერების პროცესი მიმდინარეობს უჯრედში წინასწარ მომარაგებული ენერჯის ხარჯვით. თანაც სასურველია, უჯრედში ეს ენერჯია იმყოფებოდეს ადვილად მისაწვდომ ფორმაში, ამასთან ერთად გამაძლიერებელი უნდა ეკონტაქტებოდეს მემბრანის ირგვლივ მყოფ გარემოს, სხვაგვარად ის უბრალოდ ვერსაიდან ვერ აიღებს გარე ენერჯიას თავის მუშაობისათვის. ასეთი პერიოდული სისტემები რეალურად არსებობენ აქსონების ზედაპირზე – ცნობილი რინჯიეს დამჭერების სახით. ფონონი, აქსონში მოძრაობის პროცესში, პერიოდულად აქტივირებს კვანტურ გამაძლიერებლებს, რომლებიც უნდა იყვნენ განლაგებული რინჯიეს დამჭერებში. ეს კვანტური გამაძლიერებლები ირთვება მიღებული სიგნალის გასაძლიერებლად, ხოლო მისი გადაცემის შემდეგ გამოირთვებიან. ამგვარად, ნერვული იმპულსი არანაირად და არსად არ მიხტის, ის მშვიდად ვრცელდება აქსონში და გზად მიმავალი რთავს თავის გასაძლიერებლად მემბრანაში პერიოდულად განლაგებულ კვანტურ გამაძლიერებლებს, რომლებიც ფონონური სიგნალის გადაცემის შემდეგ გამოირთვებიან. სხვაგვარად რომ ითქვას, ფონონის მემბრანული კვანტური გამაძლიერებლამდე მიღწევის შემდეგ მოხდება ამ უკანასკნელით მისი შთანთქმა. ფონონის ასეთი შთანთქმა ნიშნავს, რომ გამაძლიერებელი მიიღებს ენერჯიის პორციას, რომელიც გადაიტანება ბგერის კვანტით. ენერჯიის მიღებისას გამაძლიერებელი აქტივირდება და გადასცემს გაძლიერებულ (და კორექტირებულ) სიგნალს ახალი ფონონის სახით. ამ პროცესს თან უნდა ახლავდეს ენერჯიის ხარჯვა. მოცემულ კონკრეტულ შემთხვევაში ეს ტრანსმემბრანული ელექტროქიმიური გრადიენტი – წინასწარ მომარაგებული ენერჯია. ენერჯიის გაცემის შემდეგ გამაძლიერებელი ინაქტივირდება, ან უბრალოდ გამოირთვება. აქედან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ მოლეკულურ გამაძლიერებელს უნდა ჰქონდეს მექანოდამოკიდებული ნაწილი, რომელიც უნდა გამოირთოს მემბრანის ლატერალური ზედაპირული წნევით განპირობებული მისი შეკუმშვის შედეგად. სწორედ ეს მექანოდამოკიდებულობა აღინიშნება ნეირონების მემბრანაში იონური არხებისათვის. სრულიად მოსალოდნელია, რომ არხი, შეიძლება ითქვას, პირს შეიკრავს თავისი გარემოცვის (მემბრანის) შეკუმშვის შედეგად. ესე იგი ადგილი აქვს სიგნალის ზეგავლენის შედეგად მოლეკულური გამაძლიერებლის აქტივირებას (თანაც ეს სიგნალი უნდა იყოს გაძლიერებული და შემდეგ გადაცემული), რომელიც თავისი ფუნქციის შესრულების შემდეგ „ავტომატურად“ გამოირთვება მის გარშემო მყოფი მემბრანის შეკუმშვის შედეგად. ბუნებრივია, რომ გამორთულ (არააქტიურ) მდგომარეობაში ენერჯია გამაძლიერებელს არ ესაჭიროება. უჯრედს კი შეუძლია აღადგინოს თავისი ტრანსმემბრანული ელექტროქიმიური გრადიენტი, რომელიც წარმოადგენს მოლეკულური გამაძლიერებლის ენერჯიის წყაროს; უბრალოდ საჭიროა ორი დამოუკიდებელი მოლეკულური სისტემის არსებობა. ამჟამად არ მოგვეპოვება მონაცემები კვანტური ფონონური გამაძლიერებლის მოქმედების კონკრეტული მექანიზმის ანალიზისათვის, იმისათვის რომ განისაზღვროს მემბრანებში იონების პასიური და აქტიური ტრანსპორტების როლი ამ პროცესში და ა.შ. სხვათა შორის უნდა აღინიშნოს, რომ ნერვული უჯრედებისათვის დამახასიათებელი ტრანსმემბრანული ელექტრული ველის მნიშვნელობის ცვლილება, მხოლოდ ლიპიდების პოლარულ თავებზე ახდენს ზეგავლენას და არ ეხება მემბრანაში მყოფი ნახშირწყალბადური ჯაჭვების არც სტრუქტურას და არც დინამიკას. ეს კი ნიშნავს, რომ პროცესები, რომლებიც თან ახლავს მემბრანული ფონონური სიგნალის გავრცელებას, არ მოქმედებდნენ მათი გავრცელების პირობებზე – ანუ ბიომემბრანის ნახშირწყალბადურ კომპონენტზე.

ასეთი მოკლე განხილვაც კი გვიჩვენებს, რომ შემოთავაზებული „მოდელის“ კვანტური ფონონური ვარიანტი შესაძლებელს ხდის აღიწეროს სხვადასხვა ბიოლოგიური

სისტემის მუშაობა, და მათ შორის ცოცხალი ორგანიზმების ნერვული სისტემების მუშაობაც. ნერვული უჯრედების მიერ ფონონების მეშვეობით ინფორმაციის გადაცემა საშუალებას იძლევა გადაეცეს უჯრედს ერთდროულად რამდენიმე სიგნალი, თანაც სხვა და სხვა მიმართულებით, ყველაზე სწრაფი, მარტივი და ერთიანი წესით. თუ კი ფონონი მემბრანაში მოძრაობისას მასზე ზეგავლენას ახდენს, ეს მხოლოდ ლოკალურად ხდება და არანაირად არ ეხება სხვა ფონონების გავრცელებას. ამ „მოდელის“ ერთად ერთი შესაძლო სუსტი წერტილი არის მემბრანაში მყოფი გამაძლიერებლების შეზღუდული რაოდენობა და მათი ამოქმედების დრო. დაუშვათ, რომ ინფორმაციის გადაცემის პროცესში ყველაზე ნელი სტადია – არის კვანტური ფონონური გამაძლიერებლის ამოქმედების ციკლი, რომელიც ~0,002 წმ-ს შეადგენს (ეს არის ცნობილი მონაცემები იმის თაობაზე, რომ ვერ ხერხდება აქსონში ~500 ნერვული იმპულსზე მეტის გატარება), მაშინ ნერვული იმპულსის გავრცელების სიჩქარე (0,2 – 0,4 მ / 0,002 წმ) იქნება 100 – 200 მ/წმ-ის ფარგლებში, რაც ცნობილ, ზემოთ მოყვანილ მნიშვნელობებთან ახლოს იმყოფება. ბიოლოგიისათვის ეს საკმაოდ კარგი დამთხვევაა, რომელიც მიღებულია იმ დაშვებით, რომ ნერვული იმპულსი სხვა და სხვა ორგანიზმებში გადაიცემა ფონონებით და რომ გამაძლიერებლების მოქმედების მექანიზმი მათში თითქმის ერთნაირია. თვით ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე ქსოვილებში, რომელიც ~1600 მ/წმ და რომელიც არც თუ ისეა დამოკიდებულია კონკრეტულ ბიოლოგიურ ქსოვილზე, არ შეიძლება წარმოვაჩინოთ როგორც ზღვრული სიჩქარე აქსონში ფონონური იმპულსის გავრცელებისას.

არაწონასწორული დისიპატიური გარემოთა ევოლუციის დინამიკა სწავლობს პირობებს რომლებშიც ფორმირდება ნულისგან განსხვავებული იმპულსის მქონე ენერჯის ნაკადები, ანუ ნაკადები რომლებსაც შეუძლიათ მაკროსკოპული მუშაობის შესრულება. ისწავლება კოოპერატიული ნაკადების სტაბილობის, და მათი მიღების პირობები თვით წონასწორულ მდგომარეობამდე.

არაწონასწორულ სისტემებში, მათ შორის ბიოლოგიურშიც, ყოველთვის მოქმედებენ ძალები, რომლებიც მიმართულია არაწონასწორობის პოტენციალური ენერჯის გრადიენტის საპირისპიროდ. დინამიკის ძირითადი კანონის თანახმად ეს ძალა იწვევს ზეგავლენის ქვეშ მყოფი მასის აჩქარებულ მოძრაობას: ( $F = ma$ ). ვინაიდან პოტენციალთა სხვაობა მოქმედებს მთელ მრავალნაწილაკებიან სისტემაზე, ძალაც მოქმედებს მთლიან სისტემაზე და იწვევს ამ მრავალმოლეკულური სისტემის ნაწილაკების კოლექტიურ, ერთობლივ მოძრაობას. წარმოიქმნება უმოვის ვექტორით აღწერილი მასის და ენერჯის ნაკადები. არაწონასწორულ გარემოში მოქმედი ძალა ახორციელებს თვით ამ სისტემაში მომარაგებული პოტენციალური ენერჯის გადასვლას მოლეკულების ერთობლივი გადატანის კინეტიკურ ენერჯიაში, რომლის ჯამური იმპულსის მიმართულება სისტემაზე მოქმედი ძალით განისაზღვრება.

სწორედ ამაში მდგომარეობს დისიპატიური სტრუქტურების თვითორგანიზების მექანიზმი. მექანიზმისა, რომელიც წარმოადგენს ძალზე არაწონასწორული თერმოდინამიკის (სინერგეტიკის) ფუძემდებლურ ცნებას. მაგრამ მრავალნაწილაკიან სისტემაში ენერჯის კოოპერატიული ნაკადების წარმოქმნისათვის მხოლოდ მისი არაწონასწორობა და დინამიკის ძირითადი კანონის მოქმედება არაა საკმარისი. ნაჩვენები იყო, რომ ამ ეფექტის მიზეზს წარმოადგენს სისტემის ნაწილაკების არაცენტრალური შეჯახება, რომელსაც თან ახლავს ამ პროცესში მეზობელი ნაწილაკების გრიგალისებრივი ჩართვა. სწორედ ამის გამო ხდება კოოპერატიული ენერჯის გაზნევა და მისი გადაყვანა ნაწილაკების ქაოტურ მოძრაობაში, ანუ სითფურ ფორმაში, რომლის დროსაც მრავალნაწილაკიანი სისტემა კარგავს უნარს შეასრულოს მაკროსკოპული მუშაობა მასზე

მოქმედი ძალების საწინააღმდეგოდ. არაწონასწორულ მრავალნაწილაკიან სისტემაში ყოველთვის მიედინება ორი თანხლებადი პროცესი: ენერგიის კოოპერატიული ნაკადების ფორმირების პროცესი, მისი არაწონასწორობის გამო, და კოოპერატიული ენერგიის გაბნევის და ქაოტიურ ფორმაში გადაყვანის პროცესი, როგორც ჯამური იმპულსის გადაგვარების ეფექტის შედეგი. ყველაფერს განსაზღვრავს სისტემის მდგომარეობაზე და თვისებებზე დამოკიდებული ამ ორი სრულიად საწინააღმდეგო პროცესების სიძლიერე. თუ კოოპერატიული ნაკადების წარმოქმნის სიძლიერე კოოპერატიული ენერგიის დისიპაციის პროცესის სიძლიერეზე მეტია, მაშინ სისტემაში აღინიშნება კოოპერატიული ნაკადები, ანუ წარმოიქმნება უმოვის ენერგიის ნაკადები. წინააღმდეგ შემთხვევაში კი მყარდება წონასწორული მდგომარეობა.

თუ კი არაწონასწორულ სისტემაში წარმოიქმნება ჯამურ იმპულსთან დაკავშირებული მიმართული კინეტიკური ენერგიის ნაკადების შექმნის პირობები და სისტემას მიეცემა მუშაობის (მათ შორის მაკროსკოპული) შესრულების შესაძლებლობა, მაშინ ამ პირობის ჩაწერა ჩვენ შეგვეძლება შემდეგნაირად:

$$\frac{dE_{coop}}{dt} > \frac{dE_{dissip}^{max}}{dt} \quad (132)$$

სადაც,  $E_{coop}$  – წარმოადგენს ჯამური იმპულსით გადატანილ მიმართული კოოპერატიული მოძრაობის ენერგიას, რომელიც მიიღება არაწონასწორობის პოტენციალური ენერგიიდან.  $E_{dissip}^{max}$  – ჯამური იმპულსით გადატანილი მიმართული კოოპერატიული მოძრაობის მაქსიმალური ენერგია, რომელიც მოცემულ მრავალნაწილაკიან სისტემას შეუძლია გაბნევის შედეგად გადაიყვანოს ქაოტიურ ფორმაში. ამ ენერგიას დისიპაციის ზღურბლი დაარქვეს.

სწორედ გამოსახულება (132), რომელიც განსაზღვრავს თვითორგანიზების და დისიპატიური პროცესების სიმძლავრეების თანაფარდობას, ამავდროულად განსაზღვრავს მოვლენების და საერთოდ ევოლუციის მიმართულებას არაწონასწორე დისიპატიურ გარემოში და წარმოადგენს ღია დისიპატიური სტრუქტურის ფორმირების წინაპირობას. სხვაობა (132)-ის მარცხენა და მარჯვენა მხარეებს შორის იძლევა ჭარბი კოოპერატიული ენერგიის სიმძლავრეს, რომელიც დისიპატიურმა სტრუქტურამ (მათ შორის ბიოლოგიურმა) შეიძლება დახარჯოს თავისი ფუნქციონალური შესაძლებლობების განსახორციელებლად, მათ შორის გარე მუშაობის შესრულებაზე, მაგალითად, საკვების მოძიებაზე.

კოოპერატიული ენერგიის განბნევის შესამცირებლად აუცილებელია მიმდინარე პროცესიდან გამოირიცხოს მასის გრიგალისებრივი ჩართვის კოოპერატიული ნაკადი. ამის მიღწევა შეიძლება ორი ხერხით: 1) ნაკადის კანალიზაციით (ფრანგ. Canalisation, ან უბრალოდ ნაკადის მილში მოთავსებით); 2) ნაწილაკების შეჯახების ცენტრალიზებით (ანუ ნაწილაკების შეჯახება უნდა მოხდეს ცენტრებით და არა გვერდულად), კოპერენტული ურთიერთობების პირობების შექმნით. რაც უფრო ნაკლებია მრავალნაწილაკიანი სისტემის დისიპაციის ზღურბლი ( $E_{dissip}^{max}$ ), მით უფრო მდგრადია (მოცემულ გარემოში) კოოპერატიული ნაკადები, მეტია მათი სიმძლავრე (არსებული არაწონასწორობისათვის) და მეტია მუშაობის შესრულების უნარი არსებული ძალების საწინააღმდეგოდ.

ჩვენ უკვე ვიცით, რომ ენერგიის ნაკადების ინტენსივობა ხასიათდება უმოვის ვექტორით. ხოლო ამ ვექტორის აბსოლუტური მნიშვნელობა წარმოადგენს კინეტიკური ენერგიის რაოდენობას, რომელიც გაედინება ნაკადის ერთიანი ფართის განივკვეთში დროის ერთეულში.

გარემოში ენერგიის ნაკადების გავრცელებისას, მიმართული ენერგიის განბნევის შედეგად, ჯამური იმპულსის გადაგვარების ეფექტის მოქმედების გამო, უმოვის ვექტორის მოდული მცირდება. მაშასადამე, არსებობს უმოვის ვექტორის მოდულის

გრადიენტი, რომელიც ახასიათებს მოცემული გარემოს მიმართული ენერჯის დისიპაციის უნარს, ანუ, რაოდენობრივად განსაზღვრავს მის დისიპატიურ ზღურბლს.

დისიპატიურ გარემოში (132) პირობის რეალიზება შესაძლებელია ორი გზით. ან სისტემის არაწონასწორობის გაზრდით, ან მისი დისიპატიური ზღურბლის დაწევით და შემდეგი პირობის შესრულებით:

$$\text{grad}|S_U| \rightarrow \min \quad (133)$$

სადაც,  $S_U$  – უმოვის ვექტორია.

არაწონასწორობის ზრდა ცოცხალ ბუნებაში შეზღუდულია, ამიტომაც ბუნება წავიდა მეორე გზით, დისიპატიური ზღურბლის დაწევის გზით.

უმოვის ნაკადები გარემოს ფიზიკური პირობებიდან გამომდინარე, წარმოიქმნება ჰიდროდინამიური ნაკადების, დამუხტული ნაწილაკების, ფონონების ან ფოტონების ნაკადების ფორმით.

ცოცხალ უჯრედში ჰიდროდინამიური ნაკადები წარმოიშვება არაწონასწორობადობის შემქმნელი, ციკლურად მიმცვლად, სინთეზის და დაშლის რეაქციებში მიღებულ წნევათა სხვაობის გამო. დისიპატიური ზღურბლის დაქვეითება შესაძლებელია ჰიოლოპლაზმის<sup>99</sup> ნაკადების ენდოპლაზმურ რეტიკულუმში კანალიზაციით, რაც უზრუნველყოფს უჯრედის ერთიანი ცირკულირებადი სისტემის შექმნას. დამუხტული იონების ნაკადები, რომლებიც იწვევენ მემბრანის დეპოლარიზაციას ან ქმედების პოტენციალს, წარმოიქმნება მემბრანის მხარეებს შორის არსებული ელექტრული პოტენციალთა სხვაობის და კონცენტრაციების სხვაობის გამო, იონურ არხებში ან მემბრანულ ფორებში მოძრაობისას.

ფონონების ნაკადების გატარების იდეალურ გარემოს, ევოლუციის დინამიკის თვალსაზრისით, წარმოადგენს უჯრედული მემბრანების ორგანოზომილებიანი თხევადკრისტალური გარემო. აქ, ერთის მხრივ, თხევადკრისტალური გარემო ფიზიკური პირობებიდან გამომდინარე ხელს უწყობს ფონონური ტალღების, ფონონის კვაზინაწილაკების ნაკადების ფორმირებას. მეორეს მხრივ, ევოლუციის დინამიკის თვალსაზრისით, მორფოლოგიურად ბიომემბრანები წარმოადგენენ ენერჯის ნაკადების გავრცელების იდეალურ გარემოს. მემბრანულ გარემოს ძალზე დაბალი დისიპატიური ზღურბლი გააჩნია. ამის უზრუნველყოფა ხდება ჯერ ერთი, ფონონების ნაკადის კანალიზაციით (ვთქვათ, აქსონის მემბრანის გრძელი არხით, მემბრანის ლიპიდური მატრიქსის გარემოში), მეორეც, გარემოს ორგანოზომილებიანობის გამო უზრუნველყოფილია კოჰერენტულობა ლიპიდების თანმიმდევრობითი ურთიერთობისას ფონონის კვაზინაწილაკის გადამტანისას.

ეხლა კი შევეცადოთ ნერვული პროცესების შესახებ არსებული ექსპერიმენტული ფაქტების ინტერპრეტირება, ფონონური თეორიის იდეებიდან გამომდინარე.

1) **მოსვენების პოტენციალი.** მოსვენების პოტენციალის ფორმირება მოხდა უჯრედის ევოლუციის ადრინდელ სტადიაზე, ნერვული სისტემის და ქმედების პოტენციალის გაჩენამდე მილიონობით წლით ადრე. მთავარი ფუნქცია, რომელსაც თავიდანვე ასრულებდა მოსვენების პოტენციალი, იყო პროტოპლაზმაში  $K^+$  იონების მაღალი კონცენტრაციის შენარჩუნება. ეს კი საჭიროა ცილის სინთეზისათვის, გლიკოლიზისათვის, ფოტოსინთეზისათვის და კიდევ სხვა სასიცოცხლო მნიშვნელოვან პროცესებისათვის. მოსვენების პოტენციალის უზრუნველყოფა სრულდება ნატრიუმ-კალიუმის ტუმპოვით.

<sup>99</sup> **ჰიოლოპლაზმა** ეს არის ციტოპლაზმის თხევადი ნაწილი, მისი ძირითადი ნივთიერება, რომელიც ავსებს პლაზმატური მემბრანის, ბირთვის გარსის და სხვა უჯრედშიდა სტრუქტურებს შორის მოქცეულ სივრცეს.



2) **ნერვული იმპულსის (ფონონური ნაკადების) წარმოქმნის მექანიზმი.** განხილული „მოდელის“ თანახმად, ნერვული იმპულსის (ფონონის ტალღის) ფორმირება იწყება ცილის სპეციალური მოლეკულების კონფორმაციის ცვლილების (პირის შეკვრის) შედეგად, როგორც მემბრანული მატრიქსის თხევადკრისტალურ გარემოზე მექანიკური (დარტყმითი) ზეგავლენის შედეგი. ეს ენერგოხარჯვადი პროცესია, ამიტომაც ის წარმართება ATP-ის ხარჯვით. ამასთან ერთად, „დარტყმითი კონფორმაციით“ გამოწვეული ფონონის მორბენი ტალღის ფორმირების მექანიზმი უნივერსალურია ყველა სახის ქმედებისათვის: ელექტრული, მექანიკური, ქიმიური, თერმული და სხვა. შესაძლებელია, რომ ყველა სახის ზეგავლენას ჰქონდეს თავის ცილის ტიპი. შესაძლებელია ნერვული იმპულსი წარმოადგენს ფონონურ და არა ბგერით ტალღას, როგორც ცალკეული მკვლევარები იმახიან. საქმე იმაშია, რომ ბგერითი ტალღა – მაკროსკოპული მოვლენაა და წარმოიშვება როგორც დარტყმითი ტალღის ფრონტი, გარემოს მაკროსკოპული, მოცულობითი შეკუმშვის გამო. ცილები კი წარმოადგენენ მიკროობიექტებს და თავიდანვე მოქმედებენ მათ გარშემო მყოფ ორგანოზომილოვანი ფენის ლიპიდების მცირე ჯგუფებზე.

3) **უჯრედული მემბრანების დეპოლარიზაციის მიზეზი (ქმედების პოტენციალის წარმოქმნა).** ქმედების პოტენციალი, ანუ უჯრედული გარე მემბრანის დეპოლარიზება გამოიწვევა უჯრედში ნატრიუმის დადებითი იონების ფეთქვისებრივი შემოჭრით. შედეგად, პოტენციალის მნიშვნელობა უჯრედის მემბრანის შიდა მხარეს იცვლება  $-70$  მვ-დან  $+40$  მვ-მდე. ეს იმითაა გამოწვეული, რომ ნერვული (ფონონური) იმპულსი მემბრანაზე გავლისას ფონონური ტალღის ფრონტის დარტყმითი მექანიკური ქმედებით შლის ნატრიუმის იონების გარშემო მყოფ ჰიდრატულ გარსებს. ჰიდრატული გარსების არსებობის გამო ნატრიუმის იონები იჭედებიან ლიპიდურ ფორებში, ხოლო გარსების გარეშე ადვილად აღწევენ უჯრედში. ამის შემდეგ კი ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოები აღადგენენ მოსვენების პოტენციალს და ნატრიუმის და კალიუმის კონცენტრაციას პროტოპლაზმაში. ამრიგად, ქმედების პოტენციალი – ნერვული იმპულსის შედეგია და არა მიზეზი.

4) **კანონი „ყველაფერი ან არაფერი“.** ამ კანონის თანახმად ქვეზღურბლოვანი გალიზიანება აგზნებას არ იწვევს, ხოლო ზღურბლზე მყოფი სტიმულების დროს აგზნება მაშინვე მაქსიმუმს აღწევს და გალიზიანების შემდგომი ზრდის შემთხვევაშიც კი აღარ იზრდება. ზემოთ ჩვენ უკვე უჩვენეთ, რომ ენერგიის მდგრადი ფონონური ნაკადების ფორმირებისათვის და შენარჩუნებისათვის მემბრანების თხევადკრისტალურ გარემოში აუცილებელია (132) პირობის შესრულება. ამ პირობის შესრულების შემთხვევაში წარმოიქმნება უმოვის ენერგიის ნაკადები დადებითი ჯამური იმპულსით:

$$M_{rez}^p > 0$$

და სისტემას შეეძლება მაკროსკოპული მუშაობის შესრულება. თანაც, კოოპერატიული მოძრაობის მიღწევისათვის არაა აუცილებელი რომ დროის ნებისმიერი მომენტისათვის კოოპერატიული მოძრაობის წარმოქმნის პროცესის სიმძლავრე ყოფილიყო მეტი ვიდრე ჯამური იმპულსის გადაგვარების პროცესის სიმძლავრე. უბრალოდ აუცილებელია, რომ დროის აღნიშნულ მონაკვეთში კოოპერატიული ენერგიის წარმოქმნა მის დისიპაციას ჭარბობდეს.

$$\int_M N_{coop}(t) dt > \int_M N_{dissip}^{max}(t) dt \quad (134)$$

სადაც,  $N_{coop}(t) = \frac{dE_{coop}}{dt}$  – კოოპერატიული ენერგიის წარმოქმნის სიმძლავრე არაწონასწორულ სისტემაში, ხოლო  $N_{dissip}^{max}(t) = \frac{dE_{dissip}^{max}}{dt}$  – კოოპერატიული ენერგიის მაქსიმალური სიმძლავრე, რომლის დისიპაცია შეუძლია მოცემულ თერმოდინამიურ სისტემას.

ჩვენ შემთხვევაში დროის აღნიშნული მონაკვეთი ეს არის დრო, რომელიც აუცილებელია ფონონური ტალღის ნეირონის მემბრანულ გარსზე გასასვლელად მისი ჩასახვის მომენტიდან დენდრიტის პოსტ სინაპსურ მემბრანაზე, აქსონის პრე სინაპსურ მემბრანაზე მისვლამდე. ეს დრო განსაზღვრავს (134) გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის სიდიდეს, ვინაიდან დისიპატიური ზღურბლის მნიშვნელობა გარემოსათვის საკმაოდ სტაბილური სიდიდეა. ვინაიდან გამმალიზიანებელი სტიმულის დრო (დრო, რომელშიც ცილები ერთობლივად „კრავენ პირს“) მცირეა ნეირონზე ფონონური ტალღის გავლის დროსთან შედარებით, სწორედაც ამიტომ წარმოიქმნება ზღურბლული ზეგავლენის საჭირო მნიშვნელობა (134)-ში „მეტობის“ ნიშნის მისაღებად. თუ ზეგავლენის იმპულსის მნიშვნელობა ზღურბლულზე დაბალია, მაშინ (134)-ში ნიშანი იცვლება „ნაკლებობაზე“ და ფონონური ტალღა მიიღევა მემბრანის დისიპატიურ გარემოში. გარდა ამისა არსებობს ზღურბლული სტიმულის ძალის დამოკიდებულება მის ხანგრძლივობაზე. ანუ, ძალზე ხანმოკლე გალიზიანებების დროს, მიუხედავად გამმალიზიანებელი ძალის სიძლიერისა აგზნება არ წარმოიქმნება. ამას ვე ვხედავთ ჩვენს მიერ განხილულ განტოლებაში. ენერგია რომელიც გამოიყოფა (134)-ის მარჯვენა ნაწილში ფონონური ენერგიის გამოყოფის პროცესის ხანმოკლეობის გამო იქნება მარჯვენა ნაწილზე მცირე და პროცესი მიიღევა ჯერ კიდევ გაძლიერების სტადიამდე მისვლამდე.

ამრიგად, თუ ფონონური ნაკადი სუსტია, და ვერ ლახავს დისიპატიურ ზღურბლს, ის გაიზნევა მემბრანის გარემოში და გამოიწვევს მის გათფობას; ნერვული იმპულსი ვერ ვრცელდება ნეირონით; ფონონების ენერგია აღარაა საკმარისი ჰიდრატული გარსების დასაშლელათ, და მორბენი ქმედების პოტენციალი (მემბრანის დეპოლარიზაციის პროცესი) ქრება ფონონური ნაკადის გაზნევასთან ერთად. თანამედროვე მიკროელექტროდულმა კვლევებმა უჩვენეს, რომ „ქვეზღურბლული ძალების შემთხვევაში წარმოიქმნება ადგილობრივი, არაგავრცელებადი აგზნება (ლოკალური პასუხი)“.

5) **მიელინის გარსების როლი.** მიელინის გარსი, უჯრედების მემბრანული ფორების გადახურვის გამა, ამცირებს ნატრიუმის იონების შეღწევას ციტოპლაზმაში და ამით ამცირებს ATP-ის ენერგიის ხარჯვას ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოების მუშაობაზე. ნეირონების გარე მემბრანების დიდი ფარდობითი ფართობის გათვალისწინებით, მიელინის გარსების გარეშე შეუძლებელია გრძელი აქსონების არსებობა. მიელინის გარსი წარმოადგენს დაცვითი მექანიზმის და ფუნქციონირების სიმბიოზის მაგალითს უჯრედულ დონეზე.

დადგენილია, რომ რაც უფრო სქელია აქსონი, მით უფრო სწრაფად ვრცელდება ნერვული იმპულსი. იქმნებოდა შთაბეჭდილება, რომ ნერვული იმპულსის სიჩქარე დამოკიდებულია არა აქსონის სისქეზე, არამედ მის სიგრძეზე, ვინაიდან ამ შემთხვევაში ნაკლებია სინაპსური დაბრყოლებები სიგნალის გასაძლიერებლად. უბრალოდ რაც უფრო სქელია აქსონი, მით უფრო გრძელი შეიძლება ის იყოს. აქსონით, მისი ბირთვის უბნიდან (იქიდან სადაც იმყოფება გოლჯის აპარატი) ხორციელდება აცეტილქოლინის ბუმტუკების მიწოდება აქსონის სინაპსში. უჯრედში მემბრანული ბუმტუკების ფორმირება მიმდინარეობს მხოლოდ გოლჯის აპარატში. ამიტომაც რაც უფრო სქელია აქსონი, მით ნაკლებია ჰიდრავლიური წინაღობა ჰიალოპლაზმის ნაკადებისათვის, რომლითაც სინაპსში მოედინება აცეტილქოლინის ბუმტუკები. აქ ბუნებრივი შერჩევა მოქმედებდა პუაზეილის კანონის თანახმად, ვინაიდან აქსონის ზრდა აჩქარებდა ორგანიზმის რეაქციას. აქსონებში ჩამოყალიბდა ჰიალოპლაზმის ინტენსიური მოძრაობა 8 მკმ/წმ რიგის სიჩქარით (დაახლოვებით 30 მმ ერთ საათში). ეს კი ნიშნავს, რომ მანძილზე გოლჯის აპარატიდან ყველაზე გრძელი აქსონის (1 მ სიგრძის) სინაპსამდე აცეტილქოლინის ბუმტუკა მიეწოდება სამ საათში.

6) **ნერვული იმპულსის გაძლიერება.** შესაძლებელია ნერვული იმპულსის, ანუ ფონონური ნაკადის გაძლიერება მიმდინარეობს არა რინვიეს დამჭერებში, არამედ სინაპსებში, სწორედ აქ იმყოფება მიტოქონდრიების (უჯრედის ენერგეტიკული სადგურების) დიდი რაოდენობა. ახალი, გაძლიერებული ფონონური იმპულსის ფორმირება მიმდინარეობს სწორედ პოსტ სინაპსურ მემბრანაზე. ფონონური ნაკადის ზეგავლენით პრე სინაპსურ მემბრანაში მიმდინარეობს აცეტილქოლინის (ნორადრენალინის ან სხვა მედიატორების) გამონთავისუფლება და მისი მიწოდება ( სინაპსური ნაპრალის გავლით) პოსტ სინაპსურ მემბრანაზე. ეტყობა ფონონური ნაკადი ახდენს გარკვეულ ზეგავლენას მიტოქონდრიებზე, რომელთა ენერჯის ხარჯზე სრულდება აცეტილქოლინის გადატანა პოსტ სინაპსურ მემბრანაზე. აქ, აცეტილქოლინის და ქიმიური რეცეპციის<sup>100</sup> წყალობით მიმდინარეობს ცილების კონფორმაციის ცვლილება და წარმოიქმნება ახალი, გაძლიერებული ფონონური ნაკადი. ასე რომ, ნერვული იმპულსის გაძლიერება და შემდგომი გადაცემა მიმდინარეობს ქიმიური რეცეპციის საფუძველზე. დადგენილია, რომ პოსტ სინაპსურ მემბრანაზე მიმდინარეობს აცეტილქოლინის დაშლა სპეციფიური ფერმენტის – ქოლინესტერაზის მონაწილეობით. ამ პროცესს თან ახლავს ATP-ის დიდი ხარჯვა, ესე იგი დიდი რაოდენობის ენერჯის შთანთქმა. როგორც ჩანს, ცილის (ქოლინესტერაზის) კონფორმაციული აქტივობა წარმოქმნის პოსტ სინაპსურ მემბრანაზე ფონონების გაძლიერებულ ნაკადს, ანუ გაძლიერებულ ნერვულ იმპულსს. როდესაც აცეტილქოლინის კონცენტრაცია სინაპსურ ნაპრალში გარკვეულ დონემდე მცირდება, იშვიათი კონფორმაციული ცვლილებები უკვე ვეღარა ჰქმნიან მდგრად ფონონურ ტალღას.

7) **რეფრაქტერულობა**<sup>101</sup>. ამ თავში მოყვანილი თეორიის საფუძველზე ძალიან მარტივად აიხსნება რეფრაქტერულობის პერიოდი. დეპოლარიზაციის შემდეგ ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბოები იწყებენ ინტენსიურ მუშაობას. ამას თან ახლავს ATP-ის ენერჯის დიდი რაოდენობით შთანთქმა, რომელიც ნაწილობრივ იხარჯება მემბრანული პოტენციალის აღდგენაზე, ნაწილობრივ კი ცილა-ტუმბოების კონფორმაციულ ცვლილებებზე. ამ დროს ენერჯის ნაწილი გამოიყოფა მემბრანული ტუმბოების გარშემო მყოფი ლიპიდური მოლეკულების ქაოტიური რხევების სახით. სწორედ ეს, საკმაოდ ინტენსიური ქაოტიური რხევები, ახშობენ ფონონების მიმართულ ნაკადებს, და ამით არ ატარებენ ნერვულ იმპულსს. როგორც ამბობენ სიგნალების თეორიაში, წარმოიქმნება ძლიერი „ხმაურები“. ნატრიუმის იონების გადატუმბვისას, ამ იონების კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად ტუმბოები წყვეტენ თავის მუშაობას, მემბრანა წყნარდება („ხმაურის“ ფლუქტუაციები მიიღევა) და შედეგად მემბრანის გამტარობაც აღდგება. ამიტომაც აბსოლუტური რეფრაქტერულობის ხანგრძლივობა დაახლოვებით ემთხვევა ქმედების პოტენციალის აღმავალი ტოტის ხანგრძლივობას.

8) **ორმხრივი გატარების კანონი.** ნერვულ ბოჭკოზე გაღიზიანების მიდებისას, ის მასზე ორივე მიმართულებით (მემბრანის ზედაპირით – ყველა მიმართულებით) ერთი და იგივე სიჩქარით ვრცელდება. ეს ფაქტი დადგენილია მრავალი ექსპერიმენტის საფუძველზე. ფონონური ტალღა ცილების ერთობლივი „პირის შეკვრის“ კონფორმაციაში გადასვლისას ვრცელდება ყველა მიმართულებით ამპლიტუდით რომელიც ყოველ მხარეზე მექანიკური ზეგავლენის სიძლიერებაზეა დამოკიდებული. იმპულსის ცალმხრივი გატარება ცოცხალ ორგანიზმში უკავშირდება იმპულსის წარმოქმნას დენდრიტში

<sup>100</sup> რეცეპცია (ლათ. Receptio – მიღება) – მექანიკური, თერმული, ელექტრომაგნიტური, ქიმიური და სხვა გამაღიზიანებლების მიღება და ნერვულ სიგნალებში გარდაქმნა.

<sup>101</sup> რეფრაქტერულობა (ფრანგ. refractaire – აუთვისებლობა) – ნერვის ან კუნთის აგზნების არარსებობა ან დაქვეითება გასული აგზნების შემდეგ. რეფრაქტერული პერიოდი გრძელდება წამის რამდენიმე მეათიათასეულიდან (ბევრ ნერვულ ქსოვილში) რამდენიმე მეათეულამდე (კუნთოვან ქსოვილებში).

(ნეირონის დასაწყისში), რის გამოც წარმოქმნილი ტალღა ვრცელდება მხოლოდ ცალ მხარეს, ნეირონის მეორე ბოლოსკენ და ვერ მობრუნდება იმპულსის შენახვის კანონის თანახმად.

9) **მემბრანების გამტარობა.** ნერვული იმპულსის არგამტარე მემბრანები არ არსებობს. სხვა ამბავია, რომ ყველგან არ მოიპოვება ნერვული დაბოლოებები, სინაპსები. გამტარია შიდაუჯრედული მემბრანებიც, ვთქვათ სარკოპლაზმატური რეტიკულუმი. ელექტრონული მიკროსკოპიის მეშვეობით დადგინდა, რომ სარკოპლაზმატური რეტიკულუმის ტერმინალური ცისტერნები ორ მეზობელ სარკომერში უკავშირდება ერთმანეთს ეგრე წოდებული „დამაკავშირებელი ფხეებით“ T-სისტემის მილაკით, რითიც ტრიადა იკვრება. გამოითქვა მოსაზრება, რომ „დამაკავშირებელი ფხეები“ უზრუნველყოფენ არა მხოლოდ მექანიკურ კონტაქტს პლაზმატურ მემბრანასა და სარკოპლაზმატურ რეტიკულუმს შორის, არამედ მონაწილეობენ მათ შორის სიგნალის გადაცემაში. შიდაუჯრედულ მემბრანებზე დეპოლარიზაცია არ წარმოიქმნება, ვინაიდან შიდა მემბრანებზე ნატრიუმის გრადიენტის არ არსებობს.

ამ თეორიიდან გამომდინარე ექვსი ქვეშ დგება საკითხიც სპეციალური პოტენციალ დამოკიდებული და პოტენციალ დამოუკიდებელი იონური არხების არსებობაც. მათ როლს ასრულებენ ჩვეულებრივი მემბრანული ფორები. მემბრანაში იონების გამტარობის ინაქტივაცია, ვთქვათ, ტეტროდოტოქსინის ქმედების გამო, შეიძლება აიხსნას მარტივი გაჭედვით, და არა იონურ არხებში, არამედ ჩვეულებრივ ფორებში. ამ დროს მემბრანაში იზრდება ლატერალური წნევა, რაც ეწინააღმდეგება ახალი ფორების წარმოქმნას. ერთობლიობაში ეს ყველაფერი ამცირებს და მეტიც, ბლოკავს იონურ გამტარობას.

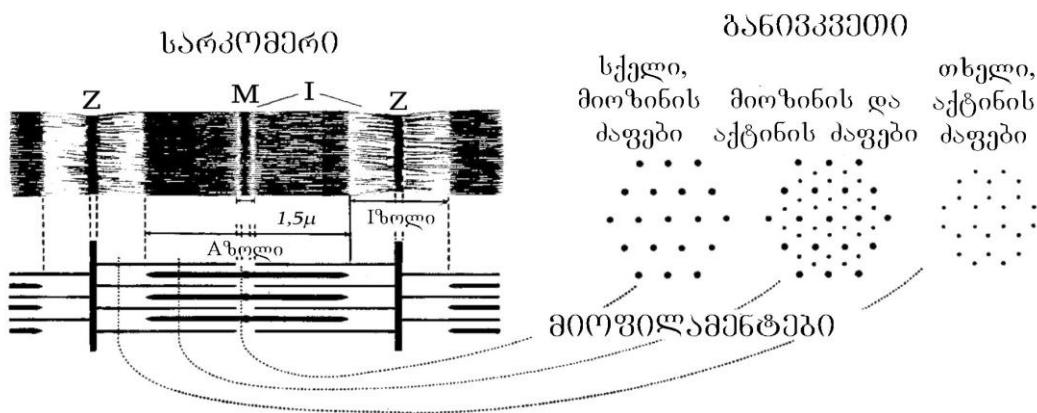
ასე რომ, ამ თეორიის მიხედვით შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ მემბრანის დეპოლარიზაცია, რომელიც მიღებული იყო როგორც ქმედების პოტენციალი, წარმოადგენს მემბრანაში ფონონური ნაკადის გავლის შედეგს. სწორედაც რომ ენერჯის ფონონური ნაკადები, რომელთა ფორმირება ხდება მემბრანული ცილების კონფორმაციული გარდაქმნების ენერჯის ხარჯზე (ცილების ერთობლივი „პირის შეკვრა“), მართავენ ამა თუ იმ ბიოქიმიური პროცესების ჩართვას, რომლებიც უზრუნველყოფენ ATP-ის წარმოებას და ენერჯის ან ჰორმონების ნაკადების შექმნას ორგანიზმის ფუნქციონალური შესაძლებლობების შესასრულებლად.

## 16. კუნთის ბიოფიზიკა.

### 16.1. კუნთის მუშაობის პრინციპები.

კუნთის შეკუმშვის თანამედროვე თეორია ეფუძნება მცოცავი ძაფების ჰიპოთეზას, რომელიც წამოაყენა ა.ჰაქსლიმ მე XX საუკუნის ორმოცდაათიან წლებში. ეს თეორია მიიჩნევს, რომ კუნთის შეკუმშვა ხორციელდება ძირითადად ორი ტიპის ცილის (აქტინის და მიოზინის) ციკლური ურთიერთქმედებით. ამ პროცესში სხვა მრავალი ცილაც მონაწილეობს: ტროპონინი, ტროპომიოზინი, კონექტინი, დესმინი, და ა.შ., მაგრამ ძირითადად საუბარია მიოზინის მოლეკულების თავებისა (S1-ფრაგმენტი) და აქტინის მონომერების ციკლურ ურთიერთობებზე. ურთიერთობების ერთი ციკლი შეიცავს სამ ოპერაციას: ერთმანეთზე მიერთება; ერთმანეთის მიმართ წანაცვლება; კავშირის გაწყვეტა. ძალზე ზოგადათ რომ ითქვას ეს ქმედებები მიმდინარეობს მიოზინის მოლეკულების S1-ფრაგმენტებისა და აქტინის მონომერების კონფორმაციული გარდაქმნების შედეგად, რომლებიც ხორციელდება ATP-ის ჰიდროლიზის თანხლებით, რაზეც უფრო დაწვრილებით საუბარი ქვემოთ გვექნება.

კუნთის უჯრედი ძირითადად შედგება მიტოქონდრიებისაგან და **ფიბრილებისაგან**, რომლებიც მასში პარალელურად არიან ჩალაგებულნი. თვითოეული ფიბრილა შედგება ერთმანეთზე მიმდევრობით მიერთებული **სარკომერებისაგან**. სარკომერი წარმოადგენს **მიოფილამენტების** ერთობლიობას (იხ.სურ. 120). სქელი ფილამენტები (სიგრძე 1,5 მკმ) შედგენილია მიოზინის მოლეკულებისაგან და ჰქმნიან A ზოლს. თხელი ფილამენტები (სიგრძე 1 მკმ) შედგებიან აქტინის მოლეკულებისაგან, რომლებიც სათავეს Z ხაზიდან იღებენ და I ხაზის გავლით A ზოლში შედიან.



სურ. 120. სარკომერის აგებულობა.

ცნობილია, რომ ენერჯის ტრანსფორმაციის ნებისმიერ ბიოლოგიურ რეაქციაში აუცილებელია, რომ ფერმენტის მოლეკულა შევიდეს რეაქციაში სპეციფიურ პარტნიორთან (მოლეკულასთან ან იონთან) რომელსაც **ლიგანდი** ეწოდება. ფერმენტ-ლიგანდური ურთიერთქმედების ხასიათზე დამოკიდებულებით ქიმიური პოტენციალი (ანუ, რაც იგივეს წარმოადგენს, თავისუფალი ენერჯია) შეიძლება ან სითბოს სახით გაიფანტოს ან მის ხარჯზე შესრულდეს სასარგებლო მუშაობა.

მიოზინის ადენოზინტრიფოსფატური ფერმენტისათვის (ATP-აზისათვის) ლიგანდს წარმოადგენენ აქტინი, ATP და ორვალენტური მეტალების იონები. აქტინთან მიოზინის ურთიერთქმედებისას ამ უკანასკნელის სტრუქტურაში აღმოჩენილი მნიშვნელოვანი ცვლილებები განაპირობებენ მიოზინის თავების აქტინთან ძლიერი კავშირის წარმოქმნას (ე.წ. **რიგორული** კავშირი გარემოში ATP-ის არ არსებობის შემთხვევაში). ამ ძლიერი

კავშირის გაწყვეტისათვის აუცილებელი ენერჯის წყაროს წარმოადგენს ახლად შექმნილი ძლიერი ფერმენტ-ლიგანდური კავშირი გარემოში შემოტანილ ATP-სა და მიოზინს შორის. ეს კავშირი იწყებს მიოზინის კონფორმაციის ცვლილებას და აქტინსა და მიოზინს შორის უკვე არსებულ კავშირს ცვლის უფრო ძლიერი კავშირით მიოზინის მოლეკულებსა და ATP-ს შორის.

რეაქციის შემდგომი მიმდინარეობის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ მოხდეს მისი პროდუქტების გამონთავისუფლება რაც შეიძლება მცირე ენერგეტიკული დანახარჯებით. ამრიგად, თანამედროვე მეხედულებით, შეკუმშვის პროცესის ენერჯის წყაროს ATP-ის ტერმინალური ფოსფატის მოწყვეტა კი არ წარმოადგენს, არამედ ATP-ის ენზიმთან<sup>102</sup> ძლიერი კავშირის ენერჯის ისეთი შუალედური ფორმა, რომელიც შემდეგ გარდაიქმნება მიოზინის თავების (ანუ ხიდების) მექანიკურ ენერჯიად და ნაწილობრივ გაიფანტება სითბოს სახით.

ATP-ის ჰიდროლიზის უნარი გააჩნია არა მთელ მიოზინის მოლეკულას, არამედ მხოლოდ მის S-1 სუბერთეულს, რომელიც ქმნის 15 ნმ სიგრძის და 7 ნმ სიგანის განივ ხიდს. თავის მხრივ S-1 სუბერთეული, შედგება რამდენიმე ფუნქციონალური ფრაგმენტისაგან ანუ დომენისაგან. მიოზინის S-1 ფრაგმენტი უერთდება აქტინს სულ მცირე ორი სპეციფიური უბნით. ATP-ის მოლეკულა აგრეთვე მიუერთდება მიოზინს S-1 სუბფრაგმენტის სპეციალურად ამისათვის გამოყოფილ ადგილზე.

ATP-ის მიოზინთან ურთიერქმედების პროცესი, ისევე როგორც უჯრედში წარმართული ბიოქიმიური რეაქციების უმეტესობა, მიმდინარეობს უამრავი შუალედური ეტაპის გავლით. კუნთში ATP-ის ჰიდროლიზის თანამედროვე სქემები ხასიათდებიან შუალედური ეტაპების დიდი რაოდენობით აქტინსა და მიოზინს შორის “სუსტი” და “ძლიერი” კავშირების პოსტულირებით და იმის დაშვებით, რომ შესაძლებელია ATP-ის ჰიდროლიზი განივი ხიდების დისოციაციის<sup>103</sup> გარეშე.

ძალის გენერაცია ხდება აქტომიოზინის (AM) ძლიერად შებოჭილი მდგომარეობიდან სუსტად შებოჭილ AM-ATP მდგომარეობაში გადასვლისას და სუსტად შებოჭილი AM-ADF მდგომარეობიდან ძლიერად შებოჭილ AM-ADF მდგომარეობაში გადასვლისას.

სადღეისოდ ყველაზე მიღებულია ძალის გენერაციის ოთხი მოდელი:

1. განივი ხიდის ანუ მიოზინის თავის დახრის კუთხის ცვლილებით. აქ წვრილი ძაფი ასრულებს პასიურ როლს (იხ. სურ. 121; H.Huxley, 1969);
2. მიოზინის მოლეკულის S-1 სუბფრაგმენტის ფორმის შეცვლით მისი ცალკეული დომენების ურთიერთმოზრუნებისას (წვრილი ძაფი პასიურია);
3. მიოზინის მოლეკულის S-2 სუბფრაგმენტში სპირალ-გორგლის ტიპის გადასვლით (იხ. სურ. 121; A.Huxley, Simmons, 1971 – აქაც წვრილი ძაფი პასიურია).
4. აქტინის მოლეკულაში მიმდინარე კომფორმაციული ცვლილებები პასიური მიოზინის ძაფის ფონზე (იხ. სურ. 121; A.Huxley, 1974 – აქტინისებრივი ალტერნატიული მოდელი.);

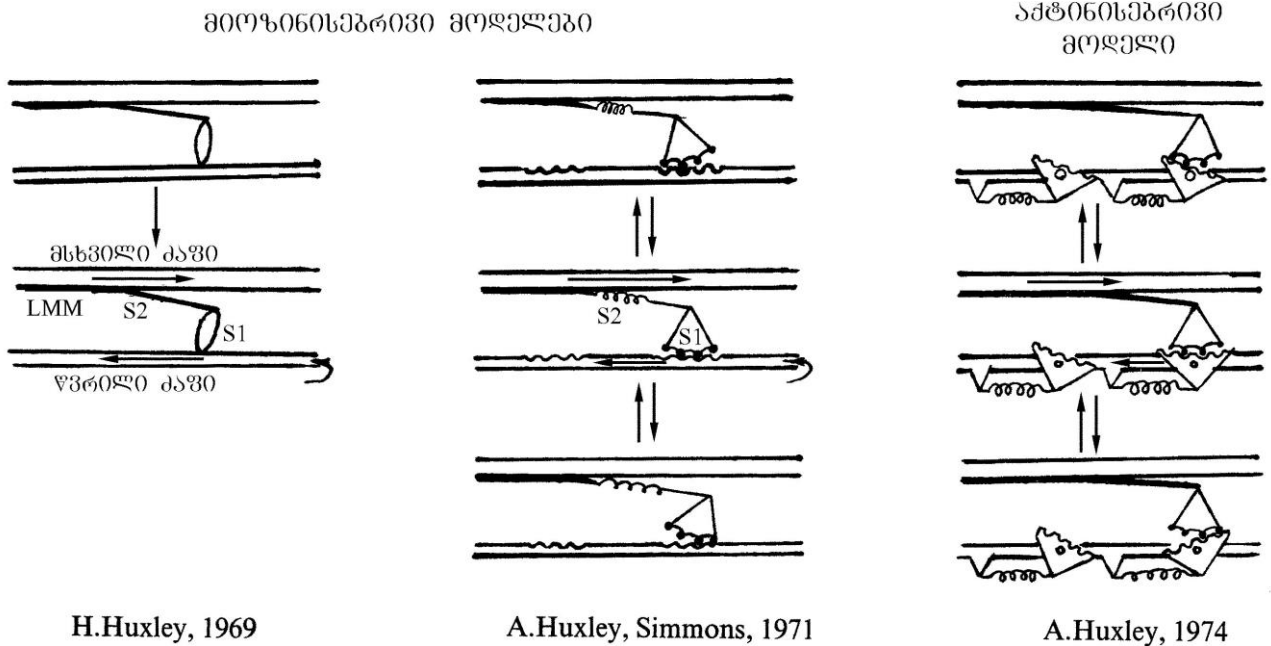
ამ მოდელებიდან ჯერ-ჯერობით უპირატესობით სარგებლობს პირველი თუმცა, აქ მთავარი ისაა, რომ ნებისმიერი მოსაზრებით ერთი ATP-ის მოლეკულის ჰიდროლიზი იწვევს ძალის გენერაციას განივი ხიდის წვრილი ფილამენტის მიმართ 11 ნმ მანძილზე გადაადგილების გზით. უნდა აღინიშნოს, რომ მოყვანილ მოდელებში ძალის გენერაციის

<sup>102</sup> ენზიმი – იგივეა რაც ფერმენტი.

<sup>103</sup> ფიზიკურ ქიმიამი ელექტროლიტიკური დისოციაცია ნიშნავს გამხსნელი ხსნარის ზეგავლენით ელექტროლიტის მოლეკულის იონებათ დაშლას. ჩვენ შემთხვევაში ეს ტერმინი გამოიყენება როგორც სპეციფიური კომფორმაციული ცვლილებები.

ერთ ერთ “კომპანიონს” ყოველთვის პასიური როლი აქვს მინიჭებული. მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ, რომ ბუნებაში პასიური სტრუქტურების არსებობა არ არის გამართლებული, უნდა ვეძიოთ კუნთის შეკუმშვის ისეთი მექანიზმი, რომელშიც ორივე (წვრილ და სხვილ ძაფებს) სტრუქტურას ექნება თანაბარი, აქტიური როლი მინიჭებული. ანუ საჭიროა განვიხილოთ ძალის გენერაციის მეხუთე მოდელი, რასაც ქვემოთ გავაკეთებთ. ეხლა კი ისევ დაუბრუნდეთ კუნთის ენერგეტიკას.

კუნთის მუშაობის მოდელირება



სურ. 121. ძალის გენერირების ალტერნატიული მექანიზმები მცოცავი ძაფების მოდელში.

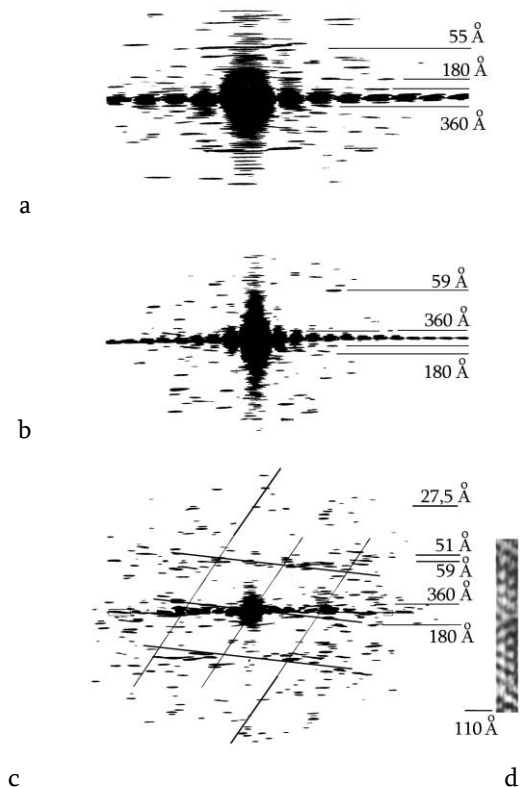
ზემოთ განხილული ენერჯის გარდაქმნის მექანიზმი ცნობილია **ქემო-მექანიკური გარდაქმნის** სახელით და იგი ხორციელდება უჯრედში მიმდინარე ყოველ პროცესში სადაც ადგილი აქვს სივრცულ გადაადგილებას. ქემო-მექანიკური გარდაქმნა ჩვენთვის განსაკუთრებით იმითაა საინტერესო, რომ იგი საშუალებას იძლევა მაკრომოლეკულურ სტრუქტურას ცოცხალ ორგანიზმში მოახდინოს სისტემის სივრცული თვითორგანიზაცია. სხვანაირად რომ ითქვას, ცოცხალ სისტემაში, რომელიც შეადგენს ქვესისტემების ჰარმონიულ ერთობას, ადგილი აქვს დისიპატიური სტრუქტურების ლოგიკური იეარქიის ჩამოყალიბებას. ამ საქმეში ენერჯის გარდაქმნის სხვა მექანიზმებთან ერთად, როგორცაა ელექტრო-ქიმიური და ქემო-ოსმოსური, უმნიშვნელოვანესი როლი ენიჭება ქემო-მექანიკურ გარდაქმნას. აღსანიშნავია, რომ ენერჯის გარდაქმნის პროცესები ორგანიზმში არც თუ ისე მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტით (მ.ქ.კ.) ხასიათდებიან. მაგალითად, ქემო-მექანიკური გარდაქმნის მ.ქ.კ. სხვადასხვა მონაცემებით 40-60%-ს არ აღემატება. ეს იმდენადაა საინტერესო, რამდენადაც ხელოვნურად შექმნილ ბევრ მოწყობილობაშიც კი უფრო მაღალი მ.ქ.კ.-ს მიღწევა მოხერხდა. ბუნების ასეთი “მფლანგველობის” ერთადერთი ახსნა მდგომარეობს იმაში, რომ გაფანტური სითბური ენერჯია ემსახურება ორგანიზმის ტემპერატურული რეჟიმის რეგულირებას.

## 16.2. F-აქტინის ძაფების სტრუქტურა

მიოკარდიუმის ულტრასტრუქტურული გამოკვლევებით ნაჩვენებია, რომ გულის ნაკლოვანების (გნ) დროს სარკომერში, პირველ რიგში ზიანდება წვრილი, აქტინის ძაფები. ტროპონინ-ტროპომიოზინ (ტნ+ტმ) კომპლექსის შემცველი F-აქტინის ძაფების სტრუქტურების კვლევისას ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდებით, ნორმალური მიოკარდიუმის F-აქტინის მიკროფოტოსურათებზე გამოვლინდა გრძელი ძაფები დიამეტრით ~70 Å. ამ მიკროფოტოსურათებისაგან განსხვავებით, ათირეოზული მიოკარდიუმის F-აქტინის შემთხვევაში ძაფები მოკლეა და აქვთ „გაფუებული“ „ფხვიერი“ სტრუქტურა. ამ ძაფების დიამეტრი გადიდებულია და მერყეობს 70 – 100 Å-ის ფარგლებში.

გაწმენდილი F-აქტინის მიკროფოტოსურათების ოპტიკურ დიფრაქციულ სურათებზე შეინიშნება 55 Å პერიოდულობის შესატყვისი ძლიერი მერიდიანული რეფლექსები. ეს სიდიდე ემთხვევა ჩონჩხის კუნთების F-აქტინის სპირალის ბიჯის მნიშვნელობას, განსაზღვრულს ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდებით და ჩონჩხის G-აქტინის გლობულის შებრტყელებული ელიპსოიდის დიდი დიამეტრის ზომას. ამავე დიფრაქციულ სურათებზე შეიძლება შევნიშნოთ 59 Å-ის შესაბამისი სუსტი ინტენსივობის რეფლექსები. შეინიშნება აგრეთვე ფენოვანი ხაზი რეფლექსებით 360 Å, რაც შეესაბამება F-აქტინის სპირალის განმეორების პერიოდს.

ნორმალური მიოკარდიუმის ტნ+ტმ კომპლექსის შემცველი F-აქტინის ძაფის დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 122a) ძირითადი პერიოდულობის საშუალო სიდიდე შეადგენს 55 და 360 Å შესაბამისად. ამასთან, ათირეოზული გულის F-აქტინის ოპტიკური დიფრაქციის სურათზე რეფლექსები, რომლებიც შეესაბამებიან პერიოდულობას 55 Å, სუსტდება, 59 Å პერიოდულობის შესაბამისი რეფლექსების ინტენსივობა კი მკვეთრად ძლიერდება (სურ. 122b). რაც შეეხება სპირალის განმეორების პერიოდს, აქ მისი მნიშვნელობა დარჩა უცვლელი და შეადგინა ~360 Å.



სურ. 122. ტნ+ტმ კომპლექსის შემცველი F-აქტინის ოპტიკური დიფრაქციული სურათები ნორმალური (a), ათირეოზული (b) და იზოლირებული აქტინი ნორმალური (c) მიოკარდიდან. დიფრაქციული სურათების მარჯვენა მხარეს აღნიშნულია ფენოვანი ხაზები, რომლებზეც ნაჩვენებია მათი შესატყვისი პერიოდულობა. (c)-ზე ჩანს ახლომერიდიანული რეფლექსები 51 და 59 Å, აგრეთვე მერიდიანული რეფლექსები 27,5 და 55 Å. მაგრამ ეს უკანასკნელი პერიოდულობა არაა აღნიშნული, რამდენადაც აკრძალულია. (d) – იზოლირებული აქტინის ძაფის ოპტიკური ფილტრაცია ნორმალური მიოკარდიუმიდან. ქვემოთ მოყვანილია მასშტაბი.



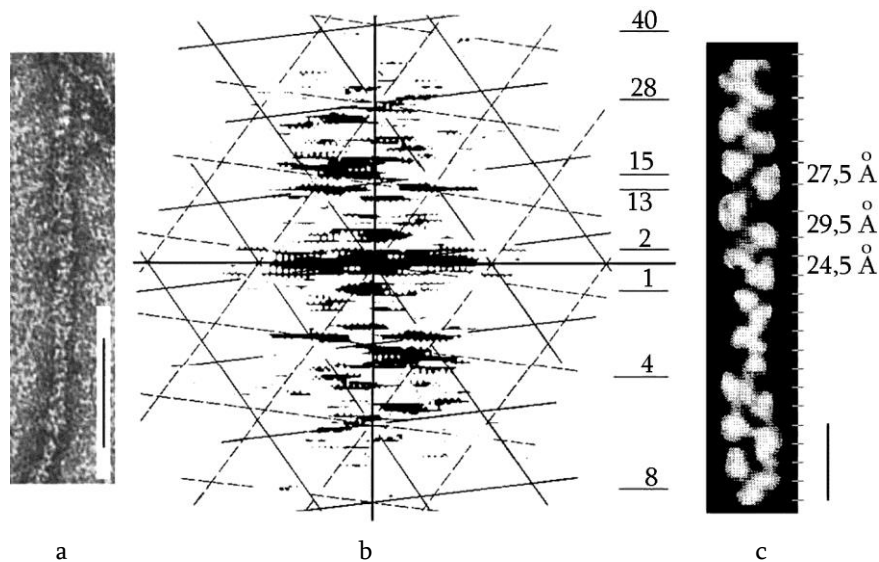
სურ. 122c-ზე მოყვანილი ოპტიკური დიფრაქციული სურათი არაა დამახასიათებელი F-აქტინისთვის. ამ სურათის განსხვავება F-აქტინის ჩვეულებრივი დიფრაქციისაგან არის 27,5 Å შესაბამის პერიოდულობის მკვეთრი რეფლექსის არსებობა და, ჩონჩხის კუნთების F-აქტინისაგან მიღებული დიფრაქციული სურათის მაგვარად, 59 და 51 Å (მე-6 და მე-7 ფენოვანი ხაზები შესაბამისად) პერიოდულობის შესაბამისი რეფლექსების არსებობა. სურ. 122d-ზე წარმოდგენილია ნორმალური მიოკარდიუმის სარკომერის იზოლირებული F-აქტინის ძაფის ორმხრივი ოპტიკური ფილტრაცია.

ათირეოზული გულიდან ტნ+ტმ კომპლექსის შემცველი F-აქტინის დიფრაქციულ სურათებზე, განსხვავებით ნორმალურისაგან, ძლიერი ინტენსივობის რეფლექსები აღინიშნება არა 55, არამედ 59 Å პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე. საინტერესოა, რომ 59 Å პერიოდულობის რეფლექსების ინტენსივობა რენტგენულ დიფრაქციულ სურათებზე ძლიერდება რიგორში და დამახასიათებელია აქტინის ძაფის ფუნქციონალური ერთეულის "ჩართული" მდგომარეობისათვის (ეს მდგომარეობა გულისხმობს ფუნქციონალური ერთეულების ისეთ კონფორმაციას, რომელიც მომზადებულია მიოზინთან ურთიერთობისათვის).

ამგვარად, მიღებული შედეგები ადასტურებენ F-აქტინის ძაფის გარდაქმნას კარდიომიოპათიის დროს. თანაც სტრუქტურულ-კონფორმაციული ცვლილებები მიმდინარეობს როგორც თვით გლობულაში, ასევე მისი სუბერთეულების შეფარდებითი განლაგებაში.

### 16.3. აქტინის და წვრილი ძაფების სტრუქტურა (ნორმა)

ნორმალური კარდიომიოციტის სარკომერის ნატურალური წვრილი ძაფების პრეპარატები (სურ. 123a) შეიცავენ როგორც ცალკეულ წვრილ ძაფებს, ასევე მათ სტრუქტურულ აგრეგატებს „ტივებს“. უშუალოდ მიკროფოტოსურათებზე გაზომილი ძაფების დიამეტრი აღმოჩნდა 80 – 100 Å-ის ფარგლებში. მიოკარდიუმის იზოლირებული ნატურალური წვრილი ძაფების სპირალის პერიოდი (c) მერყეობს 714-დან 826 Å-მდე.



სურ. 123. (a) მიკროფოტოგრაფიის უბანი დიდ გადიდებაზე (მასშტაბი – 500 Å); (b) მითითებული ფრაგმენტის კომპიუტერული დიფრაქციული სურათი. მარჯვნივ ნაჩვენებია ფენოვანი ხაზები ძირითადი (დიფრაქციის ზედა ნაწილი) და ტროპომიოზინური (ქვედა ნაწილი) პერიოდულობებისათვის. (c) ფონიდან ფილტრირებული (a) წვრილი ძაფი დიდ გადიდებაზე (მასშტაბი – 100 Å).

ცალკეული ნატურალური წვრილი ძაფისაგან მიღებულ კომპიუტერულ დიფრაქციულ სურათებზე რეფლექსები, რომლებიც შეესაბამებიან ძირითად პერიოდულობას, განლაგდებიან მე-2, მე-13, მე-15 და 28-ე ფენოვან ხაზებზე (სურ. 123b). აქედან, წვრილი ძაფის სპირალის შესაბამისი პარამეტრები შემდეგია:  $c = 720 \text{ \AA}$ ,  $p/q = 28/13$ , ხოლო ელემენტარული კუთხე  $\alpha = 167^\circ$ . მაგრამ, აქ უნდა აღინიშნოს, რომ პროტომერების საზოგადოდ მიღებული წყობის თანახმად, წვრილი ძაფი წარმოადგენს მარცხნივშემავალ სპირალს  $c = 360 \text{ \AA}$ ,  $p/q = 13/7$  და  $\alpha = 167^\circ$  (და ამ შემთხვევაში ძირითადი რეფლექსები განლაგებულია 1-ლ, მე-6, მე-7 და მე-13 ფენოვან ხაზებზე შესაბამისად). ამასთან, მნიშვნელოვანია, რომ თანაფარდობა  $p/q = 28/13$  არაა ფიქსირებული – შეინიშნება სპირალები, რომლებისთვისაც  $p/q = 25/12, 21/10, 27/13$  და სხვა ახლომყოფი მნიშვნელობები, რომლებისთვისაც ელემენტარული კუთხე შესაბამისად უტოლდება  $173^\circ, 171^\circ, 173^\circ$  და ა.შ. წვრილი ძაფის ყველა დიფრაქციულ სურათზე 28-ე ფენოვან ხაზზე მდებარე მერიდიანული რეფლექსის მრავალჯერადი გახლეჩა განპირობებულია გადატანის მუდმივას დისკრეტული მერყეობით ყოველ ცალკეულ აღებულ ძაფში  $25,5 - 29,5 \text{ \AA}$  ფარგლებში  $1 \text{ \AA}$  ბიჯით. ზემოთ მოყვანილი შედეგები ამტკიცებენ მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის სპირალის პარამეტრების არასტაბილურობას ერთი პერიოდის საზღვრებშიც კი.

კომპიუტერულ დიფრაქციულ სურათებზე ისევე, როგორც ოპტიკურზე, გარდა აღნიშნული რეფლექსებისა, შეინიშნება დიდი რაოდენობით არაიდენტიფიცირებული და „აკრძალული“<sup>104</sup> (კერძოდ, მე-14 ფენოვან ხაზზე) რეფლექსები.

პერიოდულობების ( $\text{\AA}$ ) განაწილება ფენოვანი ხაზების მიხედვით ნორმალური მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის აქტინის პროტომერების გადატანის მუდმივას (28-ე ფენოვანი ხაზი) მნიშვნელობაზე დამოკიდებულებით  $p/q = 28/13$  სპირალისათვის

ცხრილი 24

ჯგუფი	რეფლექსის პერიოდულობა, $\text{\AA}$					
1	25,5	48	51*	55	357	714
2	26,5	50	53	57	371	742
3**	27,5	51	55	59	385	770
4	28,5	53	57	61	399	798
5	29,5	55	59	63	413	826
ფენოვანი ხაზის № ( $\ell$ )	28	15	14	13	2	პერიოდი ( $c$ )

\* გამოყოფილ ვერტიკალურ გრაფაში პერიოდულობები მიკუთვნებულია მოცემული სპირალისათვის ( $28/13$ ) აკრძალულ მე-14 ფენოვან ხაზს.

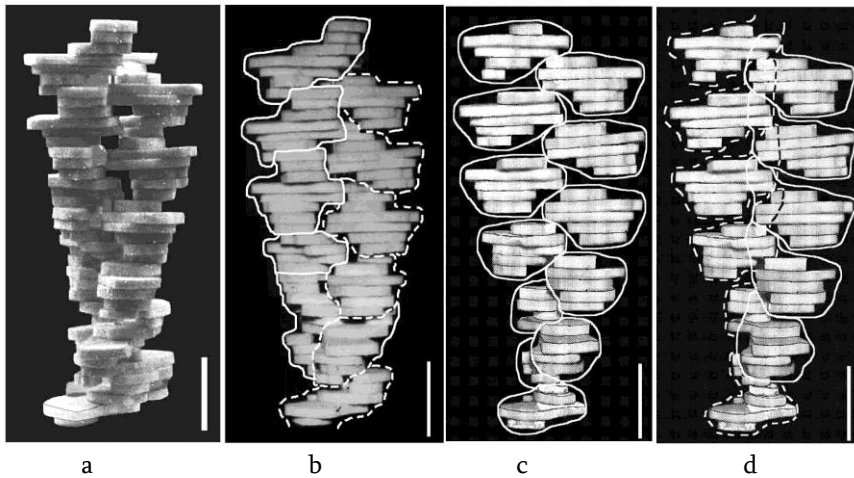
\*\* გამოყოფილ პწკარში (ჯგუფი #3) პერიოდულობები შეესაბამება დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 123b) აგებულ უკუ მესერს.

წარმოდგენილ კომპიუტერულ დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 123b) აგებულია უკუ მესერი გამომდინარე იქიდან, რომ 28-ე ფენოვან ხაზზე განლაგებული რეფლექსი შეესაბამება პერიოდულობას  $27,5 \text{ \AA}$ . ამ შემთხვევაში, აკრძალულ მე-14 ფენოვან ხაზს (ჰორიზონტალურად გამოყოფილი პწკარი #3 ცხრილი 24) შეესაბამება პერიოდულობა  $55 \text{ \AA}$  („აკრძა-

<sup>104</sup> ამ დამკვიდრებულ ტერმინოლოგიასთან დაკავშირებით უნდა აღინიშნოს, რომ „აკრძალული“ რეფლექსები საერთოდ არ არსებობენ. აკრძალული (შერჩევის წესის მიხედვით) შეიძლება იყოს ფენოვანი ხაზი, რომელზეც განლაგებულია რეფლექსები.

ლული რეფლექსი“). მაგრამ ეს პერიოდულობა ისევე, როგორც სხვა დანარჩენი პერიოდულობები, რომლებიც მიეკუთვნება მე-14 ფენოვან ხაზს, შეიძლება თანაბრად მიეკუთვნოს მე-15-საც (ჯგუფი #5) და მე-13 (ჯგუფი #1) ფენოვან ხაზებსაც, სადაც რეფლექსი  $55 \text{ \AA}$  უკვე აღარაა „აკრძალული“. პირველ შემთხვევაში იგი შეესაბამება გადატანის მუდმივას  $29,5$ , მეორეში კი –  $25,5 \text{ \AA}$ . პერიოდულობების ასეთივე კრებული შეინიშნება მე-2 ფენოვანი ხაზის შემთხვევაშიც, ამიტომაც სპირალის პერიოდიც ასევე ექვემდებარება მერყეობას. ამგვარად, მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის გამოკვლეულ სპირალურ სტრუქტურას მთელ სიგრძეზე აქვს სხვადასხვა პარამეტრი ( $c, p, q$ ), და ზემოთ აღნიშნული პარამეტრები ასახავენ ძაფის იმ უბნებს, რომლებზეც იყო ჩატარებული სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია ( $c = 770 \text{ \AA}$ , ხოლო  $p/q = 28/13$ ).

$20 \text{ \AA}$  გარჩევით უნარიანობის მქონე მიკროფოტოსურათების, (თუ ვიმსჯელებთ დიფრაქციული სურათების მიხედვით) (სურ. 123c), კომპიუტერული ფილტრაციის ანალიზის შედეგები საშუალებას იძლევა გამოვლინდეს აქტინის პროტომერების დომენური სტრუქტურა და მათი წყობის წესი ერთჰიმეიან სპირალში. აქტინის პროტომერს გვერდით პროექციაში აქვს T-მაგვარი სტრუქტურა, რომელიც თავისი ფეხით სპირალის ღერძზეამიბჯენილი, ხოლო კუთხე, რომელსაც ქმნის გარე დომენზე გამავალი ღერძი ვერტიკალურ მიმართულებასთან, ანუ სპირალის ღერძთან (ტანგენციალური მდგენელი), უტოლდება  $20^\circ$ . წვრილი ძაფის ფონიდან გაფილტრული მიკროფოტოსურათის მარჯვენა მხარეს დატანილია არათანაბარი დაყოფის სახაზავი, რომელზეც ნაჩვენებია გადატანის მუდმივას მნიშვნელობები. ძაფის უმრავლესი ნაწილისათვის გადატანის მუდმივა შეადგენს  $24,5 \text{ \AA}$ , მაგრამ გვხვდება  $27,5$  და  $29,5 \text{ \AA}$ -ის უბნებიც.



სურ. 124. ნორმალური მიოკარდის წვრილი ძაფის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია: (a) ძაფის სამგანზომილებიანი მოდელი; მოდელი გამოყოფილი პროტომერებით (b); (c) ტროპომიოზინისაგან გაფილტრული (F-აქტინი) წვრილი ძაფის ერთჰიმეიანი მოდელი; (d) ტროპომიოზინისაგან გაფილტრული წვრილი ძაფის ორჰიმეიანი მოდელი. მოდელის კუთხეში მონაკვეთის სიგრძე შეესაბამება  $50 \text{ \AA}$ .

მიღებული შედეგების საფუძველზე ჩატარდა წვრილი ძაფის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია უბნიდან, რომელზეც  $c = 770 \text{ \AA}, p/q = 28/13, \alpha = 194^\circ$ . მიღებულია ელემენტარული დისკოს სამი კვეთა (ყოველი კვეთის სისქე  $9,2 \text{ \AA}$ -ია). ელემენტარული კვეთის მიხედვით აგებულ მოდელებზე, სურ. 124a,b შემთხვევებში, წარმოდგენილია ნატურალური წვრილი ძაფი, ხოლო სურ. 124c,d – წვრილი ძაფი გაფილტრული ტროპომიოზინის ჰიმეისაგან (F-აქტინის ძაფი). ყველა მოდელზე თეთრი ხაზით შემოხაზულია აქტინის (სურ. 124b,c) ან აქტოტროპომიოზინის (სურ. 124d) პროტომერები. ავლნიშნავთ, რომ დღემდე არ არის ერთიანი აზრი წვრილ ძაფში აქტინის ჰიმეის რიცხვის შესახებ,

ვინაიდან ბიოქიმიური გამოკვლევების გარეშე ცალსახად ამ კითხვაზე პასუხი ვერ გაეცემა, ამდენად წარმოგიდგინთ აგებული მოდელის ინტერპრეტაციის ორ ვარიანტს — ერთ- ან ორჭიმინა ძაფს.

მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის ორივე აგებული მოდელის დიამეტრი 100 Å ტოლია, ხოლო პერიოდი, როგორც ზევით აღინიშნა, 770 Å. ერთჭიმინაი წვრილი ძაფის შემთხვევაში აქტინის პროტომერებს აქვთ ელიფსოიდის ფორმა ზომებით  $65 \times 45 \times 40$  Å. ორჭიმინაი ძაფის შემთხვევაში პროტომერის ფორმა რთულია და აქვს შემდეგი ზომები  $65 \times 75(55) \times 40$  Å, სადაც 75 Å – აქტინის პროტომერის საერთო სიმაღლეა წვრილი ძაფის ღერძის სიახლოვეს. თუ გავითვალისწინებთ, რომ მისი ღერძი დახრილია სპირალის ღერძის მიმართ  $75^\circ$  კუთხით, მაშინ პროექციაში წვრილი ძაფის ღერძზე მისი სიმაღლე სპირალის ღერძის სიახლოვეს შეადგენს 55 Å, ხოლო სპირალის გარე მხრიდან – 45 Å. მცირე დომენის გავლით ვერტიკალური მიმართულებით გამავალი ღერძის დახრის კუთხე სპირალის ღერძის მიმართ (ტანგენციალური მდგენელი) შეადგენს, ისევე როგორც ფილტრირებულ გამოსახულებაზე,  $20^\circ$ , ხოლო, დიფრაქციული სურათის თანახმად, ტროპომიოზინის ჭიმი მიერთებულია მცირე (მოლეკულური მასის მიხედვით) დომენის გარეთა მხრიდან, სპირალის ღერძიდან 40 Å-ის დაშორებით.

ყველა ეს შედეგი მიუთითებს იმაზე, რომ მიოკარდიუმის წვრილ ძაფს ახასიათებს მოქნილი, საკმაოდ დინამიური სტრუქტურა, რაც მას აძლევს საშუალებას ფუნქციონირების პროცესში განუწყვეტლივ შეიცვალოს კონფორმაცია და პარამეტრები. მაგრამ ეს საკითხი ჯერ კიდევ არაა ბოლომდე გადაწყვეტილი და სადღეისოდ არსებობს მონაცემები ორივე მოდელის სასარგებლოდ. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ აქტინის ძაფის პროტომერის სტრუქტურის მაღალი დინამიურობა, აგრეთვე ტროპომიოზინთან კონტაქტების მნიშვნელოვანი რაოდენობის არსებობა, უზრუნველყოფს მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის მაღალ კოოპერატიულობას, აქტინის უნარს დააკავშიროს ცილების და არაცილოვანი ბუნების ნივთიერებების უზარმაზარი რიცხვი და, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, ადაპტაციის უნარს პათოლოგიის მიმართ. ასეთმა დინამიურმა სტრუქტურამ შეიძლება უზრუნველყოს კონფორმაციული ცვლილება არაფიზიოლოგიურ იმპულსზე პასუხად, მაგალითად, ჰიპოქსიური და იშემიური სტრესი, და კონფორმაციის აღდგენას ფარმაკოლოგიური საშუალებების ზემოქმედებით.

ყველა ეს და სხვა კითხვაც ელოდება გადაწყვეტას და, ამდენად, პათოლოგიურად შეცვლილი მიოკარდიუმიდან წვრილი ძაფის სტრუქტურის გამოკვლევა ხდება განსაკუთრებით აქტუალური. გარდა ამისა, კვლევები აღნიშნული მიმართულებით, უხსნიან გზას სტრუქტურული კვლევების ახალ ეტაპს, მიძღვნილს გულის სხვა და სხვა დაავადების დროს აქტინის სტრუქტურის შეცვლის როლზე მიოკარდიუმის შეკუმშვის უნარის დაქვეითებაში.

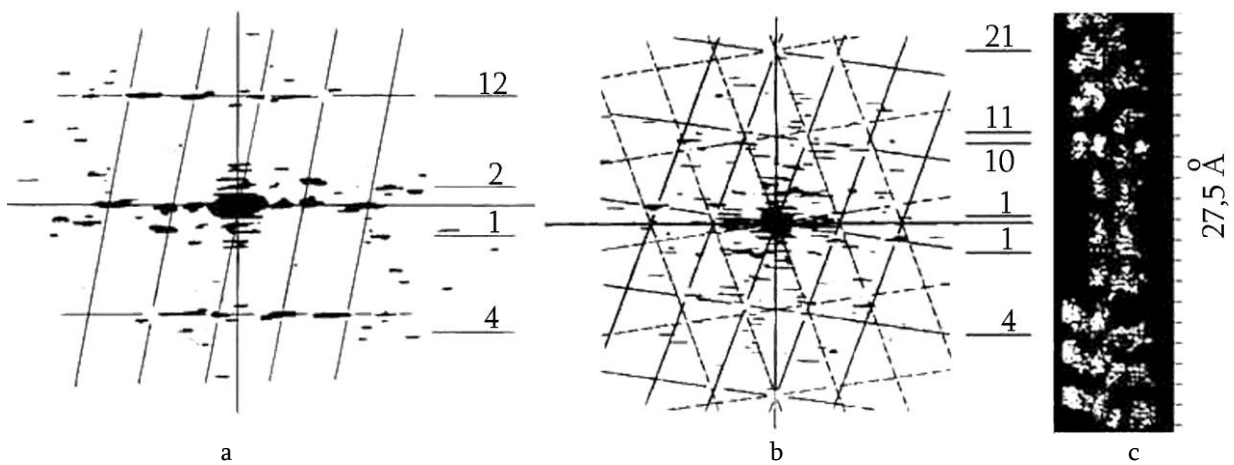
#### **16.4. აქტინის და წვრილი ძაფების სტრუქტურა (პათოლოგია 1)**

აღმოჩნდა, რომ წვრილი ძაფის დიამეტრი ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის<sup>105</sup> დროს იმავე რიგორიზებული გარემოში, რომელშიც იმყოფებოდა ნორმა, 1,4-ჯერ მეტია ნორმასთან შედარებით და შეადგენს 130 Å-ს (მერყეობს 120 – 140 Å-ის ფარგლებში, ხოლო განაწილების მაქსიმუმი მოდის 130 Å-ზე). ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს სპირალის პერიოდის მერყეობა ორივე მხარეს მკვეთრად იზრდება: შემცირებისაკენ – ეცემა 570-მდე, ხოლო ზრდის მხარეს – აღწევს 1100 Å-ს, თუმცა გადატანის მუდმივას მერყეობა არსებითად ნაკლებია (იხ. ქვემოთ). ბუნებრივია, შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ სტაბილიზირებული გადატანის მუდმივას შემთხვევაში სპირალის პერიოდის ასეთი დიდი მერყეობა ვერ იქნება ფუნქციონა-

<sup>105</sup> ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub> – სამი დღის ხანგრძლივობის ტოქსიკო-ალერგიული მიოკარდიტი.

ლური. ეს ნიშნავს, რომ აღნიშნული მერყეობა შეიძლება იყოს გამოწვეული ძაფების მექანიკური გადახლართვით პრეპარატის სადებ აკვზე. მაგრამ წვრილი ძაფების ასეთი დეფორმაცია შესაძლებელი ხდება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ აქტინის პროტომერების სტრუქტურა შეიცვლება იმდაგვარად, რომ პროტომერები უკვე ნაკლებ ასტაბილებდნენ ერთმანეთს, რათა დაამყოფონ მთელი ძაფი კომპაქტურ კონფორმაციაში. გადახლართვის შედეგად წვრილი ძაფები შეიძლება დაწყდეს. წვრილი ძაფების დაწყვეტა შეიძლება იყოს განპირობებული პროტომერებს შორის შემაკავშირებელი ძალების შემცირებით. ამგვარად, პროტომერის გარე დომენის წრფივი გაწელება ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს უნდა იყოს შეუღლებული დომენტა შორის კავშირების შემცირებასთან, ხოლო სპირალის პერიოდის ზრდა – წვრილი ძაფის პროტომერებს შორის შემაკავშირებელი ძალების შემცირებასთან.

ნორმისაგან განსხვავებით (სურ. 123b), ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს (სურ. 125b) მერიდიანული რეფლექსები განლაგებულია 25 და 21 ფენოვან ხაზებზე. გადატანის მუდმივას ვარიირების დიაპაზონი არსებითად მცირდება – გაფანტვა მერყეობს 26,5 – 28,5 Å-ის ფარგლებში ასევე დისკრეტულად 1 Å-ის ბიჯით.



სურ. 125. კომპიუტერული დიფრაქციული სურათები მიოკარდიუმის იზოლირებული წვრილი ძაფისაგან ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს (b) და მისი Mg-პარაკრისტალისაგან (a). სპირალის წინა მხარის რეფლექსები მოთავსებულია უწყვეტი ხაზებით აღნიშნულ მესერის კვანძებში, უკანა მხრისა – წყვეტილი. ეკვატორის ზედა ნაწილში აღნიშნულია ძირითადი (აქტინური) პერიოდულობის ფენოვანი ხაზები, ეკვატორის ქვედა ნაწილში – ტროპომიოზინის. (c) – ფონისაგან ფილტრირებული წვრილი ძაფის მონაკვეთი, რომლის დიფრაქციული სურათი წარმოდგენილია (b)-ზე. გადატანის მუდმივა ძაფის მთელ სიგრძეზე შეადგენს 27,5 Å. კარგად ჩანს აქტინის სტრუქტურის გაწელება სპირალის ღერძის პერპენდიკულარული მიმართულებით და აქტინის პროტომერის დომენური აგებულება.

ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub> მიოკარდის წვრილი ძაფის დიფრაქციული სურათის ძირითადი განსხვავება ნორმისაგან იმაში მდგომარეობს, რომ ყველა რეფლექსი გადანაცვლებულია მერიდიანისაკენ. შედეგად, ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს სიმეტრიულ ახლომერიდიანალურ რეფლექსებს შორის მანძილი ნორმასთან შედარებით მცირდება 1,4-ჯერ. ეს ადასტურებს ნორმასთან შედარებით წვრილი ძაფის დიამეტრის იმდენჯერვე გაზრდას ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს. ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს აქტინის ძაფის გარე დომენის წრფივი გაწელების სასარგებლოდ მეტყველებს დიფრაქციულ სურათებზე 55 Å პერიოდულობის შესატყვისი აკრძალული რეფლექსის გაქრობაც, რომელიც შენიშნული იყო ნორმალური მიოკარდიუმის F-აქტინის მიკროფოტოსურათების დიფრაქციაზე.

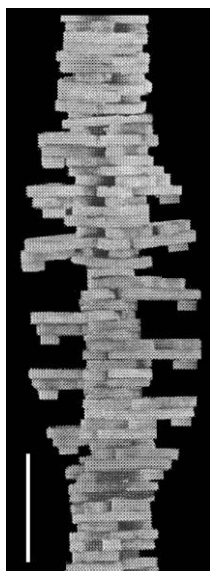
ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 125b) თანაფარდობა  $p/q = 21/10$ , მაშინ, როცა ნორმაში (სურ. 123b)  $p/q = 28/13$ . ორივე თანაფარდობა ერთი რიგისაა (2,10; 2,15 შესაბამისად). ესე იგი შეიძლება ითქვას, რომ წვრილი ძაფების გადახვევის ხარისხი ტამ<sub>3</sub>დ<sub>ლბ</sub>-ის დროს 167°, პრაქტიკულად ანალოგიურად ნორმისა (172°, 171°).

ჩვენ უკვე ავლნიშნეთ, რომ პარამეტრები  $c$ ,  $p$  და  $q$  ნორმაში და ტამ-ის დროს ვარირებას განიცდიან მაგრამ სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციისათვის, პროტომერის სტრუქტურაზე სხვადასხვა დესტაბილიზაციის გამომწვევი ფაქტორების გავლენის გამორიცხვის მიზნით, შეიძლება შეირჩეს წვრილი ძაფების უბნები, რომლებიც ხასიათდებიან სტაბილური პარამეტრებით, კონკრეტულად კი  $c = 687\text{\AA}$ ,  $p = 25$  და  $q = 12$ . მაშინ ტამ<sub>დღ</sub>-ის შემთხვევაში  $\alpha = 172^\circ$ . ელემენტარული დისკოს სისქე, ისევე როგორც ნორმაში,  $\Delta = 27,5\text{\AA}$ . ეს პარამეტრები შეირჩა იმასთან დაკავშირებით, რომ ისინი უახლოვდებიან წვრილი ძაფის Mg-პარაკრისტალებში მყოფი ფილამენტების პარამეტრებს (იხ. ქვემოთ).

რეფლექსები, რომლებიც განსაზღვრავენ ტროპომიოზინის ადგილმდებარეობას წვრილ ძაფზე ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროს, რჩება იმავე ადგილას, რომელზეც იყო ნორმაში – ორივე ჭიმი წარმოქმნის მარჯვნივ დახვეულ ორშემავლიან სპირალს პარამეტრებით:  $c = 140\text{\AA}$ ,  $p = 2$  და  $q = 1$ . მიოკარდიუმის წვრილი ძაფების დიდი რაოდენობის დიფრაქციული სურათების ანალიზი ამტკიცებს, რომ ნორმაშიც და ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროსაც 30%-ზე მეტ შემთხვევაში ტროპომიოზინური ჭიმები განლაგებულია სპირალის ღერძიდან  $29\text{\AA}$ -ის მანძილზე – როგორც ჩანს, ტროპომიოზინური რეფლექსი დინამიურია.

მიოკარდიუმის წვრილი ძაფების Mg-პარაკრისტალების დიფრაქციულ სურათებზე ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროს (სურ. 125a) ძირითადი რეფლექსები განლაგებულია მე-2 და მე-12 ფენოვან ხაზებზე. შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ სპირალის პერიოდი პარაკრისტალში ორივე შემთხვევაში სტაბილიზირებულია და  $770\text{\AA}$ -ის ტოლია. მაგრამ აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მითითებული პათოლოგიის დროს კრისტალების წარმოქმნა გამწვანებულია, ხოლო წარმოქმნილი პარაკრისტალები ნორმის მგავსია (იხ. თავი პარაკრისტალების სტრუქტურა).

ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროს მიოკარდიუმის მოფიბრილის სარკომერის წვრილი ძაფების გამოსახულების კომპიუტერული ფილტრაციის სურათებზე (სურ. 125c), ნორმისაგან განსხვავებით, აქტინის პროტომერის სტრუქტურა გაჭიმულია სპირალის ღერძისადმი პერპენდიკულარული მიმართულებით და სიგრძეში აღწევს  $90\text{\AA}$ -ს, რის ხარჯზეც, როგორც ჩანს, იზრდება კიდევ წვრილი ძაფის დიამეტრი.



სურ. 126. წვრილი ძაფის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროს. დიფრაქციული სურათი და ორმხრივი ფილტრაცია მოყვანილია სურ. 125b,c-ზე. მოდელის კუთხეში მონაკვეთი შეესაბამება  $100\text{\AA}$ . ნახატზე წარმოდგენილია ერთი პერიოდი.

ჩატარებულია მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროს. წარმოდგენილია მოდელი, რომელიც აგებულია ელემენტარული დისკოს კვეთებისაგან – სისქით  $\Delta' = \Delta/3 = 9,2\text{\AA}$ , და მობრუნების კუთხით  $\alpha' = \alpha/3 = 57^\circ$  (სურ. 126). ტამ<sub>დღ</sub>-ის დროს რეკონსტრუქციული ძაფის დიამეტრი შეადგენს  $140\text{\AA}$ ,

სპირალის პერიოდი, როგორც ზემოთ აღინიშნებოდა, ტოლია  $687 \text{ \AA}$ , ხოლო აქტინის პროტომერის ზომებია  $90 \times 40 \times 30 \text{ \AA}$ . იგი ჩალაგებულია მარჯვნივშემავლიან სპირალში გადატანის მუდმივათი  $27,5 \text{ \AA}$  და თანაფარდობით  $p/q = 25/12$ . გარე დომენის დახრილობის კუთხე სპირალის ღერძის მიმართ შეადგენს, ისევე როგორც ნორმის შემთხვევაში,  $70^\circ$ . ტროპომიოზინის ჭიმი განლაგებულია სპირალის ღერძიდან  $29 \text{ \AA}$ -ის დაშორებით.

ტამ<sub>3დღბ</sub>-ის დროს მიოკარდიუმის წვრილ ძაფში, როგორც ჩანს, მიმდინარეობს აქტინის პროტომერების დინამიური სტრუქტურულ-კონფორმაციული გარდაქმნების მოშლა და მათი დაბალენტროპული მდგომარეობის სტაბილიზება. ტამ<sub>3დღბ</sub>-ის წვრილი ძაფების სპირალების პარამეტრები, ნორმასთან შედარებით, ხასიათდებიან დიამეტრის მომატებით და გადატანის მუდმივას სტაბილიზაციით, რომელიც პრაქტიკულად ხდება შეუცვლელი და  $27,5 \text{ \AA}$  ტოლი. ორივე მოვლენა განპირობებულია ნორმალური აქტინის ძაფის პროტომერებისათვის მახასიათებელი კონფორმაციული გარდაქმნის მოშლით და სტრუქტურის მოქნილობის დაქვეითებით, რის შედეგადაც პროტომერები იწელებიან სპირალის ღერძის პერპენდიკულარული მიმართულებით და ფიქსირდებიან ასეთ კონფორმაციაში – პროტომერი აღარ უბრუნდება ნორმალური აქტინის ძაფის პროტომერისათვის დამახასიათებელ კონფორმაციას.

ტამ<sub>3დღბ</sub>-ის დროს მიოკარდიუმის კონტრაქტილური ცილების სისტემის მიერ ძალის გენერაციის უნარის მკვეთრი დაქვეითება უფლებას იძლევა ჩაითვალოს, რომ წვრილი ძაფის კონფორმაციული ცვალებადობის ხარისხის დაქვეითებას აქვს დიდი ფუნქციონალური მნიშვნელობა. აღმოჩნდა, რომ აღწერილი ცვლილებები ტამ<sub>3დღბ</sub>-ით განპირობებული მძიმე გნ-ის დროს ერთტიპურია მიოკარდიუმის დილატაციური კარდიომიოპათიითა და ანთებითი დაზიანებით განპირობებული ადამიანის ქრონიკული გნ-ის დროს წვრილი ძაფის სტრუქტურისა და კონფორმაციის მოშლისა, და რომ მიოკარდიუმის მიოფიბრილების წვრილი ძაფის სტრუქტურულ-კონფორმაციული ცვალებადობის დაკარგვას აქვს წამყვანი მნიშვნელობა მიოკარდიუმის კუმშვითი ფუნქციის დაქვეითებაში.

### 16.5. აქტინის და წვრილი ძაფების სტრუქტურა (პათოლოგია 2)

2-3 თვიანი ხანგრძლივობის ათირეოზული კარდიომიოპათიის (აკმ<sub>2-3თბ</sub>) შემთხვევაში, ლაპარაკია პრაქტიკულად ტერმინალური გნ-ის შესახებ. აღმოჩნდა, რომ აკმ<sub>2-3თბ</sub>-ის დროს ისევე, როგორც ტამ<sub>3დღბ</sub>-ის შემთხვევაში, მიმდინარეობს მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის სპირალის პარამეტრების სტაბილიზაცია და აქტინის პროტომერების გაწელვა მისი ღერძის პერპენდიკულარული მიმართულებით.

მიოკარდიუმის წვრილი ძაფის სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქციის მონაცემების მიხედვით, აკმ<sub>2-3თბ</sub>-ით განპირობებული გნ-ის დროს, ელემენტარული დისკოს კვეთა  $\Delta' = \Delta/3 = 9,2 \text{ \AA}$ , ხოლო მობრუნების კუთხე  $\alpha' = \alpha/3 = 57^\circ$ . რეკონსტრუირებული ძაფის დიამეტრი აკმ<sub>2-3თბ</sub>-ის დროს შეადგენს  $140 \text{ \AA}$ -ს, სპირალის პერიოდი უდრის  $687 \text{ \AA}$ , ხოლო აქტინის პროტომერის ზომებია  $90 \times 40 \times 30 \text{ \AA}$  (ნორმაში  $65 \times 40 \times 45 \text{ \AA}$ ). წვრილი ძაფის სპირალში ის  $27,5 \text{ \AA}$  გადატანის მუდმივათაა ჩალაგებული და  $p/q = 25/12$  თანაფარდობით. გარე დომენის დახრის კუთხე სპირალის ღერძის მიმართ (ტანგენციალური მდგენელი)  $70^\circ$  ტოლია, როგორც ნორმაში და ტამ<sub>3დღბ</sub>-ის დროს. განხილული პათოლოგია ხასიათდება კონტრაქტილური ცილების სისტემის მიერ ძალის გენერირებისა და ენერჯის ეკონომიურად გარდაქმნის უნარის და  $Ca^{2+}$  პასუხის კოოპერატიულობის ისეთივე მკვეთრი დაქვეითებით, როგორც ტამ<sub>3დღბ</sub>-ისა და ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის დროს. გამოვლენილია წვრილ ძაფებში გადახრების პრინციპულად ერთნაირი მიმართულება მძიმე გნ -ის განვითარების დროს, განურჩევლად მისი გამშვები ფაქტორისა.

## 16.6. დეკორირებული წვრილი ძაფის სტრუქტურა

მიოზინის S-1-ით დეკორირებული წვრილი ძაფის გამოკვლევის დროს, გარდა ტრადიციული მიკროფოტოსურათებისა "arrow-head" ტიპის სტრუქტურით, შეინიშნება ფენოვანი, წვრილი ძაფების პარაკრისტალების ტიპის წარმონაქმნები (გვერდული აგრეგაცია). პირველ შემთხვევაში წვრილი ძაფების და მიოზინის S-1-ის კონცენტრაცია და ურთიერთობის დრო, დაყვანილია მინიმუმამდე (პრეპარატების ხსნარები ერთმანეთში ირევა თვით აპკზე, მიკროსკოპისათვის პრეპერირების დროს), ხოლო მეორე შემთხვევაში ურთიერთქმედება იწყება წვრილი ძაფების პრეპარატის ხსნარში მიოზინის S-1 შეყვანით. პირველი ტიპის მიკროფოტოსურათების ვიზუალური ანალიზის შედეგად დადგინდა, რომ მიოზინის S-1 მოლეკულების დიამეტრები მერყეობს 30 – 40 Å-ის ფარგლებში, ხოლო სიგრძე ~420 Å. ეს მოლეკულები მიერთებულია წვრილ ძაფთან როგორც ნორმის შემთხვევაში, ასევე გნ-ის დროსაც ერთი და იგივე 400 Å პერიოდულობით. მიუხედავად სტრუქტურათა მოჩვენებითი იდენტურობისა ნორმისა და გნ-ის შემთხვევებში, მათი დიფრაქციული სურათები არსებითად განსხვავდება – ორივე შემთხვევაში დიფრაქციული სურათი კი შეესაბამება პარაკრისტალური ტიპის სტრუქტურების, მაგრამ ელემენტარული უჯრედი მჟღავნდება მხოლოდ ერთ პროექციაში. დიფრაქციის მიხედვით თუ ვიმსჯელებთ, გნ-ის დროს აგრეგირებული ძაფების ძირითადი განსხვავება ნორმისაგან არის შექმნილი სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედის სიგანის ორჯერ გაზრდა, რაც მიუთითებს ფენოვან სტრუქტურაში წვრილი ძაფების ერთადერთ შესაძლო ჩალაგებაზე: გნ-ის დროს ძაფების მკვრივი გვერდითი ჩალაგება (შესაძლებელია რამდენიმე ფენაში). ხოლო ნორმის შემთხვევაში – ყოველი მომდევნო ფენა სტრატეგიცირებულია წინა ფენის მიმართ განივი მიმართულებით (ამ შემთხვევაში აუცილებელია მინიმუმ ორი ფენის არსებობა), თანაც ძაფები განლაგებულია ისე, რომ ფოტოგრაფირების სიბრტყეზე პროექციაში, ერთიერთმანეთზე დალაგებულ ფენებში, პირველი ფენის მარჯვენა პროტომერი თანხვდება მეორე ფენის მარცხენა პროტომერს.

ოპტიკურ დიფრაქციულ სურათებზე ფენოვანი ხაზების მიხედვით ყველა ღერძული პერიოდულობების გასაშუალებამ და უფრო ხშირად შემხვედრი რეფლექსების ( $M > 5$ ) შერჩევამ, შესაძლებელი გახდა გამოვლენილიყო ნორმაში, ტამ<sub>3დღბ</sub>-ისა და ატმ<sub>2-3თგბ</sub>-ის დროს დიფრაქციული სურათების სამი ჯგუფი (ცხრილი 25).

გამოკვლეული რეფლექსები სისტემატიზირებულია ჯგუფებად (ერთი და იგივე გადატანის მუდმივას კუთვნილობის მიხედვით). ის, რომ გნ-ის დროს წარმოდგენილია ფენოვანი ხაზების უფრო დიდი რაოდენობა, მიუთითებს პათოლოგიური სტრუქტურის მეტ სტაბილურობაზე. მიღებული მონაცემების საფუძველზე აგებული იქნა გრაფიკული „დიფრაქციული“ სურათები, რომელთა რეალურ დიფრაქციულ სურათებთან შედარების შედეგად შეიძლება აღინიშნოს, რომ საუკეთესო შესაბამისობა შეინიშნება  $n_1$  ნაკრებისათვის. აქედან გამომდინარე, სპირალის ყველაზე ალბათურ პარამეტრებად ნორმაში შეიძლება ჩაითვალოს  $p/q = 13/7$ .

ანალოგიური ანალიზი იქნა ჩატარებული მიოზინის S-1-ით დეკორირებული წვრილი ძაფების დიფრაქციული სურათებისთვის ტამ<sub>3დღბ</sub>-ისა და აკმ<sub>2-3თგბ</sub>-ის შემთხვევებშიც. მიღებული იდენტური შედეგები ამტკიცებს, რომ მითითებული მეთოდებით განსხვავების გამოვლინება აღნიშნულ პათოლოგიებს შორის ჯერჯერობით შეუძლებელია. ამიტომ შემდგომში, ამ თავში, მიზანშეწონილია კონკრეტული პათოლოგიის განსაზღვრის მაგივრად, ვისაუბოთ გნ-ის შესახებ.

გნ-ის დროს პრაქტიკულად ქრება 55 Å პერიოდულობა და მისი რიგები. აგრეთვე იზრდება ფენოვანი ხაზების რაოდენობა, ჩნდებიან უფრო მაღალი პერიოდულობების ფენოვანი ხაზები, რაც ამტკიცებს წვრილი ძაფის სპირალის სტაბილიზაციას გნ-ის დროს.



	$\lambda$	$\tilde{n}_1$	$\tilde{n}_2$	<i>I ჯგუფი</i>		<i>II ჯგუფი</i>		<i>III ჯგუფი</i>	
				$K_{საშ}$ (Å)	M	$K_{საშ}$ (Å)	M	$K_{საშ}$ (Å)	M
ნორმა	1	2	13	330	23	360	5	420	5
	2	4	-11	165	20	180	5	-	-
	5	-3	-9	64	8	-	-	-	-
	6	-1	4	54	33	59	16	-	-
	12	-2	8	27,5	21	29,5	11	35	9
ტამაღლებ	1	2	13	360	19	540	7	420	7
	2	4	-11	180	13	-	-	-	-
	6	-1	4	59	22	91	10	-	-
	7	-12	17	51	7	-	-	-	-
	10	7	-18	37	7	-	-	-	-
	12	-2	8	29,5	16	47	10	35	12
	15	4	10	24,5	8	-	-	-	-
	20	1	-36	17	6	-	-	-	-
	24	9	10	-	-	24,5	8	-	-
	32	-1	9	-	-	17	6	-	-
ატმოსფერო	1	2	13	360	20	540	10	420	9
	2	4	-11	180	15	-	-	-	-
	6	-1	4	59	25	91	16	-	-
	7	-12	17	51	7	-	-	-	-
	10	7	-18	35	8	-	-	-	-
	12	-2	8	30	15	47	15	35	11
	15	4	10	24	10	-	-	-	-
	20	1	-36	18	10	-	-	-	-

შენიშვნები: პირობითი აღნიშვნები

$\lambda$  – ფენოვანი ხაზის ნომერი

$\tilde{n}_1, \tilde{n}_2$  – ბესელის ფუნქციის რიგები

$K_{საშ}$  – გასაშუალებით მიღებული ღერძული პერიოდულობა (Å)

M – ფენოვან ხაზზე რეფლექსების შეხვედრის სიხშირე

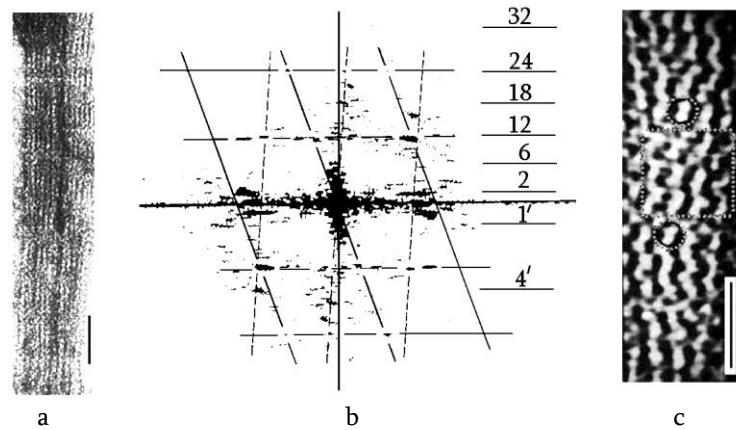
აქვე ავლნიშნავთ პერიოდულობას 48 Å, რომელიც ახასიათებს მიოზინის S-1-ის წვრილ ძაფთან მიერთების პერიოდს (144 Å -ის რეფლექსის მესამე რიგი). როგორც ზემოთ აღინიშნებოდა, ნორმაშიც და გნ-ის დროსაც ეს პარამეტრი უცვლელია ~420 Å (ჩონჩხის კუნთის მაგვარად), ხოლო ხშირად აღრიცხული რეფლექსი 35 Å ( $M = 9$  ნორმა და  $M = 8$  გნ-ის დროს) – განლაგებულია მე-12 ფენოვან ხაზზე და წარმოადგენს უკვე აღნიშნული 420 Å-ის პერიოდულობის მე-12 რიგს. რიგების გამოჩენა მე-12-ზე და არა სხვა რომელიმე ფენოვან ხაზზე გამოწვეულია თვით წვრილი ძაფის სტრუქტურის სპეციფიკით, კერძოდ იმით, რომ, შერჩევის წესის თანახმად, სპირალისთვის  $p/q = 13/7$  მერიდიანალური რეფლექსი უნდა განლაგდეს ან მე-12, ან მე-14 ფენოვან ხაზზე. ხოლო, რათგანაც მიოზინის S-1 ფრაგმენტი მიერთებულია წვრილ ძაფთან ღერძის გასწვრივ, იმეორებს რა მის სტრუქტურას, ამიტომ ძაფზე მისი დასმის პერიოდის შორეული რიგიც უნდა ასახავდეს თვით წვრილი ძაფის პარამეტრებს. გასაშუალების შედეგად მიღებულმა მონაცემებმა დაამტკიცეს, რომ წვრილი ძაფის გაწონასწორებული სტრუქტურის დამახასიათებელი პარამეტრები არის შემდეგი:  $c = 357 \text{ Å}$ ,  $p/q = 13/7$ , ელემენტარული დისკოს სისქე  $\Delta = 27,5 \text{ Å}$ , რაც შეადგენს 55 Å პერიოდულობის ნახევარს, ხოლო ელემენტარული კუთხე  $\alpha \approx 194^\circ$ . რაც შეეხება მიოზინის S-1, მისი დიამეტრი მერყეობს 30 – 40 Å-ის ფარგლებში,

ხოლო სიგრძე  $\sim 420 \text{ \AA}$  და მისი მოლეკულები მიერთებულია წვრილ ძაფთან როგორც ნორმის შემთხვევაში, ასევე გნ-ის დროს ერთნაირი პერიოდულობით  $\sim 420 \text{ \AA}$ .

### 16.7. წვრილი ძაფების პარაკრისტალების სტრუქტურა

ვიზუალურად ნორმალური კარდიომიოციტის ნატურალური წვრილი ძაფის პარაკრისტალების პრეპარატები შეიცავენ ერთტიპობრივ წარმონაქმნებს და, იზოლირებული წვრილი ძაფებისაგან განსხვავებით, შედგებიან სტაბილური ელემენტებისაგან. ნორმალური წვრილი ძაფის შემთხვევაში და  $[Mg^{++}] = 10mM$ -ის პირობებში წარმოიქმნება, ჩვეულებრივი, საკმარისად მსხვილი პარაკრისტალები, აგებული გვერდი გვერდ ჩაწყობილი ნატურალური წვრილი ძაფებისაგან.  $[MgCl_2]$ -ის  $20mM$ -მდე და დიალიზის ხანგრძლივობის 48 საათამდე გაზრდისას, წარმოიქმნება ახალი ტიპის პარაკრისტალი, რომელშიც ძაფები ჩალაგებულია ისე, რომ იქმნება მეზობელი ძაფების „ზედდებითი“ განლაგების შთაბეჭდილება. მეზობელი ძაფები სტრატეგიცირებულია სიბრტყეებზე.

ტამ<sub>3დღ</sub>-ის შემთხვევაში  $10mM [MgCl_2]$ -ის გამოყენებისას და 2 საათიანი დიალიზის შემთხვევაში წვრილი ძაფების პარაკრისტალები არ წარმოიქმნება. კრისტალიზაციის დროის 48 საათამდე გაზრდა ასევე არ იწვევს პარაკრისტალების წარმოქმნას, მაგრამ  $[MgCl_2]$ -ის  $20mM$ -მდე გაზრდისას წარმოიქმნება პარაკრისტალები ძაფების ძალზე მცირე რაოდენობით, რომლებიც სტრუქტურულად არ განსხვავდებიან ნორმალურისაგან. აღწერილ პირობებშიც ვერ მიიღება პარაკრისტალები  $140 \text{ \AA}$  დიამეტრის პატოლოგიურად შეცვლილი წვრილი ძაფებისაგან. მიიღება სრულიად სხვა ეფექტი, კერძოდ, წვრილი ძაფების მჭიდრო ჩალაგება ერთტიპობრივ კრისტალებში, რომლებიც პარამეტრებით არ განსხვავდებიან ნორმალურისაგან, როგორც ნორმის შემთხვევაში, ასევე ტამ<sub>3დღ</sub>-ის დროს. ძაფების დიამეტრი პარაკრისტალში, უშუალოდ მიკროფოტოსურათებზე გაზომვისას, ასევე აღმოჩნდა  $100 \text{ \AA}$ -ის ტოლი, ხოლო პერიოდი –  $700 \text{ \AA}$ . აქედან გამომდინარე შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ამ ცდებში კრისტალიზდება ნორმალური აქტინის ძაფების მცირე რაოდენობა, რომლებიც ჯერ კიდევ არსებობენ პათოლოგიურ პრეპარატში.



სურ. 127. a) პარაკრისტალის მიკროფოტოსურათის საწყისი ფრაგმენტი. (მასშტაბური მონაკვეთი შეესაბამება  $500 \text{ \AA}$ ); b) (a) ფრაგმენტის კომპიუტერული დიფრაქცია; c) ფონიდან გაფილტრული (a) პარაკრისტალი დიდ გადიდებაზე (მასშტაბური მონაკვეთი შეესაბამება  $200 \text{ \AA}$ ). ჩანს პროტომერის სუბდომენური სტრუქტურა (ასეთი ორი პროტომერი ფრონტალურ პროექციაში შემოხაზულია წრეებით). დიფრაქციულ სურათზე მარჯვენა მხარეს ნაჩვენებია ძირითადი (დიფრაქციის ზედა ნაწილი) და ტროპომიოზინური (მის ქვედა ნაწილში) პერიოდულობების ფენოვანი ხაზები.

ყველა დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 127b), პარაკრისტალის ტიპზე დამოუკიდებლად, ძირითადი რეფლექსები განლაგებულია მე-2, მე-12 და 24-ე ფენოვან ხაზებზე (შესაბამისი პერიოდულობებით  $330, 55, 27,5 \text{ \AA}$ ), და არ შეინიშნება რეფლექსების გახლეჩა

24-ე ფენოვან ხაზზე (ნატურალური წვრილი ძაფის შემთხვევაში ამ პერიოდულობას შეესაბამება 28-ე ფენოვანი ხაზი) –ძაფის სტრუქტურა უფრო ხისტია.

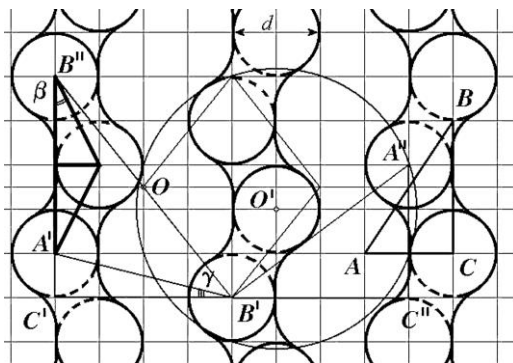
სურ. 127b-ზე წარმოდგენილ დიფრაქციას აქვს რთული სახე, რის გამოც მასზე აგებულია უკუ მესერის ორი ტიპი (უწყვეტი და პუნქტირის ხაზებით). აქტინის ძაფების პოლიმორფიზმის შედეგად, უკუ მესერები შეიძლება მიეკუთვნოს როგორც სხვადასხვა, ასევე ერთი ტიპის პარაკრისტალებს და იყოს განპირობებული ერთი და იგივე ელემენტარული უჯრედის სხვადასხვა პროექციით. უწყვეტი ხაზებით წარმოდგენილი მესერი ასახავს ელემენტარულ უჯრედს  $110 \times 35 \text{ \AA}$ , ხოლო პუნქტირით –  $55 \times 50 \text{ \AA}$ . ეს უჯრედები ერთმანეთის მიმართ ორიენტირებული არიან  $25^\circ$ -ზე მობრუნებით. პირველი ელემენტარული უჯრედისთვის დამატებით შეინიშნება რეფლექსები მე-6 და მე-18 ფენოვან ხაზებზე, რომლებსაც შეესაბამება პერიოდულობები 110 და  $37 \text{ \AA}$ . ეს რეფლექსები არ შედიან ჩვენს მიერ აგებულ უკუ მესერში, რამდენადაც აგებული მესერი შეესაბამება ელემენტარული უჯრედის ნახევარს ( $55 \times 35 \text{ \AA} - 110 \times 35 \text{ \AA}$ -ის ნაცვლად).

მეორე ტიპის ელემენტარული უჯრედი გამოვლინდება პარაკრისტალის მკვეთი სიბრტყის გავლისას მისი ღერძის გასწვრივ (მიმართულება  $110 \text{ Bunn}$ -ის მიხედვით). კრისტალის ეს ორიენტაცია უპირატესია და ამიტომ ყველაზე ხშირად გვხვდება დიფრაქციულ სურათებზე. პირველი ტიპის ელემენტარული უჯრედი განიხილება  $120 \text{ (Bunn)}$  მიმართულების გასწვრივ.

სურ. 127a-ზე წარმოდგენილია საწყისი გამოსახულება, სურ. 127 b-ზე მისი გათვლითი დიფრაქცია, ხოლო სურ. 127c-ზე – ფონისაგან გაფილტრული ნატურალური წვრილი ძაფის პარაკრისტალის გამოსახულება (დიფრაქციული სურათის მიხედვით თუ ვიმსჯელებთ, მისი გარჩევითუნარიანობა  $20 \text{ \AA}$ -ზე მეტია). ფილტრაციის დროს გაშვებული იქნა ორივე უკუმესერზე განლაგებული ყველა რეფლექსი. ყურადღებას იპყრობს აქტინის პროტომერის სუბდომენური სტრუქტურა, რომელსაც გვერდით ორიენტაციაში აქვს თირკმლის მაგვარი ფორმა და მიმაგრებულია სპირალის ღერძთან, ფილტრაციაზე უხილავი, მაგრამ წვრილი ძაფის რეკონსტრუირებულ მოდელებზე არსებული „წანაზარდით“.

გარე დომენის სიგანე, ელემენტარული უჯრედიდან გამომდინარე, შეადგენს  $35 \text{ \AA}$ , ხოლო სიმაღლე –  $55 \text{ \AA}$ . კუთხე, რომელსაც ის ჰქმნის სპირალის ღერძთან (ტანგენციალური მდგენელი)  $\approx 25^\circ$ . როგორც ჩანს, ეს გამოწვეულია იმით, რომ ადრე ხსენებული სტრუქტურების გამოსახულებები მოცემული გარჩევითუნარიანობისას ფორმირდება პროტომერების ფრონტალური და გვერდითი პროექციების სუპერპოზიციის შედეგათ.

ჩატარებულია პარაკრისტალის ფილტრირებული გამოსახულების დეტალური ანალიზი (სურ. 127c-ზე ჩარჩოთი გამოყოფილი უბანი) პროტომერის ზომისა და პარაკრისტალში წვრილი ძაფის პარამეტრების დასაზუსტებლად. ამისათვის მრავალჯერ გადიდებული გამოსახულება მოთავსდა მასშტაბურ ბადეზე კვადრატული უჯრებით და 1 და 2 სუბდომენების რადიუსის ტოლი ბიჯებით. სურ. 128-ზე წარმოდგენილია ამ ოპერაციის შემდეგ გაკეთებული ნახაზი.



სურ. 128. მასშტაბურ ბადეზე მოთავსებული პარაკრისტალის 1 და 2 სუბდომენების ურთიერთორიენტაცია, ამ ბადის უჯრების ზომები სუბდომენების რადიუსების ტოლია. ნახაზი შედგენილია სურ. 127c-ს საფუძველზე. დიდი გარშემოწერილობის დიამეტრი ტოლია  $\Phi \cdot d$ . გამოსახულების ანალიზი გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოთ აგებული „ოქროს კვეთაში“ და განვსაზღვროთ როგორც წვრილი ძაფის, ასევე თვით აქტინის პროტომერის ზუსტი პარამეტრები.

სამკუთხედები  $ABC, A'B'C', A''B''C''$  (იხ. სურ. 128) ყურადღებას იპყრობენ იმით, რომ მიღებული თანაფარდობებიდან მათი ჰიპოტენუზებისათვის შედგება „ოქროს პროპორცია“ ( $\Phi \cdot d$ , სადაც  $\Phi \approx 1,618$  – ოქროს პროპორცია;  $d$  – სუბდომენის დიამეტრი).  $A'B'$  მონაკვეთზე 0 წერტილის პროექცია ყოფს მას „ოქროს კვეთაში“, ხოლო გარშემოწერილობაზე, რომლის ცენტრია  $O'$  და რადიუსია  $\Phi \cdot d$ , სიმეტრიულად განლაგდება აქტინის პროტომერების მეზობელი კვეთები (სურ. 128). თუ დავუშვებთ „ოქროს კვეთის“ არსებობას პარაკრისტალში, მაშინ სურ. 128-ის საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი შეფასებები: წვრილი ძაფის დიამეტრი ტოლია  $D = 7d/2$ , სადაც  $d$  – სუბდომენის დიამეტრია ( $d = 27,5$ ),  $\angle\beta$  აქტინის პროტომერის დახრილობა (ტანგენციალური მდგენელი  $ABC$  სამკუთხედის ანალიზის საფუძველზე)  $= 26^{\circ}34'$ ,  $\angle\gamma$  ( $A'B'B'$  სამკუთხედის ანალიზის საფუძველზე)  $= 14^{\circ}2'$ , ხოლო  $ABC$  სამკუთხედის ანალიზის საფუძველზე მიღებული ელემენტარული კუთხე  $\angle\alpha = 187^{\circ}55'$ . აქედან შეიძლება გამოითვალოს სპირალის პარამეტრების ზუსტი მნიშვნელობები  $p/q = 1,9149$ . სურ. 128 საფუძველზე, წვრილი ძაფის სპირალის პერიოდი  $c = 687,5 \text{ \AA}$  და, რადგანაც  $\Delta = c/p = 27,5 \text{ \AA}$ , შეიძლება ვიპოვოთ  $p = 687,5/27,5 = 25$ , აქედან გამომდინარე,  $q = p/1,9149 = 13$ .

სპირალის პარამეტრების და აქტინის პროტომერების ზომების შედარებითი ცხრილი პარაკრისტალსა და ნატურალურ წვრილ ძაფებში

ცხრილი 26

	განსაზღვრის მეთოდი, ჯგუფი	$c$ (Å)	$D$ (Å)	$p$	$q$	$\alpha$	$\Delta$ (Å)	პროტომერის ზომები (Å)
პარაკრისტალი	ფილტრაცია	700	100	28	13	$167^{\circ}$	27,5	$65 \times 55 \times 40$
	ოქროს კვეთი	687,5	96,25	25	13	$187^{\circ}55'$	27,5	$65 \times 55 \times 40$
	გასაშუალება	700	100	28	13	$167^{\circ}$	27,5	$65 \times 50 \times 40$
ნატურალური ძაფი	ნორმა	620 800	100	28 25 21 26	13 12 10 12	$167^{\circ} - 171^{\circ}$	24,5- 30,5	$65 \times 45 \times 40$
	პათოლოგია	570 1100	140	25 21	12 10	$171^{\circ} - 172^{\circ}$	26,5- 28,5	$90 \times 30 \times 40$

დაახლოებით ასეთივე პარამეტრები გააჩნია წვრილი ძაფის სპირალს პარაკრისტალში (სპირალის პერიოდი  $700 \text{ \AA}$ , დიამეტრი  $100 \text{ \AA}$ , გადატანის მუდმივა  $27,5 \text{ \AA}$ ), გამოვლენილი მათი გამოსახულებების კომპიუტერული შეჯერების დროს, სხვადასხვა ფენების პროტომერების სუპერპოზიციის შედეგად. გამოსახულების დამუშავების ამ ხერხმა გამოავლინა გარე დომენის სუბდომენური სტრუქტურა, მაგრამ შიდა დომენი მაინც „არ ვლინდება“ (გამოსახულების დაბალი სიმკვრივე) კონტრასტორის ჭარბი დაგროვების გამო. სუბდომენ-1-ის ზომები ამ პროექციაში  $30 \times 23 \text{ \AA}$  ტოლია, სუბდომენ-2 -ის კი –  $41 \times 32 \text{ \AA}$ . ორივე დომენის სიგანე ფრონტალურ პროექციაში  $39 \text{ \AA}$ -ია. ამგვარად, გარე დომენის საშუალო ზომებია  $35 \times 55 \times 39 \text{ \AA}$ , მთლიანი პროტომერისა კი:  $65 \times 50 \times 40 \text{ \AA}$ .

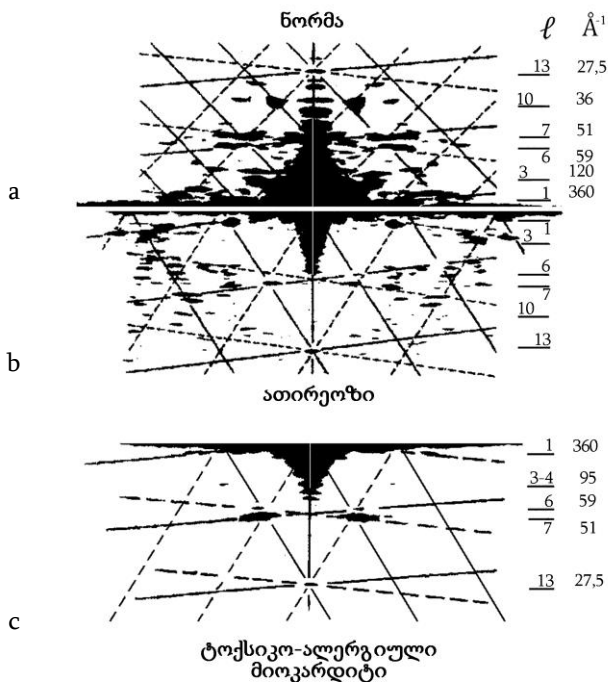
გამოსახულებათა გაფილტვრისა და გასაშუალების სამი მეთოდით მიღებული პროტომერების ზომების შედარება საფუძველს იძლევა გაკეთდეს დასკვნა იმის თაობაზე,

რომ მიღებული პარამეტრები კარგად კორელირებენ ერთმანეთთან. გასაშუალებული პარაკრისტალებიდან მიღებული სურათები უფრო კონტრასტულია, რის გამოც პროტომერების ზომები უფრო მცირეა, ვიდრე ზემოთ განხილულ შემთხვევებში (ფაქტიურად, იზომება მანძილები უმაღლესი სიმკვრივის უბნებს შორის). სამივე ვარიანტის ზომების შედარება საშუალებას იძლევა იმ ფაქტის კონსტატირება, რომ პროტომერის ზომები მის გვერდით პროექციაში განსხვავდება მხოლოდ სიმაღლეში (ცხრილი 26). ეს კი შეიძლება აიხსნას პარაკრისტალის სპეციფიკიდან გამომდინარე. იმით, რომ როგორც ჩანს, ფენები დაცურებულია ერთმანეთის მიმართ (მათი ღერძის გასწვრივ)  $5 \text{ \AA}$  და, „ნატურალური გასაშუალების“ შედეგად, რომელიც სრულდება ამ ფენების სუპერპოზიციის დროს, „იცხრილება“ პროტომერების პერიფერიული უბნები, ანუ მისი ბოლოები.

ამგვარად, ნაჩვენებია, რომ პარაკრისტალები, რომლებიც თავისი ბუნებით წარმოადგენენ სტაბილურ წარმონაქმნებს, შეიცავენ კონფორმაციულად „გაყინულ“ წვრილ ძაფებს, რომლებიც ხასიათდებიან სტრუქტურული პარამეტრების გაწონასწორებული მნიშვნელობებით. ასეთ პარაკრისტალში პროტომერის სტრუქტურა „იყინება“ ნორმალური წვრილი ძაფისათვის მახასიათებელ გაწონასწორებულ კონფორმაციაში, რომლისგანაც (მაგალითად, პათოლოგიის შემთხვევაში) გადახრა ვერ იქნა მიღებული.

### 16.8. სტრუქტურული განსხვავება ნორმასა და გნ-ის დროს

ამ თავში განიხილება ელექტრონული მიკროსკოპიის მეთოდით გამოვლენილი სტრუქტურული განსხვავებები ერთის მხრივ ნორმალური მიოკარდიდან მიღებული წვრილი ძაფისა, ხოლო მეორეს მხრივ მიოკარდიდან აკმ<sub>2-3</sub>თვხ-ით და ტამ<sub>10</sub>დღხ-ით (შემდგომში, აკმ და ტამ) გამოწვეული გულის ნაკლოვანების (გნ) დროს.

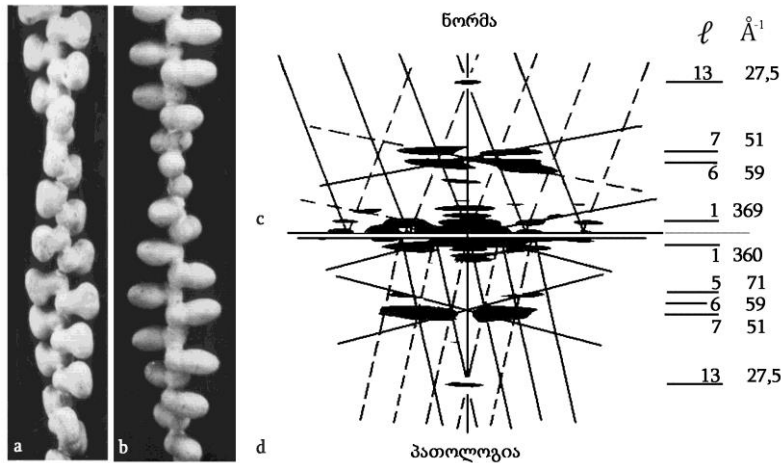


სურ. 129. გასაშუალებული ოპტიკური დიფრაქციული სურათები მიღებული მიოკარდიუმის წვრილი ძაფებისაგან. ნორმისა და პათოლოგიის უკეთ შედარებისთვის წარმოდგენილია მათი ნახევრები: (a) ნორმა, (b) აკმ, (c) ტამ. დიფრაქციულ სურათებზე დატანებულია უკუ მესერი, ხოლო მარჯვენა მხრიდან აღნიშნულია ფენოვანი ხაზები და მითითებულია მათი შესაბამისი პერიოდულობები. ფენოვანი ხაზების სვეტში, მარჯვენა მხარეს მითითებულია ძირითადი პერიოდულობებისათვის შესატყვისი ფენოვანი ხაზები, მარცხნივ კი – „აკრძალულისათვის“.

გასაშუალებულ ოპტიკურ დიფრაქციულ სურათზე, რომელიც მიღებულია ნორმალური წვრილი ძაფიდან (სურ. 129a), წარმოჩენილია ძირითადი პერიოდულობების რეფლექსები. ეს რეფლექსები განლაგებულია 1-ლ, მე-6, მე-7 და მე-13 ფენოვან ხაზებზე შესაბამისი პერიოდულობით  $360; 59; 51$  და  $27,5 \text{ \AA}$ . შეინიშნება აგრეთვე „აკრძალული“ რეფლექსები: მე-3 და მე-10 ფენოვან ხაზებზე (მათ შეესაბამება  $120$  და  $36 \text{ \AA}$  პერიოდულობები). გარდა ამისა, შეინიშნება  $55 \text{ \AA}$  პერიოდულობის შესაბამისი „აკრძალული“ რეფლექსები (მთლიან ფენოვან ხაზებზე არ ლაგდება), რომლებიც შეიძლება იყოს ინტერპრეტი-

რებული, როგორც აქტინის პროტომერის რთული ფორმით გამოწვეული ნეგატიური კონტრასტირების არტეფაქტი.

გასაშუალებულ ოპტიკურ დიფრაქციულ სურათებზე, რომლებიც მიღებულია წვრილი ძაფიდან აკმ-ისა და ტამ-ის დროს (სურ. 129b,c), ძირითადი პერიოდულობის შესატყვისი რეფლექსები, როგორც ეს ნორმის დროს აღინიშნებოდა, განლაგებულია 1-ლ, მე-6, მე-7 და მე-13 ფენოვან ხაზებზე. მაგრამ, ნორმისაგან განსხვავებით, მე-6 ფენოვან ხაზზე განლაგებული რეფლექსების ინტენსივობა მე-7 ფენოვან ხაზთან შედარებით ძალზე სუსტია მაშინ, როცა ნორმაში მათი ინტენსივობა ერთნაირია. აკრძალული რეფლექსები მე-3, მე-10 ფენოვან ხაზებზე, და 55 Å პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე, პრაქტიკულად ქრება.



სურ. 130. ნორმალური (a) და პათოლოგიური (b) წვრილი ძაფების ჰიპოტეტური მოდელების ფოტოსურათები და მათი ოპტიკური დიფრაქციული სურათები (c)-ნორმა, (d)- პათოლოგია (წარმოდგენილია დიფრაქციული სურათების ნახევრები).

წვრილი ძაფის სტრუქტურის სტაბილიზაციის ხარისხი (კონფორმაციის ცვალებადობის უნარის დაქვეითება) ტამ-ის დროს იკავებს შუალედურ მდგომარეობას ნორმალური მიოკარდიუმის ძაფის სტაბილურობასა და აკმ-ის შორის – ცენტრალური მაქსიმუმი ტამ-ის დროს ნორმაზე მცირეა, მაგრამ მეტია, ვიდრე აკმ-ის შემთხვევაში. ყურადღებას იპყრობს ის ფაქტი, რომ წვრილი ძაფების გაფილტრულ დიფრაქციულ სურათებზე აკმ-ის და, განსაკუთრებით ტამ-ის დროს, რეფლექსების რიცხვი მთელს ველზე მცირდება, „აკრძალული“ რეფლექსები კი საერთოდ ქრება, მაშინ, როცა გაუფილტრავ სურათებზე აკმ-ის დროს ისინი არაა ნორმაზე ნაკლები, ხოლო ტამ-ის დროს მნიშვნელოვნად მეტიც კია. ეს ფაქტები იმაზე მეტყველებენ, რომ წვრილი ძაფის სტრუქტურა ტამ-ის დროს ისევე, როგორც აკმ-ის დროს, სტაბილიზებულია, მაგრამ ტამ-ის შემთხვევაში მისი კონფორმაცია ნაკლებად „გაფუებულია“ და უფრო მეტად ექვემდებარება მექანიკურ დეფორმაციას. გასაშუალებულ დიფრაქციულ სურათზე რჩება ის რეფლექსები, რომლებიც აღწერენ თვით სტრუქტურას (დაკავშირებულია პერიოდულობებთან, რომლებსაც აქვთ არა შემთხვევითი, არამედ კანონზომიერი ხასიათი). წვრილი ძაფების დიფრაქციულ სურათებზე ნორმაში დიდი რაოდენობით აღინიშნება „გახლეჩილი“ რეფლექსები, რომლებიც ხასიათდებიან  $n > 1$ . ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ხსენებული რეფლექსები განლაგებულია დისკრეტულად ფიქსირებულ ადგილებზე – თითოეული ძაფის დიფრაქციული სურათები სტაბილურია, ხოლო სხვადასხვა ძაფისა – ხასიათდება მახლობელი, მაგრამ განსხვავებული პარამეტრებით.

ნორმალური და პათოლოგიური მიოკარდიუმის აქტინის ძაფების სპირალის პარამეტრებზე დაყრდნობით აგებული ტროპონინ-ტროპომიოზინის ჭიმებს მოკლებული (F-აქტინის ძაფების) მოდელები მოყვანილია სურ. 130a,b-ზე. ამ მოდელებში F-აქტინის ძაფი წარმოდგენილია ერთჭიმიანი სპირალების სახით პარამეტრებით  $p = 13$ ,  $q = 7$ , და

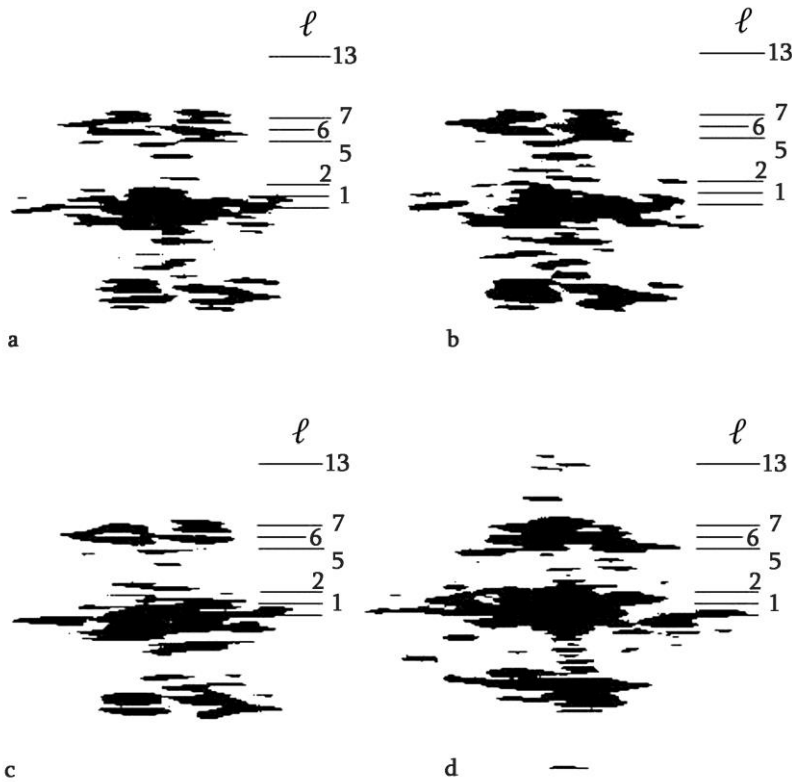
ერთის ტოლი სპირალის შემავლობით. ნორმის შემთხვევაში (სურ. 130a) აქტინის პროტომერს აქვს T-მაგვარი ფორმა, აგებულია ელიფსოიდებისაგან დიამეტრით 30 Å და შედგება დომენებისაგან. ამ სტრუქტურის ზემო ნაწილის (მცირე დომენის) სიგრძეა 55 Å, ხოლო ფუძის სიგრძე (დიდი დომენი) – 30 Å. ძაფში მეზობელ პროტომერებს შორის კონტაქტი ხორციელდება დიდი დომენების მეშვეობით, ხოლო მცირე დომენები დამატებით იყოფა ორ სუბდომენად. ყოველი ორი მეზობელი პროტომერი შეერთებულია ერთმანეთთან დიდი დომენების ზედდებით, თანაც მანძილი ერთმანეთისადმი ანტიპარალელური პროტომერების დიდ ღერძებს შორის, F-აქტინის ძაფის ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეზე პროექციაში, 20 Å-ის ტოლია, ხოლო სპირალის ღერძზე პროექციაში (გადატანის მუდმივა) – 27,5 Å. პათოლოგიის შემთხვევაში (სურ. 130b), პროტომერის გრძელი ღერძი წვრილი ძაფის ღერძის პერპენდიკულარულია რითიც პროტომერის სტრუქტურა მისი წრაფის I-მაგვარი ფორმისაკენ დიამეტრით 30 და სიგრძით 80 Å. „არაკონტრასტირებული“ მოდელების დიფრაქციული სურათები (სურ. 130c,d) პირველ მიახლოებაში საკმაოდ კარგად კორელირებენ წვრილი ძაფის შესაბამის დიფრაქციულ სურათებთან (სურ. 129 a,b,c).

წვრილი ძაფის სტრუქტურის შეფარდებითი დინამიურობისა და მასში შემავალი პროტომერების კონფორმაციული მოძრაობის აღსადგენად იყო გამოყენებული წვრილი ძაფების კომბინირებული მოდელები, ნეგატიური კონტრასტირების იმიტაციით, და იყო მიღებული მათი რენტგენის სურათები. შერჩეულია შემდეგი კომბინაციები:

- ა) სტრუქტურის 1/3 ნორმალური ძაფი + 2/3 – „პათოლოგიური“;
- ბ) სტრუქტურის 1/2 ნორმალური ძაფი + 1/2 – „პათოლოგიური“;
- გ) სტრუქტურის 2/3 ნორმალური ძაფი + 1/3 – „პათოლოგიური“;
- დ) ერთი „კომპლემენტარული“ ძაფი ნორმალური, მეორე კი „პათოლოგიური“,

რომლებიც მოდელებს აახლოვებს რეალურ სტრუქტურებთან, რამდენადაც „ცოცხალ“ ძაფში არ შეიძლება არსებობდეს გაყინული კონფორმაცია, ის უნდა გამუდმებით იცვლებოდეს. ასეთი მოდელებიდან მიღებულ დიფრაქციულ სურათებზე (სურ. 131) აღინიშნება 1-ლი, მე-2, მე-5, მე-6, მე-7 და მე-13 ფენოვანი ხაზები. თანაც კომბინაციასთან დამოკიდებულებით იცვლება შეფარდებითი ინტენსივობა და მათზე განლაგებული რეფლექსების სიმეტრია, მათი კოორდინატები და, რეალური დიფრაქციული სურათების ანალოგიურად (სურ. 129), შეინიშნება აკრძალული რეფლექსები – განლაგებული 55 Å პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე.

კომბინირებული მოდელებიდან მიღებულ დიფრაქციულ სურათებზე საინტერესოა ის კომბინაციები, სადაც სჭარბობს, ანდა ნორმის ტოლია პათოლოგიური სტრუქტურების წილი (სურ. 131a,b,d). ამ შემთხვევაში გამოიკვეთება მე-5 ფენოვანი ხაზი, რომელიც ჩნდება „პათოლოგიური“ ძაფის მოდელის დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 130d). რეფლექსებს ამ ფენოვან ხაზზე, შერჩევის წესის საფუძველზე, შეესაბამება  $n = 3$ . რეფლექსების ჯგუფი, რომლებიც ხასიათდებიან ბესელის ასეთივე რიგით, შეინიშნება მე-5 ფენოვანი ხაზის საზღვრებში წვრილი ძაფის გასაშუალებულ დიფრაქციულ სურათებზე აკმ-ის დროსაც (სურ. 129b). კომბინირებული მოდელების დიფრაქციულ სურათებზე, რომლებზეც სჭარბობს აქტინის ნორმალური პროტომერების წილი (სურ. 131c), და ნორმალური წვრილი ძაფის მოდელიდან მიღებულ დიფრაქციულ სურათებზე (სურ. 130c) ამ რეფლექსების არ არსებობა მიუთითებს აქტინის პროტომერების განსხვავებულ ფორმებზე ორ სხვადასხვა მდგომარეობაში – ნორმალურ და პათოლოგიაში. ეს აიხსნება პროტომერის მოლეკულური ტრანსფორმანტის ცვლილებით, რაც სცვლის შესაბამისი დიფრაქციული მაქსიმუმების ფაზებს და სპირალის ტრანსფორმანტასთან ნახვევისას მიჰყავს განსაზღვრული რეფლექსების ჩაქრობისკენ.



სურ. 131. ოპტიკური დიფრაქციული სურათები წვრილი ძაფების „კომბინირებული“ „კონტრასტირებული“ მოდელებიდან: ა) სტრუქტურის 1/3 ნორმალური ძაფი + 2/3 – „პათოლოგიური“; ბ) სტრუქტურის 1/2 ნორმალური ძაფი + 1/2 – „პათოლოგიური“; გ) სტრუქტურის 2/3 ნორმალური ძაფი + 1/3- „პათოლოგიური“; დ) ერთი „კომპლემენტარული“ ძაფი ნორმალური, მეორე კი – „პათოლოგიური“.

როგორც უკვე აღინიშნა, კომბინირებული ძაფების დიფრაქციულ სურათებზე, იმ შემთხვევაში, როცა ნორმალურს სჭარბობს პათოლოგიური სტრუქტურები, ჩნდება მე-5 ფენოვანი ხაზი. რეფლექსები, რომლებიც განლაგებულია ამ ფენოვან ხაზზე, შეესაბამებიან 71,5 Å-ის პერიოდულობას და განლაგებულია  $n = 3$  უბანში. ამ შემთხვევაში შენარჩუნებულია მე-6 ფენოვანი ხაზის რეფლექსები, რომლებიც ქრებიან მხოლოდ წვრილი ძაფის პათოლოგიისაკენ სრული გარდაქმნის დროს (სურ. 130d). კომბინირებული მოდელების ყველა დიფრაქციულ სურათზე, სურ. 131d-ზე წარმოდგენილის გარდა, „არაკონტრასტირებული“ მოდელებისაგან განსხვავებით (სურ. 130c,d), არ არსებობენ რეფლექსები მე-13 ფენოვან ხაზზე, სამაგიეროდ შეინიშნება მერიდიანული რეფლექსები 55 Å პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე, რომელიც აგრეთვე შეინიშნება სურ. 131d-ზე. იმ შემთხვევაში, როდესაც კომბინირებულ მოდელებში ნორმალური და პათოლოგიური პროტომერები განლაგებულნი არიან კომპლემენტარულად, დიფრაქციულ სურათზე (სურ. 131d) მჟღავნდება მერიდიანალური ასიმეტრია. შეინიშნება ძლიერი მერიდიანალური რეფლექსებიც 55 Å პერიოდულობის შესაბამის ფენოვან ხაზზე და რეფლექსების გახლეჩა მე-13 ფენოვან ხაზზე, რაც, ეჭვსგარეშეა, აახლოვებს განხილულ კომბინირებულ მოდელებს რეალურ სტრუქტურასთან. ამასთან რეფლექსები მე-6 ფენოვან ხაზზე ერწყმიან 55 Å პერიოდულობის შესაბამის მერიდიანულ რეფლექსებს. ეს მოვლენა წარმოადგენს იმის ილუსტრაციას თუ როგორ იცვლება მთელი სტრუქტურის დიფრაქციული სურათი მოლეკულური ტრანსფორმანტის შეცვლისას. მიღებული მონაცემებიდან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ პროტომერის სტრუქტურაში ცვლილებებზე მიუთითებს მე-5 ფენოვანი ხაზის გაჩენა, ხოლო მის სრულ გარდაქმნაზე პათოლოგიისაკენ – მე-6 ფენოვან ხაზზე რეფლექსების გაქრობა.

აკმ-ის დროს რეფლექსების გაჩენა მე-5 ფენოვან ხაზზე ადასტურებს აქტინის პროტომერის ფორმის გაწელებას თავისი ღერძის გასწვრივ. ტამ-ის დროს ეს ფენოვანი ხაზი არ არსებობს. ამ შემთხვევაში, როგორც ჩანს, პროტომერი მთლიანად არ „გაიშლება“,



მაშინ, როდესაც აკმ-ის შემთხვევაში „გაშლა“ უკვე სრულია. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, პათოლოგია, სიმძიმის ხარისხზე დამოკიდებულებით, იწვევს აქტინის პროტომერის გადახრას ორ ალტერნატიულ კონფორმაციას შორის თავისი ღერძის გასწვრივ გაწეილი მდგომარეობისაკენ. ამას ეთანხმება ისიც, რომ ერთეული აქტომიოზინური ანსამბლი აკმ-ის შემთხვევაში ანვითარებს 2,5-ჯერ ნაკლები ძალის გენერაციას, ვიდრე ტამ-ის შემთხვევაში.

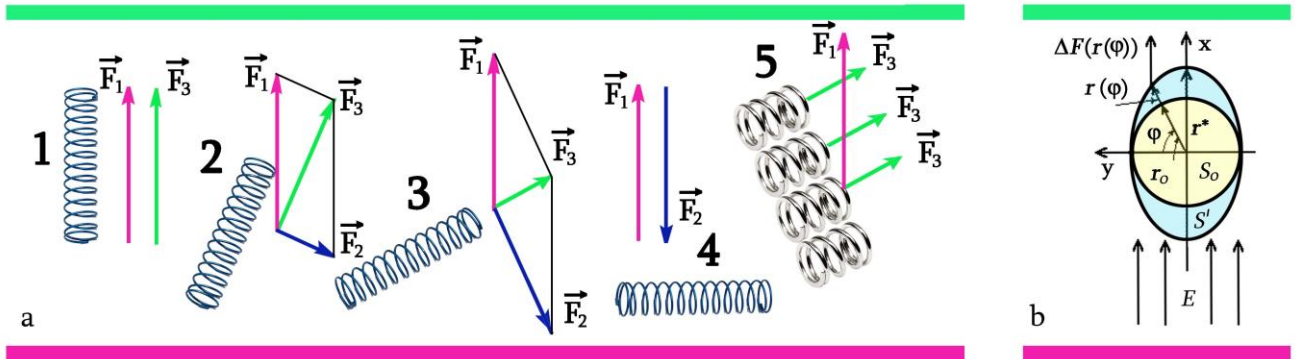
### 16.9. წვრილი ძაფები ერთგვაროვან ელექტრულ ველში.

როგორც უკვე აღინიშნებოდა, ცილოვანი სტრუქტურები წარმოადგენენ დიელექტრიკებს, ყველა აქედან გამომდინარე შედეგით. ეს კი ნიშნავს, რომ ცილების ელექტრულ ველში მოთავსებისას, შესაძლებელია მათი პოლარიზაცია, შემდეგ კი პოლარიზებული მოლეკულების ურთიერთობა აღნიშნულ ელექტრულ ველთან. ვინაიდან ცილები თავისი ბუნებიდან გამომდინარე წარმოადგენენ დინამიურ სტრუქტურებს, მათი ურთიერთობა ელექტრულ ველთან გამოიწვევს სტრუქტურის დეფორმირებას. თანაც საინტერესოა, რომ სტრუქტურის დეფორმირება შესაძლებელია მხოლოდ იმ მიმართულებით, რომელიც განსაზღვრულია მისი თავისუფლების ხარისხებით. ამ ფაქტის გასაშუქებლათ ჯობია მივმართოთ მარტივ მაგალითს.

ვთქვათ ჩვენ გვაქვს რაღაც „ძალოვანი დანადგარი“, რომელშიც ორ სიბრტყეს შორის მოქმედებენ რაღაცა ძალები. ახლა კი განვიხილოთ „არაჩვეულებრივი“ ზამბარა, რომელსაც გააჩნია მხოლოდ ერთი თავისუფლების ხარისხი – ის მხოლოდ იწელება, მოღუნვა კი შეუძლებელია. თუ კი ამ ზამბარას მოვთავსებთ „ძალოვანი დანადგარის“ შემონაფენებს შორის, მაშინ ამ დანადგარის ველში ორიენტაციიდან გამომდინარე, ის სხვადასხვაგვარად მოიქცევა. სურ. 132a-ზე მოყვანილია ძალოვანი ველში ზამბარის ორიენტირების ოთხი ვარიანტი. აქვე დავძენტ, რომ იმისათვის რომ სურათი არ გადაიტვიტოს გრაფიკული ელემენტების დიდი რაოდენობით, მასზე დატანილია ვექტორების მხოლოდ ის ნაწილი, რომელიც გვჭირდება აღნიშნული მოვლენის აღწერისათვის. „ძალოვანი დანადგარის“ მხრივ მოქმედი ძალები ( $\vec{F}_1$ ) მონიშნულია წითელი ფერის ვექტორებით, ხოლო ზამბარის გამწელი ძალები ( $\vec{F}_3$ ) (მიმართულება განისაზღვრება თავისუფლების ხარისხით) – მწვანე ფერით. ეხლა კი განვიხილოთ ყველა ვარიანტი ცალ ცალკე:

1. ზამბარა ძალოვანი ველში ორიენტირებულია მასში მოქმედი ძალების ( $\vec{F}_1$ ) პარალელურად. ამ შემთხვევაში არანაირ ძალთა დაშლას არა აქვს ადგილი და ის სრულად მიდის ზამბარის გასაჭიმად ( $\vec{F}_3$ ) ( $\vec{F}_1 = \vec{F}_3$  ვექტორები ერთი სიგრძისაა).
2. ზამბარა ოდნავ გადახრილია წინა შემთხვევაში განხილული ვერტიკალური მდგომარეობიდან. ამ შემთხვევაში წარმოიქმნება დამატებითი ძალთა წყვილი ( $\vec{F}_2$ ), რომელიც ცდილობს შემოატრიალოს ზამბარა და მოათავსოს ძალოვანი ველის ვექტორის გასწვრივ ( $\vec{F}_1$ ). სურათზე მოყვანილია ძალთა წყვილის მხოლოდ ერთი ძალა – ზამბარისადმი პერპენდიკულარული ლურჯი ფერის ისარი ( $\vec{F}_2$ ). საჭიროა ყურადღების მინიშნება იმ გარემოზე, რომ „ძალოვანი დანადგარის“ მხრივ ყველა მოქმედი ძალა ერთი სიდიდისაა (ყველა წითელი ისარი ერთი სიგრძისაა). ჩვენს მიერ განხილულ მაგალითში ზამბარის გამწელი ძალა ( $\vec{F}_3$ ) (მწვანე ფერის ისარი), რომელიც მიიღება  $\vec{F}_1$  და  $\vec{F}_2$  ძალების დაშლისას, იქნება უფრო მოკლე ვიდრე პირველ შემთხვევაში.
3. ზამბარა კიდევ უფრო დახრილია ვერტიკალური მიმართულებიდან. ნათელია, რომ აქაც უნდა განიხილოს ძალთა წყვილი. ლურჯი ვექტორის სიგრძე ( $\vec{F}_2$ ), რომელიც ცდილობს მოათავსოს ზამბარა ველის მიმართულებით, უკვე მეტია, ვიდრე მეორე შემთხვევაში, ხოლო მწვანესი ( $\vec{F}_3$ ) პირიქით – ნაკლები.

4. და ბოლოს ზღვრული შემთხვევა, როდესაც ზამბარა „ძალოვანი ველისადმი“ მკაცრად პერპენდიკულარულია. ამ შემთხვევაში  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ , ძალდაშლა აღარ მიმდინარეობს ( $\vec{F}_3 = 0$ ) და ზამბარა არ გაიწელება. საჭიროა განსაკუთრებით აღინიშნოს, რომ ასეთი უკიდურესი შემთხვევის ალბათობა ძალზე მცირეა, ვინაიდან ასეთი მდგომარეობიდან უმნიშვნელო გადახრაც კი გამოიწვევს ძალთა დაშლას, და როგორც შედეგი გამწელი ძალის წარმოქმნას.



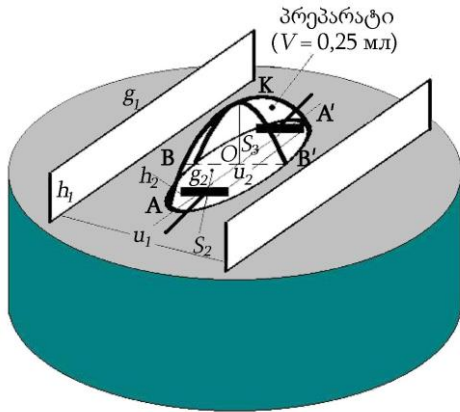
სურ. 132. (a) მწვანე და წითელ ხაზებს შორის, წითელი ფერის ისრებით მონიშნული მიმართულებით, მოქმედებენ ნებისმიერი ტიპის ძალები. ამ „ძალოვან დანადგარში“ მოვათავსოთ მხოლოდ ერთი თავისუფლების დერძის მქონე ზამბარა (ანუ, მას არ შეუძლია მოღუნვა, შეუძლია მხოლოდ გაწევა). (1,2,3,4) ზამბარის ორიენტაციის ვარიანტები. (5) წვრილი ძაფის წარმოდგენა მოკლე ზამბარების ნაკრების სახით (გააჩნია თავისუფლების ერთი ხარისხი, რომელიც მონიშნულია მწვანე ფერის ისრებით). (b) მწვანე და წითელ ხაზებს შორის, შავი ფერის ისრებით მონიშნული მიმართულებით, მოქმედებენ ელექტრული ბუნების ძალები. მოყვანილია წვრილი ძაფის განიკვეთის სქემა გარე ელექტრული ველის მიდებამდე და მიდების შემდეგ. ისრებით მონიშნებულია ველის მიმართულება ( $E$ ).  $S_0$  – განიკვეთის ფართი  $E = 0$  შემთხვევაში, ხოლო  $S'$  – როდესაც  $E > 0$ . ფართის ნამატი ნახატზე მონიშნულია ცისფერი ფერით.

ასე რომ, შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ „ძალოვან ველში“ ზამბარის ორიენტაციის მიუხედავად, მასზე მოქმედებენ გამწელი ძალები (ძალები, რომელსაც თვით სისტემა განსაზღვრავს მასში არსებული თავისუფლების ხარისხების რაოდენობის მიხედვით). ამ ყველაფრის გათვალისწინებით შეიძლება აქტინის პროტომერების მოდელირება მოკლე ზამბარების სახით, რომელთაც გააჩნია მხოლოდ ერთი თავისუფლების ხარისხი (შეუძლიათ გაწევა თავისი დერძის გასწვრივ) და რომლებიც ჩალაგებულია „ფიბრილარულ სტრუქტურაში“. განვიხილოთ ეს მოდელი შემდეგი პუნქტით.

5. „ძალოვან ველში“ ( $\vec{F}_1$ ) მოთავსებულია ჩვენი „ფიბრილარული სტრუქტურა“ ნებისმიერი ორიენტაციით. აგებულ სტრუქტურაში „პროტომერ-ზამბარებს“ შეუძლიათ გაიწელონ გამწელი ძალის მიმართულებით ( $\vec{F}_3$ ). შეიძლება ავღნიშნოთ, რომ „ფიბრილარული სტრუქტურის“ მთელ სიგრძეზე იმოქმედებენ ერთი სიდიდის გამწელი ძალები (რა თქმა უნდა იმ პირობით, თუ თვით ძაფი წარმოადგენს წრფეს, ანუ „პროტომერები“ და მათსადაც  $\vec{F}_3$  ვექტორები ერთმანეთის პარალელურია). ამ მოდელის ნახვა შეიძლება სურ. 132a-ზე (5 პუნქტი), რომელზეც ყველა გამწელი ძალა ( $\vec{F}_3$ ) ერთი და იგივე სიდიდისაა.

ეხლა კი გადავიდეთ ჩვენს მიერ განხილულ მოდელებიდან რეალურ სისტემებზე. წვრილი ძაფების დინამიკის დასადგენათ ნორმასა და პათოლოგიის დროს, ანუ შესაძლო კონფორმაციული გარდაქმნების გამოსავლენათ საჭირო იყო გამოსაკვლევი ობიექტის მოქცევა სპეციფიური ზეგავლენის ქვეშ. ასეთმა ქმედებამ შეიძლება გამოიყვანოს ობიექ-

ტები წონასწორული მდგომარეობიდან ან და გადაიყვანოს ისინი „ჩიხისებრი“ კონფორმაციაში, როცა ისინი უკვე ველანაირად ვერ იცვლებიან (ექსტრემალური მდგომარეობა). ლოგიკურად, წვრილი ძაფების პარამეტრების და აქტინის მაკრომოლეკულების კონფორმაციის შეცვლის ყველაზე მარტივი ზეგავლენა იქნება ზედდებული ელექტრომაგნიტური ველი. ამ ველით შეიძლება მოქმედება წვრილი ძაფების ხსნარზე, ელექტრონული მიკროსკოპისათვის პრეპარატების მომზადების პროცესში.



სურ. 133. პრეპარატის მომზადება კონდენსატორის შემონაფენებს შორის გაციებულ სპილენძის შაიბაზე. პრეპარატის რაოდენობა  $V = 0,25$  მლ, სურათზე თვალსაჩინოების მიზნით გადაჭარბებულია. შაიბის სიბრტყეზე პროექციაში  $AA' = BB' = 10$  მმ; პრეპარატის წვეთის სიმაღლე  $OK = 4$  მმ. წვეთის კვეთების სიბრტყეები:  $AA'K = S_2 = BB'K = S_3 = 2,86 \cdot 10^{-5}$  მ<sup>2</sup>. წვეთზე ნაჩვენებია პლატინის ელექტროდების ადგილმდებარეობა. ელექტროდების სიგრძე  $g_2$ , ხოლო მანძილი მათ შორის –  $u_2$ .

ტეფლონის აპკით (აპკის სისქე 0,01 მმ) დაფარულ წინასწარ გაციებულ ( $T = 277^\circ K$ ) სპილენძის „შაიბაზე“ (დიამეტრი 150 მმ, ხოლო სიმაღლე 100 მმ) დაიტანება პრეპარატის 0,25 მლ (ცილის კონცენტრაცია  $\rho_f = 0,1$  მგ/მლ) (იხ. სურ. 133). ტეფლონის აპკსა და შაიბას შორის უკეთესი თბოგამტარობისათვის თავსდება ეთილის სპირტი. ამ პრეპარატის ზედაპირზე ქარსიდან გადაიტანება მასზე წინასწარ დამტვერიანებული ნახშირბადოვანი აპკი (აპკის სისქე 50 – 60 Å). აპკს პრეპარატზე აყოვნებენ 2 წუთის განმავლობაში, შემდეგ კი გადააქვთ იქვე მოთავსებულ ურანილაცეტატის 2%-იანი წყალხსნარის წვეთზე, რის შემდეგ ხდება მისი დამონტაჟება წვრილნასვრეტოვანი აპკით დაფარულ სპილენძის ბადეებზე.

ელექტრული ველით პრეპარატზე ზეგავლენის მიზნით ყველა ოპერაცია ტარდება კონდენსატორის შემონაფენებს შორის 300 და 500 ვ ძაბვის ქვეშ. ეს კი ნიშნავს, რომ პრეპარატი მზადდება მუდმივ ელექტრულ ველში დაძაბულობით  $E_1 = 5 \cdot 10^4$  ვ/მ და  $E_2 = 8 \cdot 10^4$  ვ/მ. ამ კონდენსატორის ტევადობა იყო  $C_1 = \epsilon_0 S_1 / u_1$  აქ  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  ფ/ვ – აბსოლუტური ელექტრული მუდმივაა. მაგრამ ეს ტევადობა გააჩნია კონდენსატორის მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ შემონაფენებს შორის პრეპარატი არ იმყოფება. კონდენსატორში პრეპარატის მოთვსების შემდეგ ის ნაწილობრივ ავსებს შემონაფენებს შორის სივრცეს და იმ მონაკვეთზე სადაც იმყოფება პრეპარატი კონდენსატორის ტევადობა იქნება  $C_2 = \epsilon \epsilon_0 S_2 / u_1$ . შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ადგილი აქვს  $C_1$  და  $C_2$  კონდენსატორების პარალელურ ჩართვას. აქ,  $u$  – მანძილი კონდენსატორის შემონაფენებს შორის,  $S$  – მათი ფართობი, რომლისთვისაც შეიძლება დავწეროთ:  $S = S_1 + S_2$ . ნათელია, რომ  $S_2$  – კონდენსატორის შემონაფენების ის ფართობია, რომელთა შორის იმყოფება გამოსაკვლევი პრეპარატი, რომლის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა  $\epsilon$ -ის ტოლია. ჩვენი ბრტყელი კონდენსატორის შემონაფენის სიმაღლე  $h = 0,01$  მ, სიგრძე –  $g_1 = 0,1$  მ, ხოლო მანძილი შემონაფენებს შორის  $u_1 = 0,01$  მ. ამიტომაც, კონდენსატორის შემონაფენებს შორის მყოფი გამოსაკვლევი პრეპარატის მოცულობის გათვალისწინებით შეიძლება ჩაიწეროს, რომ  $S = 10^{-3}$  მ<sup>2</sup>;  $S_2 = 2,86 \cdot 10^{-5}$  მ<sup>2</sup>;  $S_1 = 97,14 \cdot 10^{-5}$  მ<sup>2</sup>. და ამ ყველაფრის გათვალისწინებით  $C_1 = 0,858$  პფ;  $C_2 = \epsilon \cdot 0,025$  პფ (იხ. სურ. 133).

ეხლა კი გავვერკვიოთ თუ როგორ შეიძლება ელექტრონული მიკროსკოპის მეთოდებით მექანიკის და ელექტროდინამიკის კანონების გამოყენებით ამოვხსნათ ჩვენს წინაშე მდგარი ამოცანა. ანუ თუ როგორ შეიძლება გავვერკვიოთ აქტინის პროტომერების კონფორმაციის მოქნილობაში, და მის მოშლაში მიოკარდის პათოლოგიის დროს.

სარკომერის წვრილი ძაფი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც სპირალური სიმეტრიის გარკვეული კანონზომიერების მიხედვით სივრცეში განაწილებული ელექტრულად ნეიტრალური და დამუხტული ნაწილაკები, რომლებიც შეადგენენ აქტინის პროტომერებში შემავალი ამინომჟავების ნარჩენების ელემენტებს. წვრილი ძაფის ელექტრულ ველში მოთავსებისას, პოლარიზაციის შედეგად იწყება მუხტების გადანაწილება, შემდეგ კი მიღებული დიპოლების სივრცული ორიენტაციის შეცვლა. წვრილი ძაფის ირგვლივ შექმნილი ელექტრული ველი, სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად, გაანეიტრალებს გარედან მიღებულ ველს. როგორც უკვე აღინიშნა, სივრცეში წვრილი ძაფები შეიძლება იყვნენ ნებისმიერად ორიენტირებული, მაგრამ ტოლქმედი ძალები ეცდებიან გაწელონ ისინი ველის ძალოვანი ხაზების მიმართულებით, და რაც მეტი იქნება ველის დაძაბულობა, მით მეტი სიდიდის ძალა იმოქმედებს წვრილ ძაფზე, რათა გაწელოს ის განივი მიმართულებით და გაზარდოს წვრილი ძაფის დიამეტრი.

### 16.10. იუნგის მოდული და ელექტრული ველი.

ვთქვათ, რომ წვრილ ძაფზე გარე ელექტრული ველის მოდებამდე მისი განივი კვეთი წარმოადგენდა წრეს რადიუსით  $r_0$ . გარე ველი ტრანსფორმირებს მას ელიფსად, რომლის დიდი ნახევარღერძი  $r^*$  ველის ძალოვანი ხაზების პარალელურია, ხოლო წვრილი ძაფის მოცულობის ნამატი  $\Delta V = \pi r_0 (r^* - r_0)$  (იხ. სურ. 133b). წრფივ მიახლოებაში ძალის მატება  $\Delta F(r(\varphi))$  კარგი სიზუსტით შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით

$$\Delta F(r(\varphi)) = \frac{JS_H \Delta r(\varphi)}{r(\varphi)} \quad (135)$$

სადაც  $J$  [ნ/მ<sup>2</sup>] – წვრილი ძაფის დრეკადობის მოდულია განივი მიმართულებით (იუნგის მოდული),  $S_H = 2r_0 l$  – კვეთის ფართი, რომელიც გადის წვრილი ძაფის ღერძზე ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის პერპენდიკულარულად, ხოლო  $l$  – წვრილი ძაფის სიგრძეა;  $\Delta r(\varphi) = r(\varphi) - r_0$  — წვრილი ძაფის განივი კვეთის რადიუსის მატება, როგორც აზიმუტალური –  $\varphi$  კუთხის ფუნქცია.

მცირე ველების შემთხვევაში:

$$\frac{dF}{dV} \sim \frac{\Delta F}{\Delta V}$$

სადაც  $\Delta V = l \cdot (S' - S_0)$  — წვრილი ძაფის მოცულობის მატება ზედდებულ ელექტრულ ველში. ვინაიდან ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ ელექტრულ ველში ძაფის კვეთს წარმოადგენს ელიფსი

$$\Delta V = \pi r_0 (r^* - r_0)$$

ჩავწეროთ  $dF/dV$  ცხადი სახით

$$\frac{dF}{dV} = \frac{JS_H (r(\varphi) - r_0)}{\pi l r(\varphi) r_0 (r^* - r_0)} \quad (136)$$

ვინაიდან წვრილი ძაფის კვეთს  $E > 0$  შემთხვევაში ელიფსის ფორმა გააჩნია, ამიტომაც

$$r(\varphi) = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \eta^2 \sin^2 \varphi}}$$

აქ,  $\eta$  – წარმოადგენს ექსცენტრისიტეტს ( $\eta = 1 - \frac{r_0^2}{r_*^2}$ ). სუსტი გარე ელექტრული ველის შემთხვევაში

$$\eta \ll 1 \text{ и } r(\varphi) \approx r_0 \left( 1 + \frac{\eta^2}{2} \sin^2 \varphi \right) \quad (137)$$

განტოლება (136)-ში (137)-ის ჩასმის და ინტეგრირების შემდეგ მივიღებთ:

$$F = \frac{2JS_H}{\pi r_0(r^* - r_0)} \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_{r_0}^{r(\varphi)} (r - r_0) dr = \frac{3Jr_0^2\eta^4 l}{32(r^* - r_0)} \quad (138)$$

კონდენსატორის ელექტრულ ველში წვრილი ძაფის პოლარიზაციის და შექმნილი დიპოლების ორიენტაციის შემდეგ, ძაფზე, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, იმოქმედებს მოცულობითი გამწელი ძალა. ამ ძალის გამოსახვა შეიძლება პუასონის განტოლების (ანიზოტროპული გარემოსთვის) მეშვეობით:

$$dF = -\frac{4\pi\rho_e}{\varepsilon} EdV$$

სადაც,  $\rho_e$  – წვრილი ძაფის მუხტის მოცულობითი სიმკვრივე, ხოლო  $\varepsilon$  – გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა.

არსებული სისტემის ანალიზისას, მისი სრული აღწერისათვის უნდა გათვალისწინდეს პოლარიზაციის პროცესი. ეს ნიშნავს, რომ სისტემა უნდა იქნას შესწავლილი პოლარიზაციის საწყისი მომენტიდან, და ამისათვის საჭიროა ტენზორული ანალიზის გამოყენება (განისაზღვროს პოლარიზაციის ტენზორი). მაგრამ, თუ დაუბრუნდებით დასმული ამოცანის საწყისებს, ჩვენ გვინტერესებს ძაფის დიამეტრის გაწელვა მანძილებზე, რომლებიც პოლარიზებულ დიპოლებში მყოფ მუხტებს შორისი მანძილებზე გაცილებით მეტია. ანუ, მარტივად რომ ვთქვათ, ჩვენ განვიხილავთ კონდენსატორის ელექტრულ ველში უკვე პოლარიზებულ სისტემას, რომელიც უბრალოდ იცვლის თავის პარამეტრებს (ჩვენ შემთხვევაში კი დიამეტრს) სისტემაზე ელექტრული ძალების მოქმედების შედეგად. უბრალოდ ხდება დიპოლების გადაადგილება ელექტრულ ველში.

მუხტის სიმკვრივის მოსანახად უნდა მიექცეს ყურადღება იმ გარემოებას, რომ წვრილი ძაფის პოლარიზების შედეგად იწყება დიპოლების წარმოქმნა ყველა მის ატომში ამინომჟავის ნაშტის ბუნების მიუხედავად. ამინომჟავების თანმიმდევრობის ცოდნა გვამლევს საშუალებას დაითვალოს ატომების რაოდენობა პროტომერში ( $N_M = 5955$ ), ეს კი ნიშნავს, რომ პროტომერის საერთო მუხტი შეიძლება წარმოვადგინოთ როგორც:

$$Q_e = -N_M \cdot e \quad (e = 1,6021 \cdot 10^{-19} K - \text{ელემენტარული მუხტი}).$$

აქედან, თუ გავითვალისწინებთ, რომ აქტინის პროტომერების რიცხვი  $l$  სიგრძის წვრილ ძაფში  $lp/c$  -ს ტოლია, სადაც  $p$  – პროტომერების რაოდენობა ერთ პერიოდში, ხოლო  $c$  – ამ პერიოდის სიგრძე, მაშინ წვრილი ძაფის საერთო მუხტი იქნება

$$Q_e = -N_M \cdot e \frac{lp}{c}, \text{ ხოლო მუხტის სიმკვრივე } -\rho_e = -\frac{Q_e}{V} = -\frac{N_M p e}{\pi r_0 r^* c}$$

გავაინტეგრიროთ  $dF$  წვრილი ძაფის მოცულობით

$$F_H = E_{II} \int_0^{r^*} \int_0^{\pi} \int_0^{\lambda} \frac{N_M p e}{\pi r_0 r c} r dr d\varphi dz = \frac{E N_M e p l r^*}{r_0 c \varepsilon} \quad (139)$$

ვინაიდან  $E_{II}$  – ველის დამაბულობა პოლარიზებულ პრეპარატში (დიელექტრიკში)  $E_{II} = E/\varepsilon$ . (138) და (139)-ის შედარებისას, საბოლოოდ წვრილი ძაფების იუნგის მოდულის განსაზღვრისათვის შეიძლება ჩავწეროთ:

$$J \approx \left(\frac{BE}{2aU}\right) \left(\frac{r^*}{r_0}\right)^3 \frac{1}{(aU)^2} \quad (140)$$

აქ,  $B = \frac{64N_M p e \pi}{3c\varepsilon} = 1,61251 \cdot 10^{-5}$ , ხოლო  $a$  – წარმოადგენს პროპორციულობის კოეფიციენტს, რომელიც აკავშირებს წვრილი ძაფების დიამეტრის ცვლილებას პრეპარატიულ კონდენსატორზე მიდებულ ძაბვასთან.

### 16.11. პრეპარატის ხსნარის დიელექტრიკული შეღწევადობა.

პრეპარატის ხსნარის დიელექტრიკული შეღწევადობის მოსანახად შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც პირდაპირი მეთოდი, პრეპარატიული კონდენსატორის ტევადობის ხელსაწყოთი გაზომვით, ასევე არაპირდაპირი, სპეციალური გამოთვლების ჩატარებით.

ცნობილია, რომ გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა უჩვენებს მასში ელექტრული ველის დამაბულობის შემცირების ხარისხს. ესე იგი, თუ ჩვენ გვჭირდება სისტემის შესწავლა (ჩვენ შემთხვევაში წვრილი ძაფები) გარკვეულ გარემოში, საჭიროა ამ გარემოში ველის დამაბულობის ცოდნა. წვრილი ძაფები რომ სუფთა წყალში ყოფილიყო მოთავსებული, მაშინ  $\varepsilon$  იქნებოდა 80,6-ის ტოლი, მაგრამ პრეპარატის ხსნარი შეიცავს დიდი რაოდენობით სხვადასხვა იონებს, რაც ბუნებრივია ამცირებს დიელექტრიკულ შეღწევადობას.

გამოვიყენოთ ის ფაქტი, რომ პრეპარატის ხსნარში ელექტროდების შეყვანისას რომელთა შორის მცირე პოტენციალთა სხვაობა იქნება (10 ვ), პრეპარატში აღმოჩნდება ელექტრულ ველში და მასში წარმოიქმნება ელექტროდენი, რომლის სიმკვრივე იქნება:

$$I_z = \sigma_e E_n \quad (141)$$

სადაც,  $E_n = E_{10}/\varepsilon$  – ველის დამაბულობა პრეპარატში,  $\sigma_e$  – გარემოს ელექტროგამტარობა. მეორეს მხრივ

$$I = U/R = E_{10} S_3 \chi$$

ვინაიდან ცნობილია, რომ ხსნარის კუთრი ელექტროგამტარობა

$$\chi = \frac{1}{R} \frac{u_2}{S_3}$$

სადაც,  $R$  – მისი წინაღობაა,  $u_2$  – მანძილი ელექტროდებს შორის,  $S_3$  – ელექტროლიტით დაკავებული მოცულობის განიკვეთი (იხ. სურ. 133). გარდა ამისა ველის დამაბულობა მცირე პოტენციალთა სხვაობის დროს (10ვ)

$$E_{10} = U/u_2$$

სადაც,  $U$  – პოტენციალთა სხვაობაა,  $u_2$  – მანძილი ელექტროდებს შორის აქედან დენის სიმკვრივე იქნება

$$I_z = \frac{E_{10} \chi S_3}{S_4} \quad (142)$$

$S_4$  – იმ მოცულობის განიკვეთი, რომელშიც გადის ელექტროდენი.

$$S_4 = g_2 h_2$$

სადაც,  $g_2$  – პლატინის ელექტროდის სიგრძე, ხოლო  $h_2$  – მისი დიამეტრი. გამოსახულებების (141) და (142) შედარებისას, მივიღებთ:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_e g_2 h_2}{S_3 \chi} \quad (143)$$

მაგრამ გარემოს ელექტროგამტარობა შეიძლება გამოისახოს წვრილი ძაფების პრეპარატის ხსნარის მახასიათებელი მოლეკულური პარამეტრების მეშვეობით:

$$\sigma_e \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_i Q^2}{N_f S_3 \sqrt{M_i k T}} \quad (144)$$

აქ,  $N_i$  – დამუხტული ნაწილაკების საშუალო რიცხვი მოცულობის ერთეულში, ანუ ხსნარში ელექტრული დენის მნიშვნელობის განმსაზღვრავი ნაწილაკების რაოდენობა.  $Q$  – ყოველი ნაწილაკით გადატანილი მუხტი.  $N_f$  – იონების განმზნევი ნაწილაკების საშუალო რაოდენობა, რომელთა მასაც  $M_f \gg M_i$  – თვით გამტარობის იონების მასაზე.  $S_3$  – იონის განზნევის სრული განივკვეთი, ანუ, უბრალოდ რომ ითქვას, საპრეპარატო მოწყობილობაზე მყოფი პრეპარატის წვეთის ვერტიკალური კვეთი (იხ. სურ. 133).  $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$  ჯ/გრად – ბოლცმანის მუდმივა.  $T$  – წვრილი ძაფების პრეპარატის ხსნარის ტემპერატურა.

განვსაზღვროთ გამოსახულება (144)-ში დამუხტული ნაწილაკების და განზნევი მოლეკულების საშუალო რაოდენობა

$$N_i = \rho_i N_A; \quad N_f = \rho_f N_A / M$$

სადაც,  $\rho_i$  – გამტარობის იონების მოლარული სიმკვრივე პრეპარატის ხსნარში;  $\rho_f$  – ცილის სიმკვრივე პრეპარატის ხსნარში;  $N_A$  – ავოგადროს რიცხვი;  $M$  – ცილის (აქტინის) მოლეკულური მასა.

ამ მნიშვნელობების ჩასმისას (144) და (143)-ში საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{g_2 h_2}{S_3 \chi} \frac{\rho_i M Q^2}{\rho_f S_3 \sqrt{M_i k T}} \quad (145)$$

ჩვენ შემთხვევაში გამტარობის იონებს წარმოადგენენ  $KCl$  მოლეკულები ვინაიდან მათი საერთო რაოდენობა ხსნარში ( $M_{KCl} = 74,55$ ) ბევრად მეტია სხვა იონების კონცენტრაციაზე. ამიტომ, ჩვენი პრეპარატის ხსნარში ( $0,1M KCl$ ) გამტარობის იონების მოლარული სიმკვრივე იქნება:

$$\rho_i = 0,1 \cdot M_{KCl} / V$$

( $V = 0,25$  მლ =  $25 \cdot 10^{-8}$  მ<sup>3</sup> – გამოსაკვლევი პრეპარატის მოცულობა (იხ. სურ. 133))

$$\rho_i = 0,2982 \cdot 10^8 \text{ მოლ/მ}^3$$

მოლარული მასის მნიშვნელობა გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ გამოსაკვლევი ნივთიერების მასა აღემატება მასის პირობით ერთეულს

$$m_0 = \frac{m_{C12}}{12} = \frac{1,9927 \cdot 10^{-26}}{12} = 1,6606 \cdot 10^{-27} [\text{კგ}]$$

$m_0$ -ს კიდევ მასის ატომურ ერთეულს უწოდებენ (მ.ა.ე.)

( $m_{C12} - C^{12}$  ატომის იზოტოპის მასა, უფრო სწორედ კი მისი ნუკლიდის მასა, რომელიც SI სისტემაში =  $1,9927 \cdot 10^{-26}$  კგ). ამ ერთეულებში წყალბადის ატომის მასა  $H \approx 1,00797$ . ამიტომ, შეიძლება ითქვას, რომ აქტინის პროტომერში  $M = 43076,83$ . გამტარობის იონების მასა შეიძლება განისაზღვროს როგორც

$$M_i = M_{KCl} \cdot m_0 = 74,55 \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27} = 1,2376 \cdot 10^{-29} [\text{კგ}]$$

რიცხობრივი მნიშვნელობების ჩასმისას (145) გამოსახულებაში მივიღებთ, რომ წვრილი ძაფის პრეპარატის ხსნარის ბარდობითი დიელექტრიკური შეყწევადობა  $\varepsilon = 1,54$ .

## 16.12. წმ დინამიკა და მისი იუნგის მოდული ნორმაში და გნ-ის დროს

ჩატარებულია წვრილი ძაფების დიამეტრების გაზომვა ნორმაში და ტამ<sub>10დლბ</sub>-ით გამოწვეული გნ-ის დროს ელექტრული ველის გარეშე და 0,5·10<sup>5</sup> და 0,8·10<sup>5</sup> ვ/მ დაძაბულობის ველში (ცხრილი 27). დიამეტრების საშუალო კვადრატული გადახრის<sup>106</sup> ანალიზი თითოეული ჯგუფისათვის მოწმობს, რომ ელექტრული ველის არ არსებობისას ტამ<sub>10დლბ</sub>-ის შემთხვევაში  $s = 6,99 \text{ \AA}$  (ნორმაში  $s = 6,09 \text{ \AA}$ ). წვრილ ძაფზე ელექტრული ველის ზემოქმედებისას  $s$  აღწევს უმაღლეს მნიშვნელობას (7,6  $\text{\AA}$  ნორმაში), რაც მიუთითებს ელექტრული ველის ზემოქმედებით წვრილი ძაფის კონფორმაციული გარდაქმნის სიჩქარის გაზრდაზე (იზრდება სტრუქტურის მობილურობა). ტამ<sub>10დლბ</sub>-ის დროს წვრილი ძაფის სტრუქტურა აღმოჩნდა უფრო სტაბილური – ელექტრული ველის ზემოქმედებისას  $s$  კი იზრდება, მაგრამ მხოლოდ 5,7%-ით და არა 28%-ით, როგორც ნორმის შემთხვევაში.

წვრილი ძაფის დიამეტრი ( $\text{\AA}$ ) ნორმაში და ტამ<sub>10დლბ</sub>-ის დროს 0,5·10<sup>5</sup> და 0,8·10<sup>5</sup> ვ/მ ელექტრულ ველში<sup>107</sup>

ცხრილი 27

ჯგუფი	$d_{min}$ ( $\text{\AA}$ )	$d_{max}$ ( $\text{\AA}$ )	გაზომილი			მიევ. 300 გაზომვ.			$\bar{d}_{წონ}$ ( $\text{\AA}$ )	
			$\bar{d}$ ( $\text{\AA}$ )	$s$ ( $\text{\AA}$ )	$m_x$	$\bar{d}$ ( $\text{\AA}$ )	$s$ ( $\text{\AA}$ )	$m_x$		
ნორმა	( $K=329$ ) 0 ვ/მ	75	110	90,1	6,09	0,03	90,1	6,08	0,03	90,5
	( $K=145$ ) 0,5·10 <sup>5</sup> ვ/მ	80	110	95,1	5,97	0,05	95,1	5,92	0,03	95,5
	( $K=1262$ ) 0,8·10 <sup>5</sup> ვ/მ	80	122,5	99,1	7,64	0,02	99,0	7,51	0,04	99,7
ტამ	( $K=543$ ) 0 ვ/მ	115	157,5	133,9	6,99	0,03	134,0	6,90	0,04	134,3
	( $K=199$ ) 0,8·10 <sup>5</sup> ვ/მ	120	160	145,1	7,38	0,05	145,1	7,30	0,04	145,4
ნორმა	( $K=76$ ) დაჩრდილვა	100	147	111,1	10,1	0,10	-	-	-	112
	( $K=112$ ) 10 ვ	80	110	93,3	7,31	0,07	-	-	-	93,9

შედეგნილი იყო წვრილი ძაფების დიამეტრების მერყეობის ცხრილი ნორმაში და ტამ<sub>10დლბ</sub>-ის დროს, ელექტრული ველის გარეშე და ველის არსებობისას. ცხრილში დაჯგუფებული იყო წვრილი ძაფების დიამეტრების მნიშვნელობები დისკრეტულობის ბიჯით 0,5  $\text{\AA}$ . აგებულია წვრილი ძაფების დიამეტრების დიაგრამა ამა თუ იმ ჯგუფთან მათი კუთვნილებისაგან გამომდინარე (სურ. 134), რომელიც გვაძლევს საშუალებას დავინახოთ, რომ, მრუდების ამპლიტუდებისაგან დამოუკიდებლად, მათი საერთო სახე S1-S4 შემთხვევებისთვის ერთნაირია, ხოლო S5-სათვის მიღებულია სრულიად სხვა ტიპის მრუდი. ეს ნიშნავს, რომ ძაფები ჯგუფდებიან ერთ-ერთი ნიშნის მიხედვით.

$$\bar{d} - \Delta d' = d_1^* \quad \text{ან} \quad \bar{d} + \Delta d' = d_2^*.$$

სიდიდეები  $d_1^*$  და  $d_2^*$  იქნება ძაფების დიამეტრების განაწილების სიმეტრიის ცენტრები, ხოლო  $\Delta d'$  – სტრუქტურისათვის მახასიათებელი დისკრეტულობის ბიჯი, სხვა სიტყვით

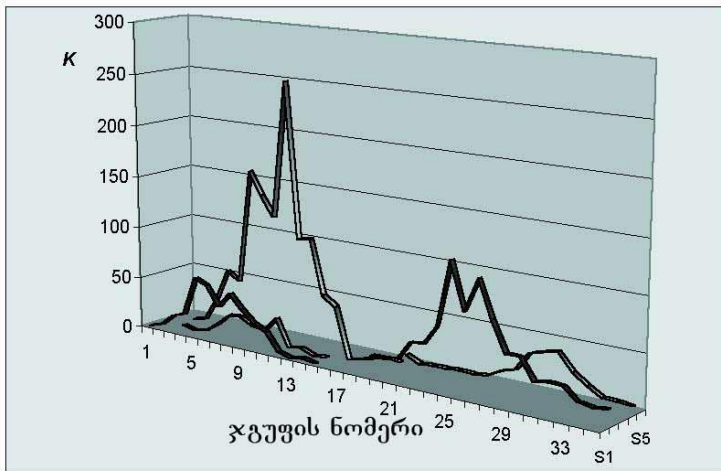
<sup>106</sup> საშუალო კვადრატული გადახრა იზომება თვით შემთხვევითი სიდიდის გაზომვის ერთეულებში და გამოიყენება გამოსაკვლევი ცვლადი სიდიდის საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობის სტანდარტული შეცდომის გამოსარკვევად სანდო ინტერვალების აგებისას ჰიპოთეზების სტატისტიკური შემოწმების დროს და შემთხვევითი სიდიდეებს შორის წრფიული ურთიერთკავშირის დადგენისას. განისაზღვრება როგორც

შემთხვევითი სიდიდის დისპერსიის კვადრატული ფესვი:  $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ .

<sup>107</sup> K – გაზომვების რაოდენობა; s – საშუალოკვადრატული გადახრა; დაჩრდილვულ უჯრედებში მოყვანილი მონაცემები მოდულის განსაზღვრაში არ მონაწილეობდნენ.



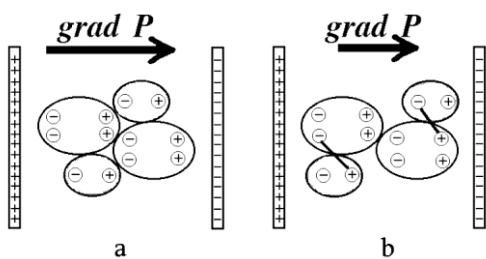
ბით, დიამეტრის მინიმალური ცვლილება, რომელსაც სტრუქტურა გადაჰყავს ახალ ენერგეტიკულ კონფორმაციაში. აქედან გამომდინარეობს, რომ საშუალო მნიშვნელობა  $\bar{d}$  უნდა იყოს ნაკლებად ალბათური სტრუქტურებისათვის, რომელთაც გააჩნიათ აქტიური კონფორმაციული გარდაქმნის უნარი.



სურ. 134. წვრილი ძაფების დიამეტრების განაწილება გაზომვის ჯგუფებთან კავშირში, რაც გვამღევეს საშუალებას, გაზომვების რიცხვზე დამოუკიდებლად, დავაკვირდეთ დიამეტრების განაწილების მრუდს. S1-S3 – ძაფები ნორმალური მიოკარდიუმიდან (მიღებული ძაბვა 0ვ, 500 ვ, 800 ვ); S4 -გნ – 0 ვ; S5 - გნ – 800 ვ

წვრილი ძაფის სპირალის პარამეტრები ხასიათდება დისკრეტულობით. ეს, უდავოდ, უნდა ეხებოდეს მის დიამეტრსაც, რომლის დისკრეტული ცვლილების სასარგებლოდ მიგვითითებს განაწილების მრუდების ასიმეტრია, და მათზე რაღაც „უნაგირის“ გამოჩენა, რომელშიც განლაგდება ძაფის დიამეტრის საშუალო მნიშვნელობები. „უნაგირი“ მიუთითებს თითოეულ შემთხვევაში დიამეტრების სიდიდეების განაწილების, სულ მცირე, ორი დამოუკიდებელი ოჯახის არსებობაზე, რომელთა ერთმანეთზე ზედდებით მქდავდება სპეციფიკური სურათი ორი მაქსიმუმით (სურ. 134).

ტამ<sub>10ღებ</sub>-ის შემთხვევაში წვრილ ძაფზე ელექტრული ველის ზემოქმედების დროს, „უნაგირი“ ქრება (სურ. 134 (S5)), რაც მიუთითებს პროტომერის უფრო მეტად ინერციულ კონფორმაციაზე, რომელსაც არ გააჩნია მობილური ცვლილების უნარი. ასეთი დახასიათება პროტომერს შეიძლება ჰქონდეს უკვე უკიდურესად გაშლილ, სტრუქტურულ მდგომარეობაში, რაც მიუთითებს ექსტრემალურ კონფორმაციულ ცვლილებებზე მიოფიბრილების წვრილ ძაფებში ტამ<sub>10ღებ</sub>-ის დროს. ლოგიკური იქნება ეს დაკვირვება გადავიტანოთ სპირალის დანარჩენ პარამეტრებზე და ვივარაუდოთ, რომ ნორმალურად მომუშავე კუნთში სპირალის პარამეტრების საშუალო მნიშვნელობების შეხვედრის ალბათობა – მინიმალურია.



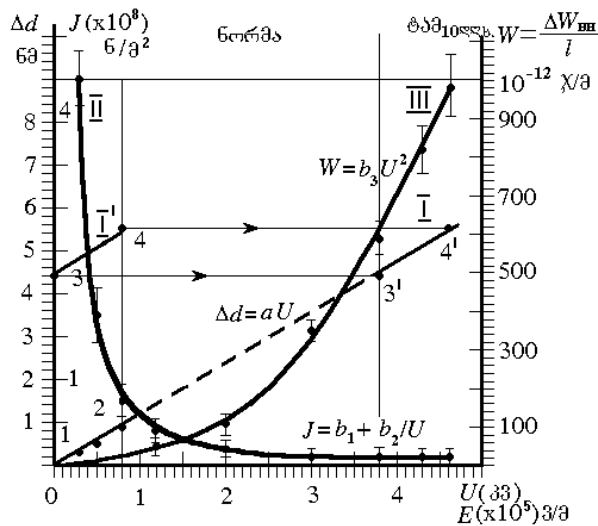
სურ. 135. ილუსტრირებულია სურ. 134-ზე „უნაგირის“ წარმოქმნა კონდენსატორის ელექტრულ ველში მუხტის გრადიენტის წარმოშობით. სიდიდე  $grad P$  დამოკიდებულია ტროპომიოზინის ჭიმის მდებარეობაზე აქტინის პროტომერების მიმართ. (a) – მაქსიმალური, ხოლო (b) – მინიმალური  $grad P$ . b ნახაზზე მოყვანილი ორი მონაკვეთი სიმბოლურად გამოხატავს ეკვანირებულ მუხტებს.

არსებითს წარმოადგენს მუხტების განაწილების გრადიენტის წარმოქმნა ( $grad P$ ) წვრილი ძაფის ღერძის პერპენდიკულარულად, ველის ძალოვანი ხაზების გასწვრივ (იხ. სურ. 135), რომელთა მიმართულება დამოკიდებულია ძაფის ელექტრულ თვისებებზე. ეს თვისებები, თავის მხრივ, განისაზღვრება წვრილი ძაფების ფუნქციონალური ერთეულების მდგომარეობით, რომლებზეც ჩვენ უკვე გვქონდა საუბარი. როდესაც ტროპო-

მიოზინის ჭიმი განლაგებულია წვრილი ძაფის ღერძის მახლობლად (სურ. 135a), პროტომერის გარე ნაწილი თავისუფალია ტროპომიოზინის ჭიმის მუხტების ზემოქმედებისაგან,  $grad P$  მიმართულია ველის ძალოვანი ხაზების გასწვრივ და გააჩნია მაქსიმალური მნიშვნელობა, ამიტომ ძაფის დიამეტრი იზრდება აგრეთვე მაქსიმალურამდე. პირიქით, ჭიმის განლაგებისას აქტინის პროტომერის გარეთა მხარის სიახლოვეს (სურ. 135b), ხდება პროტომერის გარეთა მუხტების ნაწილობრივი ეკრანირება, მცირდება  $grad P$ -ს მნიშვნელობა და, როგორც შედეგი, ძაფის დიამეტრი ელექტრულ ველში იზრდება შესაბამისად მცირე სიდიდით. სხვაობა წვრილი ძაფის დიამეტრის მაქსიმალურ და მინიმალურ ზრდას შორის შეადგენს  $\sim 2,5 \text{ \AA}$ . შეიძლება ვივარაუდოთ წრფივი დამოკიდებულების არსებობაზე დიამეტრის მატებასა ( $\Delta d$ ) და ელექტრული ველის დამაბულობას ანდა კონდენსატორის შემონაფენებთან მიდებულ ძაბვას შორის.

$$\Delta d = aU \tag{146}$$

სადაც  $a$  – პროპორციულობის კოეფიციენტი, რიცხობრივად აბსცისის ღერძთან I მრუდის დახრილობის კუთხის  $tg$ -ის ტოლია (იხ. სურ. 136).



სურ. 136. წვრილი ძაფის დიამეტრის (I), მისი დრეკადობის მოდულის (II) და დაყვანილი შიდა ენერჯის (III) ცვლილებების დამოკიდებულება მიდებული ელექტრული ველის (E) დამაბულობაზე, ანდა კონდენსატორის შემონაფენებს შორის ძაბვაზე (U). მიდებული ელექტრული ველის დამაბულობა, რომელიც  $0,8 \cdot 10^5$  ვ/მ -ზე მეტია, ატარებს პირობით ხასიათს.

ჩატარებულია წვრილი ძაფების დიამეტრების ცვლილების გრაფიკული ანალიზი მიდებულ ძაბვებთან დამოკიდებულებით (სურ. 136). მაგრამ, ვინაიდან ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის შემთხვევაში დიამეტრის დამახასიათებელი მატება არ აღინიშნება ნორმალური მიოკარდიუმიდან მიღებული წვრილი ძაფების პრეპარატის ელექტრულ ველში მოთავსებისას, (I) გრაფიკის ფუნქცია წყვეტილია. ფუნქციის წყვეტილობა შეიძლება მოვხსნათ, თუ I' უბანს (3 – 4) გადავიტანთ პარალელურად ისრებით აღნიშნული მიმართულებით (3' – 4'). ამგვარად, ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის დროს შეიძლება ოპერირება კონდენსატორის ფენებთან მიდებული ძაბვის არა რეალური მნიშვნელობებით, არამედ ძაბვის პირობითი სიდიდით, რომელიც შეიცავს როგორც ელექტრული ველით გამოწვეულ ზემოქმედებას, აგრეთვე ნორმიდან პათოლოგიაში კონფორმაციული გადასვლით გამოწვეული სხვა რაღაც ფაქტორების ზემოქმედებასაც. კიდევ ერთხელ ავღნიშნოთ, რომ უბნები 1 – 2 და 3 – 4 (მრუდი I) შეესაბამება წვრილი ძაფის დიამეტრის ცვლილების დამოკიდებულებას რეალურად მიდებული გარე ძაბვის სიდიდეზე, შესაბამისად ნორმისა და ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის შემთხვევებში.

ანალიზი იმისა, თუ როგორ იქცევა წვრილი ძაფი სხვადასხვა ძაბვის ელექტრულ ველში, გვაძლევს საშუალებას (140) თანაფარდობიდან, რომელიც განსაზღვრავს წვრილი ძაფის მექანიკურ თვისებებს, გამოვიყვანოთ მისი დრეკადობის მოდული:

$$J \approx 1,3 \frac{(r_*/r_0)^3}{(aU)^2} \cdot 10^{13} = 3,7 \frac{(d_*/d_0)^3}{U^2} \cdot 10^{13} \quad (147)$$

გათვლების შედეგები წარმოდგენილია ცხრილი 28-ში. (147) განტოლების ანალიზის შედეგად, შეიძლება ითქვას, რომ დრეკადობის მოდულსა და პრეპარატიულ კონდენსატორზე მიდებულ ძაბვას შორის არსებობს უკუ კავშირი, რომელიც ერთმნიშვნელოვნად ვერ აღიწერება ელემენტარული ფუნქციებით.

წვრილი ძაფის დრეკადობის მოდულის (განივი მიმართულება) და მისი შინაგანი ენერგიის ცვლილების განსაზღვრა ძაფზე გარე ელექტრული ველის ზემოქმედების პირობებში<sup>108</sup>.

ცხრილი 28

ჯგუფი	U(კვ)		d* (Å)	d <sub>0</sub> (Å)	Δd (Å)	J (x10 <sup>8</sup> ) (ნ/მ <sup>2</sup> )	ΔW <sub>in</sub> /l (x10 <sup>-12</sup> ) (ჯ/მ)
	რეალ.	პირობ					
ნორმა	0,3		93	90,1	3	4,52±0,3	2,22±0,55
	0,5		95,1	90,1	5	1,74±0,12	6,33±0,48
	0,8		99,1	90,1	9	0,77±0,03	19,01±0,81
		1,2	104	90,1	14	0,39±0,04	46,54±3,2
		2,0	113	90,1	23	0,18±0,02	138±43
		3,0	125	90,1	35	0,11±0,02	350±31
ტამ <sub>10დლბ</sub>	0	3,8	133,9	90,1	43,8	0,08±0,01	593±53
	0,5	4,3	141	90,1	51	0,08±0,01	823±74
	0,8	4,6	145,1	90,1	55,0	0,07±0,01	977±88

როგორც ჩანს, დრეკადობის მოდული არაა სტაბილური (ცხრილი 28 და სურ. 136(II)) და მცირდება წვრილ ძაფზე დატვირთვის გაზრდასთან ერთად. მაგრამ დიამეტრის ზრდასთან ერთად დრეკადობის მოდული სტაბილიზირდება, ხოლო ტამ<sub>10დლბ</sub>-ის დროს ელექტრული ველის ზემოქმედების შემდეგ პრაქტიკულად არ იცვლება. ეს ფაქტი ამტკიცებს წვრილი ძაფების კონფორმაციული გარდაქმნის შესაძლებლობის დაქვეითებას გნ-ის დროს.

წვრილ ძაფზე  $E_1 = 5 \cdot 10^4$  ვ/მ დაძაბულობის ველის ზემოქმედების დროს შინაგანი ენერგიის ცვლილება უმცირესია  $-1,92 \cdot 10^{-12}$  ჯ/მ, ხოლო  $E_2 = 8 \cdot 10^4$  ვ/მ დაძაბულობის ველის ზემოქმედებისას  $-5,7 \cdot 10^{-12}$  ჯ/მ. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ელექტრული ველის 1,6-ჯერ გაზრდისას ძაფის დიამეტრის მატება ( $\Delta d$ ) – იზრდება 1,78 -ჯერ, ხოლო შინაგანი ენერგია იზრდება 2,97 -ჯერ. ეს ნიშნავს, რომ წვრილი ძაფის დიამეტრის გაზრდასთან ერთად (ძაფის გაჭიმვისას) მცირდება მისი წინააღმდეგობის უნარი გარე ძალების მიმართ. სხვა სიტყვებით, ძაფი გადადის ექსტრემალურთან მოსაზღვრე მდგომარეობაში, რის შემდეგ შესაძლებელია მისი მექანიკური გაწყვეტა.

სხვაგვარი სურათი შეინიშნება ტამ<sub>10დლბ</sub>-ის დროს წვრილ ძაფზე  $E_2 = 8 \cdot 10^4$  ვ/მ დაძაბულობის ველის ზემოქმედებისას. აქ, იმ შემთხვევასთან შედარებით, როცა წვრილი ძაფი არ იყო მოთავსებული ელექტრულ ველში, შინაგანი ენერგიის ცვლილება შეადგენს  $6,91 \cdot 10^{-12}$  ჯ/მ. იგივე დაძაბულობის ველში მოთავსებული ნორმალური წვრილი ძაფის

<sup>108</sup> გრაფა U-ში (კონდენსატორის შემონაგენებზე მიდებული ძაბვა) წარმოდგენილია ამ პარამეტრის ორი ვარიანტი: რეალური და პირობითი. პირობითი მნიშვნელობა მიდებულია მიდებულ ძაბვაზე წვრილი ძაფის დიამეტრის ცვლილებების დამოკიდებულების ანალიზის შედეგად (სურ. 136, მრუდი I).

შემთხვევაში, შინაგანი ენერჯის ცვლილება გაზრდილია 1,21 -ჯერ, ძაფის დიამეტრის მატება ( $\Delta d$ ) კი იზრდება 1,23 -ჯერ, რაც გვიჩვენებს, რომ ეს ორი სიდიდე პრაქტიკულად ერთმანეთთან შესაბამისობაშია. ეს ნიშნავს, რომ, თუმცა ძაფის დიამეტრი ნორმასთან შედარებით გაზრდილია 1,61 -ჯერ, ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის დროს წვრილ ძაფში ხდება აქტინის პროტომერის ისეთი კონფორმაციული გარდაქმნა, რომელსაც ჯერ კიდევ გააჩნია უნარი წინააღმდეგობა გაუწიოს ძაფში მიმავალ განივ დეფორმაციებს.

ყოველივე ზემოთ გადმოცემული მიუთითებს, რომ ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის დროს ხდება აქტინის პროტომერის სრული კონფორმაციული გარდაქმნა, და არა უბრალო მისი გაჭიმვა განივი (პროტომერისათვის კი მის გასწვრივ) მიმართულებით. გარდა ამისა, ტამ<sub>10დღბ</sub>-ის შედეგად მიღებული წვრილი ძაფი მასზე ელექტრული ველის შემდგომი ზემოქმედებისას გადადის კონფორმაციაში, რომელიც ხასიათდება ნაკლები მოქნილობით, თუმცა მასზე ველის ზემოქმედებამდე ძაფის კონფორმაცია ჯერ კიდევ იყო მობილური. თავის მხრივ, კონფორმაციული გადასვლების შექცევადობა ამტკიცებს მათ ფუნქციურ დანიშნულებას. ანუ რეალურად მომუშავე კუნთში მითითებული კონფორმაციული ცვლილებები აუცილებელია მიოფიბრილების შეკუმშვა-მოდუნების აქტის განხორციელებისათვის.

### 16.13. აქტინის პროტომერების კონფორმაციული მოქნილობა.

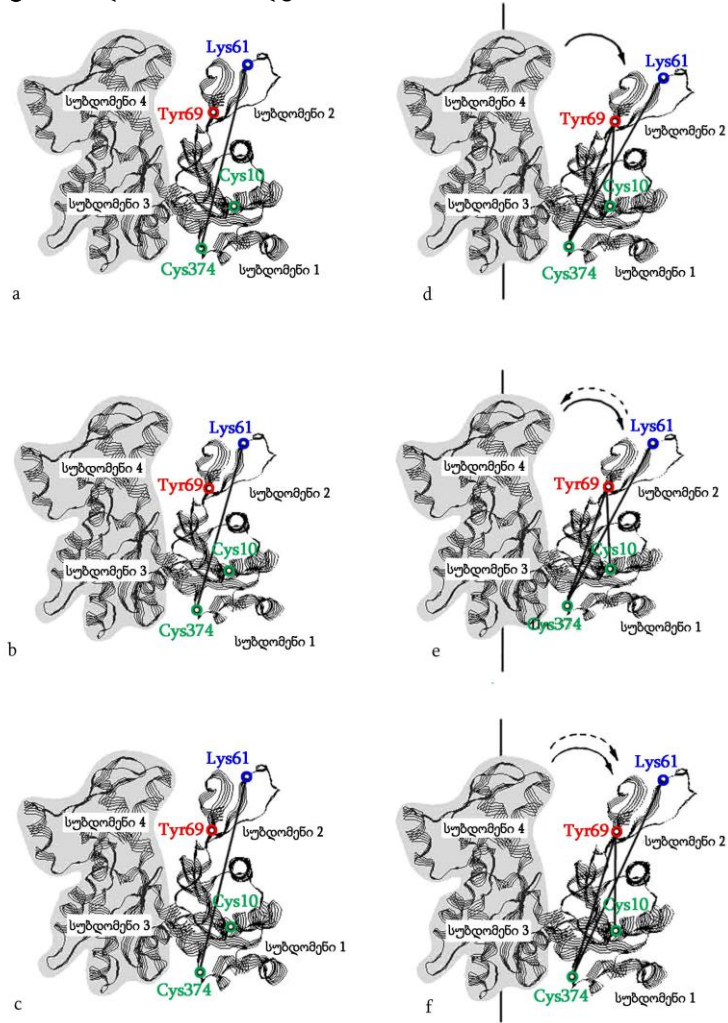
როგორც უკვე აღინიშნებოდა, სადღესოდ უკვე არსებობს აქტინის მონომერის ატომალური მოდელი, აგებული რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის მონაცემების მიხედვით (იხ. სურ. 137), რომელიც თავისი ბუნებით სტატიკურია, ვინაიდან არ ასახავს ცილაში მიმავალ კონფორმაციულ ცვლილებებს, ანუ მის დინამიკას. მაგრამ, თუ ამ მოდელში შევიტანეთ აქტინის მოლეკულის სხვადასხვა მდგომარეობების ამსახავი კორექტივები, შეიძლება მივიღოთ მისი განსხვავებული კონფორმაციები, რაც საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ აქტინის სტრუქტურა დინამიკაში.

აქტინის ძაფის მონომერებსა და პროტომერებში სხვადასხვა ამინომჟავების ნაშტებს შორის არსებული მანძილების გაზომვები, ფლუორესცენციის ენერჯის რეზონანსული გადატანის მეთოდის (ფერგ) გამოყენებით უჩვენებს, რომ გნ-ის შემთხვევაში მანძილები  $Cys374 - Liz61$ ,  $Cys374 - Tyr69$  შორის (მონომერის ან პროტომერის ფარგლებში და წვრილი ძაფის მომიჯნავე პროტომერებს შორის), და აგრეთვე მანძილი მეზობელი პროტომერებში ნყოფი  $Cys374$  ამინომჟავებს ნაშტებს შორის, სხვადასხვა კონფორმაციულ მდგომარეობებში ნორმასა და მწვავე გნ-ის დროს იზრდება, რაც კორელირებს გნ-ის კლინიკური სურათის სიმძიმესთან. ამრიგად, კვლევების სრულიად დამოუკიდებელი მეთოდები – ფერგ და მაღალი გარჩევისუნარიანობის ელექტრონული მიკროსკოპია ადასტურებენ წვრილი ძაფის დიამეტრის ზრდას, და პირველყოფლისა აქტინის პროტომერის გარე დომენის გაფაშვას  $\beta$ -აცეთილდიგოქსინის ან სტროფანტინ K ზეგავლენით.

ისმის კითხვა, წარმოადგენენ თუ არა წვრილი ძაფის ეს ცვლილებები სტრუქტურის შეუქცევად გარდაქმნას თუ შეიძლება მათი შექცევა. პასუხი ამ კითხვაზე იყო მიღებული ATP-ის ნორმალური შემცველობის გარემოში (რომლის შემცველობა გნ-ის დროს მკვეთრად შემცირებულია კარდიოტონიკური საშუალებების, საგულე გლიკოზიდების (სგ),  $\beta$ -აცეთილდიგოქსინის ან სტროფანტინ K-ს ქმედების გამო) მოდელირების შედეგად. აღმოჩნდა, რომ ამ პრეპარატების ქმედებით აღდგენილი კონტრაქტილური ცილების სისტემის შესაძლებლობა მოახდინოს ძალის გენერირება და ATP-ის ჰიდროლიზი, თანხლება აქტინის ძაფის პროტომერის გარე დომენის ზომის შემცირებასთან ნორმალურ მნიშვნელობამდე.

სგ-ით და ანგიოტენზინგარდაქმნელი ფერმენტის ინჰიბიტორებით გამოწვეული სტრუქტურულ-კონფორმაციული ცვლილებები აქტინში ეხება აქტინის და მიოზინის

ურთიერთობის ცენტრს, რითიც იწვევს კუმშვადობის პროცესის ეკონომიურობის შესაბამისად ზრდას ან შემცირებას. შედეგად, პათოლოგიური გადახრები მიოკარდის მიოფიბრილებში ანგიოტენზინგარდაქმნელი ფერმენტის ინჰიბიტორების ზეგავლენით გნ-ის დროს იზრდება.



სურ. 137. აქტინის მონომერის ჰიპოტეტური მოდელები (a – c) – ნორმაში; (d – f) – გნ-ის დროს. a,d – პრეპარატის გარეშე; b,e –საგულე გლიკოზიდების (სგ) ზეგავლენით; c,f – ანგიოტენზინგარდაქმნელი ფერმენტის ინჰიბიტორების ზეგავლენით. უწყვეტი ისრები – გარდაქმნების მიმართულეა გნ-ის დროს; პუნქტირისანი ისრები – პრეპარატის ზეგავლენით.

დილატაციური კარდიომიოპათიით, ინფექციურ-ალერგიული მიოკარდიტით, კლინიკური პოსტინფექტური კარდიოსკლეროზით განპირობებული ქრონიკული გნ-ის შემთხვევაში, აქტინის ძაფის პროტომერის გარე დომენში, ფერგ-ის მონაცემებით ასევე მიმდინარეობს მანძილის ზრდა ამინომჟავათა ნაშტებს შორის (ცხრილი 29). ეს ყველაფერი ხდება მიოკარდის კონტრაქტილური ცილების სისტემაში აქტინის გარე დომენის იმ უბანში, სადაც განლაგდებიან ძალის გენერაციაზე და ენერჯის ეკონომიური გარდაქმნაზე პასუხისმგებელი ცენტრები. დადგინდა, რომ განვითარებული მიოფიბრილებით ძალა გენერირდება აქტინის ძაფის პროტომერის გარე დომენში N (1-4, 11, 21-40) და C (345-346 და 374-375) ბოლოებში მყოფი ამინომჟავების ნაშტების ურთიერთობის დროს.

სხვადასხვა მეთოდების (ფერგ-ს და მაღალი გარჩევისუნარიანობის ელექტრონული მიკროსკოპია) მონაცემების შედარებისას აღმოჩნდა, რომ Cys374-ის გარემოებში წარიმართება მნიშვნელოვანი სტრუქტურულ-კონფორმაციული ცვლილებები. ამის დასტურად შეიძლება მოვიყვანოთ 1,5-IAEDANS ფლუორესცენციის კორელაციური სიციცხლის ხანგრძლივობის გაზრდა Cys374-ზე მიერთებისას (მონომერული აქტინის შემთხვევაში 47%-ით, და აქტინის პროტომერის შემთხვევაში – 60%-ით). 1,5-IAEDANS ფლუორესცენციის ინტენსივობა კი პირიქით ორივე შემთხვევისათვის მცირდება შესაბამისად 2,25 და

2,1 ჯერ. ამასთან, მონომერული აქტინის შემთხვევაში მკვეთრად იცვლება სანიშნის<sup>109</sup> პოლარიზაცია და ანიზოტროპია, ხოლო აქტინის ძაფის პროტომერში არა ხდება ფლუორესცენციის პოლარობის შეცვლა. აღნიშნული ცვლილებები მეტყველობენ 1,5-IAEDANS-ის უფრო ხისტ მიერთებაზე, Cys374 მიკროგარემოცვის უფრო სტაბილურ, „გაშემუბულ“ მდგომარეობაზე და აქტინის C-ბოლოში მყოფი სტრუქტურული ელემენტების კონფორმაციული ცვლილებების ზრდაზე.

ადამიანის აქტინის მონომერის და პროტომერის სტრუქტურულ-კონფორმაციული ცვლილებები გულის ქრონიკული ნაკლოვანების (გქნ) დროს სგ-ის ზეგავლენისას.

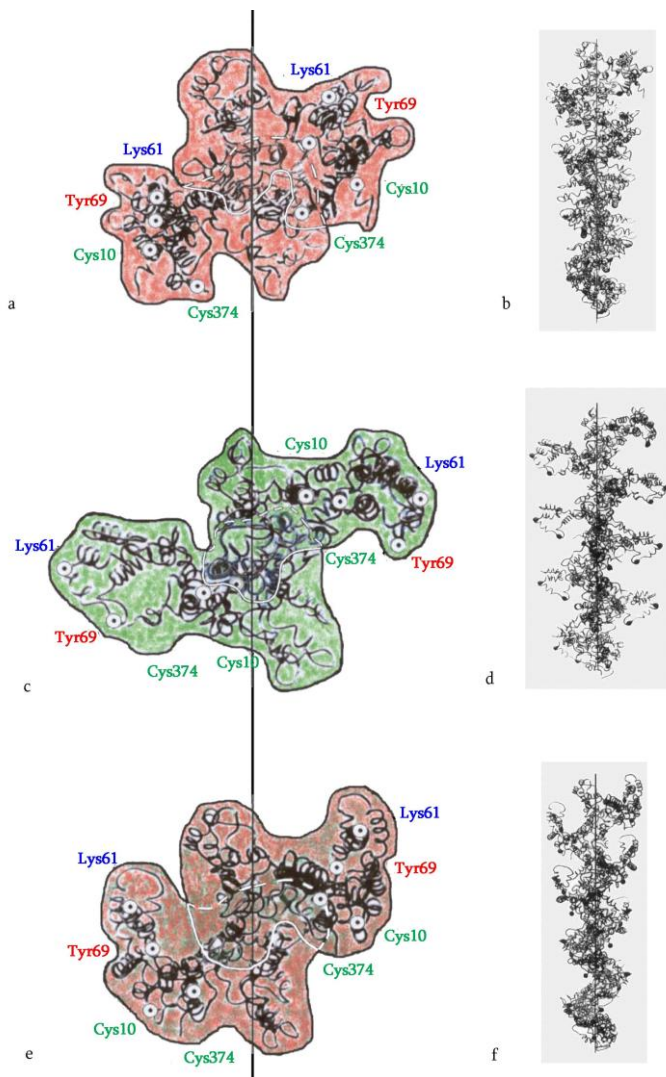
ცხრილი 29

ამინომჟავების ნაშტები	მდგომარეობა	ნორმა (Å)	ნორმა+სგ (Å)	გქნ (Å)	გქნ+სგ (Å)
Cys374 — Liz61	მონომერი	46,8	42,5	54,8	50,5
	პროტომერი	39,0	41,0	51,5	48,5
Cys374 — Tyr69	მონომერი	26,5	25,0	18,5	28,5
	პროტომერი	19,6	18,5	17,8	22,9
Tyr69 — Cys10	მონომერი	29,0	30,5	36,5	34,0
	პროტომერი	28,5	26,0	32,9	29,9
Cys374 — Cys10	მონომერი	25,0	25,0	31,5	28,5
	პროტომერი	24,0	18,0	30,5	22,9

გქნ-ის დროს Cys374-ის რადიალური მანძილი  $pCa = 5$ -ის პირობებში (შეკუმშვის პირობა) ნორმასთან შედარებით მნიშვნელოვნად (6 Å-ით) იზრდება (ნორმაში ის 19,6 Å-ის ტოლია). ეს კი იმის მაუწყებელია, რომ სუბდომენი 1 გადაინაცვლება აქტინის ღერძიდან გარე მიმართულებით. იმის გამო, რომ Cys374 ლოკალიზებულია აქტინის და მიოზინის ურთიერთობის ცენტრთან ახლოს, მანძილის ასეთმა ზრდამ შეიძლება მიიყვანოს სისტემა აქტინის ძაფზე მიოზინის თავის უფრო სუსტ ტანგენციალურ მიერთებამდე, ანუ ძალის გენერირებადი ძლიერი კავშირის შესუსტებამდე.

აქტინის სუბდომენ 2 დომენებს შორის ნაპრალის შესასვლელთან მყოფი Liz61-ზე მიერთებული (სურ. 138a,c,e) FITC-ის ქცევა მოწმობს იმაზე, რომ Liz61-ის მიდამოები Cys374-საგან განსხვავებით, პირიქით, ხდება ქიმიურათ ნაკლებად ეკრანირებული, ღია, ისევე როგორც ტამ<sub>10</sub>დღ-ით განპირობებული მძიმე გნ-ის შემთხვევაში (სურ. 138). მეტიც, FITC-ის ფლუორესცენციის ინტენსივობა გქნ-ის დროს იზრდება არა მხოლოდ საკუთარი ფლუორესცენციის გაზრდის ხარჯზე, არამედ ინდუცირებულიც, რომელიც წარმოიქმნება 1,5-IAEDANS-ის აგზნებისას, თანაც მაშინაც კი, როდესაც 1,5-IAEDANS-ის ნათების ინტენსივობა ნორმაზე ორჯერ ნაკლებია. ეს მეტყველობს ენტროპიის და თავისუფალი ენერჯის მკვეთრ ზრდაზე, ანუ სტრუქტურის სტაბილიზაციაზე, შინაგანი ენერჯის შემცირებაზე როგორც ჩანს მთლიანად აქტინის პირველ დომენში, ისევე როგორც ათერიოიდური მიოკარდიოდისტროფიის შემთხვევაში.

<sup>109</sup> ბიოქიმიამი ფლუორესცენტულ სანიშნად გამოიყენებენ სხვადასხვა ფლუოროფორ შემცავ მოლეკულებს. **ფლუოროფორი** წარმოადგენს მოლეკულის ფრაგმენტს, რომელიც ანიჭებს მას ფლუორესცენტულ თვისებებს. როგორც წესი ფლუოროფორი წარმოადგენს კარბო- ან ჰეტეროციკლურ ბირთვს, რომელიც შთანთქამს გარკვეული ტალღის სიგრძის მქონე ენერჯიას (აბსორბცია) შემდეგ კი გამოასხივებს სხვა სიგრძის ენერჯიას (ემისია). ენერჯიის რაოდენობა და გამოსხივებული სინათლის ტალღის სიგრძე ფლუოროფორის ქიმიურ ბუნებაზე და მისი გარემოცვის პარამეტრებზეა დამოკიდებული (სიბლანტე, პოლარობა და ა.შ.). **FITC** — ერთერთი ფართოდ გამოყენებადი სანიშნი (აბსორბცია – 490 ნმ; ემისია – 520 ნმ).



სურ. 138. აქტინის ატომური მოდელის მიხედვით აგებული მისი პროტომერების (a,c,e) და წვრილი ძაფების (b,d,f) ჰიპოტეტური მოდელები: პრაქტიკულად ჯამრთელი ადამიანის გულის შემთხვევაში (a,b), ქგუ-ით ავადმყოფისა (c,d) და ქგუ-ით ავადმყოფის გულიდან ოლონდ სგ-ით ზეგავლენისას (e,f). წვრილი ძაფების აგებისას მიღებული იყო სპირალის შემდეგი პარამეტრები ნორმაში:  $c = 770\text{\AA}$ ;  $p/q = 28/13$ , დიამეტრი  $100\text{\AA}$ . გუ-ს დროს:  $c = 687\text{\AA}$ ;  $p/q = 25/12$ , დიამეტრი  $140\text{\AA}$ .

ამ დროს მანძილი *Cys374* და *Lys61*-ის შორის, პრაქტიკულად ჯამრთელი ადამიანის მიოკარდის აქტინის მაკრომოლეკულაში იზრდება 17%-ით (0,8 ნმ-ით), ხოლო მანძილი თვით ნაპრალში, ნუკლეიდდამაკავშირებელი ცენტრის მახლობლად მყოფი *Cys374* და *Tyr69*-ის შორის, მცირდება 19%-ით (ცხრილი 29). სწორედ ეს წარმოადგენს კონფორმაციული მდგომარეობის ცვლილებაში ძირითად განსხვავებას მწვავე და ქრონიკული გნ-ის დროს.

გქნ-ის შემთხვევაში აქტინის სუბდომენ 2-ში მყოფი *Tyr69* შორდება სუბდომენ 1-ში მყოფი *Cys10* 25,9%-ით. ეს კი საფუძველს იძლევა ვივარაუდოთ, რომ აქტინის მოლეკულაში გქნ-ის დროს ისევე როგორც ტამ<sub>10დღბ</sub>-ით განპირობებული მძიმე გნ-ის შემთხვევაში და მიოკარდიუმის მწვავე ინფაქტის დროს, ნაპრალი აქტინის მონომერის დომენებს შორის გაიშლება და აქტინის მონომერი, როგორც ჩანს, „იყინება“ ასეთ გაშლილ მდგომარეობაში. ასეთი აქტინის პოლიმერიზაციას (ძაფის წარმოქმნას), ისევე როგორც პოლიმერიზაციას ნორმალური აქტინის შემთხვევაში, თან არ ახლავს მის მოლეკულაში მიმდინარე მნიშვნელოვანი გარდაქმნები – არ იცვლება არომატული ამინომჟავების ნაშტების ოპტიკური აქტივობა. აქტინის მონომერი გულის ქრონიკული ნაკლოვანების დროს ირთვება აქტინის ძაფში შესაბამისი კონფორმაციული ცვლილებების გარეშე (სურ. 138c,d). ამაზე მეტყველობს ის ფაქტიც, რომ გქნ-ით დავაადებული მიოკარდის აქტინის პროტომერში მანძილი *Cys374* და *Lys61* და ასევე *Cys374* და *Tyr69* შორის, ისეთივეა როგორც აქტინის მონომერებისთვისაა დამახასიათებელი, და ნორმის ნაირად არა

მცირდება შესაბამისად 17 და 25%-ით (ცხრილი 29). მიუხედავად იმისა, რომ მანძილი Tyr69 და Cys10 მცირდება 12%-ით, ის მაინც არ აღწევს პრაქტიკულად ჯამრთელი ადამიანის აქტინის ძაფში მყოფი პროტომერებისათვის დამახასიათებელ მნიშვნელობას. შედეგად, გქნ-ის შემთხვევაში ხორციელდება აქტინის ძაფის პროტომერების ზომების ზრდა, რაც განპირობებულია პროტომერის ნაპრალის გახსნით და გასწორებით, და რასაც თან ახლავს პოლიპეპტიდური ჯაჭვის C-ბოლოში მყოფი Cys374-ის აქტინის ღერძიდან 5 – 6 Å-ით (20%) გადანაცვლება.

მანძილების ზემოდ აღნიშნული ცვლილებები გქნ-ის დროს არღვევენ ურთიერთობას აქტინის პროტომერსა და მიოზინის თავს შორის. შედეგად, აქტომიოზინის კომპლექსში, მანძილი გქნ-ის მქონე ავადმყოფის F-აქტინის ძაფში მყოფი Cys374 და (SH1) მიოზინის Cys707 შორის იზრდება (58 Å-დან ნორმაში – 68 Å-მდე რიგორში (18%) და 67 Å-მდე შეკუმშვისას (13%)), ხოლო Cys374 და Liz83-ის შორის შეკუმშვის პირობებში – 40%-ით. პათოლოგიური მიოზინის ნორმალურით შეცვლისას აღნიშნული მანძილები არ იცვლება. ამის გამო შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ აღნიშნული მანძილების ცვლილება განპირობებულია აქტინის Cys374-ის მიკროგარემოცვაში რეკომბინაციული გარდაქმნებით და მოწმობს იმის სასარგებლოდ, რომ გენერირებული ძალისა და ATP-ის  $\Delta G$  ჰიდროლიზის მნიშვნელობების შემცირება გქნ-ის შემთხვევაში განპირობებულია არა მხოლოდ აქტინში კოპერატიული გარდაქმნების დაქვეითებით (სტრუქტურის დეფორმირების გამო), არამედ აქტინ-მიოზინის კონტაქტის დაქვეითებითაც, განსაკუთრებით კი ძლიერი ძალის გენერირებადი კავშირის შექმნისას, აქტინის მოლეკულის გეომეტრიის ცვლილების გამო. ამრიგად, არა მხოლოდ კონფორმაციული არამდგრადობის მკვეთრი შემცირება არამედ აქტინის და მიოზინის სტერიული ურთიერთობის დარღვევაც წარმოადგენს აქტომიოზინის ანსამბლის კუმშვადობის შემცირების საფუძველს გქნ-ის დროს.

ყველაფერი ზემოთქმულიდან შეიძლება უმნიშვნელოვანესი დასკვნის გაკეთება – არ შეიძლება რომელიმე ერთ ცილას, აქტინს ან მიოზინს, მიეცეს პასიური როლი. ყველა ცილა ასრულებს აქტიურ როლს ძალის გენერირების პროცესში.



## 17. ცოცხალი ორგანიზმი და მართვის სისტემები.

### 17.1. მართვის სისტემები.

როგორც არაერთხელ აღვნიშნეთ, ცოცხალი ორგანიზმები წარმოადგენენ თვითრეგულირებად, თვითორგანიზებად ადაპტიურ სისტემებს. ამგვარად ისინი უნდა იღებდნენ ენერჯიას გარე სამყაროსაგან და იყენებდნენ მას თავისი ბიოლოგიური ფუნქციების განსახორციელებლად. ეს შესაძლებელია იმის გამო, რომ ცოცხალი ორგანიზმი წარმოადგენს თერმოდინამიკური თვალსაზრისით არა სითბურ, არამედ ქიმიურ მანქანას. ეს კი ნიშნავს, რომ ორგანიზმში ხორციელდება შეუქცევადი პროცესები. ამავე დროს თვითრეგულაცია და ადაპტაცია შეუძლებელია ისეთი პროცესების გარეშე როგორცაა ინფორმაციის გადაცემა და რეგულაცია. ასე რომ ინფორმაცია შეიძლება განვიხილოთ როგორც ენერჯიის ფორმა, რომელიც გავლენას ახდენს აღწერილ ქიმიურ მანქანაზე.

პირველყოვლისა საჭიროა გავერკვეთ ენერჯიისა და ინფორმაციის ცნებებში. ენერჯია და ენერგეტიკული გარდაქმნები ჩვენს მიერ უკვე არა ერთხელ იყო განხილული, ამიტომ ახლა გავამახვილოთ ყურადღება ინფორმაციაზე. მაგრამ, ვინაიდან როგორც ინფორმაციის დამუშავებისა და გადაცემისათვის ასევე ენერგეტიკული გარდაქმნებისათვის უნდა განვიხილოს ამ პროცესებში მონაწილე ელემენტების სისტემური ორგანიზება, რისთვისაც საჭიროა ენერგეტიკული და ინფორმაციული სისტემების განსაზღვრა.

ენერგეტიკულ სისტემებს მივაკუთნით ისეთ სისტემებს, რომლებიც ენერჯიის მიღებასთან, გაცემასთან და გამოყენებასთან არიან დაკავშირებულნი. ესენია პროცესები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ორგანიზმის ზრდას, გადაადგილებას და საერთოდ ნებისმიერ სხვა ფუნქციის შესრულებას.

ინფორმაციული სისტემებია ისეთი სისტემებია, რომლებიც უკავშირდებიან ინფორმაციის მიღებას, შენახვას და გადამუშავებას. ეს პროცესები განსაზღვრავენ მართვას, ანუ იმას, თუ რა ფუნქციებს ასრულებს ორგანიზმი და რა სიჩქარით.

როგორც აღვნიშნეთ, ეს სისტემები ერთმანეთისაგან გამოცალკევებულად და მითუმეტეს დაპირისპირებულად კი არ უნდა წარმოვიდგინოთ, არამედ უნდა გვესმოდეს, რომ ასრულებენ რა უმნიშვნელოვანეს როლს ორგანიზმის ცხოველმოქმედებაში, მჭიდროდ არიან ერთმანეთზე გადაჯაჯულნი და ფაქტიურად ერთი და იგივე მოვლენის ორ მხარეს წარმოადგენენ. ორივე მექანიზმის ერთობლივი მოქმედება უზრუნველყოფს დინამიურ წონასწორობის შენარჩუნებას ორგანიზმის ღია სისტემაში.

ყოველივე ზემოთ თქმული ცხადყოფს, რომ ცოცხალი ორგანიზმის ქიმიურ მანქანად წარმოდგენა მეტად გააუბრალოებდა სიტუაციას და შეიქმნებოდა შთაბეჭდილება, რომ ცოცხალ ორგანიზმში ენერჯიის გარდაქმნას მხოლოდ ქიმიური კიბერნეტიკის კანონები განსაზღვრავენ. სინამდვილეში საქმე გაცილებით რთულადაა, თუნდაც იმიტომ, რომ ცოცხალი ორგანიზმი თვითრეგულირებადი სისტემაა. ნებისმიერი სისტემა კი შეიცავს ქვესისტემების გარკვეულ სიმრავლეს. ორგანიზმის შემთხვევაში ესენი არიან ფიზიოლოგიური სისტემები: ნერვული, გულსისხლძარღვული, საჭმლის მომნელებელი და ა.შ. ფიზიოლოგიური სისტემები ფუნქციონირებენ ერთმანეთთან მჭიდრო კავშირში და უზრუნველყოფენ ორგანიზმის, როგორც მთლიანი ერთეულის ფუნქციონირებას.

მართვის მექანიზმები შეიძლება გაიყოს ორ ტიპად იმის მიხედვით რეგულირებადი ზემოქმედება თვით მართული სისტემის შიგნით აღმოცენდება, თუ მას რაიმე სპეციალური, მართული ელემენტისაგან გამოცალკევებული მექანიზმი გამოიმუშავებს. ამგვარად განვიხილავენ შინაგან – ენდოგენურ, და გარე – ეგზოგენურ მართვას.

მაგრამ, სანამ დავიწყებთ მართვის სისტემებში გარკვევას, კიდევ ერთხელ დაუბრუნდეთ ინფორმაციის ცნებას, და გავსაზღვროთ თუ რას წარმოადგენს ინფორმაცია.

## 17.2. ინფორმაცია.

ყველაზე მოკლე და ამასთან ინფორმაციის ყოვლისშემცველი განმარტება მოიყვანა შენონმა. როგორც ჩვენ უკვე ავლინებთ, ინფორმაცია, შენონის განმარტებით — ეს არის ცნება რაიმეს შესახებ. არსებობს ამ ცნების სხვა განმარტებებიც. ასე, ნ.ვინერის განმარტებით — ინფორმაცია წარმოადგენს ჩვენი და ჩვენი გრძნობების გარე სამყაროსთან შეწყობის პროცესში მისგან მიღებული შიგთავსის აღნიშვნას. კიბერნეტიკული კონცეფციის თანახმად ინფორმაცია შეიძლება შევაფასოთ როგორც გარკვეული ცოდნა, რომელსაც გააჩნია ფასეულობის ერთი საზომი გარე სამყაროსთან მიმართებაში (სემანტიკური ასპექტი) მეორე კი მიმდებთან, მის მიერ დაგროვილ ცოდნასთან, შეცნობის მიზნებთან და ამოცანებთან (პრაგმატული ასპექტი).

ინფორმაცია შეიძლება არსებობდეს მისი მატარებლისაგან დამოუკიდებლად, ანუ ვირტუალურად – ინფორმაციული ველის დონეზე. მაგრამ, ის შეიძლება იყოს გადატანილი მატერიალურ მატარებელზე. მარტივად რომ ითქვას ის შეიძლება ჩაიწეროს. შევნიშნოთ, რომ ამ შემთხვევაში ინფორმაცია უნდა იყოს რამენაირად კოდირებული (ბგერებით, სიმბოლოებით, ცნებებით, ნეირონების სტრუქტურაში და ა.შ.), ანუ საჭიროა მისი კოდირების დონეების განხილვა. კოდირებული ინფორმაცია უკვე შეიძლება ჩაიწეროს თავის მატარებელზე, კერძოდ კი ნეირონების სტრუქტურაში, იმ პირობით, რომ მეტი სანდოობისათვის საჭიროა მისი მრავალჯერადი დუბლირება სხვადასხვა ნეირონების სტრუქტურაში. მაგრამ როგორც მატარებელზე ინფორმაციის ჩაწერისათვის ისევე მისი ამოკითხვისათვის აუცილებელია რაღაც საკომუნიკაციო მოწყობილობა და გარკვეული „ჩაწერა-ამოკითხვის“ ალგორითმის არსებობა. თავად ინფორმაცია არ შეიძლება ჯადოსნური ხერხით გადავიდეს თავის მატარებელზე, ან და ამოკითხული იყოს იქიდან.

ჩვენს გარშემო მიმდინარე მოვლენებს შორის, რომლებიც თავიდან ჩვეულებრივი და ყოველდღიური გვეჩვენებოდა, საგულდაგულო ანალიზის შედეგად შეიძლება გამოვლინდეს ბევრი საინტერესო ფაქტი, რომელიც თავიდან შეუმჩნეველი გვჩვენებოდა. ეს ეხება ინფორმაციის კოდირებასაც. თავად სიტყვის სემანტიკიდან გამომდინარე შეიძლება მოგვეჩვენოს, რომ კოდირება წარმოადგენს რაღაც საიდუმლოს. ეს სიტყვა ასოცირებს ჩვენში საიდუმლოებრიობასთან, შიფრირებასთან და პაროლებთან. მაგრამ ინფორმაციის კოდირება ეს ჩვეულებრივი პროცედურაა, რომელსაც ჩვენ ყოველწუთს ვატარებთ და ყურადღებასაც კი არ ვაქცევთ ამას. იმისათვის რომ გავერკვიოთ ამ ცნებაში საჭიროა კოდირების პროცესის სისტემატიზირება, მისი დონეებად დაშლის მეშვეობით. თანაც უნდა აღინიშნოს, რომ ეს სისტემატიზირება ატარებს არც თუ ისე ობიექტურ ხასიათს, ვინაიდან დამოკიდებულია ცოდნის დონეზე ჩვენს გარშემო მყოფი რეალობის შესახებ, რომელსაც ჩვენ ამჟამად ვფლობთ.

მაშ ასე, ინფორმაციის კოდირების რა დონეებს ფლობს კაცობრიობა ამჟამად?

1. როგორც უკვე აღინიშნა, ინფორმაცია წარმოადგენს ცნებას რაიმეს შესახებ. ამ განმარტებიდან გამომდინარე, თვით ინფორმაცია ვირტუალურია. ინფორმაციის მატერიალიზება ხდება მისი რაიმე მატარებელზე მოთავსებისას, მაგრამ ამ ოპერაციისათვის საჭიროა რამენაირად განისაზღვროს ინფორმაციული ელემენტები. შემოვიღოთ აღნიშნული ელემენტების რამენაირი მონიშვნების ან განმარტებების სისტემა, ანუ საჭიროა მისი რაიმე სახით კოდირება. ინფორმაციის თავის ტვინში მოთავსებისას კოდირება ატარებს წარმოსახვით ხასიათს. ეს ნიშნავს, რომ ჩვენ გავნსაზღვრავთ ცნებებს და საგნებს მათი სახოვანი ანალოგიებით, რომლებიც თავსდებათ ინფორმაციის მატარებელზე – თავის ტვინის ნეირონებში. დავსძინოთ, რომ ინფორმაციის ანალოგიური კოდირება ამ ყველაზე დაბალ დონეზე შესაძლებელია ხორციელდებოდეს ცოცხალი სამყაროს სხვა წარმომადგენლების გონებაშიც.

2. შემდეგი, კოდირების უფრო მაღალი დონე, განისაზღვრება მეტყველობის უნარით, ენით რომლითაც ურთიერთობენ ცოცხალი სამყაროს წარმომადგენლები, რომლებსაც გააჩნიათ კოდირების ეს დონე. რაც მეტია ენის ორგანიზების დონე, მით უფრო მაღალია ამ ენაზე მოსაუბრე არსებების ინტელექტი. ისევ და ისევ ეს შეიძლება იყოს როგორც ადამიანი, ასევე არსებები, რომლებიც ადამიანმა დააყენა ცმნობიერების უფრო დაბალ საფეხურზე, და საერთოდ ინტელექტის და ცნობიერების არ არსებობის დონეზე. თუ რას წარმოადგენს ინტელექტი, ჩვენ ამაზე მოგვიანებით კიდევ ვისაუბრებთ. ამ საფეხურზე ინფორმაციის კოდირებისათვის და შემდგომი დეკოდირებისათვის აუცილებელი პირობაა – კოდის ფლობა, მოცემულ შემთხვევაში კი ურთიერთობის ენის ცოდნა.
3. იმისათვის რომ შეგვეძლოს დიდი ხნით ინფორმაციის დამახსოვრება, ან და მისი შორს მყოფ რესპონდენტებისათვის გადაცემა, კაცობრიობამ გამოიგონა ინფორმაციის რიგით შემდეგი, უფრო მაღალი დონის კოდირება – დამწერლობა. აქ შესაძლებელია როგორც ცალკეული გამოსახვების და ცნებების კოდირება (მაგალითად, იეროგლიფებით), ასევე ცალკეული ბგერების კოდირებაც (ანბანის დამწერლობა). კოდირების ამ დონეზე ასევე აუცილებელია კოდის, ანუ საურთიერთო ანბანის ცოდნა.
4. კოდირების ეს დონე საჭიროა კოდირების მესამე დონით (სიმბოლოებით) კოდირებული ინფორმაციის დიდ მანძილზე (მაგალითად, მავთულებით) გადასატანათ ელექტრული სიგნალის მეშვეობით. ან და ინფორმაციის ელექტრონულ მატარებლებზე მისი ჩაწერისათვის. ვინაიდან საუბარია ელექტრული სიგნალის გადაცემაზე, სწორე იქნებოდა ამ მიზნისათვის ბინარული კოდის გამოყენება.

რამდენჯერმე რომ ავაგდოთ მონეტა, და ავღრიცხოთ მისი დაცემის მხარეები, ჩვენ მივიღებთ გარკვეულ ინფორმაციას ამ მოვლენის შესახებ. მონეტის ორივე მხარე „თანაბარუფლებიანია“, ამიტომ თითოეული გვერდის ამოსვლას ერთნაირი ალბათობა გააჩნია. ასეთ შემთხვევაში იძახიან რომ მოვლენას გააჩნია ინფორმაციის 1 ბიტი. თუ ჩავდებთ ტომარაში ორ სხვადასხვა ფერის ბურთულას, მაშინ ალაღბედზე ბურთულის ამოღებისას ჩვენ ასევე ბურთულის ფერის შესახებ მივიღებთ 1 ბიტ ინფორმაციას. თუ ტომარაში იქნება სამი სხვადასხვა ფერის ბურთულა, მაშინ ჩვენ დაგვჭირდება 3 თანაბარალბათური ფერიდან ამორჩევა, ხოლო ინფორმაციის რაოდენობა უკვე იქნება 2 ბიტი. მიაქციეთ ყურადღება, რომ 4 ფერის ბურთულების შემთხვევაში ინფორმაცია ფერის შესახებ ისევ 2 ბიტს შეადგენს. ამიტომ 3 ბურთულას შემთხვევაში უპირანი იქნებოდა ინფორმაციის სხვა ერთეულის – ტრიტის<sup>110</sup> გამოყენება. ასეთი სახის მსჯელობები ჩვენ შეგვიძლია კიდევ გავაგრძელოთ და გავზარდოთ თანაბარალბათური მოვლენების რაოდენობა, რათა შემოვიღოთ ინფორმაციის გაზომვის სხვადასხვა ერთეულები. მაგრამ, სადღეისოთ ინფორმაციის გაზომვის ერთეულად მიჩნეულია ბიტი (bit) – ინგლისური სიტყვების binary digit შემოკლება, რაც ორობით რიცხვს ნიშნავს. ბინარული ერთეულის სასარგებლოდ არჩევნის გაკეთება განაპირობა იმ გარემოებამ, რომ ინფორმაციის რაღაც მანძილზე ნერვული ბოჭკოთი, სატელეგრაფო მავთულებით თუ რაღაც რთული ელექტრონული მოწყობილობით გადასატანად, გამოიყენება ელექტრული მუხტი. ეს კი ნიშნავს, რომ შეიძლება ის ან იმყოფებოდეს ინფორმაციის მატარებელზე ან და მავთულებით იყოს გადატანილი ან ის იქ შეიძლება არ იმყოფებოდეს. ანუ ჩვენ უბრუნდებით ინფორმაციის ბინარულ ხასიათს. ამრიგად, **1 ბიტი ინფორმაცია** შეიძლება განისაზღვროს როგორც **ორი თანაბარალბათური მოვლენიდან ერთის ამორჩევა** და ინფორმაციის რაოდენობის განსაზღვრისას ბიტი წარმოადგენს ინფორმაციის მინიმალურ რაოდენობას.

<sup>110</sup> ტრიტი – სამი თანაბარალბათური მოვლენიდან ერთის ამორჩევა.

განვიხილოთ თუ როგორ შეგვიძლია შეტყობინებაში ინფორმაციის რაოდენობის დათვლა, მისი შინაარსიდან გამომდინარე.

ვთქვათ რაიმე შეტყობინება შეიცავს ცნობას იმის თაობაზე, რომ  $N$  თანაბარალბათური მოვლენიდან განხორციელდა ერთ-ერთი. მაშინ, ინფორმაციის  $x$  რაოდენობა, რომელიც ამ შეტყობინებაშია მოქცეული და მოვლენათა საერთო  $N$  რაოდენობა უკავშირდება ერთმანეთს ფორმულით:  $2^x = N$ . ამ განტოლების ამონახსენი ასე გამოიყურება:

$$x = \log_2 N \quad (148)$$

ანუ ინფორმაციის სწორედ ეს რაოდენობაა საჭირო  $N$  ტოლმნიშვნელოვანი ვარიანტიდან შემდგარი განუსაზღვრობის აღმოსაფხვრელად. ფორმულა (148) ცნობილია ხარტლის ფორმულის სახელით. ის მიღებულია ჯერ კიდევ 1928 წ აშშ-ის ინჟინერის რ.ხარტლის მიერ. ინფორმაციის მიღების პროცესი მან შემდეგნაირად ჩამოაყალიბა: თუ  $N$  ტოლმნიშვნელოვანი ელემენტისაგან შემდგარ მოცემულ სიმრავლეში გამოვყავით რაღაც  $x$  ელემენტი, რომელზეც ცნობილია მხოლოდ ის რომ ის ამ სიმრავლეს მიეკუთვნება, მაშინ იმისათვის რომ ვიპოვოთ  $x$  საჭიროა მივიღოთ  $\log_2 N$ -ის ტოლი ინფორმაციის რაოდენობა.

როგორ იყო ნაჩვენები, ინფორმაცია შეიძლება გაიზომოს, განისაზღვროს მისი რაოდენობა. მაგრამ რაოდენობრივად ერთი და იგივე ინფორმაცია შეიძლება იყოს უფრო სასარგებლო, ფასეული ერთი სისტემისათვის და ნაკლებად ფასეული მეორესათვის. მაშასადამე, შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ინფორმაციას გააჩნია სემანტიკური ხასიათი. არსებობს კი რაიმე პარამეტრი, რომლითაც შეიძლება ინფორმაციის ფასეულობის განსაზღვრა?

აქ საჭიროა აღინიშნოს, რომ სისტემის მიერ გარკვეული ინფორმაციის მიღების შემდეგ, მასში შეიძლება აღიძრას რაღაც პროცესები, შეიძლება კი არაფერი მოხდეს. არაფერი მოხდება თუ მოცემულ სისტემისათვის მის მიერ მიღებული ინფორმაცია არ წარმოადგენს არანაირ ფასეულობას. თუ კი სისტემაში იწყება რამენაირი ცვლილებები, ეს აისახება მის მდგომარეობაზე, რომლის ცვლილება შეიძლება განისაზღვროს თერმოდინამიკური პარამეტრის – ენტროპიის მეშვეობით.

როგორც ჩვენთვის ცნობილია, თერმოდინამიკაში იყენებენ დამხმარე სიდიდეს (მდგომარეობის ფუნქციას), რომელსაც ენტროპია ეწოდება ( $s$ ). ეს სიდიდე შეიძლება დაკავშირდეს თერმოდინამიური მდგომარეობის ალბათობასთან ( $W$ ) შემდეგნაირად. რაც მეტია თერმოდინამიური მდგომარეობის ალბათობა, მით მეტია მისი ენტროპია და პირიქით. ენტროპია ახასიათებს მოლეკულების მოწესრიგებლობის ხარისხს და უკავშირდება თერმოდინამიურ ალბათობას შემდეგი შეფარდებით:

$$s = k \ln W$$

სადაც,  $k$  – ბოლცმანის უნივერსალური მუდმივაა ( $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  ერგ/გრად).

უნდა აღინიშნოს, რომ მოყვანილი ფორმულა ძალიან ჰგავს ზემოდგანხილულ ხარტლის ფორმულას, რომელიც აკავშირებს მიღებული ინფორმაციის რაოდენობას მოვლენის ალბათობასთან, ეს კი ნიშნავს, რომ სისტემის ენტროპია შეიძლება განიხილოს როგორც გარკვეული ინფორმაცია, რომელსაც ეს სისტემა ფლობს. ინფორმაციის თეორიაში გამოიყენებენ ინფორმაციული ენტროპიის ცნებას, რომელიც შემდეგნაირად განისაზღვრება: ენტროპია — ეს ინფორმაციის რაოდენობაა რომელიც მოდის ისეთი წყაროს ელემენტარულ შეტყობინებაზე, რომელიც გამოიმუშავებს სტატისტიკურად დამოუკიდებელ შეტყობინებებს. თანაც ინფორმაციის ეს რაოდენობა უნდა სცვლიდეს სისტემის შინაგან მდგომარეობას.

მაშ ასე, თუ სისტემაში ინფორმაციის მიღების შემდეგ არაფერი ხდება, ენტროპიის ცვლილება იქნება ნულის ტოლი ( $ds = 0$ ), რაც იმას ნიშნავს, რომ მიღებული ინფორმაცია არ წარმოადგენს აღნიშნულ სისტემისათვის არანაირ ფასეულობას. თუ კი ენტროპიის ცვლილება განსხვავდება ნულისაგან, მაშინ მასში დაიწყება რაღაცა პროცესები, და ეს ნიშნავს, რომ განხილულ ინფორმაციას გააჩნია გარკვეული ფასეულობა სისტემისათვის. ამ ცვლილების ნიშანს მნიშვნელობა არა აქვს, ნებისმიერ შემთხვევაში სისტემის მიერ მიღებულ ინფორმაციას გააჩნის მისთვის გარკვეული ფასეულობა. ოღონდ, თუ  $ds > 0$  (ენტროპია იზრდება) ეს იქნება მაუწყებელი იმისა, რომ სისტემამ მიიღო პათოგენური, მისთვის მავნე ინფორმაცია. თუ კი  $ds < 0$  (ენტროპია მცირდება), მაშინ სისტემაში იწყება ახალი სტრუქტურების წარმოქმნა, ანუ ის სასარგებლოა სისტემისათვის. მოყვანილი მსჯელობები ეხებოდა ეგრე წოდებულ თერმოდინამიურ ენტროპიას. ეხლა კი მოდით უფრო მკაფიოდ განვსაზღვროთ ინფორმაციული ენტროპია და დაუკავშიროთ მას სისტემის მიერ მიღებული ინფორმაციის რაოდენობა. შემდგომში ენტროპიაზე საუბრისას ჩვენ გვექნება მხედველობაში სწორეთაც რომ ინფორმაციული ენტროპია, თუ კი ეს არ იქნება სპეციალურად დათქმული.

**ენტროპია** – ეს არის რიცხობრივი საზომი, რომელიც ასახავს სისტემის მდგომარეობის განუსაზღვრელობას.

შემოვიღოთ შემდეგი პარამეტრები:

$\alpha$  – წინასწარი (აპრიორული) ცნობები სისტემაზე.

$H(\alpha)$  – სისტემის მდგომარეობის განუსაზღვრელობა (ენტროპია).

$\beta$  – რაღაცა შეტყობინება.

$H_\beta(\alpha)$  – სისტემის მდგომარეობის განუსაზღვრელობა  $\beta$  შეტყობინების მიღებისას.

$I_\beta(\alpha)$  – სისტემის მიერ მიღებული ინფორმაციის რაოდენობა.

ნათელია, რომ სისტემის მიერ ინფორმაციის მიღების შედეგად უნდა შეიცვალოს მისი მდგომარეობის განუსაზღვრელობა. ამიტომ სისტემის მიერ მიღებული ინფორმაცია შეიძლება შეფასდეს შემდეგი შეფარდებით:

$$I_\beta(\alpha) = H(\alpha) - H_\beta(\alpha) \quad (149)$$

განვიხილოთ სისტემის მდგომარეობის განუსაზღვრელობის ფუნქციის, ანუ ენტროპიის ( $H = f(\alpha)$ ) ზოგიერთი თვისება:

1.  $f(1) = 0$ , რათგან,  $n = 1$  შემთხვევაში, შედეგი არ იქნება შემთხვევითი და განუსაზღვრელობას არა აქვს ადგილი.
2.  $f(n)$  იზრდება  $n$ -ის გაზრდასთან ერთად, რაც მეტია შესაძლო შედეგების რაოდენობა, მით უფრო ძნელია ვიწინასწარმეტყველოთ შედეგი.
3. თუ კი  $a$  და  $b$  ასახვენ ორ დამოუკიდებელ ცდას, რომელთა თანაბარალბათური შედეგების რაოდენობა  $n_a$  და  $n_b$ -ს ტოლია, მაშინ მათი ჯამური განუსაზღვრელობის ზღვარი ცალკეული ცდის განუსაზღვრელობის ზღვრების ჯამის ტოლია:

$$f(n_a) + f(n_b) = f(n_a, n_b)$$

აქ საჭიროა დამატებითად აღინიშნოს, რომ ენტროპიის ცნება იყო შემოღებული შენონის მიერ 1948 წ. დახმარებული საკომუნიკაციო არხის მეშვეობით ინფორმაციის რაციონალური გადაცემის პრობლემის შესწავლისას. მის მიერ, კომუნიკაციის შინაარსის გასარკვევად იყო გამოყენებული ალბათური მიდგომა და იყო შექმნილი პირველი, ჭეშმარიტად მათემატიკური, ენტროპიის თეორია. ეს სრულიად არ ნიშნავს, რომ ენტროპიის გამოყენება შეიძლება კავშირის არხებით მხოლოდ სიმბოლური ინფორმაციის გადასატანად. დავიწყოთ იქიდან, რომ კავშირის არხები არ შემოიფარგლება მავთულე-ბით. აქ შეიძლება განიხილოს ნერვული იმპულსის გადაცემის არხები. რაც შეეხება

სიმბოლური ინფორმაციის გადაცემას, აქ საჭიროა გავიხსენოთ ზემოთ განხილული ინფორმაციის კოდირების დონეები და დავძინოთ, რომ კავშირის არხებით შეიძლება ნებისმიერი დონით კოდირებული ინფორმაციის გადატანა. უბრალოდ არხები უნდა შეესაბამებოდეს კოდს. ასე მაგალითად, წარმოსახვითი ინფორმაციის გადატანისას (კოდირების პირველი დონე) არხებმა უნდა გაატარონ ანალოგური სახის ინფორმაცია. ამიტომაც, მასალის აღქმის გამარტივების მიზნით, ჩვენ განვიხილავთ მეოთხე დონით კოდირებული ინფორმაციის გადატანას.

მაშ ასე, **ენტროპია** ესაა ინფორმაციის ქაოტურობის ზომა, პირველადი ანბანის რაიმე სიმბოლოს გამოჩენის განუსაზღვრულობა. ინფორმაციული დანაკარგების არარსებობის შემთხვევაში, ის რიცხობრივად გადატანილი შეტყობინების ერთ სიმბოლოზე მოსული ინფორმაციის რაოდენობის ტოლია.

ასე მაგალითად ავიღოთ სიმბოლოთა თანმიმდევრობა რომლებიც ადგენენ წინადადებას ქართულ ენაზე. ყოველი სიმბოლო გამოვლინდება განსხვავებული სიხშირით, მაშასადამე, ზოგი სიმბოლოს გამოვლენის განუსაზღვრობა მეტია ზოგის კი ნაკლები. თუ კი გავითვალისწინებთ, რომ ზოგი სიმბოლოთა კომბინაცია ძალზე იშვიათია, მაშინ განუსაზღვრობა კიდევ უფრო მცირდება (ამ შემთხვევაში საუბრობენ  $n$  – რიგის ენტროპიაზე).

ინფორმაციის და ენტროპიის კონცეფციებს ერთმანეთთან საკმაოდ ღრმა კავშირები გააჩნიათ, მაგრამ მიუხედავად ამისა თეორიული საკითხების დამუშავებისას თერმოდინამიკასა და ინფორმატიკაში დასჭირდად წლები, რათა ერთმანეთის შესაბამისობაში მოეყვანათ ეს ცნებები.

**ინფორმაციული ენტროპია** დამოუკიდებელი შემთხვევითი  $x$  მოვლენებისათვის  $n$  შესაძლო მდგომარეობით (1-დან  $n$ -მდე) გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i) \quad (150)$$

სადაც,  $p(i)$  – მე  $i$ -ე მოვლენის ალბათობა.

ამ სიდიდეს ( $p(i)$ ) ასევე **შეტყობინების საშუალო ენტროპიას** უწოდებენ, ხოლო (150) გამოსახულება **შენონის ფორმულის** სახელით არის ცნობილი. სიდიდეს  $\log_2 \frac{1}{p(i)}$  **კერძო ენტროპია** ეწოდება, და ის მხოლოდ მე  $i$ -ე მდგომარეობას ახასიათებს.

ამრიგად,  $x$  მოვლენის ენტროპია წარმოადგენს ყველა  $i$  მოვლენის შესრულების ფარდობითი სიხშირეების მათივე ორობით (ორის ფუძით) ლოგარითმებზე (ორის ფუძე აღებულია ორობით ფორმაში მყოფი ინფორმაციასთან მოხერხებული მუშაობისათვის) ნამრავლების ჯამს საწინააღმდეგო ნიშნით. დისკრეტული შემთხვევითი მოვლენების ეს განმარტება შეიძლება გაფართოვდეს ალბათობათა განაწილების ფუნქციისათვის.

ენტროპიის ეს განმარტება შენონმა გამოიყვანა შემდეგი მოსაზრებების გამო:

- ინფორმაციული ელემენტების საზომი უნდა იყოს უწყვეტი; ანუ, ალბათობის სიდიდის მცირე ცვლილებამ უნდა გამოიწვიოს საერთო ენტროპიის მცირე ცვლილება;
- იმ შემთხვევაში, როდესაც ყველა ვარიანტი (ასოები მოყვანილ მაგალითში) თანაბარ-ალბათურია, ვარიანტების რაოდენობრივ ზრდას (ასოთა რაოდენობის ზრდას) უნდა ყოველთვის მოყვეს სრული ენტროპიის ზრდაც;
- შესაძლებელი უნდა იყოს არჩევნის გაკეთება (ჩვენ შემთხვევაში ასოების) ორ ნაბიჯად, რომლებშიც საბოლოო შედეგის ენტროპია უნდა იყოს შუალედური შედეგების ენტროპიების ჯამი.

შენონმა უჩვენა, რომ ენტროპიის ნებისმიერი განმარტება, რომელიც აკმაყოფილებს ზემომოყვანილ მოსაზრებებს, უნდა იყოს წარმოდგენილი შემდეგი ფორმით:

$$-K \sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i) \quad (151)$$

სადაც,  $K$  – კონსტანტაა (და სინამდვილეში მხოლოდ გაზომვის ერთეულების ამორჩევისათვისაა საჭირო).

შენონმა დაადგინა, რომ ენტროპიის ცვლილებას

$$H = -p_1 \log_2 p_1 - \dots - p_n \log_2 p_n$$

რომელიც ინფორმაციის წყაროს მიმართ გამოიყენება, შეუძლია არხის მინიმალური გამტარობის შესაძლებლობებისათვის, რომელიც საჭიროა კოდირებული ორობითი რიცხვების სახით ინფორმაციის სანდო გადაცემისათვის, საჭირო მოთხოვნების განსაზღვრა. შენონის ენტროპიის საზომი ასახავს დაურწმუნებლობას შემთხვევითი ცვლადის რეალიზებაში. ამ რიგად, ენტროპია წარმოადგენს სხვაობას შეტყობინებაში მყოფი საერთო ინფორმაციის რაოდენობისა და ინფორმაციის იმ ნაწილს შორის, რომელიც ამ შეტყობინებაში დანამდვილებით არის ცნობილი (ან და კარგად პროგნოზირებადი). ამის მაგალითია ენის სიჭარბეობა — რაც გამოიხატება იმაში, რომ არსებობს სიტყვებში ასოების, თანმიმდევრობითი ასოთა წყვილების, სამ ასოებიანი ფრაგმენტების და ა.შ. გამოსვლის სტატისტიკური კანონზომიერება, ეგრე წოდებული მარკოვის ჯაჭვები<sup>111</sup>.

საერთო შემთხვევაში,  $S = (S, P)$  წყაროს **b-არული ენტროპია** (სადაც  $b = 2, 3, \dots$ ) საწყისი ანბანით

$$S = \{a_1, \dots, a_n\}$$

და ალბათობის დისკრეტული განაწილებით

$$P = \{p_1, \dots, p_n\}$$

სადაც,  $p_i$  წარმოადგენს  $a_i$ -ს ალბათობას ( $p_i = p(a_i)$ ), განისაზღვრება ფორმულით:

$$H_b(S) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_b p_i$$

ენტროპიის შენონისებრივი განმარტება ძალიანაა დაკავშირებული თერმოდინამიური ენტროპიის ცნებასთან. ბოლცმანმა და ჯიბსმა ბევრი რამ გააკეთეს სწორედ სტატისტიკურ თერმოდინამიკაში, რომელმაც ხელი შეუწყო სიტყვა „ენტროპიის“ მიღებას საინფორმაციო თეორიაში. არსებობს კავშირი თერმოდინამიკულსა და ინფორმაციულ ენტროპიებს შორის. მაგალითად, მაქსველის დემონი ასევე უპირისპირებს თერმოდინამიურ ენტროპიას ინფორმაციას, ანუ რაღაცა რაოდენობის ინფორმაციის მიღება დაკარგული ენტროპიის ტოლია.

### პირობითი ენტროპია.

თუ ანბანის სიმბოლოების თანმიმდევრობა არაა დამოუკიდებელი (მაგალითად, ფრანგულ ენაში „q“ ასოს თითქმის ყოველთვის მოყვება „u“, ხოლო სიტყვა „მოწინავე“-ეს საბჭოთა გაზეთებში ჩვეულებრივ წინ უსწრებდა სიტყვა „წარმოების“ ან „შრომის“, მაშინ ინფორმაციის რაოდენობა, რომელიც ასეთი სიმბოლოების თანმიმდევრობას მოაქვს (და მაშასადამე ენტროპია) უნდა იყოს ნაკლები. სწორედ ამ ფაქტების აღსარიცხავათ გამოიყენება პირობითი ენტროპია.

<sup>111</sup> მარკოვის ჯაჭვი – მოვლენათა თანმიმდევრობა, რომელშიც ყოველი მომდევნო მოვლენა თავის წინაბორბედზეა დამოკიდებული.

პირველი რიგის პირობითი ენტროპია (პირველი რიგის მარკოვის მოდელის ანალოგიურად) ეწოდება ენტროპიას იმ ანბანისათვის, რომელშიც ცნობილია ერთი ასოს გამოსვლის ალბათობა მეორის შემდეგ (ანუ ორსიმბოლოიანი კონბინაციების ალბათობები):

$$H_1(S) = - \sum_i p_i \sum_j p_i(j) \log_2 p_i(j)$$

სადაც,  $i$  – ეს არის წინა სიმბოლოზე დამოკიდებული მდგომარეობა, ხოლო  $p_i(j)$  – ეს უკვე  $j$ -ს ალბათობაა იმ პირობით, რომ  $i$  იყო მის წინამავალი სიმბოლო.

### თვისებები

მნიშვნელოვანია გვახსოვდეს, რომ ენტროპია წარმოადგენს რაოდენობას, რომელიც განისაზღვრება მონაცემთა წყაროს ალბათური მოდელის კონტექსტში. განვიხილოთ სხვადასხვა პროცესების ენტროპია, რისთვისაც გამოვიყენოთ მათთვის (150) ფორმულა.

დასაწყისისთვის განვიხილოთ თუ რას უდრის მონეტის აგდების ენტროპია. განსახილავი შემთხვევისათვის შესაძლო მდგომარეობების რაოდენობა  $n = 2$  (ავერსი, რევერსი), ხოლო მოვლენის ალბათობა (ავერსის ან რევერსის ამოვარდნა)  $p(i) = 0,5$ . მაშინ, მოვლენის ენტროპია, მისი დამოუკიდებლობის შემთხვევაში, იქნება ტოლი:

$$H(x) = -2(0,5 \log_2 0,5) = 1 \text{ ბიტი ერთ აგდებაზე}$$

ეხლა განვიხილოთ კამათლის აგდების ენტროპია. ამ შემთხვევაში შესაძლო მდგომარეობათა რაოდენობა  $n = 6$ , ხოლო კამათლის ერთერთი გვერდის გამოსვლის ალბათობა  $p(i) = 1/6$ . მაშინ, მოვლენის ენტროპია, ისევ და ისევ მისი დამოუკიდებლობის შემთხვევაში, იქნება ტოლი:

$$H(x) = -6 \left( \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} \right) = \log_2 6 \approx 2,58 \text{ ბიტი ერთ გაგორებაზე}$$

როგორც ვხედავთ, მოვლენის ენტროპიის განსაზღვრისას, ჩვენს მიერ იყო მიღებული ბიტების არამთელრიცხოვრივი მნიშვნელობა. მაგრამ, როგორც გვახსოვს, ინფორმაციის რაოდენობის განსაზღვრისას აღინიშნა, რომ 1 ბიტით მოიხსენებენ ინფორმაციის მინიმალურ რაოდენობას, რაც გამორიცხავს წილადი ბიტის არსებობას. საქმე იმაშია, რომ მოვლენათა ენტროპიის დათვლისას, სხვაობა მათ შორის შეიძლება იყოს სულ უმნიშვნელო. ამიტომაც, იმისათვის რომ მოგვეცეს შესაძლებლობა განისაზღვროს სხვაობა სხვადასხვა მოვლენათა ენტროპიებს შორის, გადაწყვიტეს, რომ ენტროპიის დათვლისას გამოიყენონ ბიტების არამთელრიცხოვრივი მნიშვნელობები.

განვსაზღვროთ იმ ინფორმაციის წყაროს ენტროპია, რომელიც აგენერირებს მხოლოდ "A" სიმბოლოებით შედგენილ სტრიქონს. ამ შემთხვევაში შესაძლო მდგომარეობების (კონბინაციების) რაოდენობა  $n = \infty$ , ხოლო ამ სიმბოლოს გამოყვანის ალბათობა  $p(i) = 1$  (ვინაიდან სტრიქონი შეიცავს მხოლოდ „A“-ს, ხოლო სხვა სიმბოლოები უბრალოდ არ გამოიყენება). მაშინ, მოყვანილი სიდიდეების (150)-ში ჩასმის შემდეგ მივიღებთ ნულის ტოლ ენტროპიას:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^{\infty} \log_2 1 = 0$$

მაგრამ რთული ტექსტის შემთხვევაში ენტროპიის განსაზღვრა გაცილებით რთული იქნება. ასე მაგალითად, ცდების მეშვეობით შეიძლება დადგინდეს, რომ ინგლისური ტექსტის ენტროპია შეადგენს 1,5 ბიტს ერთ სიმბოლოზე, რაც, რა თქმა უნდა, ვარირებს სხვადასხვა ტექსტებში.



ასე რომ, მონაცემათა წყაროს ენტროპიის რაოდენობა ნიშნავს ბიტების საშუალო რაოდენობას მონაცემების ერთ ელემენტზე, რომელიც საჭიროა მისი დაშიფრვისათვის ინფორმაციის დაკარგვის გარეშე, ოპტიმალური კოდირების შემთხვევაში.

ამ თემის ამოსაწურად შეიძლება მოვიყვანოთ ძირითადი ორი თვისება, რომლებიც ახასიათებენ ენტროპიის და ინფორმაციის ურთიერთობას:

1. მონაცემათა ზოგი ბიტი შეიძლება არ ატარებდეს ინფორმაციას. მაგალითად, მონაცემების სტრუქტურები ხშირად ინახავენ ჭარბ ინფორმაციას, ან და გააჩნიათ იდენტური სექციები მონაცემების სტრუქტურაში მყოფი ინფორმაციის დამოუკიდებლად
2. ენტროპიის რაოდენობა ყოველთვის არ გამოიხატება მთელი რიცხვით.

მაშ ასე, ჩვენ განვსაზღვრეთ ენერგეტიკული და ინფორმაციული სისტემები. იყო განმარტებული თვით ინფორმაცია და მისი გაზომვის, და როგორც რაოდენობრივი, აგრეთვე ხარისხობრივი შეფასების ხერხები. იყო შემოღებული ინფორმაციის კოდირების ცნება და განიხილა კოდირების დონეები. მაგრამ სანამ გადავალთ მართვის სისტემებზე, საჭიროა ვცადოთ გავერკვიოთ ინფორმაციის ორგანიზების უმაღლეს დონეზე – ინფორმაციულ სისტემაში სახელწოდებით ადამიანი. განვსაზღვროთ თუ რას წარმოადგენს ინტელექტი და არსებობს თუ არა მისი ხელოვნური შექმნის შესაძლებლობა.

### 17.3. ინტელექტი.

**ინტელექტი** (ლათ. Intellectus – გაგება, შეცნება) — შეცნების, გაგების და პრობლემების გადაწყვეტის საერთო უნარები. ინტელექტის ცნება აერთიანებს ინდივიდის ყველა შეცნებით უნარს: გრძნობას, აღქმას, მეხსიერებას, წარმოდგენას, აზროვნებას, წარმოსახვას. ინტელექტი – ესაა სისტემის უნარი თვითშესწავლის პროცესში შექმნას პროგრამები (პირველ ყოვლის ევრისტიკული<sup>112</sup>) გარკვეული სირთულის კლასის ამოცანების ამოსახსნელად და შესძლოს მათი ამოხსნა.

თანამედროვე განმარტებით ინტელექტი წარმოგვიდგება როგორც შემეცნებითი პროცესის წარმატების და პრობლემების ეფექტური გადაჭრის უნარი, კერძოდ კი ახალი ცხოვრებისეული ამოცანების დაუფლებისას. ამიტომაც, ინტელექტის დონე შეიძლება განავითაროთ ისევე, როგორც შეიძლება გავზარდოთ ან დავწიოთ ადამიანის ინტელექტის მ.ქ.კ. ხშირად ამ უნარს ახასიათებენ ადამიანის მიერ ცხოვრებისეული ამოცანების გადაჭრასთან მიმართებაში. მაგალითად, სიცოცხლის შენარჩუნების ამოცანის მიმართ: სიცოცხლის შენარჩუნება – ადამიანის ძირითადი ამოცანაა, დანარჩენები კი – მხოლოდ მისგან გამომდინარეობენ, ან და ადამიანის საქმიანობის რომელიმე დარგს ეხებიან.

არსებობს საფუძველი ვივარაუდოთ, რომ ინტელექტის ჩანასახი გააჩნია ცხოველებს და უკვე ამ დონეზე მათი ინტელექტი მიზანდასახულობის და მიზნის მიღწევის მექანიზმების მეშვეობით, გავლენას ახდენდა და ახდენს ცხოველების ევოლუციაზე. ცხოველთა ინტელექტს სწავლობს მეცნიერების შედარებით ახალი დარგი – კოგნიტიური ეტოლოგია.

ინტელექტი – ეს არის დაგეგმვის ორგანიზების და მიზნის მიღწევისას თავისი მოქმედებების კონტროლირების უნარი, ჭეშმარიტების და ორგანიზმის კეთილდღეობის დამთხვევის გათვალისწინებით. მიაქციეთ ყურადღება, რომ ამ განმარტებაში ჯდება **ხელოვნური ინტელექტის** მატარებელი მოწყობილობებიც. ინტელექტი შეიძლება იყოს აქტუალიზირებული მხოლოდ საინფორმაციო სივრცეში. საქმიანობის ყოველი სახე აყალიბებს თავის ინფორმაციულ სივრცეს. ამ სივრცის შექმნის და გამოყენების ხერხები

<sup>112</sup> **ევრისტიკა** წარმოადგენს სპეციფიურ სამეცნიერო დარგს, რომელიც შეისწავლის პიროვნების შემოქმედებით საქმიანობას.

ინტელექტის ორგანიზების პრინციპებითაა აგებული. პირველყოვლისა ესაა საინფორმაციო სივრცეში ახალი ინფორმაციის შეყვანის ორგანიზების პრინციპები. ინტელექტის მოქმედების თავისებურებებს აგრეთვე ეკუთვნის მეხსიერებაში ინფორმაციის შენახვის და მისი იქიდან მიღების ხერხებიც, სახელდობრ – მეხსიერების ორგანიზება. ამიტომაც საინფორმაციო სივრცე ამავე დროულად წარმოადგენს ინტელექტუალურ სივრცესაც, ვინაიდან მასში უკვე ჩადებულია დაგეგმვის და მიზნის მიღწევის ეტაპობრივი კონტროლის ორგანიზების და გამოყენების პრინციპები.

ინტელექტის ზეგავლენა სცილდება ერთი ადამიანის ცხოვრების საზღვრებს. ინტელექტის განვითარებამ Homo sapiens-ში, გამოყო იგი ცხოველთა სამყაროდან. ის გახდა სოციუმის შემდგომში კი მთელი კაცობრიობის ცივილიზაციის განვითარების საწყისი. ინტელექტი, როგორც უნარი, ჩვეულებრივ ხორციელდება სხვა უნარების მეშვეობით. ისეთის როგორიცაა, შეცნობის, სწავლის, ლოგიკური აზროვნების, ინფორმაციის სისტემატიზირების მისი ანალიზის გზით, მისი გამოყენებადობის განსაზღვრის (კლასიფიცირების), მასში კავშირების, კანონზომიერებების და განსხვავებების მოძიების, ანალოგიურ ინფორმაციასთან მისი ასოცირების და ა.შ. უნარები.

არსებობს სხვა და სხვა მიდგომა ინტელექტის ცნების განსაზღვრისათვის.

- **ინტელექტი** – ეს გონების საკმაოდ საერთო უნარია, რომელიც შეიცავს დასკვნების გაკეთების, დაგეგმვის, პრობლემების ამოხსნის, აბსტრაქტულად აზროვნების, რთული იდეების გაგების, სწრაფი სწავლის და გამოცდილების საფუძველზე სწავლის შესაძლებლობას. ის არ ეფუძნება მხოლოდ წიგნების შესწავლას, ვიწრო აკადემიურ ცოდნას ან ტესტების გავლის უნარებს. პირიქით, ინტელექტი ასახავს გარე სამყაროს უფრო ფართო და ღრმა შემეცნების, საგანთა არსში ჩაწდომის და იმის მოსაზრების უნარს, თუ როგორ უნდა იმოქმედოს ამა თუ იმ სიტუაციაში.
- აი კიდევ ერთი მოსაზრება: **ინტელექტი** – ესაა ადამიანის მიერ ინფორმაციის მოძიების, აღქმის, ანალიზის, სისტემატიზირების და ეფექტური გამოყენების უნარი, დასმული მიზნის განსახორციელებლად. მხოლოდ ჰკუამოკლე, გონებაშეზღუდული ადამიანი პიროვნების მიერ დაგროვილ არასისტემატიზირებულ, გაუანალიზირებულ და გამოუყენებელ ინფორმაციას აღიქვამს როგორც პიროვნების ინტელექტს.
- კიდევ ერთი (იასპერსის) განმარტებით: **ინტელექტი** – ესაა ადამიანი მთლიანობაში, განხილული მისი უნარების მხრიდან.

ინტელექტის ფორმულირება პირველყოვლისა შეიცავს ადამიანის გამოცდილებას და ცოდნას. ეს ორივე კატეგორია არ შეიძლება განიხილოს უნარიანობის და ნიჭიერების გათვალისწინების გარეშე.

**ნიჭი** – ესაა ადამიანის ისეთი ინდივიდუალური თვისება, რომელიც მას ხელს უწყობს უფრო სწრაფად და მარტივად დაეუფლოს ცოდნას, მოიპოვოს ესა თუ ის უნარები და ჩვევები. ნიჭი – ფსიქიკური მოვლენებია, რომლებიც განიხილება უფრო ფართოდ ვიდრე ინტელექტი. ამასთან იგულისცმება, რომ ნიჭი ყოველთვის მიმართულია რომელიმე გარკვეულ საქმიანობაზე: შემეცნებაზე და მის პრაქტიკაში, მუსიკაში, ტექნიკაში და ა.შ. გამოყენებაზე. ამიტომაც საუბრობენ არა მხოლოდ ინტელექტუალურ ნიჭზე, არამედ მუსიკალურზეც, მხატვრულზეც, ტექნიკურზეც და ა.შ.

ჩარლზ სპირმანმა მე XX-ე საუკუნის დასაწყისში აჩვენა, რომ თუ ადამიანი კარგადა ხსნის ერთი ტიპის ამოცანებს, ის წარმატებული იქნება სხვა ტიპის ამოცანების ამოხსნაშიც, ანუ რომ ყველა ინტელექტუალური უნარი სტატისტიკურად დაკავშირებულია ერთმანეთთან. სპირმანმა შემოიღო საერთო ინტელექტის „**გ ფაქტორი**“-ს ცნება, რომელიც უჩვენებს ყველა შეცნებადი ამოცანის შესრულების ეფექტურობას. პრაქტიკაში აღმოჩნდა,

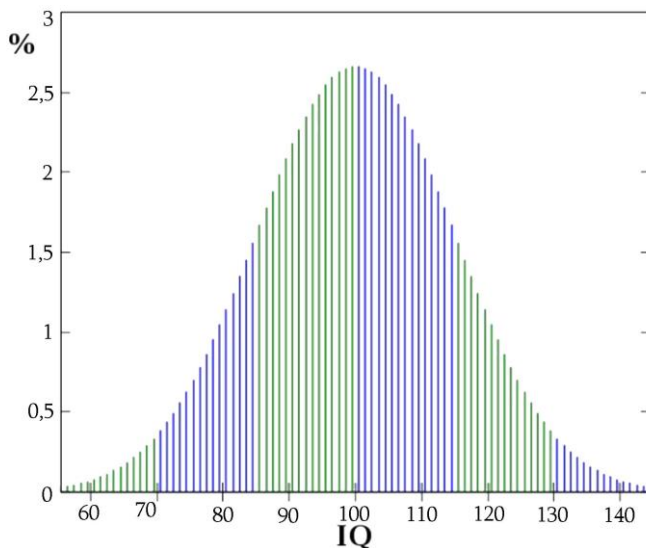
რომ „გ ფაქტორი“ პირდაპირი გზით ძნელად გასაზომია. მაგრამ მის საფუძველზე შესაძლებელი გახტა ისეთი სიდიდეების ჩამოყალიბება, რომელთა გაზომვა უკვე შესაძლებელია და რომელმაც წარმოადგენს **g**-ს მიახლოებულ მნიშვნელობებს. ერთ ერთ ასეთ პარამეტრს წარმოადგენს ინტელექტის კოეფიციენტი (**IQ**).

პსიქოლოგმა ჯეიმს ფლინმა პირველმა ჩაატარა ფართო კვლევები **IQ**-ს დინამიკის მიმართულებით მსოფლიოს სხვა და სხვა ქვეყნებში გრძელვადიან პერიოდში და აჩვენა, რომ ეს კოეფიციენტი უწყვეტლივ იზრდებოდა 50 წლის განმავლობაში (ფლინის ეფექტი).

ინტელექტის დონედ მიიჩნევენ ინტელექტუალური უნარების განვითარების დონეს ასაკთან მიმართებაში.

1912 წ გერმანელმა ფსიქოლოგმა უილიამ შტერნმა შეიმუშავა ინტელექტუალური და ბიოლოგიური ასაკების შეფარდების განსაზღვრის მეთოდიკა. მან გამოავლინა, რომ ეს შეფარდება პრაქტიკულად არ იცვლებოდა ბავშვების ზრდის პროცესში. სწორედ ეს შეფარდება გახდა ცნობილი როგორც ინტელექტის კოეფიციენტი ანუ **IQ** (Intelligence Quotient). გამოითვლება ფორმულით:

$$IQ = 100 \times (\text{ინტელექტუალური ასაკი} / \text{ბიოლოგიური ასაკი})$$



სურ. 139. IQ-ს განაწილება მოსახლეობაში (ვერტიკალურ ღერძზე – მოსახლეობის რაოდენობა (%), რომელთაც გააჩნია ჰორიზონტალურ ღერძზე მოყვანილი IQ.

გასაგებია, რომ ასეთი მეთოდიკით **IQ**-ს საშუალო მნიშვნელობა მთელი მოსახლეობისათვის იქნება 100-ის ტოლი. ადამიანის ინდივიდუალური **IQ** გვიჩვენებს თუ რამდენად კონკრეტული პიროვნების ინტელექტი არის მაღალი ან პირიქით დაბალი მისი ასაკის საშუალო ინტელექტუალურ მაჩვენებელთან.

ამრიგად, ტესტების ჩასატარებლად პირველყოვლისა გროვდება მათი შესრულების სტატისტიკა ადამიანთა დიდ რაოდენობაზე. შემდეგ ხდება ყოველი ტესტირებული პიროვნების მაჩვენებლების შედარება ადრე ტესტირებული ადამიანების საშუალო მაჩვენებლებთან. სურ. 139-ზე მოყვანილია **IQ**-ს განაწილება მოსახლეობაში.

ინტელექტის შეფასების ტესტები ირჩევა ისეთნაირად, რომ შემოწმდეს პიროვნების ტვინის ყველა განყოფილება: გამოთვლები, ნიმუშების გამოცნობა, თანმიმდევრობების გაგრძელება, ლოგიკა, სიტყვებთან მუშაობა, აბსტრაგირება და ა.შ. მიღებულ შედეგს ადარებენ ნორმას.

არსებობს მიღებული შედეგების სხვადასხვაგვარი ინტერპრეტაცია.

მოსახლეობის 80% **IQ**-ს მაჩვენებელი იმყოფება 80 – 120 დიაპაზონში.

მიუხედავად იმისა რომ IQ-ს ტესტები არაა უტყუარი, მათი შედეგები წარმოადგენენ სასარგებლო ინდიკატორს. როგორც წესი IQ-ს მაჩვენებელი უცვლელი რჩება მთელი ცხოვრების განმავლობაში.

საინტერესოა, რომ 1950-ან და 1060-ან წლებში შოტლანდიაში ჩატარებულმა გამოკვლევამ, რომელშიც მონაწილეობდა 11 000 მეტი ადამიანი, გამოავლინა IQ-ს მაჩვენებლის დამოკიდებულება ავადობაზე და სიცოცხლის ხანგრძლივობაზე. გამოვლინდა კანონზომიერება, რომ ნაკლები IQ-ს მქონე ადამიანის სიცოცხლის ხანგრძლივობა საშუალოდ უფრო მცირეა ვიდრე მაღალი IQ-ს მქონე პიროვნებებში.

ინტელექტუალური მოღვაწეობის უმნიშვნელოვანეს თვისებას და ამავდროულად პირობას წარმოადგენს გონებრივი შრომისუნარიანობა. ნიშანდობრივია, რომ ნიჭიერი და გენიალური ადამიანების უმრავლესობას ახასიათებდათ მაღალი შრომისუნარიანობა.

საკმაოდ მნიშვნელოვან და არსებით როლს თამაშობს მეხსიერება. მეხსიერების დიდი მარაგი წარმოადგენს ინტელექტუალური განვითარების მნიშვნელოვან წინაპირობას. მაგრამ ისევ და ისევ, მეხსიერება არაა მთავარი ინტელექტში. მაგალითად, ჩ.დარვინს, რომლის ინტელექტუალური შესაძლებლობები არავისში ეჭვს არ იწვევს, მისივე სიტყვებით საკმაოდ სუსტი მეხსიერება ჰქონდა.

ჩვენი ცოდნა მოიპოვება სწავლის და პრაქტიკული საქმიანობის პროცესში. ცოდნის დიდი მარაგი, ეგრედ წოდებული *ერუდიცია*, წარმოადგენს ინტელექტის უმნიშვნელოვანეს ნაწილს. მიუხედავად ამისა, არ შეიძლება შეფასდეს ცოდნის მნიშვნელოვანი მარაგის მქონე ადამიანის ჭკუა როგორც მაღალი და ძლიერი, ვინაიდან ინტელექტი არ განისაზღვრება მხოლოდ ერუდიციით.

იმისათვის რომ უფრო კარგად გავიგოთ ცოცხალი სისტემების ორგანიზების პრინციპები, უპრიანი იქნება, როგორც მოდელი, განვიხილოთ ადამიანის მიერ შექმნილი ხელოვნური ინტელექტი (**ხი**). ასეთი ანალიზის ჩასატარებლად უპრიანი იქნება ადამიანი – კომპიუტერი სისტემის განხილვა. თანაც ვივარაუდოთ, რომ ადამიანს გააჩნია რაღაცა ჰიპოტეტიური ოპერაციული სისტემა. მაშინ ამ სისტემის (ადამიანის) ბირთვი შეიცავს შემდეგი სახის „ქვესისტემებს“:

1. **თვითდაპროგრამირება** – ნებისმიერი ქმედების განსახორციელებლად, სისტემამ უნდა არა მხოლოდ შეასრულოს უკვე მზა, ადამიანის მიერ შედგენილი და შეყვანილი პროგრამა, არამედ **თვითონ** წინასწარ შეადგინოს თავისი მომავალი ქმედების პროგრამა, შემდეგ კი შეასრულოს ის;
2. **თვითსწავლა** – სისტემამ უნდა აწარმოოს თავისი ქმედების ქრონიკა მისი ანალიზის მიზნით, რათა მოახდინოს შემდგომი თვითპროგრამირების კორექცია;
3. **თვითმართვა** – სისტემას უნდა გააჩნდეს უნარი გააძლიეროს ან პირიქით შეანელოს თავისი ცალკეული სააპარატო საშუალებების (პერიფერიული მოწყობილობების) მუშაობა, ვითარებიდან გამომდინარე („პროგრამების მორგება“).

ადამიანად წოდებული სისტემის ამნაირი საკმაოდ გამარტივებული წარმოდგენა საშუალებას იძლევა მივიღოთ პირველადი წარმოდგენა ინტელექტის ფორმირების პრინციპზე. თუ კი ხელოვნურად შექმნილ სისტემას გააჩნია ზემოდჩამოთვლილიდან პირველი ფუნქცია, ეს იმის მაუწყებელია, რომ ის არ არის „ჩვეულებრივი ავტომატი“, რომელიც მუშაობს წინასწარ შედგენილი პროგრამის მიხედვით; მეორე ფუნქციის არსებობა ნიშნავს, რომ სისტემას გააჩნია „გონება“, ხოლო მესამე ფუნქციის არსებობის შემთხვევაში – მას „ემოციების“ უნარი გააჩნია. აღწერილი სქემით აგებული **ხი** შეიძლება იყოს ტესტირებული (მაგალითად ტიუნინგის ტესტით) და გამოყენებული ალგორითმის სრულყოფილებიდან გამომდინარე, დახასიათებული როგორც გარკვეული დონის სირთულის ინტელექტი.

მიღებულია, რომ ადამიანის ინტელექტზე უმეტესწილად პასუხისმგებელია მისი გონება, რომელიც ვლინდება მისი თვითკონტროლის და განათლების უნარში. მაგრამ რთულ სისტემებში ემოციებით გამოწვეული თვითმართვას შეიძლება ჰქონდეს საკმაოდ დიდი ფუნქციონალური დატვირთვა. ეს ნიშნავს, რომ რთულ **ხი**-ში და ადამიანშიც თვითმართვა, ანუ ემოციები შეიძლება იყონ განმსაზღვრავი. ამ ყველაფრის შედეგად, ქვესისტემებს, რომლებიც ჰქმნიან ოპერაციული სისტემის ბირთვს, შეიძლება ჰქონდეთ სხვადასხვა მნიშვნელობები და სხვადასხვა პრიორიტეტები, და ამასთან ერთად განლაგდნენ არა იმ თანმიმდევრობით როგორც ზემოთ იყო მოყვანილი. მაგალითად, განათლებამ და თვითმართვამ შეიძლება ერთმანეთს ადგილები შეუცვალონ, რაც მიუთითებს ემოციონალური მდგენელის განმსაზღვრავ როლზე როგორც **ხი**-ში, აგრეთვე ადამიანშიც. ამრიგად, შესაძლებელია **ხი**-ბის შექმნა, რომლებსაც ადამიანის მაგვარად ექნებათ სხვადასხვა ხასიათები, ანუ შეიქმნას პიროვნება.

ამ თავის დასასრულში კიდევ ერთხელ გავიხსენოთ, რომ **ხი**-ის შემოყვანა განსახილავ მასალაში ჩვენ დაგვჭირდა ადამიანის ინტელექტის მოდელირებისათვის, და სრულადაც არ ნიშნავს, რომ ადამიანის გონება აიგო **ხი**-ის ბაზაზე. რა თქმა უნდა ყველაფერი სრულიად საპირისპიროდ ვითარდებოდა. **ხი** და საერთოდ კომპიუტერული ტექნიკა შეიქმნა და ვითარდებოდა ბიოლოგიური სისტემების ანალოგიურად, და ვინაიდან აღნიშნული სისტემები საკმაოდ რთულია (რა თქმა უნდა დღევანდელი გადასახედიდან), ამ ტექნიკის შემქმნელებს მოუწიათ გარკვეული ფუნქციების გაყოფა კიდევაც. ასე, თავის ტვინის ფუნქცია გაიყო ცენტრალური პროცესორის, ჩიპსეტის, ოპერატიული მემორიების და ნაწილობრივ მყარი დისკის შორის. ადამიანის გონების ფუნქცია ნაწილობრივ აიღო კომპიუტერული ტექნიკის პროგრამულმა ნაწილმა (Soft-მა) და პირველყოფლისა ოპერაციულმა სისტემამ. სწორედ ამიტომ კომპიუტერული ტექნიკა და **ხი** წარმოადგენენ ადამიანის გონების შესწავლის საკმაოდ კარგ მოდელს.

#### **17.4. შინაგანი მართვა, ლე-შატილიეს პრინციპი.**

როგორც ითქვა, თვითორგანიზება წარმოადგენს მატერიის ზოგად კანონზომიერებას. მართლაც, ეს პრინციპი უკვე ქიმიური რეაქციების დონეზე ვლინდება. ამის მაგალითია *მოქმედ მასათა კანონი*<sup>13</sup> და *ლე-შატილიეს პრინციპი*<sup>14</sup>. ამ პრინციპის თანახმად თუ სისტემა იმყოფება წონასწორობის მდგომარეობაში და განიცდის ზემოქმედებას, რომელიც ცვლის მისი მდგომარეობის განმსაზღვრვე პარამეტრს ან პარამეტრებს (მაგალითად წნევა, ტემპერატურა და ა.შ), მაშინ სისტემა, როგორც მთლიანი, ამ ზემოქმედებას ისეთნაირად უპასუხებს, რომ გაანეიტრალოს იგი. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, სისტემაში აღიძვრება ისეთი პროცესები, რომლებიც ეწინააღმდეგებიან ზემოქმედებას და ამცირებენ მას ნულამდე. ვინაიდან ლე-შატილიე იყო ქიმიკოსი, ეს პრინციპი თავდაპირველად გამოიყენებოდა ქიმიური რეაქციებისათვის. ასე, მაგალითად, ლე-შატილიეს პრინციპიდან გამომდინარეობს, რომ:

- ტემპერატურის (T) გაზრდა გადაწევს რეაქციას ენდოთერმული პროცესის მიმდინარეობის მიმართულებით.
- წნევის (P) გაზრდა (გაზოფაზური რეაქციებისათვის) გადაწევს წონასწორობას მოცულობის (V) შემცირების მიმართულებით.

<sup>13</sup> ამ კანონის თანახმად რეაქციის მიმდინარეობის სიჩქარე მორეაგირე ნივთიერებების საწყის კონცენტრაციაზეა დამოკიდებული.

<sup>14</sup> ეს პრინციპი ჩამოაყალიბა 1884წ ფრანგმა ქიმიკოსმა ლე-შატილიემ, ხოლო თეორიულად დასაბუთდა გერმანელი ფიზიკოსის ფერდინანდ ბრაუნის მიერ 1887წ (რადიოს გამოგონებისათვის მარკონისთან ერთად გახდა 1909 წ ნობელის პრემიის ლაურეატი).

- ერთ-ერთი საწყისი ნივთიერების კონცენტრაციის გაზრდა გადაწვეს რეაქციას მისი პროდუქტის შექმნის მიმართულებით და პირიქით.

გავიხსენოთ ენდოთერმული და ეგზოთერმული რეაქციების განმარტება.

- **ენდოთერმული რეაქციები** – ქიმიური რეაქციები სითფოს შთანთქმის თანხლებით. ამ სახის რეაქციებისათვის ენტალპიის და შინაგანი ენერჯიის ცვლილებებს აქვთ დადებითი მნიშვნელობები ( $\Delta H > 0$ ,  $\Delta U > 0$ ), ამრიგად რეაქციის პროდუქტები შეიცავენ მეტ ენერჯიას ვიდრე საწყისი კომპონენტები.
- **ეგზოთერმული რეაქცია** – ქიმიური რეაქციები სითფოს გამოყოფის თანხლებით. ამ სახის რეაქციებისათვის ენტალპიის და შინაგანი ენერჯიის ცვლილებებს აქვთ უარყოფითი მნიშვნელობები ( $\Delta H < 0$ ,  $\Delta U < 0$ ), ამრიგად რეაქციის პროდუქტები შეიცავენ ნაკლებ ენერჯიას ვიდრე საწყისი კომპონენტები.

ეხლა კვლავ დაუბრუნდეთ ლე-შატელიეს პრინციპს და მაგალითისათვის განვიხილოთ რეაქცია:



სადაც  $Q$  – რეაქციაში გამოყოფილი სითბო.

**ტემპერატურა.** ტემპერატურის გაზრდისას ქიმიური წონასწორობა გადაიწევა ენდოთერმული, ხოლო შემცირებისას – ეგზოთერმული რეაქციების მიმართულებით. ეს კი ნიშნავს, რომ თუ გვჭირდება რეაქციის მარცხნივ გადაწევა, საჭიროა ტემპერატურის გაზრდა, მარჯვნივ კი – შემცირება.

**წნევა.** წნევის გაზრდისას ქიმიური წონასწორობა გადაიწევა ნაკლები მოცულობის მქონე ნივთიერებათა შექმნის (ან საწყისი პროდუქტების) მიმართულებით, შემცირებისას კი – მეტი მოცულობის მიმართულებით.

**კონცენტრაცია.** პირდაპირი რეაქციის აჩქარებისათვის საჭიროა რეაგირებადი ნივთიერებების კონცენტრაციის გაზრდა, ხოლო პროდუქტის კონცენტრაცია უნდა შემცირდეს. უკუ რეაქციის აჩქარებისათვის საჭიროა რეაგირებადი ნივთიერებების კონცენტრაციის შემცირება, ხოლო პროდუქტის კონცენტრაცია უნდა გაიზარდოს. ანუ წონასწორობის გადასაწევად ნივთიერების შექმნის მიმართულებით, საჭიროა საწყისი ნივთიერებების კონცენტრაციის გაზრდა და პროდუქტის კონცენტრაციის შემცირება.

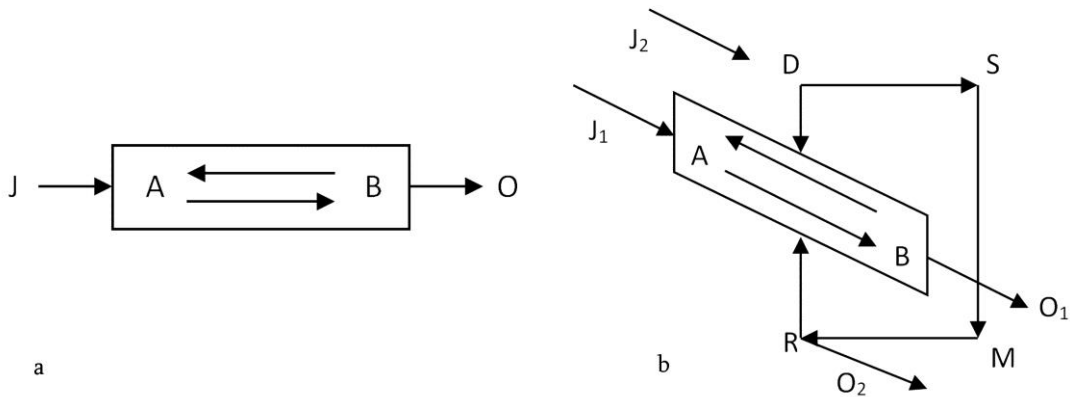
უფრო ზოგადად რეაქციის წარმოდგენა შეიძლება შემდეგნაირად:



- |   |  |
|---|--|
| P | • წნევა თუ მატულობს, წონასწორობა გადაიწევა რეაგირებადი სისტემის მოცულობის შემცირების მიმართულებით. |
|   | • წნევა თუ მცირდება, წონასწორობა გადაიწევა რეაგირებადი სისტემის მოცულობის გაზრდის მიმართულებით.    |
| T | • ტემპერატურა თუ მატულობს, წონასწორობა გადაიწევა ენდოთერმული რეაქციის მიმართულებით.                |
|   | • ტემპერატურა თუ მცირდება, წონასწორობა გადაიწევა ეგზოთერმული რეაქციის მიმართულებით.                |

- თუ ერთ-ერთი რეაგენტის კონცენტრაცია იზრდება, წონასწორობა გადაიწევა პირდაპირი რეაქციის მიმართულებით.
- c • თუ ერთ-ერთი რეაგენტის კონცენტრაცია მცირდება, წონასწორობა გადაიწევა უკუ რეაქციის მიმართულებით.

ფიზიკური ქიმიის ენაზე ეს ყოველივე გასაგები ხდება სურ. 140a-ზე მოყვანილი მართვის სქემის მეშვეობით. ამ სქემაზე J – შემავალი სიგნალია, O – გამომავალი სიგნალი, A, B – ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესები.



სურ. 140. ენდოგენური (a) და ეგზოგენური (b) მართვის სისტემების ილუსტრირება.

ლე-შატილიეს პრინციპი გამოიყენება ნებისმიერი წონასწორული სისტემისათვის:

- თემოდინამიური.
- ბიოლოგიური.
- ფსიქიკური.
- პედაგოგიური.
- სოციალური.
- ეკონომიკური.

ცხადია, რომ ნებისმიერ ბიოლოგიურ სისტემაში მეტაბოლური რეაქციების გზა გაცილებით უფრო რთულია და ისინი წარმოადგენენ უამრავი ცალკეული სტადიების ჯამს, რომლებიც შეიძლება მიმდინარეობდნენ როგორც პარალელურად ასევე შეიცავდნენ უკუკავშირის ელემენტებს. მაგრამ ყოველთვის პირველ მიახლოებაში ეს რეაქციები მოქმედ მასათა კანონით იმართებიან, რა თქმა უნდა ლე-შატილიეს პრინციპთან ერთად. აქვე დავამატებთ, რომ შინაგანი რეგულაცია (მართვა) ენერგეტიკული აზრით პასიური ხასიათისაა ე.ი. თუ მოცემულია ცოცხალი სისტემის ორგანიზაციული კომპონენტები და ფუნქციონირების ფიზიკური და ქიმიური კანონები, სტაციონარული მდგომარეობის შესანარჩუნებლად აღარაა აუცილებელი რაიმე მეტაბოლური მუშაობის შესრულება. ცხადია ისიც, რომ ეს მტკიცება სამართლიანია მხოლოდ ორგანიზაციის შედარებით დაბალ დონეზე.

მას შემდეგ რაც მოხდა მართვის მექანიზმის დიფერენცირება, მისი ფუნქციონირება საჭიროებს ენერგიას. ენერგია საჭიროა ცოცხალი ორგანიზმის როგორც თვითორგანიზაციისათვის, ასევე მისი არსებობა განვითარებისათვის. ყველაფერ ამას კი ენერგეტიკუ-

ლად ერთად უზრუნველყოფს კიბერნეტიკული<sup>115</sup> სისტემა, რომელიც თავად საჭიროებს ენერგეტიკულ უზრუნველყოფას.

### 17.5. ეკზოგენური მართვა.

ნებისმიერ რეალურ ორგანიზმში არსებობს მართვის მექანიზმების სივრცული და დროითი იერარქია, სადაც მართვის ერთი ჩაკეტილი კონტური შედის მეორე ჩაკეტილი კონტურის შემადგენლობაში, რომელიც უშუალოდ ცვლად სიდიდეზე ახდენს ზემოქმედებას. მაგალითად გენეტიკური განვითარების რეგულატორული სისტემა წარმოდგენილია მოლეკულურ დონეზე ნუკლეინის მჟავებით, ხოლო ინდივიდუალური განვითარების სისტემა – ფერმენტული ცილებით. DNA-ს როგორც ვიცით, შესწევს უნარი მოახდინოს თავისი თავის კვლავ წარმოქმნა. ამასთან ერთად, მისგან, RNA-ს მეშვეობით გადაიცემა ინფორმაცია, რომელიც აუცილებელია ფერმენტების სისტემის სინთეზისათვის.

ფერმენტები თავის მხრივ მნიშვნელოვნად განსაზღვრავენ მეტაბოლური რეაქციების ისეთ მიმდინარეობას, რომელიც აუცილებელია მოცემული ორგანიზმისათვის. ეს ფაქტიურად ენერგეტიკული სისტემის გარედან მართვის მაგალითია გენეტიკური სისტემის მიერ. თავის მხრივ სტრუქტურული გენი თვითონ არის სხვა მართვის სისტემების შემადგენელი ნაწილი.

ამგვარად ბიოსინთეზის რეგულატორული მექანიზმები, რომლებიც შეადგენენ გენეტიკური და მორფოგენეტიკური მართვის საფუძველს, შეიძლება განხილული იქნეს სხვა მართვის გარე მექანიზმების გვერდით, რომლებიც თავის მხრივ რეალიზდებიან მართვის უჯრედული რეგულატორების მონაწილეობით. ესენია: ნერვული სისტემა, ნეიროსეკრეცია, ენდოკრინული და სხვა მართვის სისტემები. ამ ჩამონათვალში ყველანი გარე მექანიზმებს წარმოადგენენ და მჭიდროდ უკავშირდებიან ენერგეტიკულ სისტემას. ეს ფაქტი იქიდან გამომდინარეობს, რომ გარე კიბერნეტიკული ელემენტების ზედდება ხდება შინაგან კიბერნეტიკულ ელემენტებზე, რაც ქმნის მართვის ჩაკეტილ კონტურს. ეს ყველაფერი მოყვანილია სურ. 140b-ზე წარმოდგენილ სქემაზე.

მართვის გარე მექანიზმი ისეა ორგანიზებული, რომ ნებისმიერი გარე ზემოქმედება  $J_2$ , რომელიც ახდენს გავლენას ენერგეტიკულ სისტემაზე, ქმნის გარკვეულ შეშფოთებას D, რომელიც გავლენას ახდენს რეაქციაზე  $A \rightarrow B$ . იმისათვის რომ მართვის გარე სისტემამ იმოქმედოს მან უნდა აღმოაჩინოს და აღიქვას შეშფოთება D (ან რაიმე ეფექტი, რომელიც ამ შეშფოთებამ გამოიწვია) რომელიც S მგრძნობიარე ელემენტით. აქედან სიგნალი მიდის მაინტეგრირებელ მოწყობილობაში M, სადაც გამომუშავდება სიგნალი R, რომელიც უკვე ცვლის  $B \rightarrow A$  რეაქციის მიმართულებას ისეთნაირად, რომ წინააღმდეგობა გაეწიოს ამ რეაქციაზე D შეშფოთების ზემოქმედებას.

თუ ამ ზოგად სქემას დავაკვირდებით, მაგალითად ნერვული სისტემისათვის შეიძლება ითქვას, რომ ნერვული რეცეპტორი S გაზომავს შეშფოთება D-ს, გადასცემს ამ ინფორმაციას გარკვეულ M უბანს, სადაც ხდება ამ სიგნალის შედარება მის ნორმალურ მნიშვნელობასთან. თუ აღმოჩნდება განსხვავება, გამომუშავდება ბრძანებები R, რომლებიც ეწინააღმდეგება შეშფოთებას (D). ეს გაგრძელდება მანამ, სანამ შემოსული სიგნალი, რომელიც რეცეპტორის მიერ იყო აღქმული, არ მიიღებს ნორმალურ მნიშვნელობას.

ბიოსინთეზის მართვის პროცესის შემთხვევაში, შეშფოთებას შეიძლება წარმოადგენდეს სუბსტრატის რაოდენობის ზრდა. ამ შეშფოთების გავლენა შეიძლება გამოვლინდეს რომელიმე კონკრეტული ცილის კონფორმაციულ ცვლილებაში, რის შედეგადაც მოხდება

<sup>115</sup> კიბერნეტიკა – მეცნიერება მართვის პროცესების საერთო კანონზომიერებებზე და ინფორმაციის გადაცემაზე მანქანებში, ცოცხალ ორგანიზმებში და საზოგადოებაში. ლუის კოუფფინგალმა (1956) დაახასიათა კიბერნეტიკა როგორც ეფექტური მოქმედების უზრუნველყოფის ხელოვნება.



შესაბამისი სტრუქტურული გენის რეპრესიის მოხსნა M. ეს გამოიწვევს შესაბამის ფერმენტის დაჩქარებულ სინთეზს, რაც გამოიწვევს R ნივთიერების სწრაფ ხარჯვას, ანუ შეშფოთების საწინააღმდეგო პროცესის აქტივაციას.

ორგანიზმის ყველა ქვესისტემა მოიხმარს ენერგიას, რომელიც იქმნება მეტაბოლურ სისტემაში. კერძოდ, საერთო ენერგეტიკული ნაკადის მნიშვნელოვანი წილი იხარჯება გალიზიანებაზე პასუხის მისაღებად.

### **17.6. მართვის ფიზიოლოგიური სისტემები.**

ცოცხალი ორგანიზმი წარმოადგენს რთულ თვითრეგულირებად, თვითორგანიზებად ადაპტურ სისტემას. ნებისმიერი სისტემა კი უნდა შეიცავდეს ქვესისტემებს – შედარებით უფრო მარტივ სისტემებს. ორგანიზმის შემთხვევაში ესენი არიან ფიზიოლოგიური სისტემები: ნერვული, გულსისხლძარღვთა, საჭმლის მომნელებელი და ა.შ. ფიზიოლოგიური სისტემები ფუნქციონირებენ ერთმანეთთან მჭიდრო კავშირში და უზრუნველყოფენ ორგანიზმის, როგორც მთლიანი სტრუქტურის ფუნქციონირებას.

სისტემის რეგულაცია შეიძლება დაიყოს სამ ეტაპად:

1. პირდაპირი კავშირი მართულ და მმართავ სისტემებს შორის;
2. უკუკავშირი პროცესის კორექციისათვის;
3. ინფორმაციის გადამუშავება პროცესის მიმდინარეობის შესახებ.

მართვის ნებისმიერი ობიექტი როგორც ცოცხალ, ისევე არაცოცხალ სისტემებში ხასიათდება რეგულირებადი სიდიდეებით. მაგალითად, სისხლი და გულსისხლძარღვთა სისტემა, როგორც მართვის ობიექტი, ხასიათდება შემდეგი რეგულირებადი სიდიდეებით: სისხლის წნევა, ოსმოსური წნევა, გლუკოზის კონცენტრაცია და სხვა. მართვის ობიექტი დინამიური სისტემაა და მისი რეგულირებადი სიდიდე ყოველთვის განიცდის ცვლილებას სხვადასხვა შეშფოთების (ანუ გარე ზემოქმედების) შედეგად. მაგალითად, ისეთი რეგულირებადი სიდიდისათვის როგორცაა სისხლში გლუკოზის კონცენტრაცია, შეშფოთებად აღიქმება გლუკოზის ღვიძლიდან ან ნაწლავებიდან სისხლში გადასვლა ან და პირიქით, გლუკოზის სისხლიდან ქსოვილებში გადასვლა. მართვის სისტემები ახდენენ ენერგეტიკული პროცესების მოდულაციას, რის შედეგადაც მართვის ობიექტის მდგომარეობა იცვლება მიღებული ინფორმაციის შესაბამისად. რთულ სისტემებში, მათ შორის ცოცხალშიც, მართვა უკუკავშირისა და კონტროლის პირობებში ხდება უწყვეტი კორექციის გზით.

არსებობს ორგანიზმის ოთხი მარეგულირებადი სისტემა:

1. **ქიმიური არასპეციფიური სისტემა.** იგი უზრუნველყოფს უჯრედების და ორგანოების ურთიერთქმედებას მიმოცვლის პროდუქტებით – ერთი ორგანოს მიმოცვლის პროდუქტები ზემოქმედებენ სხვა ორგანოებზე და ცვლიან მათ მოქმედებას. ეს პროდუქტები – ე.წ. მეტაბოლიტები, არც ჰორმონები არიან და არც მედიატორები. უჯრედ უჯრედულ ურთიერთობაში უმთავრეს როლს ასრულებენ მემბრანები და მათი სპეციალიზირებული სტრუქტურები.
2. შემდეგი რეგულირებადი სისტემაა – **ენდოკრინული სისტემა**, ანუ ჰორმონალური რეგულაციის სისტემა. იგი ახდენს რეგულაციას განსაკუთრებული ნივთიერებების, ჰორმონების გამოყოფის გზით.
3. **ვეგეტატიური რეგულირებადი სისტემა** (ვეგეტატიური ნერვული სისტემა), რომლის საშუალებითაც ხორციელდება ერთი ცენტრიდან რამდენიმე ობიექტის დისტანციური ოპერატიული მართვა. ეს სისტემა ძირითადად განაგებს ჰომეოსტაზს.

4. **ცენტრალური ნერვული სისტემა.** თავის ტვინი ერთი მხრივ ასრულებს ჰომეოსტაზის<sup>116</sup> რეგულირების ფუნქციებს, მეორე მხრივ ორგანიზმის გარე სამყაროსთან ურთიერთობის ფუნქციას. აქ და შემდეგ **ჰომეოსტაზი** გაიგება, როგორც **ორგანიზმის შინაგანი გარემოს პარამეტრების მუდმივობა**. ჰომეოსტაზის კიბერნეტიკულ გაგებაში მთავარია ის, რომ ორგანიზმი თავისი შინაგანი და გარე კავშირების ვარიანტებით, უცვლელად ინარჩუნებს თავისთვის მნიშვნელოვან პარამეტრებს. მაგალითად, ორგანიზმის ტემპერატურას, სისხლის წნევას, ჟანგბადის კონცენტრაციას და ა.შ. ჰომეოსტაზის შენარჩუნება ხორციელდება თვითრეგულაციის პროცესში უკუკავშირის გზით. აქ მმართველი სისტემის როლს ასრულებს თავის ტვინი, ჰიფოთალამუსი და შინაგანი სეკრეციის ჯირკვლები. მართული ნაწილებია შინაგანი ორგანოები და კუნთები. პირდაპირი და უკუკავშირის არხებია **ეფერენტული**<sup>117</sup> და **აფერენტული**<sup>118</sup> ნერვები და სისხლის მიმოქცევის სისტემა, რომლითაც გადაეცემა **ჰუმორალური**<sup>119</sup> ინფორმაცია. გამზომი მოწყობილობის როლს ასრულებენ რეცეპტორები: თერმორეცეპტორები, ოსმორეცეპტორები, ქემორეცეპტორები და სხვა.

ჰომეოსტაზის მექანიზმი ინარჩუნებს რეგულირებადი სიდიდეების ოპტიმალურ მნიშვნელობას ეს ნიშნავს, რომ მცირე გარე ზემოქმედებით რეგულირებადი სიდიდეები არ იცვლებიან. ძლიერი ზემოქმედების პირობებში კი რეგულაციის სისტემას ეს სიდიდეები ახალ, უფრო ოპტიმალურ დონეზე გადაჰყავთ. ცხადია, ახალ დონეზე ღია დისიპატიურ სისტემაში არ უნდა ირღვეოდეს სტრუქტურა, ანუ პროცესმა არ უნდა მიიღოს ენტროპიული ხასიათი. იმ შემთხვევაში, თუ გარე ზემოქმედება ისეთი ძლიერია (ან თუ გარედან შეტანილი ინფორმაცია იმდენად ზრდის სისტემის ენტროპიას), რომ რეგულირების მექანიზმები ვეღარ ახერხებენ ჰომეოსტაზის შენარჩუნებას (ან ენტროპიას აუცილებელ შემცირებას), რეგულირებადი სიდიდეები გამოდიან ფიზიოლოგიურად დასაშვები დიაპაზონიდან და ვითარდება პათოლოგია. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, რეგულაციის სისტემის მეშვეობით მოწოდებული ენერგია აღარაა საკმარისი სტრუქტურის შესანარჩუნებლად და სითბური წონასწორობისაკენ სისტემის სწრაფვის შეჩერებისათვის.

ბუნებრივია, რომ ჰომეოსტაზის მექანიზმების ნორმალური ფუნქციონირებისათვის, საჭიროა მისი ყველა ელემენტის ნორმალური ფუნქციონირება. პათოლოგიური მდგომარეობა შეიძლება იყოს გამოწვეული როგორც მართვადი, ასევე კონტროლის და უკუკავშირის ელემენტების დაზიანებით, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ ფუნქციონალური თვალსაზრისით ეს ერთიანი სისტემაა, რომელიც საერთო პრინციპებს ეფუძნება.

მაგალითისათვის მოვიყვანოთ ორგანიზმის სითბური რეგულაციის სქემას.

<sup>116</sup> ჰომეოსტაზი – (ბერძნული – ერთნაირი მდგომარეობა) ღია სისტემისთვის შეინარჩუნოს თავისი შიდა მდგომარეობა კოორდინირებული რეაქციების მეშვეობით, რომლებიც წარმართებიან დინამიური წონასწორობის შესანარჩუნებლად. ბიოლოგიაში ეს ტერმინი ნიშნავს “კოორდინირებულ ფიზიოლოგიურ პროცესებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ ორგანიზმის წონასწორულ მდგომარეობას”. დღეს დღეობით ამ ტერმინს გამოყენებენ როგორც ღია სისტემებისთვის და დინამიურად შეინარჩუნონ თავისი შიდა მდგომარეობა. ჰომეოსტაზი შეიძლება გადავთარგმნოთ როგორც “წონასწორული ძალა”.

<sup>117</sup> ეფერენტული (ლათ. efferens – გამოძევანი) ნერვები – იმპულსების გადამცემი ნერვები ნერვული ცენტრებიდან მუშა ორგანოებზე.

<sup>118</sup> აფერენტული (ლათ. afferens – მომტანი) ნერვები – ორგანოებთან მომყვანი. იმპულსების გადამცემი ნერვები მუშა ორგანოებიდან ნერვულ ცენტრზე.

<sup>119</sup> ჰუმორალური რეგულაცია – ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური პროცესების კოორდინაცია განხორციელებული ორგანიზმის თხევად გარემოში (სისხლი, ლიმფა, ქსოვილთა სითხე) ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების მეშვეობით (მეტაბოლიტები, ჰორმონები, იონები) რომლებიც გამოიყოფებიან უჯრედების, ორგანოების და ქსოვილების მიერ მათი ცხოველყოფილობის პროცესში.

## 17.7. ორგანიზმის სითბური რეგულაცია.

ადამიანის ორგანიზმის სითბური რეგულაცია ხორციელდება მისი საკმაოდ რთული მართვის სისტემის მეშვეობით. ეს სისტემა უზრუნველყოფს შინაგანი ქსოვილების და ორგანოების სითბური წონასწორობის შენარჩუნებას მათი ტემპერატურის გარკვეული დიაპაზონის საზღვრებში (საშუალოდ 37°C ფარგლებში), ამ ტემპერატურის მერყეობის ფიზიოლოგიური ზღვარი შეადგენს დაახლოებით 1,5°C. თუ სისხლის და შინაგანი ორგანოების ტემპერატურის მერყეობა, მისი საშუალო მნიშვნელობიდან, აიწევა 2 – 2,5°C, ორგანიზმში იწყება ფიზიოლოგიური ფუნქციების დარღვევა. 43°C-ზე მეტი სხეულის ტემპერატურა პრაქტიკულად ადამიანის სიცოცხლესთან შეუთავსებადია. სწორედ ნორმალური ფიზიოლოგიური ფუნქციების განხორციელების შესაძლებლობით ტემპერატურების ვიწრო დიაპაზონში, განისაზღვრება თერმორეგულაციის მნიშვნელობა ადამიანის სიცოცხლის უზრუნველყოფისათვის.

სხეულის სტაბილური ტემპერატურის უზრუნველყოფისათვის, სხეულის მიერ მიღებული სითბოს რაოდენობა უნდა უდრიდეს მის მიერ გარემოში გაცემული სითბოს რაოდენობას. ანუ, კონფორტულ პირობებში, თბომიმოცვლა უნდა შეესაბამებოდეს სითბური ბალანსის განტოლებას, რომელშიც გათვალისწინებულია ადამიანის ორგანიზმში სითბოს შემცველობის ცვლილებაზე პასუხისმგებელი მთავარი ფაქტორები:

$$\pm Q = M \pm C \pm R - E$$

სადაც,  $Q$  – ორგანიზმის სითბური დატვირთვა;  $M$  – მეტაბოლური სითბო, რომელიც შეიცავს ენერგობარჯვის დონის 67-დან 75%-მდე;  $C$  – ორგანიზმის და გარემოს ჰაერის კონვექციური<sup>120</sup> თბომიმოცვლა;  $R$  – სხივური თბომიმოცვლა ორგანიზმსა და გარემოს შორის;  $E$  – ორგანიზმის მიერ სითბოს გაცემა ოფლის აორთქლებისას.

მოცემული განტოლებიდან გამომდინარე ორგანიზმის სითბური დატვირთვა განისაზღვრება მეტაბოლიზმის დონით, ოფლის გამოყოფის ინტენსივობით და აგრეთვე მეტეოროლოგიური და მიკროკლიმატური პირობებით, რომლებზეც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია ორგანიზმის წინაპათოლოგიური და პათოლოგიური ცვლილებთან დაკავშირებული ფუნქციონალური გადახედვების ხასიათი და ხარისხი.

ორგანიზმის სითბური კომფორტი ჩვეულებრივ პირობებში შეესაბამება  $Q$ -ს ნულოვან მნიშვნელობას. დადებით სითბურ დატვირთვას ( $+Q$ ) მივყევართ სითბური დამაბულობის განვითარებისაკენ. სითბოს დაგროვების ფიზიოლოგიურ ზღვრად მიჩნეულია 600 კჯ. უარყოფითი სითბური დატვირთვის ( $-Q$ ) შედეგად ორგანიზმი ცივდება (შესაძლებელია გადამეტცივებაც). 5 000 კჯ-ზე მეტი სითბოს გაცემის შემთხვევაში ორგანიზმი გაიყინება.

ორგანიზმის თერმორეგულაცია ხორციელდება რეფლექტორული მექანიზმების მეშვეობით. თერმორეგულირების პროცესში დიდი როლი ეკისრებათ თერმორეცეპტორებს. მათი მეშვეობით ინფორმაცია გარემოს ტემპერატურული ცვლილებების შესახებ გადაიცემა თერმორეგულირების ცენტრში, რომელიც, თავის მხრივ, წარმოადგენს რთულ სისტემას (ზურგის ტვინი – ჰიპოთალამუსი – თავის ტვინის ქერქი). სწორედ თერმორეცეპტორების ფუნქციონალური ურთიერთკავშირი ცენტრალურ რეგულატორულ მექანიზმებთან უზრუნველყოფს ადამიანის ორგანიზმის შესაძლებლობას შეეწყოს გარემოს სითბური მახასიათებლების ცვლილებას.

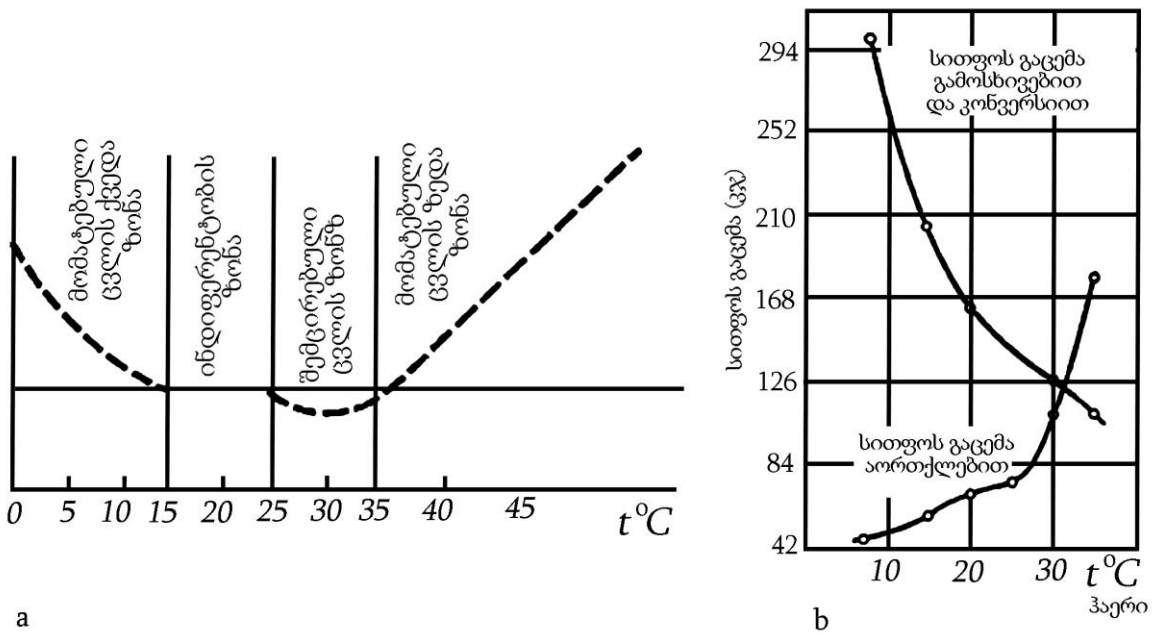
<sup>120</sup> კონვექცია (ლათ. *convectio* – გადატანა) – თბომიმოცვლის სახეობა, რომლისას შიდა ენერგია გადაიცემა ჰავლების და ნაკადების მეშვეობით.

ორგანიზმის თერმორეგულაცია ხორციელდება **თბოწარმოქმნის** და **თბოგაცემის** გაწონასწორებით. თბოწარმოქმნა ვარაუდობს ეგრედ წოდებულ *ქიმიურ თერმორეგულაციას*, თბოგაცემა კი – *ფიზიკურ თერმორეგულაციას*.

**თბოწარმოქმნა (M)** (ქიმიური თერმორეგულაცია) შეიცავს შემდეგ კომპონენტებს:

- ორგანიზმის სტრუქტურული მთლიანობისა და ცხოველქმედობის შენარჩუნებისათვის წარმოებულ მუშაობას;
- განივზოლიანი და გლუვი კუნთების შეკუმშვის მუშაობას;
- უჯრედულ მემბრანაში იონების თავისი კონცენტრაციის გრადიენტის საწინააღმდეგოდ გადატანისას შესრულებულ მუშაობას, რომელიც აუცილებელია უჯრედების აგზნებადობის შესანარჩუნებლად;
- სხვა და სხვა ორგანული შენაერთების სინთეზისათვის შესრულებულ მუშაობას, რომელიც უკავშირდება უჯრედული სტრუქტურების მუდმივ განახლებას, სეკრეტების, ჰორმონების, ფერმენტების და ა.შ. შექმნას.

ქიმიური თერმორეგულაციის შემადგენელი ყველა მითითებული მუშაობის სახეობა სრულდება მაკროერგული კავშირების ქიმიური ენერჯის ხარჯზე. ამ კავშირების მქონე შენაერთების სინთეზი მიმდინარეობს საკვების ინგრედიენტების თავისუფალი ენერჯის ხარჯზე, რომელიც გამოიყოფა საკვების დაშლისას მეტაბოლიზმის პროცესში. ამ დროს ენერჯის დაახლოვებით 40% გადადის სითბოში და ქსოვილებში იფანტება.



სურ. 141. (a) სითბოს ძირითადი მიმოცვლა ჰაერის სხვა და სხვა ტემპერატურაზე. (b) თბოგაცემის განსხვავებული ხერხების ინტენსივობის ცვლილება გარშემო მყოფი ჰაერის ტემპერატურის მიხედვით.

ქიმიური თერმორეგულაციის მნიშვნელობის თვალსაჩინო დემონსტრირებისათვის სურ. 141a-ზე მოყვანილია სითბოს ძირითადი მიმოცვლის დონის დამოკიდებულება გარემოს ჰაერის ტემპერატურაზე. როგორც სურათიდან ჩანს თბოწარმოქმნა არ იცვლება ჰაერის ტემპერატურის 15 – 25°C-ის ფარგლებში ყოფნისას, იზრდება ტემპერატურის 15°C-ზე ქვემოთ შემცირებისას და მცირდება 25 – 35°C-ის ფარგლებში. ჰაერის ტემპერატურის აწევისას 35°C-ზე ზევით, აღინიშნება სითბოს ძირითადი მიმოცვლის მეორადი ზრდა, რომელიც მოწმობს ქიმიური თერმორეგულაციის დარღვევაზე. ქიმიური

თერმორეგულაციის შეფასებისას საჭიროა გავითვალისწინოთ, რომ თბოპროდუქციის დინამიკაში სითბოს ძირითადი მიმოცვლის ხარჯზე შეიძლება იყოს შემოტანილი მნიშვნელოვანი კორექტივები, რომლებიც გამომდინარეობენ კუნთების მუშაობის ინტენსივობიდან, ორგანიზმის შეგუებითი შესაძლებლობების მდგომარეობიდან და ა.შ. კერძოთ კი, კუნთების მუშაობისას ორგანიზმის თბოპროდუქცია შეიძლება გაიზარდოს 5 – 10 ჯერ და მეტიც.

**თბოგაცემა** (ფიზიკური თერმორეგულაცია) წარმოადგენს შემდეგი მექანიზმების ერთობლიობას:

- თბოგაყვანა – სითბოს პირდაპირი გაყვანა ქსოვილების გავლით, მათი თბოგამტარობის შესაბამისად;
- კონდუქცია – სითბოს უშუალო გადაცემა საგნებზე და ზედაპირებზე რომლებსაც ეკონტაქტება ადამიანის სხეული;
- კონვექცია – სითბოს გადატანა სხეულის ზედაპირთან მოძრავი ჰაერით;
- რადიაცია – სხეულის ინფრაწითელი გამოსხივება (შესაძლებელია სითბოს მოდინებაც გაცხელებული ზედაპირებიდან ადამიანის სხეულისაკენ რადიაციის გამო);
- წყლის (ოფლის) აორთქლება სხეულის ზედაპირიდან და სასუნთქი გზების ლორწოვანი გარსიდან.

ჰაერის 20°C ტემპერატურაზე თბოგაცემა გაყვანით და კონვექციით შეადგენს დაახლოებით 31%, რადიაციით – 44%, ოფლის აორთქლებით 21%. დარჩენილი სითბო შეიძლება იყოს შთანთქმული ორგანიზმში შემოტანილი საკვებით და წყლით, მათი და სხეულის ტემპერატურული სხვაობის გამო. გარემოც ტემპერატურული ცვლილებისას სხვა და სხვა ფაქტორებთან შეთავსებით (ტენიანობასთან, ჰაერის მოძრაობის სიჩქარესთან, სხივურ სითბოსთან) თბოგაცემის მოყვანილი შეფარდება შეიძლება მნიშვნელოვნად შეიცვალოს. ასე მაგალითად, ჰაერის მომატებული ტემპერატურის დროს, წამყვანი ხშირად კი ერთად ერთი თბოგაყვანის ხერხს წარმოადგენს ოფლის აორთქლება (სურ. 141b).

თბოგაცემის უმნიშვნელოვანეს მექანიზმს წარმოადგენს ვაზომოტორული რეაქცია. სისხლძარღვთა ტონუსის დაქვეითების გამო სისხლის ნაკადი ადამიანის კანში შეიძლება გაიზარდოს 1-დან 100 მლ/წმ-მდე ქსოვილის 100 სმ<sup>2</sup>-ზე. თბოგაცემა ამ დროს იზრდება კანის თბოგამტარობის გაზრდისა და სიღრმეში განლაგებული ქსოვილებიდან სხეულის ზედაპირზე სითბოს სისხლით გაძლიერებული გადატანის გამო. სისხლძარღვთა შევიწროვება, შესაბამისად ამცირებს თბოგაცემას.

ვინაიდან ორგანიზმის მიერ მიღებული ან გაცემული სითბოს რაოდენობა იცვლება საკმაოდ ფართო დიაპაზონში, ორგანიზმის ენერგო ხარჯვიდან და გარემოს სითბური მდგომარეობიდან გამომდინარე, ორგანიზმის თერმორეგულატორული სისტემა უნდა იყოს ძალზე მოქნილი და ეფექტური. ექსტრემალურ სითბურ ზეგავლენებზე (გაცხელებაზე ან გაციებაზე) ორგანიზმი პასუხობს თერმორეგულატორული მექანიზმების დაძაბულობით, ხოლო მიღებული სითბური სტრესის გაცხელებისაკენ ან გაციებისაკენ შემდგომი ზრდისას, პათოლოგიური რეაქციებით და დაზიანებებით.

ამ თავის დასასრულს გავარჩიოთ თუ როგორ მიმდინარეობს თბორეგულაცია ადამიანის ორგანიზმში. როგორც ვიცით ეს რეგულაცია ხორციელდება ჰიპოთალამუსში განლაგებული თერმული რეგულაციის ცენტრებით  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  სიზუსტით და ეფუძნება იმ გარემოებას, რომ სითბოს გამოყოფა ორგანიზმში ტოლია ორგანიზმის მიერ სითბოს გაცემული რაოდენობისა. სითბოს გამოყოფის წყარო კუნთებში და შინაგან ორგანოებში მიმდინარე ჟანგვის პროცესებია. ამ პროცესების ინტენსივობის ცვლილებით იცვლება სითბოს გამოყოფაც. ეს თავის მხრივ ცვლის ორგანიზმის მიერ გარემოსათვის

გადაცემული სითბოს რაოდენობას: ოფლის გამოყოფის დაჩქარებით, კანში სისხლის მიმოქცევის გაზრდით, სუნთქვის აჩქარებით, ზედაპირის ფართობის ზრდით და ა.შ. როცა სხეულის ტემპერატურა გადაიხრება მოცემული მნიშვნელობიდან, ინფორმაცია ამის შესახებ თერმორეცეპტორებიდან სისხლის საშუალებით მიდის ჰიპოთალამუსის რეგულაციის ცენტრში, სადაც მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე მამოძრავებელი და ვეგეტატიური ნერვების საშუალებით გაიგზავნება სიგნალები იმ ორგანოებში, სადაც ხდება სითბოს გამოყოფა და გაცემა. ამის შედეგად უნდა მოხდეს ამ პროცესების კვლავ შეთანხმება და ტემპერატურული ბალანსის აღდგენა.

ბუნებრივია, რომ ჰომეოსტაზის მექანიზმების ნორმალური ფუნქციონირებისათვის აუცილებელია მისი ყველა ელემენტის ნორმალური ფუნქციონირება. პათოლოგიური მდგომარეობა შეიძლება გამოწვეული იქნეს როგორც მართვადი ელემენტების, ასევე კონტროლისა და უკუკავშირის ელემენტების დაზიანებით, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ფუნქციონალური თვალსაზრისით ეს ერთიანი სისტემაა და საერთო პრინციპებს ეფუძნება.

### **17.8. ადამიანის მიერ გენერირებული ფიზიკური ველები და ჰომეოსტაზი.**

ჩვენ არაერთხელ ავლნიშნეთ, რომ თერმოდინამიკური თვალსაზრისით ადამიანის ორგანიზმი წარმოადგენს ღია, დინამიურ სისტემას. ამ სისტემაში მიმდინარე პროცესები გარემოსთან ურთიერთობაში ისეთნაირად რეგულირდება, რომ მისი შინაგანი სამყარო (არე) უწყვეტი და მუდმივი რჩება, ანუ შენარჩუნებულია ჰომეოსტაზის მუდმივობა. გარკვეულ საზღვრებში პროცესების სიმრავლე, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჰომეოსტაზის მუდმივობას, თავისთავად შეიძლება ხასიათდებოდნენ როგორც ქაოსურობით, ასევე პერიოდულობითაც. ეს ხშირად ერთობ განსხვავებული პროცესები ერთდროულად ქმნიან ფიზიოლოგიური მექანიზმების ე.წ. “სამუშაო ხმაურს”. ამ უკანასკნელის მაგალითია ფიზიკური ველები, რომლებიც იქმნება ცოცხალი ორგანიზმის ირგვლივ.

სადღეისოდ უფრო ხშირად ხუთი სახის გამოსხივებასა და ველს განიხილავენ, რომლებიც შეიცავენ ინფორმაციას ორგანიზმში მიმდინარე ფიზიოლოგიურ პროცესებზე.

1. **ინფრაწითელი (სითბური) გამოსხივება** (აღმოაჩინა პერშელმა 1800 წ.). ეს გამოსხივება იკავებს დიაპაზონს ხილული წითელი სინათლიდან მოკლევადიან რადიო გამოსხივებამდე. ადამიანის სითბური გამოსხივება განსაკუთრებით ძლიერია საშუალო ინფრაწითელ დიაპაზონში (3 – 14 მკმ). გამოსხივების სიმძლავრე მთელი სხეულიდან 100 ვატს აღემატება. ინფრაწითელი გამოსხივება შთანთქმება ბიოლოგიური ქსოვილების მიერ, ამიტომ ის მხოლოდ სხეულის ზედაპირის და სისხლის მიკროცირკულაციის (კანში კაპილარული სისხლის მიმოქცევის – 100 მკმ-დე) შესახებ იძლევა ინფორმაციას. ეს ზედაპირული გამოსხივება საკმაოდ ინფორმატიულია, ვინაიდან შინაგანი ორგანოები რეფლექტორულად (ნერვული სისტემის საშუალებით) უკავშირდებიან კანის გარკვეულ უბნებს ე.წ. **დერმატომერებს**. ამიტომაც, წინასწარი კარტირების შემთხვევაში (ნორმალური გამოსხივების “რუკა”) რომელიმე ორგანოს ფუნქციონალური დატვირთვა კარგად აისახება შესაბამისი დერმატომერის ფიზიკური ველების სტრუქტურაში.
2. **სხეულის სიღრმისეული სითბური გამოსხივება**. ადამიანის ორგანიზმის რადიო-სითბური გამოსხივება ერთობ სუსტია. მისი ინტენსივობა დეციმეტრულ დიაპაზონში  $10^{-12}$  ვტ/სმ<sup>2</sup>-ს არ აღემატება. ამავე დროს მისი შთანთქმის სიღრმე ბიოლოგიურ ქსოვილებში შეადგენს რამდენიმე სანტიმეტრს. ამდენად, ადამიანის რადიოსით-

ბური გამოსხივება ასახავს შინაგანი ორგანოების და ტვინის ფუნქციონალურ ცვალებადობას.

3. **აკუსტიკური გამოსხივება.** ბიოლოგიური ქსოვილები ულტრაბგერითი დიაპაზონის აკუსტიკური რხევებისათვის საკმაოდ გამჭვირვალეა. ამ ე.წ. “გამჭვირვალობის ზონაში” (1 – 10 მჰც) შეიძლება მოვახდინოთ შინაგანი ორგანოების აკუსტიკურ-სითბური გამოსხივების რეგისტრაცია (ულტრაბგერითი სითბური ხმაური). ამ გამოსხივების ინტენსივობა მცირეა  $\sim 10^{-16}$  ვტ/სმ<sup>2</sup>.
4. **მაგნიტური ველები.** ბიოელექტრული წყაროს (ორგანოების მიერ) შექმნილი მაგნიტური ველები ორი, სამი რიგით უფრო სუსტია, ვიდრე გეომაგნიტური ველი, ასე რომ მისი რეგისტრირება ერთობ რთული საქმეა. ამავე დროს ბიოლოგიური ქსოვილების „მაგნიტური გამჭვირვალობა“ დიდ უპირატესობას იძლევა ელექტრული პოტენციალების რეგისტრირებასთან შედარებით, სადაც ინფორმაცია პირველადი ელექტრული წყაროების განაწილების შესახებ ყალიბდება ქსოვილების არაერთგვაროვნების გამო. საკმაო გავრცელება ჰპოვა გულისა და ტვინის მაგნიტური ველის რეგისტრაციამ. გულის დინამიური მაგნიტური კარტირების მეთოდით შესაძლებელი გახდა გულის მაგნიტური ველის პარციალური სტრუქტურის გამოყოფა, რომელიც დაკავშირებულია გულის აგზნებასა და გამტარი სისტემის ფუნქციონირებასთან (ჰისის სისტემა). ასეთი ინფორმაციის მიღება სხვა მეთოდებით ერთობ ძნელია. დიდად ინფორმატიულია მაგნიტური კარტირების მეთოდი თავის ტვინის ფუნქციონალური მდგომარეობის შესწავლის დროსაც.
5. **ელექტრული ველები.** ეს ველები უკავშირდებიან იონების მოძრაობას ქსოვილებში და ასახავენ როგორც შინაგანი ორგანოების, ისე ზედაპირული ქსოვილების მდგომარეობას.

ცოცხალ ქსოვილში მიმდინარე ელექტრული პროცესები (მოსვენების პოტენციალის გარდა, რომელიც გამოწვეულია იონების მემბრანული განაწილებით) – რხევითია. ზოგადად ისინი პერიოდული ხასიათისაა და მათი ამპლიტუდა იცვლება 5 მვ-დან 120 მვ-მდე. რადგან ეს რხევები აპერიოდული და არაპარამონიულია, არ შეიძლება ლაპარაკი რხევის გარკვეულ სიხშირეზე და პერიოდზე. რხევის პერიოდი რამდენიმე წუთიდან (ელექტროენცეფალოგრამის ზენელი რხევები) რამდენიმე მილიწამამდე იცვლება. ასე რომ სიხშირე ჰერცის მეთაედიდან კილოჰერცებამდე იცვლება. ელექტრული პროცესების ქაოტურობის ფიზიკური საფუძველი იმაში მდგომარეობს, რომ ცოცხალ ორგანიზმში ქსოვილების სტრუქტურა არაერთგვაროვანია. ყოველი უჯრედი წარმოადგენს ელექტრული პოტენციალების გენერატორს და ეს უჯრედები ერთმანეთისაგან გამოყოფილია უჯრედშორისი გარემოთი, რომელიც წარმოდგენილია შემაერთებელი ქსოვილების ნაკლებ აქტიური უჯრედებით და ა.შ. ასე რომ თითოეული მიკროდიპოლი (მიკროუჯრედული დენი) აიჯამება რთული ალგებრული ხასიათით და იცვლება ძალზე რთული კანონით. ამ სიძნელის მოსახსნელად შემოტანილია მიკროდიპოლების ცნება. ასე, გულის მიკროდიპოლის მოძრაობა განიხილება როგორც ელექტროკარდიოპოტენციალების წყარო. სინამდვილეში კი არსებობენ მხოლოდ მიოციტების მიკროდიპოლები (კუნთის უჯრედი).

როგორც ალბათ უკვე შენიშნეთ, ჩვენს მიერ განხილული ფიზიკური ველები საკმაოდ ინფორმატიულია, მაგრამ ეს ინფორმაცია თავისი ხასიათით და მოცულობით ბევრად აღემატება მასში გარკვევის ჩვენ შესაძლებლობებს. მაგრამ, ფსევდომეცნიერულ წრეებში საკმაოდ პოპულარულია „აურის“ თემა. აურაში გულისხმობენ რაღაც ველის, რომლის მეშვეობითაც შეიძლება ინფორმაციის მიღება ან გაცემა ფიზიკური სხეულის ფარგლებს გარეთ. პრინციპში საუბარია ორგანიზმის მიერ გამოსხივებულ ბიოველზე,

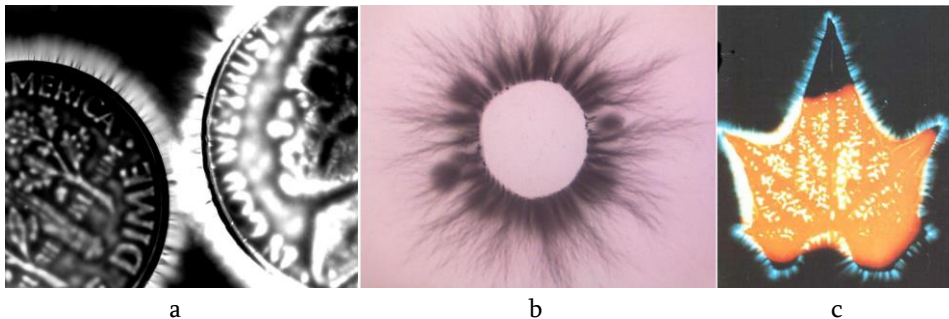
რომელიც არანაირად არაა დაკავშირებული მისტიკასთან და ეზოთერიკასთან. უბრალოდ ჩვენ ჯერ კიდევ არა გვაქვს შესაძლებლობა სრულად გავანალიზოთ ამ ველში არსებული ინფორმაცია. ამიტომაც იმ შესაძლებლობების გასარკვევად, რომლებიც იხსნება ასეთი სახის ინფორმაციის ანალიზის დროს, განვიხილოთ კირლიანის ეფექტი.

### 17.9. კირლიანის ეფექტი და ბიოველი.

ამ მოვლენას სხვა და სხვა სახელებით მოიხსენიებენ: კირლიანის ეფექტი, ეფექტი კირლიან, „კირლიანის აურა“. ის წარმოადგენს საგნების ზედაპირზე წარმოქმნილ გვირგვინოვან განმუხტვას. ამ მოვლენის წინაპირობაა საგნების წინასწარი მოთავსება მაღალი სიხშირის (10 – 100 კჰც) ცვლად ელექტრულ ველში. ამ დროს წარმოიქმნება ზედაპირული დამაბულობა (5-დან 30 კვ-მდე) ელექტროდებსა და გამოსაკვლევ ობიექტს შორის. ეს ეფექტი სტატიკური განმუხტვის ან ელვების სახით აღინიშნება ბიოლოგიური და არაორგანული წარმოშობის ობიექტებზე (იხ. სურ. 142).

ეს ეფექტი 1939 წელს აღმოაჩინა (პატენტი აღებულია 1949 წ) ფიზიოთერაპევტმა კრასნოდარიდან ს.კირლიანმა (თავის მეუღლესთან ვ.კირლიანთან ერთად). მეთოდს დაერქვა სახელი მეცნიერების საპატივსაცემოდ, რომლებმაც შეიმუშავეს ფოტოგადაღების ახალი მეთოდი, თუმცა ამდაგვარი ცდები ადრედაც ტარდებოდა (კერძოდ კი ნიკოლა ტესლას მიერ).

გამოსხივების ინტენსივობა და კონფიგურაცია ცოცხალი ობიექტებისათვის დამოკიდებულია ორგანიზმის ელექტროგამტარობაზე, რაც ძალზე ბევრი პარამეტრებით განისაზღვრება – მათ შორის გამოსაცდელის ფსიქოემოციონალური მდგომარეობით, ან გულ-სისხლძარღვთა სისტემის მუშაობით. მაგრამ ფოტოგადაღების შედეგები ცვალებადია და განმეორებითი ექსპერიმენტების სიხშირის გაზრდისას, ნათება სულ უფრო მკვერივი, ნათელი და ინტენსიური ხდება, რაც არ იძლევა სურათის ინტერპრეტირების საშუალებას.



სურ. 142. (a) გვირგვინოვანი განმუხტვა მონეტებზე, კირლიანის აპარატში მოთავსების შემდეგ. (b) ხელის თითის ფოტოსურათი მაღალი სიხშირის ველში. (c) ხის ფოთლის ფოტოსურათი მოჭროლი ზედა ნაწილით

კირლიანის მეთოდით ფოტოგრაფირებისას ობიექტი თავსდება კონდენსატორის შემონაფენებს შორის, რომლებიც ორგანული მინისაგანაა გაკეთებული. მაღალი სიხშირის ველში, შემონაფენებს შორის მყოფი ობიექტი, იძენს ელექტროგამტარობის განსაკუთრებულ სახეს – ე.წ. ტევადობრივ გამტარობას. მასში წარმოიქმნება ელექტრული მუხტი, რომელიც კი არ გადაადგილდება როგორც მეტალებში, არამედ ოსცილირებს შექმნის წერტილებში და ამით იწვევს სხვადასხვა სიკაშკაშის ნათებას, რომელიც შეესაბამება აპარატში მოთავსებული ობიექტის ელექტროგამტარობას. ნათება ჩანს ვიზუალურად. ობიექტის უკან შეიძლება კონტაქტურათ ფოტოფირის მოთავსება, ამიტომაც სურათებზე გამოსახულება მიიღება ნატურალური ზომებით.

ფოტოგრაფირება ხორციელდება ბნელ, ან წითელი შუქით განათებულ ოთახში. მოწყობილობაზე, რომელშიც იქმნება მაღალი სიხშირის ელექტრული ველი, ათავსებენ



არაექსპონირებულ ფოტომასალას (ქაღალდს, ფირს, ფირფიტას), რომელზეც შეიძლება პატარა ზომის ობიექტის დადება: მონეტის (სურ. 142a), ხის ფოთლის (სურ. 142c) და ა.შ. მაღალი ძაბვის მიწოდებისას, წარმოიქმნება გაზური განმუხტვა, რომელიც გამოიხატება საგნის გარშემო მყოფი აირის ნათებაში – გვირგვინოვანი განმუხტვა. ამ განმუხტვის შედეგად ხდება ფოტომასალის ექსპონირება (შავ-თეთრი ან ფერადი ფოტოქაღალდის ან ფოტოფირის). ფოტომასალის გამომჟღავნების შემდეგ, ყველაზე განათებული ადგილები გამოიყურებიან მუქად (ფოტონეგატივის ეფექტი), ისე როგორც ეს ჩანს ხელის თითის მოყვანილ ფოტოსურათზე (სურ. 142b). ვინაიდან თითი ეხებოდა ფოტოქაღალდს (წრე სურათის ცენტრში), ცენტრის მიდამო არაექსპონირებული დარჩა.

ელექტროგრაფიის ეფექტი (როგორც მას გამომგონელმა უწოდა) იყო აღმოჩენილი 1891 წელს ბელორუსი მეცნიერის ი.ო.ნარკვევიჩ-იოდკოს მიერ. მაგრამ მისმა გამოგონებამ ვერ ჰპოვა ფართო აღიარება და იყო 30-40 წლით დაუმსახურებლად დავიწყებული.

ცოტა უკეთეს მდგომარეობაში აღმოჩნდა ცნობილი მეცნიერი და გამომგონელი ნიკოლა ტესლა. მან შექმნა საკუთარი ხელსაწყო – ყველასათვის კარგად ცნობილი ტესლას ტრანსფორმატორი. ამ ტრანსფორმატორის გამოყენებით ტესლა, თავის ლექციებზე, აწყობდა თავისი სხეულის ნათებას დემონსტრირებას მაღალი სიხშირის ელექტრულ ველში. მე XX-ე საუკუნის დასაწყისში ეს ცდები სამეცნიერო წრეებში საკმაოდ ცნობილი გახტა. მაგრამ, უნდა აღინიშნოს, რომ ტესლას მიერ გადაღებული განმუხტვების ფოტოსურათები მიიღებოდა არა პირდაპირი ხერხით, როგორც ამას აკეთებდა ბელორუსი მეცნიერი, არამედ ჩვეულებრივი ფოტოკამერით.

1949 წელს კრასნოდარელმა (დღეს ეკატერინოდარი) წარმოშობით სომეხმა ფიზიკოს-თერაპევტმა ს.დ.კირლიანმა მიიღო საავტორო მოწმობა „მაღალსიხშირიან ფოტოგრაფიის“ მეთოდზე, მის მიერ გაუმჯობესებული ტესლას რეზონანსული ტრანსფორმატორის გამოყენებით. მრავალწლიანი ექსპერიმენტების შედეგად ს.დ.კირლიანის და მისი მეუღლის ვ.ხ.კირლიანის მიერ დაგროვდა აღნიშნული ეფექტის დიდი ფაქტობრივი მასალა და შეიქმნა „მაღალსიხშირიანი“ ფოტოგრაფირებისათვის მოწყობილობების მთელი რიგი.

ელექტრონოგრაფიის გამომგონელად უდავოდ უნდა იყოს მიჩნეული ბელორუსი ექიმი და ბუნებისმეტყველი ი.ო.ნარკვევიჩ-იოდკო, მაგრამ ამ მეთოდის განვითარებაში დიდი ღვაწლი დასდეს მეუღლე კირლიანებმა, ამიტომაც „მაღალსიხშირიან“ გამოსახულებებს დღეს მთელ მსოფლიოში კირლიანის გამოსახულებებს უწოდებენ.

კირლიანის ეფექტი გამოიყენება მეტალებში დამალული დეფექტების აღმოსაჩენათ. თვითონ კირლიანის მოწმობით, სოფლის მეურნეობაში, ამ ეფექტის გამოყენებით, შეიძლება თესლების გაღივების უნარის შემოწმება, დაავადებული და სალი მცენარეების ერთმანეთში გარჩევა. მაგრამ არ არსებობს არანაირი ინფორმაცია ამ მიზნით ეფექტის რეალურ გამოყენებაზე. კირლიანის ეფექტი წარმატებით გამოიყენება გეოლოგიაში მადანის ნიმუშების ექსპრეს-ანალიზისათვის. მაგრამ ის უფრო ცნობილია მაღალი სიხშირის ველში გვირგვინოვანი განმუხტვის სახელით.

თუ ნებისმიერ სხეულს მოვათავსებთ საკმარისი დამაბულობის ელექტრულ ველში, მაშინ მიკროწვერებიდან, რომლებითაც დაფარულია ნებისმიერი სხეულის ზედაპირი, იწყება გაზური განმუხტვა. წარმოიქმნება აირის ატომების და მოლეკულების ნათების ეფექტი. თავად კირლიანმა თავისი გამოგონება დააფიქსირა პატენტში არა როგორც ახალი ეფექტის აღმოჩენა, არამედ როგორც „ობიექტების ფოტოგრაფირების ხერხი მაღალი სიხშირის დენებში“. საინტერესოა რომ, როგორც კი შეტყობინებები კირლიანების ცდების შესახებ გავრცელდა პრესაში, მაშინვე მთელი მსოფლიოს ეზოთერიკებმა განაცხადეს, რომ კირლიანებმა აღმოაჩინეს „აურა“. მაგრამ ყველაფერი არც თუ ისე მარტივი აღმოჩნდა. ნამდვილი სენსაცია კირლიანების ცდებს მოყვა ცოტა მოგვიანებით,

როდესაც მათ გადაიეს ფოთლის ნათება, შემდეგ მოაჭრეს მას ნაწილი და კვლავ გადაიღეს (სურ. 142c). მათ გაოცრებას საზღვარი არა ჰქონდა, როდესაც იმ ადგილას, საიდანაც იყო მოჭრილი ფოთლის ფრაგმენტი, კვლავ დაფიქსირდა ნათება! ამ ექსპერიმენტმა 20 წლის წინ მოიარა მთელი მსოფლიოს გაზეთები, და დღეისათვის ყოველი პარაფსიქოლოგი უეჭველად დაიმოწმებს ამ მოწყვეტილი ფოთლის ფოტოსურათს, რათა დაადასტუროს სხეულისაგან დამოუკიდებელი „აურის“ არსებობა.

მაგრამ, რა თქმა უნდა, მთელი ეს 20 წელი მეცნიერები არ ისხდნენ ხელდაკრეფილები. მაშინვე, 1981 წელს ზაპოროჟიეს სამეცნიერო კვლევით ცენტრის ბიოფიზიკის ლაბორატორიაში ჩატარდა ანალოგიური ექსპერიმენტები. ამასთან ერთად, ცენტრის მეცნიერებმა აღნიშნულ „ცოცხალ ნათებას“ შეხედეს გარკვეული წინაპირობის არსებობიდან გამომდინარე: თუ არსებობს ნათება, უნდა არსებობდეს მისი მატერიალური მატარებელიც. ისმის კითხვა. თუ რა შეიძლება იყოს მატერიალური მატარებელი ამ შემთხვევაში?

ყოველი ცოცხალი ორგანიზმი არსებობს ნივთიერებათა ცვლის ხარჯზე. ცვლის პროდუქტების ნაწილი გამოიყვანება კანის ზედაპირიდან აიროვან ფორმაში. უშუალოდ კანის ზედაპირზე ცვლის პროდუქტები ერევა ჰაერს, რითიც იქმნება რთული შემადგენლობის მიკროატმოსფერო. ორგანიზმის მდგომარეობის ნებისმიერი ცვლილება ზეგავლენას ახდენს ნივთიერებათა ცვლაზე, ესე იგი მიკროატმოსფეროს შემადგენლობაზეც.

მაღალსიხშირიანი ელექტრული ველის ზემოქმედებით ეს მიკროატმოსფერო, სრული თანხმობით ცნობილ ფიზიკურ კანონებთან, იწყებს ნათებას. სრულიად ბუნებრივია, რომ ნათების ხასიათი (ფერი, სიკაშკაშე და ა.შ.) მის მდგომარეობაზეა დამოკიდებული. აქ ძალზე მართებული იქნება ავლნიშნოთ, რომ ეს ნათება საერთოდ ქრება ფოთლის სპირტით გაუცხიმოების შემდეგ. ეტყობა ამ დროს ობიექტს მიკროატმოსფეროს შორდება, რომელიც აღდგება მხოლოდ გარკვეული დროის გასვლის შემდეგ.

ამ ლაბორატორიაში ჩატარეს ასეთი ცდაც. ცოცხალი ფოთოლი მოათავსეს სასაგნე მაგიდაზე, რომელზეც წინასწარ იყო დაფენილი ქაღალდი. გააკეთეს ნათების პირველი ფოტოსურათი. შემდეგ მოჭრეს ფოთლის ნაწილი ქაღალდთან ერთად. განმეორებით ფოტოსურათზე ადგილი, სადაც ადრე იმყოფებოდა ფოთლის მოჭრილი ნაწილი, იყო აბსოლუტურად შავი, ანუ არანაირი ნათება იმ ადგილას არ აღინიშნებოდა – **ქაღალდმა დაიცვა სასაგნე მაგიდა ფოთლის მიკროატმოსფეროს შეხებისაგან**. ჩვეულებრივად, ფოთოლს ათავსებდნენ უშუალოდ მაგიდაზე, ამიტომაც ფოთლის ნაწილის მოჭრისას მაგიდაზე რჩებოდა მიკროატმოსფეროს კვალი, რომელიც იწვევდა ცარიელი ადგილის ნათებას მეუღლე კირლიანების ცდაში.

კირლიანის მეთოდის კრიტიკის შემდეგ, შეიძლება შეგექმნათ შთაბეჭდილება, რომ მისი გამოყენება შეიძლება მხოლოდ ეზოთერიკულ ძიებებში. მაგრამ მოდით ნუ გავაკეთებთ ნაადრევ დასკვნებს. პირველყოვლისა საჭიროა მოვლენის არსში ჩაწდომა. საჭიროა გავიგოთ თუ რამდენად ინფორმატიული შეიძლება იყოს აღნიშნული მეთოდი არაცოცხალი და ცოცხალი ბუნების ობიექტების კვლევისას. როგორც უკვე აღინიშნა, კირლიანის ეფექტი წარმოადგენს გვირგვინოვან განმუხტვას, რომელიც წარმოიქმნება მაღალი სიხშირის ელექტრულ ველში, და რომელსაც ჯერ კიდევ 1901 წელს აკვირდებოდა ნ.ტესლა სხეულის მოთავსებისას საკმარისი დამაბულობის ელექტრულ ველში. ამ დროს მიკროწვერებიდან, რომლებითაც დაფარულია ნებისმიერი სხეულის ზედაპირი, იწყება გაზური განმუხტვა და აირის ატომების ან მოლეკულების ნათება, რათგან მათში ელექტრონების შეჯახების გამო აღიგზნება ენერგეტიკული გადასვლები. გვირგვინის შემქმნელი ელექტროდის მუხტიდან გამომდინარე, განასხვავებენ უარყოფით ან დადებით გვირგვინებს. უარყოფითი გვირგვინის შემთხვევაში ელექტრონები წარმოიქმნება

კათოლიდან მათი ემისიის ხარჯზე დადებითი იონების ზეგავლენით. დადებითი გვირგვინის შემთხვევაში – ანოდის მახლობლად აირის იონიზირების შედეგად.

ჩამოვთვალოთ გვირგვინოვანი განმუხტვის ძირითადი თვისებები:

- გვირგვინოვანი განმუხტვა – ეს დამოუკიდებელი გაზური განმუხტვის ფორმაა, რომელიც აღიძვრება მკვეთრად არაერთგვაროვან ველებში.
- ამ განმუხტვის მთავარი თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ ელექტრონებით გამოწვეული იონიზირების პროცესები მიმდინარეობს განმუხტვის არის არა მთელ სიგრძეზე, არამედ მხოლოდ მის მცირე ნაწილში, მცირე სიმრუდის რადიუსის მქონე ელექტროდის მახლობლად – გვირგვინის შემქმნელი ელექტროდის წვეტი.
- ეს ზონა ხასიათდება ველის დამაბულობის გაცილებით უფრო მაღალი მნიშვნელობებით, ვიდრე მთელ განმუხტვის არეში არსებული საშუალო მნიშვნელობები.
- ბუნებრივ პირობებში გვირგვინოვანი განმუხტვა შეიძლება წარმოიქმნას ხეების ან ანძების წვეროებზე – ე.წ. წმინდა ელმის ნათება.
- გვირგვინოვანი განმუხტვა გამოიყენება აირების მტვრისაგან და თანხლები დაბინძურებისაგან გასაწმენდათ (ელექტროსტატიკური ფილტრი), აგრეთვე კონსტრუქციების მდგომარეობის დიაგნოსტიკაში (იძლევა ნაკეთებში ბზარების აღმოჩენის შესაძლებლობას).

რა პროცესები წარმართება ობიექტში მისი მაღალი სიხშირის ველში მოთავსებისას? როგორც უკვე არაერთხელ იყო ნათქვამი ცვლად ელექტრომაგნიტურ ველში აღიძვრება ცვლადი ძალები, რომლებიც სხეულის ყოველ ატომზე მოქმედებენ. ვინაიდან ეს ძალები გამუდმებით იცვლიან მნიშვნელობას და მიმართულებას, ისინი ვერ ახერხებენ ატომების გადაადგილებას, და მხოლოდ მათი „დარყევა“ შეუძლიათ. ატომები ოსცილირებენ (ირყევიან) თავის წონასწორული მდგომარეობის მახლობლად ცვლადი ელექტრომაგნიტური ველის სიხშირით. სწორედ ასეთი ოსცილაციის შედეგად წარმოიქმნება ზემოთ აღწერილი გამოსხივება.

ეხლა კი ვნახოთ თუ რამდენად ინფორმატიული შეიძლება იყოს ეს გამოსხივება.

დავიწყოთ იქიდან, რომ ნებისმიერი მოძრაობა (სივრცეში თუ დროში) ტოვებს ინფორმაციულ კვალს, რომელიც შეიძლება აისახოს გარშემო მყოფ სტრუქტურებში, რთული სისტემების ორგანიზების ყველა დონეზე. თუ ეს ასეა, მაშინ ცვლილებები შეიძლება აისახოს სხეულების ფორმირების დონეზეც, ვთქვათ კრისტალურ მესერში. მთელი სირთულე იმაში მდგომარეობს, რომ ჩვენ **ჯერ** კიდეც არ შეგვიძლია მივიღოთ ეს ინფორმაცია სრულად, არ შეგვიძლია „ნაკვალევის ამოკითხვა“. მაგრამ, არაა გამორიცხული ამ „ნაკვალევის“ ამოკითხვის შესაძლებლობა, ვინაიდან ჩვენ უკვე ვიმყოფებით ახალი თაობის გამოთვლითი ტექნიკის – სუპერკომპიუტერების შექმნის პირას, რომელთა მეშვეობით კაცობრიობას ექნება შესაძლებლობა ასეთი სირთულის დონის ამოცანების ამოხსნა.

## 18. კითხვები სამედიცინო ფიზიკაში და ბიოფიზიკაში.

### 18.1. სამედიცინო ფიზიკა.

1. ჰიდროდინამიკა. ჰიდროდინამიკური პარამეტრები. ლამინალური და ტურბულენტული დინებები. იდეალური სითხეები. სტაციონალური დინება. უწყვეტობის პირობა. ბერნულის განტოლება, ბერნულის კანონი სტატიკური, ჰიდროსტატიკური და დინამიური წნევები. ნიუტონისეული და არანიუტონისეული სითხეები. რეინოლდის რიცხვი. პუაზეილის კანონი. გულსისხლძარღვთა სისტემა და სისხლის დინების მოცულობითი სიჩქარე.
2. მექანიკური რხევები და ტალღები. მარტივი რხევები. თავისუფალი და იძულებითი რხევები. ჰარმონიული რხევები. მერხევი სხეულის სრული ენერჯია. ჰარმონიული რხევის განტოლება და მისი ზოგადი ამონახსენი. მიღევადი რხევების განტოლება და მისი ზოგადი ამონახსენი. იძულებითი რხევების განტოლება და მისი ზოგადი ამონახსენი. რთული რხევების ჰარმონიული სპექტრი. ტალღები. განივი ტალღა. გრძივი ტალღა. სფერული ტალღა. ბრტყელი ტალღა. აკუსტიკის ელემენტები. ტონი და ხმაური. მუსიკალური ბგერა ან რთული ტონი. ძირითადი ტონი. ობერტონი. ტემბრი. ხმის სიძლიერე, ინტენსიობა. ხმამაღლობა. ვებერის კანონი. თეთრი ხმაური. ულტრაბგერების გამოყენება მედიცინაში. კავიტაცია. დოპლერის ეფექტი და მისი გამოყენება სადიაგნოსტიკო საშუალებად. ინფრაბგერები.
3. ბიომექანიკის ელემენტები. კუთხური სიჩქარე და აჩქარება. მოძრაობის რაოდენობა (იმპულსი). ძალის მომენტი. ბრუნვის საკუთარი მომენტი. ბერკეტის კანონი. ძალის ბერკეტი. სიჩქარის ბერკეტი. ჩონჩხის აგებულება და ბერკეტები. თავისუფლების ხარისხების რიგი. იზოტონური, იზომეტრული და აუქსოტონური შეკუმშვები. ერგომეტრია. სტრუქტურა და სიმეტრიის ელემენტები. კრისტალები და ელემენტარული უჯრედები. ამორფული სხეულები.
4. ელექტრობა. ზონური თეორია (მეტალები, დიელექტრიკები, ნახევარგამტარები). ელექტრული ველი. დიელექტრიკის პოლარიზაცია. იონური პოლარიზაცია. დიელექტრიკის ორიენტაციული პოლარიზაცია. სპონტალური პოლარიზაცია. სტრუქტურული პოლარიზაცია. ინდუცირებული პოლარიზაცია. დიპოლები. სეგნეტოელექტრიკები. მაგნიტური ველი. დიამაგნეტიკები და პარამაგნეტიკები. დიამაგნეტიკური და პარამაგნეტიკური ეფექტები. ცვლადი დენის განმარტება. ელექტრული რხევები. კონდენსატორები და რხევითი კონტური. ელექტრომაგნიტური ველი. ელექტრომაგნიტური ტალღები. მაქსმელის განტოლებები.
5. უჯრედებისა და ქსოვილების ელექტროგამტარობა. იონური და დიპოლური პოლარიზაცია. მაკროსტრუქტურული პოლარიზაცია. ზედაპირული პოლარიზაცია. ქსოვილებსა და უჯრედების გამტარობა ცვლადი დენის მიმართ.  $\alpha$ ,  $\beta$  და  $\gamma$  დისპერსიები. ელექტროგამტარობის სადიაგნოსტიკო გამოყენება. რეოგრაფიის მეთოდი. მაღალი სიხშირის გამოსხივების სამკურნალო თვისებები. გულის ელექტრული ველის რეგისტრაცია. ეინდჰოვენის მოსაზრება. კარდიოგრამა და სტანდარტული განხრები. რენტგენოლოგია.
6. სინათლის ბუნება. კოჰერენტული ტალღები. მონოქრომატული ტალღები. სინათლის არეკვლა. ინტერფერენცია. სინათლის დიფრაქცია. ბრევის კანონი. ფრენელის და ფრაუნგოფერის დიფრაქციები. დისპერსია. პოლარიზებული სინათლე. პოლარიზაციის ხარისხი. ბუნებრივი სინათლე. ბრუსტერის კუთხე და ბრუსტერის კანონი. ჰოლოგრაფია. ბოჭკოვანი ოპტიკა.

7. ატომის აგებულება. ბორის თეორია. პლანკის მუდმივა. ენერგეტიკული დონეები. ელექტრონების ორბიტებზე მოძრაობის რადიუსი. ატომის მთავარი კვანტური რიცხვი. ატომის აღზნება და გამოსხივება. ენერგიის კვანტი. კვანტური რიცხვები. ატომის აგებულება და კვანტური რიცხვები. მასის დეფექტი. რადიაქტივობა.  $\alpha$ ,  $\beta$  და  $\gamma$  გამოსხივება. დაშლის ნახევარპერიოდი. კვანტური თეორიის ძირითადი დებულებები. შრედინგერის განტოლება და ტალღური ფუნქცია (მდებარეობის ალბათობის სიმკვრივე). ჰაიზენბერგის პრინციპი. ატომის კვანტურმექანიკური მოდელი. ორბიტალები. s-, p-, d- ელექტრონები. ჰიბრიდული ორბიტალები. ელექტრონის მდებარეობის ალბათობის სიმკვრივის განაწილება ატომის ცენტრამდე მანძილის მიხედვით. მეტასტაბილური დონეები. ინვერსული დასახლების დონეები. იძულებითი ლუმინესცენცია. ლაზერი.

## 18.2. ბიოფიზიკა.

1. თერმოდინამიკა და ბიოლოგია. ალბათობის თეორიის ელემენტები. ენტროპია. იზოლირებული, ჩაკეტილი და ღია სისტემები. მდგომარეობის ფუნქციები. ექსტენსიური და ინტენსიური სიდიდეები. წონასწორული და არაწონასწორული პროცესები. ენერგია და მუშაობა. თერმოდინამიკის I კანონი. შინაგანი ენერგია. ენტალპია. თერმოდინამიკის II კანონი. თერმოდინამიკის II კანონი ჩაკეტილ და ნებისმიერ სისტემაში. ენერგიის დისიპაცია. სასარგებლო მუშაობა. ჯიბსის თავისუფალი ენერგია. ჰელმჰოლცის თავისუფალი ენერგია. ღია სისტემების თერმოდინამიკა. ნეგენტროპია. დისიპატიური თეორია. დინამიური წონასწორობა. თერმოდინამიკის II კანონი და მდგომარეობის ალბათობა.
2. მაკრომოლეკულების სტრუქტურა. ცოცხალი სისტემის ცნება. ბიომაკრომოლეკულები: ცილები და ნუკლეინის მჟავები. სუსტი ბმები: ვანდერვალსის ძალები, წყალბადური ბმები და ჰიდროფობული ეფექტი. ფერმენტების დახასიათება. ფერმენტის მოდიფიკატორები. იზოსტერული და აზოსტერული მოდიფიკატორები. ფერმენტული კატალიზის თერმოდინამიკის ელემენტები. ფერმენტ-სუბსტრატული კომპლექსი. ლიგანდი. სორბცია. სორბენტი. სორბეტი. აბსორბცია. ადსორბცია. მაკრომოლეკულის კვანტური ბიოფიზიკის ელემენტები. ელექტრონული ენერგია. რხევითი და ბრუნვითი ენერგია. ატომებთან და მოლეკულებთან ზემოქმედი ფოტონების ცვლილებანი. ატომების და მოლეკულების ცვლილება ფოტონების ზემოქმედებისას. ფოტობიოლოგიური პროცესები. ფოტოტროპიზმი და ფოტოპერიოდიზმი. მაკრომოლეკულის კონფორმაცია და ენერგიის ტრანსპორტი. ცილის პირვალადი, მეორეული, მესამეური, მეოთხეური და მეხუთეური სტრუქტურები. დეროვანი უჯრედები. ენერგიის მიგრაციის ტიპები (რეზონანსული, ექსიტონური, სოლიტონური).
3. უჯრედის სტრუქტურა. მემბრანე და მისი სტრუქტურა. მემბრანის როლი. აქტიური და პასიური ტრანსპორტი. უჯრედის ორგანიზაცია. ორგანიზმის ენერგიის წყაროები. მეტაბოლიზმი. მიტჩელის თეორია. ბიოპოტენციალები. ელექტრონული და იონური (დიფუზიური, მემბრანული, ფაზათშორისი) პოტენციალები. მოსვენების პოტენციალი. ქმედების პოტენციალი. აღზნების მემბრანული პოტენციალი. უჯრედის დიფერენციაცია. ფილოგენეზი და ონტოგენეზი. ონტოგენეზის ორი ეტაპი.
4. კუნთის სტრუქტურა და მუშაობის პრინციპი (მცოცავი ძაფების მოდელი). ქემო-მექანიკური გარდაქმნები. რიგორული კავშირები. აქტინის და მიოზინის მოლეკულები. მიოზინის S1 და S2 სუბერთეულები. კუნთის მუშაობის

მოდელირება. სპირალური სტრუქტურების სიმეტრია. სპირალური სტრუქტურის პარამეტრები. სპირალის დიფრაქციული სურათი. არჩევის წესი. ბესელის ფუნქციის არგუმენტი როგორც სტრუქტურის ამსახავი პარამეტრი. გულის კუნთი. ნორმალური გულის წვრილი ძაფის სტრუქტურა. პათოლოგიური გულის წვრილი ძაფის სტრუქტურა. გულის პათოლოგია, როგორც კომფორმაციული ცვლილებების დარღვევა. წვრილი ძაფების პარაკრისტალები.

5. ცოცხალი ორგანიზმი და მართვის სისტემები. ენერგეტიკული და ინფორმაციული სისტემები. ენდოგენური და ეკზოგენური მართვა. მოქმედ მასათა კანონი. ლე-შატელიეს პრინციპი. ეკზოგენური მართვა. კიბერნეტიკა. მართვის გარე მექანიზმი. მართვის ფიზიოლოგიური სისტემები. სისტემის რეგულაციის ეტაპები. ორგანიზმის მარეგულირებადი სისტემები. ჰომეოსტაზი. ორგანიზმის სითბური რეგულაციის სქემა. ადამიანის მიერ გენერირებული ველეები.

## 19. დანართი

### 19.1. ბერძნული ანბანის ასოები

№	ასო		დასახელება	რიცხოვრ. მნიშვნელ.	№	ასო		დასახელება	რიცხოვრ. მნიშვნელ.
	დ	ჰ				დ	ჰ		
1	A	α	ალფა	1	13	N	ν	ნიუ	50
2	B	β	ბეტა	2	14	Ξ	ξ	ქსი	60
3	Γ	γ	გამა	3	15	O	ο	ომიკრონი	70
4	Δ	δ	დელტა	4	16	Π	π	პი	80
5	E	ε	ეფსილონი	5	17	P	ρ	რო	100
6	Z	ζ	ძეტა	7	18	Σ	σ	სიგმა	200
7	H	η	ეტა	8	19	T	τ	ტაუ	300
8	Θ	θ	ტეტა	9	20	Υ	υ	იფსილონი	400
9	I	ι	იოტა	10	21	Φ	φ	ფი	500
10	K	κ	კაპა	20	22	X	χ	ხი	600
11	Λ	λ	ლამბდა	30	23	Ψ	ψ	ფსი	700
12	M	μ	მიუ	40	24	Ω	ω	ომეგა	800

მეცნიერებაში ჩვეულებრივ გამოიყენებენ მხოლოდ იმ ასოებს, რომლებიც თავისი ფორმით არ ემთხვევა ლათინურებს (ცხრილში ასოები, რომელთა ფორმა ემთხვევა ლათინურებს გამოყოფილია ვარდისფერი შრიფტით).

### 19.2. ფიზიკური სიდიდეების საზომი ერთეულები.

ერთეულთა საერთაშორისო სისტემა, SI (ფრ. *Le Systeme International d'Unités, SI*) – ფიზიკური სიდიდეების ერთეულთა სისტემა, მეტრიკული სისტემის თანამედროვე ვარიანტი. SI წარმოადგენს მსოფლიოში ყველაზე ფართოდ გამოყენებად ერთეულთა სისტემას, როგორც საყოველთაო ცხოვრებაში, ასევე მეცნიერებასა და ტექნიკაში.

ერთეულთა სახელები SI სისტემაში იწერება პატარა ასოებით და პირობითი აღნიშვნების შემდეგ SI სისტემაში ჩვეულებრივი შემოკლებებისაგან განსხვავებით წერტილი არ ისმევა.

#### ძირითადი ერთეულები

სიდიდე		ერთეული			
დასახელება	სიმბოლო	დასახელება		აღნიშვნა	
		ქართ.	ინგლ.	ქართ.	საერთ.
სიგრძე	L	მეტრი	meter	მ	m
მასა	M	კილოგრამი	kilogram	კგ	kg
დრო	T	წამი	second	წმ	s
ელექტრული დენის ძალა	I	ამპერი	ampere	ა	A
თერმოდინამიური ტემპერატურა	Θ	კელვინი	kelvin	K	K
ნივთიერების რაოდენობა	N	მოლი	mole	მოლ	mol
სინათლის ძალა	J	კანდელა	candela	კდ	cd

## წარმოებული ერთეულები

წარმოებული ერთეულები შეიძლება გამოისახოს ძირითადი ერთეულებით მათემატიკური ოპერაციების (გამრავლება, გაყოფის) შედეგად. ზოგიერთ წარმოებულ ერთეულს მოხერხებულობისათვის ენიჭება საკუთარი დასახელები. ასეთი ერთეულები ასევე შეიძლება გამოყენდეს მათემატიკურ გამოსახულებებში სხვა წარმოებული ერთეულების შესაქმნელად.

ხშირად ერთი და იგივე ერთეული შეიძლება სხვადასხვაგვარად ჩაიწეროს ძირითადი და წარმოებული ერთეულების განსხვავებული ნაკრებების მეშვეობით (იხ. ცხრილის ბოლო სვეტი). მაგრამ პრაქტიკაში გამოიყენება დადგენილი (ან უბრალოდ საყოველთაოდ მიღებული) გამოსახულებები, რომლებიც საუკეთესოდ ასახავენ სიდიდის ფიზიკურ არსს. მაგალითად, ძალის მომენტის მნიშვნელობის ჩასაწერად საჭიროა გამოვიყენოთ ნ·მ და არა მ·ნ ან ჯ.

ზოგიერთი წარმოებული ერთეულების დასახელებები, რომლებიც ერთნაირად გამოისახებიან ერთი და იგივე ერთეულებით, შეიძლება იყოს განსხვავებული. მაგალითად, საზომ ერთეულს „წამი მინუს პირველ ხარისხად“ (1/c) ეწოდება ჰერცი (ჰც), როდესაც ის გამოიყენება სიხშირის გასაზომად, ხოლო ბეკერელი (ბკ), რადიონუკლეოტიდების აქტიურობის გაზომვისას.

### სპეციალური დასახელებების და აღნიშვნების მქონე წარმოებული ერთეულები

სიდიდე	ერთეული (დასახელ.)		აღნიშვნა		გამოსახვა ძირითადი ერთეულებით
	ქართ.	ინგლ.	ქართ.	საერთ.	
ბრტყელი კუთხე	რადიანი	radian	რად	rad	მ·მ <sup>-1</sup> = 1
სივრცითი კუთხე	სტერადიანი	steradian	სრ	sr	მ <sup>2</sup> ·მ <sup>-2</sup> = 1
ცელსიუსის ტემპერატურა	ცელსიუსის გრადუსი	degree Celsius	°C	°C	K
სიხშირე	ჰერცი	hertz	ჰც	Hz	წმ <sup>-1</sup>
ძალა	ნიუტონი	newton	ნ	N	კგ·მ·წმ <sup>-2</sup>
ენერგია	ჯოული	joule	ჯ	J	ნ·მ = კგ·მ <sup>2</sup> ·წმ <sup>-2</sup>
სიმძლავრე	ვატი	watt	ვტ	W	ჯ/წმ = კგ·მ <sup>2</sup> ·წმ <sup>-3</sup>
წნევა	პასკალი	pascal	პა	Pa	ნ/მ <sup>2</sup> = კგ·მ <sup>-1</sup> ·წმ <sup>-2</sup>
სინათლის ნაკადი	ლუმენი	lumen	ლმ	lm	კდ·სრ
ნათობა	ლუქსი	lux	ლკ	lx	ლმ/მ <sup>2</sup> = კდ·სრ/მ <sup>2</sup>
ელექტრული მუხტი	კულონი	coulomb	კულ	C	ა·წმ
პოტენციალთა სხვაობა	ვოლტი	volt	ვ	V	ჯ/კულ = კგ·მ <sup>2</sup> ·წმ <sup>-3</sup> ·ს <sup>-1</sup>
წინაღობა	ომი	ohm	ომ	Ω	ვ/ა = კგ·მ <sup>2</sup> ·წმ <sup>-3</sup> ·ს <sup>-2</sup>
ელექტროტევადობა	ფარადი	farad	ფ	F	კულ/ვ = წმ <sup>4</sup> ·ს <sup>2</sup> ·კგ <sup>-1</sup> ·მ <sup>-2</sup>
მაგნიტური ნაკადი	ვებერი	weber	ვბ	Wb	კგ·მ <sup>2</sup> ·წმ <sup>-2</sup> ·ს <sup>-1</sup>
მაგნიტური ინდუქცია	ტესლა	tesla	ტ	T	ვბ/მ <sup>2</sup> = კგ·წმ <sup>-2</sup> ·ს <sup>-1</sup>



ინდუქტივობა	ჰენრი	henry	ჰ	H	კგ·მ <sup>2</sup> ·წმ <sup>-2</sup> ·ა <sup>-2</sup>
ელექტრიგამტარობა	სიმენსი	siemens	სიმ	S	ომ <sup>-1</sup> = წმ <sup>3</sup> ·ა <sup>2</sup> ·კგ <sup>-1</sup> ·მ <sup>-2</sup>
რადიაქტიური წყაროს აქტივობა	ბეკერელი	becquerel	ბკ	Bq	წმ <sup>-1</sup>
იონიზირებადი გამოსხივების შთანთქმული დოზა	გრეი	gray	გრ	Gy	ჯ/კგ = მ <sup>2</sup> /წმ <sup>2</sup>
იონიზირებადი გამოსხივების ეფექტური დოზა	ზივერტი	sievert	ზვ	Sv	ჯ/კგ = მ <sup>2</sup> /წმ <sup>2</sup>
კატალიზატორის აქტივობა	კატალი	katal	კატ	kat	მოლ/წმ

**ერთეულები, რომლების არ შედიან SI სისტემაში**

ერთეული	ინგლისური დასახელება	აღნიშვნა		სიდიდე SI ერთეულებში
		გართ.	საერთ.	
წუთი	minute	წთ	min	60 წმ
საათი	hour	სთ	h	60 წთ = 3600 წმ
დღე-ღამე	day	დღე-ღამე	d	24 სთ = 86 400 წმ
კუთხური გრადუსი	degree	°	°	(π/180) რად
კუთხური წუთი	minute	'	'	(1/60)° = (π/10 800)
კუთხური წამი	second	"	"	(1/60)' = (π/648 000)
ლიტრი	liter	ლ	l, L	0,001 მ <sup>3</sup>
ტონა	tonne	ტ	t	1000 კგ
ნეპერი	neper	ნპ	Np	უგანზომილო
ბელი	bel	ბ	B	უგანზომილო
ელექტრონვოლტი	electronvolt	ევ	eV	≈ 1,602 177 33·10 <sup>-19</sup> ჯ
მასის ატომური ერთეული, დალტონი	unified atomic mass unit, dalton	და	u, Da	≈ 1,660 540 2·10 <sup>-27</sup> კგ
ასტრონომიული ერთეული	astronomical unit	ა. ე.	au	149 597 870 700 მ (ზუსტად)
საზღვაო მილი	nautical mile	მილი	M	1852 მ (ზუსტად)
კვანძი	knot	კვანძი	kn	1 საზღვაო მლ/სთ = (1852/3600) მ/წმ
არი	are	არი	a	100 მ <sup>2</sup>

ჰექტარი	hectare	ჰა	ha	10000 მ <sup>2</sup>
ბარი	bar	ბარი	bar	100000 პა
ანგსტრემი	angstrom	Å	Å	10 <sup>-10</sup> მ
ბარნი (ბირთვული პროც. ეფექტ. გან-თი)	barn	ბ	b	10 <sup>-28</sup> მ <sup>2</sup>

### 19.3. ზოგიერთი მუდმივი ფიზიკური სიდიდე.

- სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში  $c$  ზუსტად უდრის 299 792 458 მ/წმ;
- პლანკის მუდმივა  $h$  ზუსტად უდრის  $6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}$  ჯ.წმ;
- ელემენტალური ელექტრული მუხტი  $e$  ზუსტად უდრის  $1,602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}$  კულ;
- ბოლცმანის მუდმივა  $k$  ზუსტად უდრის  $1,380\ 649 \cdot 10^{-23}$  ჯ/კ;
- ავოგადროს რიცხვი  $N_A$  ზუსტად უდრის  $6,022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}$  მოლ<sup>-1</sup>;

### 19.4. ათწილადი წინასართები

ჯერადი ერთეულების წინასართები					
ათობითი მამრავლი	წინსართი		აღნიშვნა		მაგალით
	ქართ.	საერთ.	ქართ.	საერთ.	
10 <sup>1</sup>	დეკა	deca	დკ	da	დკლ — დეკალიტრი
10 <sup>2</sup>	ჰექტო	hecto	ჰ	h	ჰპა — ჰექტოპასკალი
10 <sup>3</sup>	კილო	kilo	კ	k	კნ — კილონიუტონი
10 <sup>6</sup>	მეგა	mega	მგ	M	მგპა — მეგაპასკალი
10 <sup>9</sup>	გიგა	giga	გ	G	გჰც — გიგაჰერცი
10 <sup>12</sup>	ტერა	tera	ტ	T	ტვ — ტერავოლტი

წილადი ერთეულების წინასართები					
ათობითი მამრავლი	წინსართი		აღნიშვნა		მაგალით
	ქართ.	საერთ.	ქართ.	საერთ.	
10 <sup>-1</sup>	დეცი	deci	დ	d	დმ — დეციმეტრი
10 <sup>-2</sup>	სანტი	centi	ს	c	სმ — სანტიმეტრი
10 <sup>-3</sup>	მილი	milli	მ	m	მნ — მილინიუტონი
10 <sup>-6</sup>	მიკრო	micro	მკ	μ(u)	მკმ — მიკრომეტრი
10 <sup>-9</sup>	ნანო	nano	ნ	n	ნმ — ნანომეტრი
10 <sup>-12</sup>	პიკო	pico	პ	p	პვ — პიკოვარადი