

ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
ფიზიკის დეპარტამენტი

ლექციების კურსი სამედიცინო ფიზიკაში

ფიზიკის დეპარტამენტის ასოც. პროფ. ლალი კალანდაძე

2013 წ

## ლექცია I

### შესავალი

თეორიული და ექსპერიმენტალური ფიზიკის განვითარებამ და მისმა დამკვიდრებამ ბიოლოგიასა და მედიცინაში განაპირობა ახალი დარგების სამადიცინო ფიზიკისა და ბიოლოგიური ფიზიკის ფორმირება.

სამედიცინო ფიზიკა სწავლობს ფიზიკურ პროცესებს, რომლებიც მიმდინარეობს ცოცხალ ორგანიზმებში, მათი ორგანიზაციის სხვადასხვა დონეზე.

ცოცხალი ორგანიზმის წარმოშობის, ფუნქციონირებისა და განვითარების კანონები ეყრდნობა ფიზიკისა და ქიმიის ზოგად კანონზომიერებებს და მათი შემდგომი განვითარებაა, რამაც ევოლუციის პროცესში მატერია მიიყვანა თვისობრივად ახალი დონის ორგანიზაციამდე. ფიზიკა სწავლობს მატერიის მოძრაობის ფიზიკურ ფორმებს, რომლებიც შეიძლება დავყოთ და განვიხილოთ როგორც მექანიკური, მოლეკულურ-სითბური, ელექტრომაგნიტური, ატომური და ბირთვული მოძრაობები. სიცოცხლე მატერიის მოძრაობის ბიოლოგიური ფორმაა და თავისთავში მოიცავს მოძრაობის უფრო დაბალ ფორმებს - ფიზიკურს და ქიმიურს. აქედან გამომდინარე, ცოცხალ ორგანიზმებში მიმდინარე პროცესების გასაგებად აუცილებელია ფიზიკის და ქიმიის ზოგადი კანონზომიერებების ცოდნა.

სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა კვლევის ობიექტებად იყენებს სხვადასხვა ცოცხალ სისტემებს: ვირუსებიდან, ბაქტერიებიდან, მცენარეებიდან დაწყებული და დამთავრებული უმაღლესი ცხოველებითა და ადამიანით. ადამიანის ორგანიზმში მიმდინარე პროცესების კვლევა ნორმისა და პათოლოგიის პირობებში წარმოქმნის სამედიცინო ფიზიკისა და შემდგომ ბიოფიზიკის შესწავლის საგანს.

მიუხედავად იმისა, რომ ადამიანის ორგანიზმში მიმდინარე პროცესები საკმარისად რთულია, შეიძლება მათ შორის გამოვყოთ პროცესები, რომლებიც ახლოა ფიზიკურთან. მაგალითად, ისეთ რთულ ფიზიოლოგიურ პროცესს, როგორცაა სისხლის მოძრაობა, საფუძვლად უდევს ფიზიკური პროცესი, რადგანაც დაკავშირებულია სითხის მოძრაობასთან (ჰიდროდინამიკა); გულის მუშაობა - (მექანიკასთან); ბიოპოტენციალების გენერაცია (ელექტრობასთან); სუნთქვა (აეროდინამიკასთან); სითბოგადაცემა (თერმოდინამიკასთან); აორთქლება ( ფაზურ გარდაქმნასთან); მხედველობა (ოპტიკასთან) და ა. შ.

ორგანიზმში ფიზიკური მაკროპროცესების გარდა, ისევე როგორც არაცოცხალ ბუნებაში, ადგილი აქვს მოლეკულურ პროცესებს, რომლებიც განსაზღვრავენ ბიოლოგიური სისტემების მდგომარეობას. ასეთი მიკროპროცესების ფიზიკის ცოდნა აუცილებელია ორგანიზმის მდგომარეობის, დაავადების ბუნების, წამლის მოქმედების და სხვ. სწორი შეფასებისათვის. ფიზიკური მახასიათებლები და მოვლენები შეისწავლება ბიოლოგიური ობიექტების ორგანიზაციის ყველა დონეზე: მაკრომოლეკულების, უჯრედების, ქსოვილთა, ფიზიოლოგიური სისტემებისა და უფრო რთული სისტემების (მთლიანი ორგანიზმი) დონეზე.

მედიცინაში ბევრი მეთოდი დიაგნოსტიკისა და მკურნალობის დაფუძნებულია ფიზიკის იდეებისა და პრინციპების გამოყენებაზე. უმეტესი სამედიცინო ხელსაწყო-აპარატურა თავისი დანიშნულებით ფიზიკურს წარმოადგენს. მაგ. წნევის საზომი, სამედიცინო თერმომეტრი, ელექტროგრაფები, რენტგენოდიაგნოსტიკა, ულტრაბერითი გამოკვლევები და სხვ.

სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა ფაროდ იყენებს ანალიზის მათემატიკურ მეთოდებს, ფიზიკურ და მათემატიკურ მოდელებს, გამოთვლით ტექნიკას. აღნიშნულის გამო ბიოლოგია და მედიცინა, რომლებიც არაზუსტ მეცნიერებებს წარმოადგენენ, უახლოვდებიან ზუსტი მეცნიერებების დონეს.

სამედიცინო ბიოფიზიკის ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანაა იმ ფიზიკური და ფიზიკა-ქიმიური პარამეტრების გამოვლენა, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იქნენ ორგანიზმის ფუნქციონალური მდგომარეობის დიაგნოსტიკისათვის. სასიცოცხლო პროცესების დარღვევის შესახებ უპირველეს ყოვლისა შეიძლება ვიმსჯელოთ ამ პარამეტრების ცვლილებით.

სამედიცინო ფიზიკა და ბიოფიზიკა ის ერთ-ერთი ძირითადი დისციპლინებია, რომელთა ცოდნა სრულფასოვანი ექიმის ფორმირების აუცილებელი პირობაა.

## მეტროლოგია

თავის პრაქტიკულ საქმიანობაში ექიმს ყოველთვის აქვს ურთიერთობა რაოდენობრივ მაჩვენებლებთან (ავადმყოფის ტემპერატურა, სისხლის წნევა, წამლების დოზირება და სხვ.). ამიტომ აუცილებელია ვიცოდეთ როგორ მიიღება ეს სიდიდეები, როგორია მათი სიზუსტე და რა ერთეულებში იზომება ისინი. რაოდენობრივ მაჩვენებლებთან საქმე აქვს ნებისმიერ მეცნიერებას, ხოლო ფიზიკას - განსაკუთრებით. ეს საკითხები არის დაკავშირებული მეტროლოგიასთან, ხოლო მათ მათემატიკურ ბაზას წარმოადგენს ალბათობის თეორია და მათემატიკური სტატისტიკა.

**მეტროლოგია**, *საზომთმცოდნეობა* (ბერძნ. μέτρον (საზომი, ზომა) და λογος (სწავლება, მოძღვრება)- მეცნიერება საზომ ერთეულთა შესახებ. მეტროლოგია სწავლობს ზუსტ საზომებს, ადგენს გაზომვის მეთოდებსა და საშუალებებს, ზრუნავს გაზომვათა სიზუსტეზე, ქმნის ფიზიკურ ერთეულებსა და ერთეულთა სისტემებს.

ფიზიკური სიდიდის გაზომვა ნიშნავს მის შედარებას მისივე გვარის მეორე ფიზიკურ სიდიდესთან, რომელიც პირობით ერთეულად არის მიღებული. მაგ. სხეულის სიგრძის გაზომვისას ჩვენ ვიგებთ, რამდენჯერ მეტია ან ნაკლები მისი სიგრძე მეორე სხეულის სიგრძეზე, რომელიც ერთეულად გვაქვს შერჩეული. ჩვენ შეგვიძლია შევადაროთ ერთმანეთს მხოლოდ ერთგვაროვანი ფიზიკური სიდიდეები. მაგ. სიგრძე შეიძლება შევადაროთ მხოლოდ სიგრძეს, მასა - მასას და სხვ.

1960 წელს შემოღებული იქნა ერთეულთა საერთაშორისო სისტემა: SI (System International). ამ სისტემას საფუძვლად უდევს შვიდი ერთეული:

1. სიგრძის -მეტრი
2. მასის - კილოგრამი
3. დროის - წამი
4. ტემპერატურის - კელვინი
5. დენის ძალის - ამპერი
6. სინათლის ძალის - კანდელა
7. ნივთიერების რაოდენობის - მოლი

ამ შვიდი ერთეულის საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს ყველა დანარჩენი ფიზიკური სიდიდე.

გაზომვების დროს შესაძლებელია მივიღოთ სიდიდეების ძალიან მცირე ან ძალიან დიდი მნიშვნელობები. ამიტომ ასეთი რიცხვების შემოკლებული ფორმით დასაწერად ხშირად იყენებენ თავსართებს (პრეფიქსებს), რომლებიც მოცემულია ცხრილში:

სიდიდე	პრეფიქსი	აღნიშვნა
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-1}$	deci	d
$10^2$	hecto	h
$10^3$	kilo	k
$10^6$	mega	M
$10^9$	giga	G
$10^{12}$	tera	T

**სამედიცინო მეტროლოგია.** მედიცინაში დიაგნოსტიკისა და სამკურნალო დანიშნულებით გამოიყენება სამედიცინო ტექნიკა. მათზე გაზომვების წარმოება საკმაოდ სპეციფიურია. ამიტომ მეტროლოგიაში ამ მიმართებით არსებობს მიმართულება - სამედიცინო მეტროლოგია.

ყველა შესაძლო ფიზიკური მედიკო-ბიოლოგიური გაზომვები შესაძლებელია კლასიფიცირებული იქნას ფიზიკის კურსის შესაბამისად: მექანიკური გაზომვები; სითბური გაზომვები; ელექტრული და მაგნიტური გაზომვები; ოპტიკური გაზომვები; ატომური და ბირთვული.

**მექანიკა** არის ფიზიკის ნაწილი, რომელიც შეისწავლის სხეულების მექანიკურ მოძრაობას. მექანიკას, რომელსაც საფუძვლად უდევს ნიუტონის კანონები, უწოდებენ კლასიკურს. მექანიკის საკითხები სამედიცინო ფიზიკაში განიხილება შემდეგ საკითხებთან მიმართებაში:

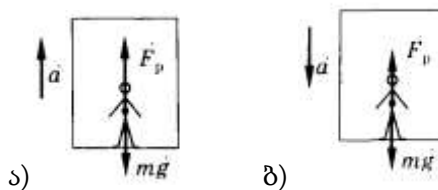
- ✓ ორგანიზმის მოძრაობის მექანიკა და ადამიანის საყრდენ - მამოძრავებელი აპარატის მექანიკა;
- ✓ ბიოლოგიური ქსოვილებისა და სითხეების მექანიკური თვისებები;

- ✓ ორგანიზმში მიმდინარე პერიოდული პროცესების ზოგადი კანონზომიერებები;
- ✓ სმენის ფიზიკური საფუძვლები;
- ✓ გულის მუშაობა და სხვ.

ბიომექანიკას უწოდებენ ბიოლოგიური ფიზიკის ნაწილს, რომელშიც განიხილება ცოცხალი ქსოვილების, ორგანოებისა და მთლიანი ორგანიზმის მექანიკური თვისებები და მოვლენები. ბიომექანიკა არის ცოცხალი სისტემების მექანიკა.

**მექანიკური მუშაობა. ერგომეტრია.** მექანიკური მუშაობა, რომელიც შეიძლება შეასრულოს ადამიანმა დღის განმავლობაში ზალიან ბევრ ფაქტორზე და მოკიდებული, ამიტომ ძნელია მივუთითოთ რაიმე ზღვრული მნიშვნელობა. ეს ეხება სიმძლავრესაც. როდესაც გადაადგილება არ სრულდება, მუშაობა ნულის ტოლია. როცა ტვირთი გვიჭირავს და ვდგავართ ერთ ადგილზე, მუშაობას არ ვასრულებთ, თუმცა ვიძლებით. ამ მუშაობას უწოდებენ კუნთების სტატიკურ მუშაობას. ადამიანის მუშაობის საზომ ხელსაწყოს წარმოადენს ერგომეტრი. ძალის საზომ ხელსაწყოს დინამომეტრი.

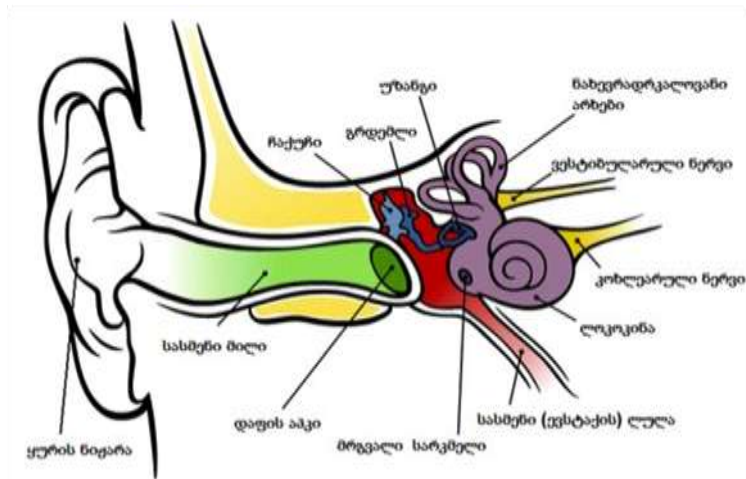
**ადამიანის გადატვირთვისა და უწონობის მდგომარეობა.** ჩვეულებრივ პირობებში ადამიანზე მოქმედებს სიმძიმის ძალა და საყრდენის რეაქციის ძალა; ეს ძალები ტოლია და ურთიერთსაწინააღმდეგოა მიმართული. ასეთი მდგომარეობა ადამიანის ბუნებრივი მდგომარეობაა. სისტემის აჩქარებული მოძრაობის შემთხვევაში აღიძვრება განსაკუთრებული მდგომარეობები, რომელთაც უწოდებენ გადატვირთვისა და უწონობის მდგომარეობებს. ეს საკითხები შეიძლება განხილული იქნას ლიფტის მოძრაობის შემთხვევაში (ნახ.1).



ნახ. 1. ა) ლიფტი მოძრაობს აჩქარებულად ზევით; ბ) ლიფტი მოძრაობს აჩქარებულად ქვევით

განიხილეთ ნახ.1 და ახსენით, როდის იქნება გადატვირთვის და როდის უწონობის მდგომარეობა (დამოუკიდებლად).

**ვესტიბულარული აპარატი, როგორც ორიენტაციის ინერციული სისტემა.** ძუძუმწოვრების სმენის ორგანო არის ყური. ყური სმენის გარდა წონასწორობის შეგრძნებასაც ემსახურება. ყური იყოფა გარეთა, შუა და შიგნითა ნაწილებად (ნახ.2). შიგნითა ყურში, ლოკოკინას გარდა, წონასწორობის ორგანო - ვესტიბულარული აპარატია მოთავსებული. ის სამი ნახევრადრკალივანი არხისა და ორი პარკისგან შედგება. ეს სისტემა ცხიტიანა ამოვსებული. არხებსა და პარკების კედლებზე რეცეპტორებია განლაგებული. მათი მგრძნობიარე ბუსუსები სითხეშია მოთავსებული. პარკებში კირის მრავალი კრისტალია, მათ ოტოლითებს უწოდებენ. სხეულის უჩვეულო მდგომარეობაში გადაწვლების შემთხვევაში, ოტოლიტები მდებარეობას შეიცვლიან, გააღიზიანებენ რეცეპტორებს. რეცეპტორები აღიგზნებიან და ნერვულ იმპულსებს შუა ტვინში, ნათხემსა და დიდი ნახევარსფეროების ქერქში გადაგზავნიან. ამ იმპულსების საპასუხოდ, თავის ტვინი გარკვეულ კუნთებს ჩართავს მდგომარეობაში, რის შედეგადაც სხეულს ნორმალური



ნახ.2. სმენის ორგანო

მდგომარეობა დაუბრუნდება. ავტომობილის მკვეთრად დამუხრუჭებისას სწორედ ამიტომ არ ვვარდებით და ვერტიკალურ მდგომარეობას ვინარჩუნებთ. ხანგრძლივად უჩვეულო მდგომარეობა: გემზე დიდხანს რჩევა, საქანელაზე დიდხანს ქანაობა და ხანგრძლივი ტრიალი ადამიანებს გულისრევისა და თავბრუსხვევის გრძნობას უჩენს. ეს ვესტიბულარული აპარატის გაღიზიანებაზე ვეგეტატიური ნერვული სისტემის პასუხია. სწორედ ამიტომ, ორბიტაზე ყოფნისას ასტრონავტების ნახევარსფეროების ქერქი საერთოდ ვერ ღებულობს პარკებიდან და ნახევრადრკალივანი არხების რეცეპტორებისგან აგზნებას. ამიტომ ასტრონავტებს სპეციალურად უვარჯიშებენ კარიბჭის აპარატს.

## ლექცია II

მექანიკური რხევები და ტალღები.

### პერიოდული მექანიკური პროცესები ცოცხალ სისტემაში.

პერიოდული მექანიკური მოძრაობა მატერიის საერთო ფუნდამენტური თვისებაა. ასეთი მოძრაობა, როგორც მაკრო, ისე მიკროსამყაროს არსებობის ძირითადი ფორმაა. ციურ სხეულთა უმეტესობა საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნავს. პლანეტები მოძრაობს ვარსკვლავების გარშემო, ვარსკვლავები გალაქტიკის ცენტრის გარშემო და ა.შ.; ჩაკეტილ წრეზე მოძრაობა კი პერიოდული მოძრაობაა. თვით ატომშიც ელექტრონების ბრუნვა ბირთვის გარშემო პერიოდული მოძრაობაა.

დედამიწის ბრუნვა მზის გარშემო, ცხადია, იწვევს გარემოს ფიზიკური პარამეტრების პერიოდულ ცვლილებას. ამ ფაქტს არ შეიძლება გავლენა არ მოეხდინა ბიოლოგიური სამყაროს განვითარებაზე. ხანგრძლივი ევოლუციის განმავლობაში გადარჩა ისეთი ცოცხალი ორგანიზმები, რომლებშიც მიმდინარე პროცესთა უმეტესობას რხევითი ბუნება აქვს.

პერიოდული (რხევითი) პროცესები დამახასიათებელია ცოცხალი სისტემების ორგანიზაციის ყველა დონისათვის - ბიომოლეკულებით დაწყებული და მთლიანი ორგანიზმითა და ბიოსფეროთი დამთავრებული. ადამიანის ბევრი ორგანოსა და ფიზიოლოგიური სისტემის ფუნქციონირებას პერიოდული მექანიკური მოძრაობა უდევს საფუძვლად. პერიოდული ხასიათისაა, მაგალითად, გულის, ფილტვების, ნაწლავების მუშაობა, არტერიის გასწვრივ წნევის პულსური რხევის გავრცელება (პულსური ტალღა - პულსი) და სხვა.

პერიოდული მექანიკური პროცესების მახასიათებელი პარამეტრების ცვლილება ორგანიზმში თუ გადააჭარბებს "ნორმის" ფარგლებს, მასში შეიძლება სხვადასხვა სახის პათოლოგიური დარღვევა განვითარდეს. "ნორმიდან" ასეთი გადახრა შეიძლება გამოიწვიოს გარეშე მექანიკური (რხევითი) ბუნების ფაქტორებმა - ინფრაბგერამ, ულტრაბგერამ, ვიბრაციამ და სხვა; ზემოქმედებისას გაეკვეთულ შემთხვევაში ვლინდება რეზონანსული ეფექტი, რომელიც უმეტეს შემთხვევაში ორგანიზმისათვის საზიანოა.

პრეფორმირებულ მექანიკურ რხევებს დიდი ხანია წარმატებით იყენებენ მედიცინაში. კვლევითი, სადიაგნოსტიკო და სამკურნალო მიზნით. შექმნილია ხელსაწყო-აპარატები ინტენსივობისა და სიხშირეთა ფართო დიაპაზონში.

მედიცინაში მექანიკური რხევების მრავალმხრივი გამოყენების მაგალითებიდან ერთ-ერთს მოვიყვანთ: შინაგანი ორგანოების გამოსახულების მისაღებად იყენებენ მაღალი სიხშირის მექანიკურ რხევებს. ამ მეთოდს ულტრაბგერითი ვიზუალიზაციის მეთოდს უწოდებენ. სამედიცინო პრაქტიკაში ის უფრო ექოსკოპიის სახელწოდებითაა ცნობილი. ექიმს შეუძლია დააკვირდეს გულის ცალკეული სარქველებისა და კუნთების მუშაობას.

### **რხევითი მოძრაობის ძირითადი ფიზიკური მახასიათებლები**

პერიოდულს ისეთ მოძრაობას უწოდებენ, რომელიც ზუსტად მეორდება დროის განსაზღვრული ინტერვალის შემდეგ. თუ პერიოდული მოძრაობისას სხეული გადაადგილდება რაიმე წონასწორული მდებარეობის მიმართ, ხან ერთ, ხან მეორე მხარეს, მაშინ სხეულის ასეთ მოძრაობას მექანიკური რხევა ეწოდება.

ბუნებაში მიმდინარე ბევრ პროცესს რხევითი ხასიათი აქვს. რხევითი პროცესებისათვის, მიუხედავად მათი ბუნებისა, ზოგიერთი კანონზომიერება საერთოა. მაგ. თავისუფალი რხევები, რომელიც გამოწვეულია მერხევ სისტემაში მოქმედი შიგა ძალებით, მისი წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოყვანის შემდეგ, რეალურ პირობებში ყოველთვის მიღევადა. თავისუფალი რხევების სიხშირეს მერხევი სხეულის საკუთარ სიხშირეს უწოდებენ. სხვადასხვა სხეულის რხევის საკუთარი სიხშირეები განსხვავებულია. რხევა არ მიიღევა, თუ მას იძულებითი ხასიათი აქვს, ე.ი. გამოწვეულია გარეშე, პერიოდულად ცვლადი ძალით.

ბუნების მიხედვით არჩევენ: მექანიკურ რხევებს, ელექტრომაგნიტურ რხევებს და ქიმიური ბუნების რხევით რეაქციებს.

რხევების სახეებია: თავისუფალი რხევები, იძულებითი რხევები, ავტორხევები, და პარამეტრული რხევები.

სხვადასხვა სახის რხევებს შორის ყველაზე მარტივი ჰარმონიული რხევაა.

რხევებს ჰარმონიული ეწოდება, თუ მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდე სინუსის და კოსინუსის კანონით იცვლება:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

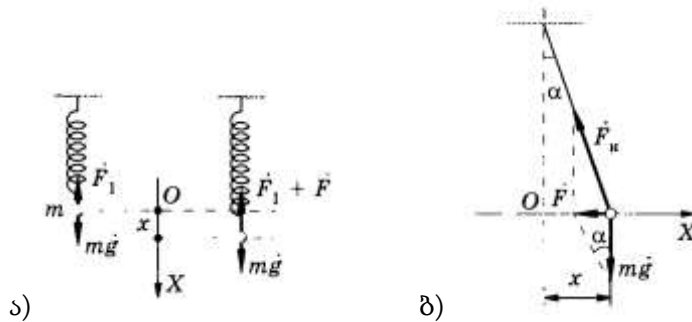
რხევითი მოძრაობის მახასიათებელი ძირითადი სიდიდეებია:

1. რხევის ამპლიტუდა ( $A$ ) - წონასწორობის მდებარეობიდან უდიდესი გადახრა;
2. რხევის პერიოდი ( $T$ ) - დრო, რომლის განმავლობაშიც სრულდება ერთი სრული რხევა; პერიოდის ერთეულია წმ;
3. რხევის სიხშირე  $\nu$  - რხევათა რიცხვი 1 წამში; სიხშირის ერთეული - წმ<sup>-1</sup>, რომელსაც ჰერცს უწოდებენ - არის რხევა, რომლის პერიოდი 1 წამია.

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2)$$

### ჰარმონიული რხევა. რხევითი მოძრაობის პარამეტრები

ზამბარაზე დამაგრებული ბურთულას მოძრაობისას ტრანექტორიის ნებისმიერ წერტილში მერხევ სხეულზე მოქმედი დრეკადობის ძალა წონასწორობის მდებარეობისაკენ არის მიმართული.



ნახ.3. ჰარმონიული რხევა ა) ზამბარას შემთხვევაში; ბ) ქანქარას შემთხვევაში

გავიხსენოთ, რომ დრეკადობის ძალა არის ის ძალა, რომელიც სხეულის დეფორმაციისას აღიმკრება და მიმართულია სხეულის ნაწილაკების გადაადგილების საპირისპიროდ.

ჰუკის კანონის თანახმად:  $F_{\text{დრ}} = -kx$ , სადაც  $k$  არის სიხისტე, რომელიც დამოკიდებულია სხეულის ზომებზე და მასალაზე.  $x$  წანაცვლებაა წონასწორობის მდებარეობიდან.

მექანიკურ რხევას, რომელიც წარმოებს წანაცვლების პროპორციული და მის საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალის მოქმედებისას, ჰარმონიული რხევა ეწოდება. დრეკადობის ძალას სწორედ ასეთი თვისება ახასიათებს, ამიტომ დრეკად ზამბარაზე მიმაგრებული სხეულის მოძრაობა ჰარმონიულია. ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად  $\vec{F} = m\vec{a}$ . განხილულ მაგალითში ხახუნის ძალა უგულებელყოფილია სიმძიმის ძალა კომპენსირდება რეაქციის ძალით. ამიტომ აჩქარების გამომწვევი დრეკადობის ძალაა. ე.ი.  $F_{\text{დრ}} = ma_x \cdot a_x$  - აჩქარების პროექცია  $x$  ღერძზე.  $ma_x = -kx$ . აქედან

$$a_x = -\frac{k}{m}x \quad (3)$$

ვინაიდან  $k$  და  $m$  მუდმივი სიდიდეა, შემოვიტანოთ აღნიშვნა:  $\omega_o^2 = \frac{k}{m}$  - მას

ციკლური სიხშირე ეწოდება. მაშინ

$$a_x = -\omega_o^2 x \quad (4)$$



თუ გავიხსენებთ, რომ  $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ , მაშინ (2) ასე ჩაიწერება:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5)$$

მივიღეთ ჰარმონიული რხევის დიფერენციალური განტოლება, რომლის ამონახსნია -  
 $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  (6)

ფიზიკური სიდიდის დროზე დამოკიდებულ პერიოდულ ცვლილებას, რომელიც სინუსისა და კოსინუსის კანონით სრულდება, ჰარმონიული რხევები ეწოდება.

როგორც მათემატიკის კურსიდან ცნობილია, სინუსის ნაქსიმალური მნიშვნელობაა 1. აქედან გამომდინარე, როცა  $\omega_0 t + \varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ , მაშინ  $\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = 1$  და  $x = A$  არის რხევის ამპლიტუდა.

გავარკვიოთ  $\omega_0 t + \varphi_0$  -ის ფიზიკური არსი.

სინუსის (ან კოსინუსის) ნიშნით მდგომ ამ სიდიდეს რხევის ფაზა ეწოდება.  $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ . იგი ორი ნაწილისაგან შედგება ცვლადი -  $\omega_0 t$  და მიდმივი  $\varphi_0$ , რომელსაც საწყისი ფაზა ეწოდება. იგი სისტემის მდგომარეობას განსაზღვრავს საწყის მომენტში. მართლაც როცა  $t=0$ , მაშინ  $\varphi = \varphi_0$ .

ფაზა იზომება რადიანებით ან (გრადუსებით) - იგი განსაზღვრავს მოცემული ამპლიტუდის დროს მერხევი სისტემის მდგომარეობას რდლის ნებისმიერ მომენტში. ფაზით განისაზღვრება თუ პერიოდის რა ნაწილი გავიდა რხევის დაწყებიდან.

პერიოდის ტოლი ( $t=T$ ) დროს მონაკვეთის შემდეგ სინუსის არგუმენტის  $\omega_0 T$ -ით გადიდებისას მოძრაობა მეორდება. მაგრამ ვიცით, რომ სინუსის უმცირესი პერიოდი  $2\pi$ -ს ტოლია, ე.ი.  $\omega_0 T = 2\pi$  და

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu \quad (7)$$

წრიული ანუ ციკლური სიხშირე ( $\omega_0$ ) არის რხევათა რიცხვი  $2\pi$  წამში.

აღნიშვნის თანახმად,  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  აქედან  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , მაშინ

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (8)$$

ე.ი. რაც მეტია სიხისტე, მით ნაკლებია პერიოდი და ნეტია სიხშირე.

მათემატიკური ქანქარას შემთხვევაში რხევითი მოძრაობა გამოწვეულია არა დრეკადობის ძალით, არამედ სიმძიმის ძალის მდგენელით; მიუხედავად ამისა, მოძრაობის განტოლებები ერთნაირია. ჰოლანდიელმა მეცნიერმა ჰიუგენსმა დაამტკიცა ვერტიკალიდან მცირე კუთხით გადახრისას ქანქარას რხევის პერიოდი არ არის დამოკიდებული ბურთულას მასაზე და ამპლიტუდაზე. დამოკიდებულია ქანქარას სიგრძეზე ( $l$ ) და გეოგრაფიულ მდებარეობაზე ( $g$ )

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (9)$$

ამრიგად, ჰარმონიული რხევა სინუსის ან კოსინუსის კანონით დაიწერება. მისი ამპლიტუდა მუდმივია. რხევა წარმოებს ძალით, რომელიც წანაცვლების პროპორციულია და მის საპირისპიროდ არის მიმართული.

### სიჩქარე და აჩქარება ჰარმონიული რხევის დროს

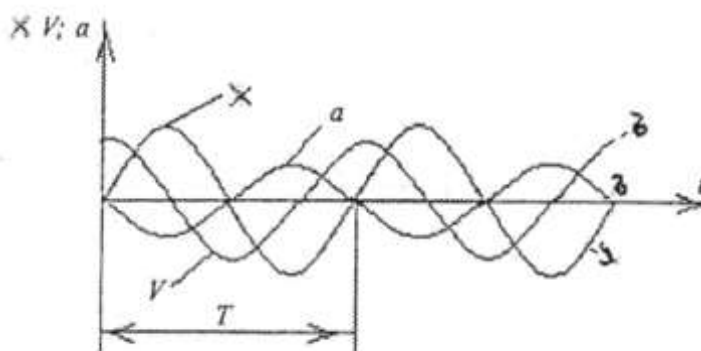
მექანიკიდან ცნობილია, რომ სიჩქარის პროექცია  $x$  ღერძზე ( $v_x$ ) არის  $x$  კოორდინატის წარმოებული დროით  $v_x = x' = \frac{dx}{dt}$ .

მერხევი სხეულის წონასწორობის მდებარეობიდან წანაცვლება ( $x$ ) დროის ნებისმიერ მომენტში, ტოლია  $x = A \sin(\omega_0 t + \phi_0)$  თუ საწყისი ფაზა  $\phi_0 = 0$ , მაშინ

$$x = A \sin \omega_0 t, \quad v = v_m \cos \omega_0 t = v_m \sin \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

სადაც,  $v_m = A \omega_0$  სიჩქარის მაქსიმალური, ამპლიტუდური მნიშვნელობაა.

ე.ი. ჰარმონიული რხევის სიჩქარე დროის მიხედვით ჰარმონიულად იცვლება, მაგრამ სიჩქარის რხევა  $\frac{\pi}{2}$  ფაზით უსწრებს კოორდინატის ( $x$ ) რხევას.



ნახ.4. ჰარმონიული რხევის კოორდინატის, სიჩქარის და აჩქარების დამოკიდებულებები დროზე.

აჩქარების პროექცია ( $a_x$ )  $x$  ღერძზე არის სიჩქარის ( $v_x$ ) წარმოებული დროით, ან კოორდინატის ( $x$ ) მეორე რიგის წარმოებული დროით.

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

მერხევი სხეულის აჩქარების ( $a$ ) დროზე დამოკიდებულების დასადგენად გავაწარმოთ (10). მივიღებთ:

$$a = -A \omega_0^2 \sin \omega_0 t = A \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \pi) \quad (11)$$

$a_m = A \omega_0^2$  აჩქარების მაქსიმალური ანუ ამპლიტუდური მნიშვნელობაა.

$$a = a_m \sin(\omega_0 t + \pi) \quad (12)$$

ე.ი. ჰარმონიული რხევის აჩქარება ჰარმონიულად იცვლება, ნისი რხევა  $\pi$  ფაზით უსწრებს კოორდინატის რხევებს (ნახ.4)  $a$  და  $x$  ერთდროულად ხდება მაქსიმალური, მაგრამ საპირისპირო ნიშნები აქვთ, ანუ აჩქარების რხევების ფაზა წანაცვლებულია  $\frac{\pi}{2}$ -ით.

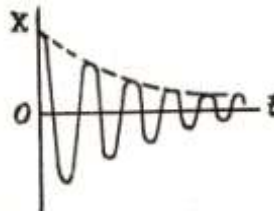
### თავისუფალი რხევები. მილევადი რხევა

მათემატიკურმა ქანქარამ ან ზამბარიანმა ბურთულამ რხევა რომ დაიწყოს, საკმარისია ქანქარა გამოვიყვანოთ წონასწორობის მდგომარეობიდან - ოდნავ გადავხაროთ ვერტიკალურიდან მათემატიკური ქანქარა ან გადავწიოთ ბურთულა, გავჭიმოთ ზამბარა, ე.ი. საჭიროა მივანიჭოთ ენერგიის გარკვეული მარაგი.

სხეულთა ჯგუფს, რომელთა მოძრაობაც მექანიკაში შეისწავლება, სხეულთა სისტემა ეწოდება. სისტემის სხეულთა შორის მოქმედ ძალებს შიგა ძალები ეწოდება.

რხევას, რომელიც შიგა ძალების მოქმედებით აღიმკვრება სისტემაში მისი წონასწორობის მდებარეობიდან გამოყვანის შემდეგ თავისუფალი რხევა ეწოდება.

თავისუფალი რხევის სიხშირის სისტემის საკუთარი სიხშირე ეწოდება. რეალურ პირობებში წინააღმდეგობის ძალა აუცილებლად არსებობს, რაც ამცირებს სისტემის მექანიკურ ენერგიას, რომლის შევსებაც აღარ ხდება, ამიტომ რხევა თანდათან მიილევა. ისეთ რხევებს, რომელთა ამპლიტუდა ( $A$ ) დროის განმავლობაში მცირდება მილევადი რხევები ეწოდება



ნახ. 5. მილევადი რხევის გრაფიკი: .ამპლიტუდის ცვლილება დროის მიხედვით.

ყოველ ახალ პერიოდში ამპლიტუდა მცირდება, ე.ი. ამპლიტუდა არის დროზე დამოკიდებული

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}, \quad (13)$$

სადაც  $A_0$  არის რხევის საწყისი ამპლიტუდა.  $\beta$ -ს მილევადობის კოეფიციენტი ეწოდება. რხევის მილევადობის სისწრაფენს ახასიათებენ მილევადობის დეკრემენტი.

$$\delta = \frac{A(t)}{A(t+T)} \quad (14)$$

იგი არის თავისუფალი რხევის რომელიმე ამპლიტუდის  $A(t)$  ფარდობა ერთი პერიოდის შემდეგ მომდევნო ამპლიტუდასთან  $A(t+\tau)$ .

(13)-ის გათვალისწინებით (14) ასე ჩაიწერება:  $\delta = \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta T}$ . მიღების ლოგარითმული დეკრემენტი  $\ln \delta = \ln e^{\beta T}$  ანუ  $\ln \delta = \beta T$ . აღვნიშნოთ  $\ln \delta = \lambda$ , მაშინ მიღვეადობის კოეფიციენტი

$$\beta = \frac{\lambda}{T} \quad (15)$$

### იძულებითი რხევა. რეზონანსი

რხევა, რომ მიუღვეადი იყოს, საჭიროა ყოველი პერიოდის შემდეგ შევავსოთ ხახუნზე დახარჯული ენერგია. მაგალითად, სისტემაზე ვიმოქმედოთ პერიოდულად ცვლადი ძალის მოქმედებით.

$$F = F_m \sin \omega t \quad (16)$$

სადაც  $F_m$  არის ამ ძალის მაქსიმალური ანუ ამპლიტუდური მნიშვნელობა.  $\omega$  ამ ძალის სიხშირე. პერიოდულად ცვლადი გარე ძალით გამოწვეულ რხევას იძულებითი რხევა ეწოდება. იძულებითი რხევის ამპლიტუდას მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს გარედან მოქმედი ძალის გარკვეულ სიხშირეზე, რომელსაც რეზონანსულს უწოდებენ. თუ მერხევი სისტემისათვის  $\omega_0$ -სა და მიღვეადობის კოეფიციენტის  $\beta$  მნიშვნელობა ცნობილია. რეზონანსული სიხშირე შემდეგი ფორმულით განისაზღვრება:

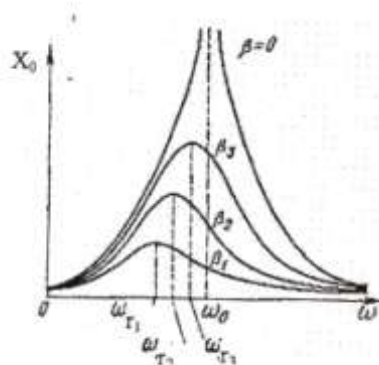
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (17)$$

მიღვეადობის კოეფიციენტი  $\beta$  გვიხასიათებს ამპლიტუდის შემცირების სისწრაფეს და დამოკიდებულია მერხევი სისტემის მასაზე და მასში ხახუნის ძალის სიდიდეზე.

რეზონანსის შემთხვევაში მექანიკური იძულებითი რხევის ამპლიტუდის გამოსათვლელ ფორმულას ასეთი სახე აქვს:

$$A_0 = \frac{F_0}{2\beta \cdot m(\omega_0^2 - \beta^2)} \quad (18)$$

ფორმულიდან ჩანს, რომ იძულებითი რხევის ამპლიტუდა გარეშე ძალის ამპლიტუდის  $F_0$ -ის პირდაპირპროპორციულია. მეორე მხრივ, რაც უფრო მცირეა  $\beta$  კოეფიციენტი, მით მეტია იძულებითი რხევის ამპლიტუდა. იდეალურ შემთხვევაში, როცა  $\beta = 0$ , მაშინ იძულებითი რხევის ამპლიტუდა უსასრულოდ იზრდება ამ შემთხვევაში,



## ნახ. 6. რეზონანსის მოვლენა

როგორც (17) ტოლობიდან ჩანს, რეზონანსული სიხშირე სისტემის საკუთარი სიხშირის ტოლია:  $\omega_0 = \omega_0$ ; რხევის ამპლიტუდის მკვეთრ ზრდას როდესაც მაიძულებელი პერიოდული ძალის სიხშირე მერხევი სისტემის საკუთარ სიხშირეს ემთხვევა, რეზონანსი ეწოდება.

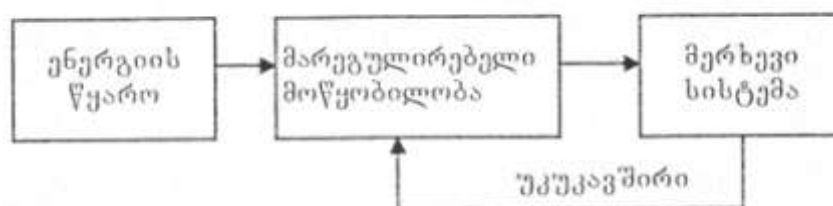
მექანიკური რეზონანსი შეიძლება იყოს როგორც სასარგებლო, ისე საზიანოც. ცოცხალი ქსოვილებისათვის დამახასიათებელია დიდი მილევადობის კოეფიციენტი, ამიტომ ჩვეულებრივ პირობებში რეზონანსი მოვლენას არ მივყევართ მათ დაზიანებამდე. მაგრამ, თუ გარეშე მექანიკური ვიბრაცია საკმაოდ ძლიერია, რეზონანსის პირობებში მან ადამიანის ორგანიზმი შეიძლება დააზიანოს.

რეზონანსის გამოყენება და მისი საზიანო ქმედებები - დამოუკიდებლად.

### ავტორხევები. რხევითი პროცესები ცოცხალ სისტემაში

იძულებითი რხევების დროს გარეშე პერიოდულად ცვლადი ძალა მუშაობას ასრულებს მერხევ სისტემაში მოქმედი წინააღმდეგობის ძალების დაძლევაზე. გარეშე ძალის ზემოქმედება განსაზღვრავს სისტემის რხევის ამპლიტუდას და სიხშირეს. ავტორხევები მიუღწევადი რხევებია, მაგრამ ის პრინციპულად განსხვავდება ჩვეულებრივი იძულებითი რხევებისაგან. ავტორხევები წარმოიშობა ისეთ მერხევ სისტემაში, რომელიც თვითონ არეგულირებს დახარჯული ენერგიის პერიოდულ შევსებას საკუთარი წყაროდან. მისი არსებობისათვის გარეშე პერიოდული ძალის მოქმედება მერხევ სისტემაზე საჭირო არ არის.

ავტორხევების ამპლიტუდა და სიხშირე მერხევი სისტემის თვისებებზეა დამოკიდებული. ასეთი სახის სისტემას ავტორხევით სისტემას უწოდებენ. ავტორხევითი სისტემა შედგება მერხევი სისტემის, ენერგიის წყაროსა და მერხევი სისტემის პერიოდულად ენერგიით შევსების მარეგულირებელი მოწყობილობისაგან (ნახ.7).



ნახ. 7. ავტორხევითი სისტემის ბლოკ-სქემა.

რხევითი ენერგიის შემცირების გამო ამპლიტუდის ან სიხშირის შეცვლის შესახებ ინფორმაცია უკუკავშირის მეშვეობით გადაეცემა მარეგულირებელ მოწყობილობას. ეს მოწყობილობა კი უზრუნველყოფს მერხევი სისტემის ენერგიით შევსებას საჭირო მომენტში.

მექანიკური ავტორხევით სისტემის მაგალითია ქანქარიანი საათი, ასეთ სისტემაში ენერჯის წყარო - შეკუმშული ზამბარა ან მაღლა აწეული საწონია. ცოცხალ ორგანიზმში მრავალი ასეთი სისტემა მოქმედებს.

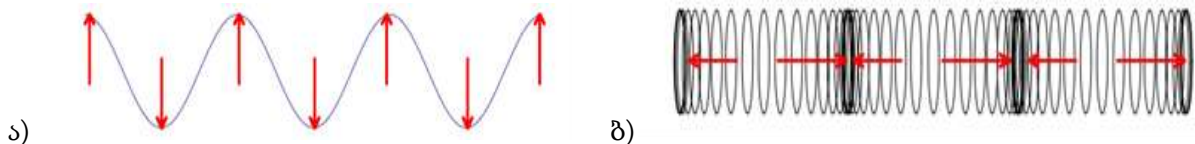
აღსანიშნავია ის, რომ ყველა პროცესის მიმდინარეობისას სისტემის მახასიათებელი რომელიმე სიდიდის პერიოდული ცვლილებისათვის სრულიად არ არის აუცილებელი პერიოდული ზემოქმედება გარედან. პერიოდული პროცესის არსებობას თვითონ სისტემის თვისება განაპირობებს.

ზემოთქმულის დამადასტურებელ მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ გულის კუნთის შეკუმშვა. სწორედ მისი პერიოდული შეკუმშვა უზრუნველყოფს სისხლის დინებას სისხლძარღვებში. ამ პროცესისათვის საჭირო ენერჯის ძირითად წყაროს კი თვითონ გული წარმოადგენს. ამასთან ეს პროცესები სინქრონიზებულია.

### მექანიკური ტალღები. ტალღის განტოლება. ტალღის ენერჯია

მექანიკური ტალღა დრეკადი დეფორმაციის გავრცელებაა გარემოში. ასეთი სახის ტალღებს - დრეკად ტალღებს უწოდებენ. მეორე სახის მექანიკური ტალღები სითხის ზედაპირზე წარმოიქმნება (ზედაპირული ტალღები). დრეკად გარემოში რხევის გავრცელება გამოწვეულია ნაწილაკების ურთიერთქმედებით. წონასწორობის მდებარეობის მიმართ ერთი ნაწილაკის გადაადგილება იწვევს მეორე (მეზობელი) ნაწილაკის გადაადგილებას, მეორე ნაწილაკი გადაადგილებს მესამეს და ა.შ. ეს პროცესი (მექანიკური ტალღა) გარშემო სასრული სიჩქარით ვრცელდება.

მექანიკური ტალღები ორი სახისაა: გრძივი და განივი. გრძივ ტალღაში გარემოს ნაწილაკების რხევა ტალღის გავრცელების მიმართულებას ემთხვევა. განივში ნაწილაკების რხევა ტალღის გავრცელების მართობულია.



ნახ. 8. ა) განივი ტალღა; ბ) გრძივი ტალღა

ტალღა ხასიათდება შემდეგი სიდიდეებით: ტალღის ამპლიტუდა, პერიოდი, სიხშირე, ტალღის სიგრძე ( $\lambda$ ) - მანძილი, რომელსაც ტალღა გადის ერთი პერიოდის განმავლობაში, სიჩქარე, რონელიც ტოლია

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \gamma$$

გარემოში ტალღების გავრცელებისას ხდება მხოლოდ ენერჯის გადატანა.

მექანიკური ტალღის ენერჯია  $E = \frac{m\omega_0^2 A_0^2}{2}$ , სადაც  $m$  რაიმე მოცულობაში მყოფი

მერხევი ნაწილაკების ჯამური მასაა,  $\omega_0$  - ციკლური სიხშირე,  $A_0$  - რხევის ამპლიტუდა. ფორმულიდან ჩანს, რომ ფიქსირებული სიხშირის შემთხვევაში ენერჯია ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია.

## ლექცია III

### დოპლერის ეფექტი

ტალღების წყაროსა და დამკვირებლის (ტალღების მიმღების) ერთმანეთის მიმართ ფარდობითი მოძრაობის დროს, დამკვირებლის მიერ გაზომილი ტალღის სიხშირე წყაროს მიერ გამოსხივებული ტალღის სიხშირისაგან განსხვავდება. ამ მოვლენას დოპლერის ეფექტს უწოდებენ. თუ დამკვირებელი და ტალღების წყარო ერთმანეთის მიმართ უძრავია და აგრეთვე უძრავია ის გარემოც, რომელშიც ტალღა ვრცელდება, მაშინ დამკვირებლის მიერ აღრიცხული სიხშირე, ცხადია, ტოლი იქნება წყაროს მიერ გამოსხივებული ტალღების სიხშირისა.

დოპლერის ეფექტი გამოვლინდება ფარდობითი მოძრაობის ყველა ჩამოთვლილ შემთხვევაში:

1. დამკვირვებელი  $V_{\text{დ}}$  სიჩქარით უახლოვდება ტალღების უძრავ წყაროს ( $V_{\text{წ}}=0$ );
2. ტალღების წყარო  $V_{\text{წ}}$  სიჩქარით უახლოვდება უძრავ დამკვირვებელს ( $V_{\text{დ}}=0$ );
3. დამკვირვებელი და ტალღების წყარო მოძრაობს შემხვედრი მიმართულებით;
4. დამკვირვებელი  $V_{\text{დ}}$  სიჩქარით შორდება ტალღების უძრავ წყაროს;
5. ტალღების წყარო  $V_{\text{წ}}$  სიჩქარით შორდება უძრავ დამკვირვებელს;
6. დამკვირვებელი და წყარო საწინააღმდეგო მიმართულებით მოძრაობენ;
7. ტალღების წყარო და დამკვირვებელი უძრავია, ხოლო გარემო მათ მიმართ მოძრაობს გარკვეული სიჩქარით.

პირველ სამ შემთხვევაში დამკვირვებლის მიერ გაზომილი  $\gamma$  სიხშირე მეტია წყაროს  $\gamma_0$  სიხშირეზე, მომდევნო სამ შემთხვევაში კი - ნაკლები.

დამკვირვებლის მიერ გაზომილი  $\gamma$  სიხშირის ფორმულას, რომელიც საერთოა დამკვირვებლისა და ტალღების წყაროს ფარდობითი მოძრაობის ყველა შემთხვევისათვის, ასეთი სახე აქვს:

$$\gamma = \frac{V \pm V_d}{V \mp V_c} \cdot \gamma_0 \quad (19)$$

სადაც  $\gamma_0$  ტალღების წყაროს სიხშირეა,  $V$  - ტალღის სიჩქარე ( $V = \lambda \gamma_0$ ).

ფორმულაში ზედა ნიშნები იწერება დამკვირვებლის და წყაროს ფარდობითი დაახლოების შემთხვევისათვის, ქვედა - დაშორებისას.

დოპლერის ეფექტს წარმატებით იყენებენ ულტრაბგერით დიაგნოსტიკაში.

თანამედროვე აპარატებში ულტრაბგერის გამომსხივებელი (ტალღების წყარო) შეთავსებულია სიხშირის გაზომვასთან (მიმღებთან).  $V_0$  სიჩქარით მოძრავი ობიექტიდან არეკლილი და მიმღების მიერ გაზომილი ტალღის სიხშირე  $\gamma_a$  ცხადია, განსხვავებული იქნება გამომსხივებელის (წყაროს)  $\gamma_b$  სიხშირისაგან. ამ ორ სიხშირეთა შორის სხვაობას -  $\Delta\gamma$ -ს დოპლერისეულ წანაცვლებას უწოდებენ. უძრავი მიმღების შემთხვევაში  $\Delta\gamma$  გამოითვლება ფორმულით:

$$\Delta\gamma = \gamma_a - \gamma_b = \frac{2V_0}{V - V_0} \gamma_b \quad (20)$$

სადაც  $V$  ულტრაბგერითი ტალღების სიჩქარეა. ჩვეულებრივ,  $V \gg V_0$  -ზე, ამიტომ (20) ფორმულა მიიღებს მარტივ სახეს:

$$\Delta\gamma = \frac{2V_0}{V} \gamma_b \quad (21)$$

ამ ფორმულიდან გამოითვლიან მოძრავი ობიექტის  $V_0$  სიჩქარეს:

$$V_0 = \frac{\Delta\gamma V}{2\gamma_b} \quad (22)$$

ზემოთ აღნიშნული უდევს საფუძვლად სისხლის დინების სიჩქარის განსაზღვრას, გულის სარქველებისა და კედლების მოძრაობის სიჩქარის განსაზღვრის მეთოდს (დოპლერისეული ექოკარდიოგრაფია) და სხვა.

### **ბგერა. ბგერის ფიზიკური (ობიექტური) და სმენითი შეგრძნების მახასიათებლები. აუდიომეტრია.**

ბგერა არის მექანიკური რხევები, რომელიც დრეკად გარემოში - აირებში, სითხეებსა და მყარ სხეულებში ვრცელდება. ადამიანის სმენის ორგანო აღიქვამს ისეთ მექანიკურ რხევებს, რომელთა სიხშირე 15-20 ჰერციდან 15-20 ათას ჰერცამდე ინტერვალშია. სწორედ ასეთ რხევებს უწოდებენ ბგერით, ანუ აკუსტიკურ რხევებს. 15-20 ჰერცზე ნაკლებ სიხშირის რხევებს ინფრაბგერას უწოდებენ. ადამიანის ყური ასეთ სიხშირეებს ვერ აღიქვამს. სმენის ორგანო ასევე ვერ აღიქვამს 15-20 ათას ჰერცზე მეტი სიხშირის რხევებს და მას ულტრაბგერას უწოდებენ. ულტრაბგერის სიხშირეები მოიცავს  $1,5 \cdot 10^4 - 10^9$  ჰც სიხშირეთა დიაპაზონს.  $10^9 - 10^{13}$  ჰც სიხშირის მექანიკურ რხევებს ჰიპერბგერას უწოდებენ.

ფიზიკის თვალსაზრისით ბგერა არის გარემოს მონაცვლეობითი კუმშვა-გაფართოება, რომელიც ყველა მიმართულებით ვრცელდება. ადამიანის ყური ყველაზე უფრო მგრძნობიარეა 1000 ჰერციდან 3000 ჰერცამდე სიხშირის ბგერისადმი. ყველაზე მახვილი სმენა ადამიანს 15-დან 20 წლამდე ასაკში აქვს. 40 წლამდე მაქსიმალური მგრძნობიარობა 3000 ჰერცის უბანშია, 40-დან 60 წლამდე - 2000 ჰერცის, ხოლო 60 წელზე ზევით 1000 ჰერც სიხშირეზეა.

სმენის ორგანოს მიერ ბგერის აღქმის თვალსაზრისით არჩევენ სამი სახის ბგერას: 1. მუსიკალური ბგერა, ანუ ტონი. 2. ხმაური. 3. ბგერითი დარტყმა.

პერიოდული ბუნების ბგერას ტონი ეწოდება. თუ ბგერა (მექანიკური რხევა) ჰარმონიულია, მაშინ ტონს მარტივ, ან სუფთა ტონს უწოდებენ. ასეთ ბგერას გამოსცემს კამერტონი. მუსიკალური ინსტრუმენტების მიერ წარმოქმნილი ტონი რთულია და ის ჰარმონიული არ არის. რთული ტონი შეიძლება დაიშალოს მარტივ ტონებად. ყველაზე დაბალი სიხშირე შეესაბამება ძირითად ტონს, დანარჩენი მარტივი ტონების (ობერტონების) სიხშირეები 2-ჯერ, 3-ჯერ და ა.შ. მეტია ძირითადი ტონის სიხშირეზე. მაშასადამე, რთული მუსიკალური ბგერა სხვადასხვა სიხშირის მარტივი რხევების (ჰარმონიკების) ერთობლივობაა. ჰარმონიკების ასეთ ერთობლიობას, თუ მასში მითითებულია თითოეულის ამპლიტუდა, აკუსტიკურ სპექტრს უწოდებენ.



ხმაური ეწოდება უწესრიგოდ ცვლადი რთული ტონების ერთობლიობას (მაგ. მანქანა-დანადგარების ვიბრაცია, ჭრიალი, ტყის შრიალი, ზღვის ხმაური და სხვა). ხმაურის აკუსტიკური სპექტრი უწყვეტია. ეს იმას ნიშნავს, რომ ის შეიცავს ნებისმიერი სიხშირის უწესრიგოდ ცვლად რხევებს, ბგერითი დარტყმა - დიდი ინტენსივობის ბგერის ხანმოკლე ზემოქმედებაა. ის თან ახლავს გასროლას. აფეთქებას და სხვა ბგერითი ტალღები - გრძივი ტალღებია. ბგერა სხვადასხვა გარემოში განსხვავებული სიჩქარით ვრცელდება. მისი სიჩქარე მყარ გარემოში უფრო დიდია, ვიდრე სითხესა და აირში. ჰაერში ბგერის სიჩქარე მცირეა. მასთან სიჩქარე ატმოსფეროს ტემპერატურაზე დამოკიდებული. მაგ.,  $0^{\circ}C$ -ზე ის 331 მ/წმ-ის ტოლია, ხოლო  $15^{\circ}C$ -ზე 340 მ/წმ-ს უდრის.

გარემოში გავრცელებისას ბგერით ტალღებს გადააქვს ენერგია. ბგერის ენერგეტიკული დახასიათებისათვის მოხერხებულია გამოვიყენოთ ბგერის წნევა, რომელიც გარემოში (სითხე, აირი) მისი გავრცელებისას წარმოიქმნება. ინტენსივობა ბგერის წნევასთან დაკავშირებულია ასეთი სახით:

$$I = \frac{P^2}{2\rho V}, \quad (23)$$

სადაც  $P$  - ბგერის წნევაა,  $V$  - მისი სიჩქარე,  $\rho$  - გარემოს სიმკვრივეა. ინტენსივობის ერთეულია ვატი/მ<sup>2</sup>

მაგ.,  $\rho=1000$  კგ სიხშირის ბგერის ინტენსივობა, რომელიც კიდევ შეუძლია აღიქვას ადამიანმა,  $I_0 = 10^{-12}$  ვტ/მ<sup>2</sup>-ის ტოლია. ამ სიდიდეს სმენადობის ზღვარს უწოდებენ. მისი შესაბამისი წნევა  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  პა-ს. მაქსიმალური ინტენსივობა, რომელიც ჯერ კიდევ არ იწვევს სმენის ორგანოს დაზიანებას  $I = 10$  ვტ/მ<sup>2</sup> - ( $P = 60$  პა). ამ ინტენსივობას ტკივილის შეგრძნების ზღვარი ეწოდება.  $I$  და  $I_0$  ინტენსივობათა დონის სკალისათვის უფრო მიხერხებულია ლოგარითმილი სკალა. ბგერის ინტენსივობათა დონის სკალას შემდეგი სახე აქვს: ინტენსივობის საწყის დონედ ჩათვლიან  $I_0$ -ს და გამოთვლიან  $I$  და  $I_0$ -ის ფარდობის ლოგარითმს:

$$L_b = \lg \frac{I}{I_0} \quad (24)$$

ბგერის წნევის შემთხვევაში:

$$L_b = 2 \lg \frac{P}{P_0} \quad (25)$$

სიდიდე  $L_b$  გამოხატავს ინტენსივობის, ან ბგერის წნევის დონეს.  $L_b$  სიდიდეს არა აქვს განზომილება. ლოგარითმული სიდიდის ( $L_b$ ) ერთეულად მიღებულია 1 ბელი. თუ ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობა 10-ჯერ აღემატება პირობითად მიჩნეული მის საწყის დონეს, მაშინ მათი შეფარდების ლოგარითმი 1 ბელის ტოლი იქნება. მართლაც, თუ  $I = 10I_0$ , მაშინ:

$$L_b = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{10I_0}{I_0} = 1 \text{ ბელი}$$

ინტენსივობის ფარდობითი ერთეული 1 ბელი საკმაოდ დიდი ერთეულია, ამიტომ პრაქტიკაში ხშირად მის მეთედ ნაწილს - დეციბელს იყენებენ. 1 ბელი=10 დბ.

ადამიანის მიერ აღქმული ჩვეულებრივი ბგერების ინტენსივობა ძალიან მცირეა. მაგ., ხმამაღალ ლაპარაკს შეესაბამება ინტენსივობა, რომელიც  $1 \text{ ვტ/სმ}^2$  ( $10^4 \text{ ვტ/მ}^2$ )-ის მემილიარდედის ტოლია. ადამიანი სმენითი შეგრძნების მეშვეობით ბგერის ზოგიერთ ფიზიკურ მახასიათებელს სუბიექტური მახასიათებლით აფასებს. ასეთია, მაგ., ბგერის სიმაღლე, ტემბრი და ხმამაღალობა.

ბგერის სიმაღლეს ადამიანი ძირითადად მისი სიხშირით განასხვავებს. რაც მეტია სიხშირე, მით მეტია ბგერის სიმაღლე. ერთი და იგივე სიხშირის ორი ტონიდან იმ ბგერის სიმაღლე გვეჩვენება უფრო მეტად, რომლის ინტენსივობაც დიდია. თუ ორი ბგერის აკუსტიკური სპექტრი (ჰარმონიკების მიმდევრობა და მათი ამპლიტუდა) განსხვავებულია, ადამიანი მას ტემბრით არჩევს.

ხმამაღლობით სმენითი შეგრძნების დონე ფასდება. ხმამაღლობის დონის სკალას საფუძვლად უდევს ვებერ-ფეხნერის ფსიქოფიზიოლოგიური კანონი. ამ კანონის არსი შემდეგში მდგომარეობს: თუ გამღიზიანებელი ფაქტორის ინტენსივობა იცვლება გეომეტრიული პროგრესიით (ერთი და იმავე რიცხვჯერ) მაშინ, გაღიზიანების შეგრძნება შეიცვლება არითმეტიკული პროგრესიით (ე.ი. ერთი და იმავე რიცხვით). ეს იმას ნიშნავს, რომ ბგერის ხმამაღლობა მისი ინტენსივობის ლოგარითმის პროპორციულია. მაგ. თუ ბგერის ინტენსივობა (ბგერის ძალა) მატულობს  $1000$ -ჯერ, აღქმული ხმამაღლობა გადიდება  $\lg 1000$ -ჯერ, ე.ი. მხოლოდ  $3$ -ჯერ; სწორედ ამის გამო შეუძლია ადამიანის ყურს აღიქვას ბგერა ინტენსივობათა ასეთ დიდ დიაპაზონში ( $10^{-12} \text{ ვტ/მ}^2$ -დან  $10 \text{ ვტ/მ}^2$ -მდე). თუ ერთმანეთს ვადარებთ, ორი -  $I$  და  $I_0$  ინტენსივობის ( $I_0$  სმენადობის ზღვარია) სმენით შეგრძნებას, მაშინ, ვებერ-ფეხნერის კანონის თანახმად, ხმამაღლობა ინტენსივობაზე ასეთი სახითაა დამოკიდებული:

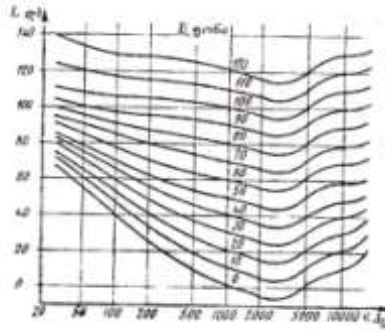
$$E = k \lg \frac{I}{I_0}$$

$k$  არის პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელიც სიხშირეზე და ინტენსივობაზეა დამოკიდებული (ე.ი. მუდმივი არ არის).  $k$  მუდმივი რომ ყოფილიყო, ბგერის ხმამაღლობის სკალა მისი ინტენსივობის ლოგარითმული სკალის შესაბამისი იქნებოდა. პირობითად მიღებულია, რომ  $\nu = 1000$  ჰც სიხშირეზე  $k = 1$  და, მაშასადამე, ეს ორი სკალა ერთმანეთს ემთხვევა. ამ შემთხვევაში ხმამაღლობის ინტენსივობაზე დამოკიდებულებას თუ გამოვსახავთ ბელით,

$$E = \lg \frac{I}{I_0}$$

პრაქტიკული მიზნებისათვის უფრო დეციბელებით გამოსახული სკალით სარგებლობენ. ამიტომ ბგერის ინტენსივობის სკალისაგან რომ განვასხვავოთ, ხმამაღლობის სკალაზე დეციბელს უწოდებენ ფონს (ფ).

ბგერის სხვადასხვა სიხშირეზე ხმამაღლობა რომ გავზომოთ, ის უნდა შევადაროთ  $1000$  ჰც სიხშირის ბგერას. ხმამაღლობის გაზომვა ასეთი მეთოდით ხდება: ბგერით გენერატორს გადამრთველით აყენებენ  $1000$  ჰც სიხშირეზე. შემდეგ სახელურის ბრუნვით ცვლიან გენერატორით წარმოქმნილი ბგერის ინტენსივობას მანამდე, სანამ ამ ბგერასა და გამოსაკვლევი ბგერის სმენითი შეგრძნება არ გახდება ერთნაირი.



ნახ. 9. თანაბარი ხმამაღლობის მრუდეები

გამოსაკვლევი ბგერის ხმამაღლობა, რომელიც ფონებით იზომება, ტოლი იქნება სკალაზე ათვლილი გენერატორით წარმოქმნილი ბგერის ინტენსივობისა.

სხვა სიხშირეებზე რომ დავადგინოთ ბგერის ინტენსივობასა და ხმამაღლობას შორის თანაფარდობა, იყენებენ თანაბარი ხმამაღლობის მრუდეებს. ამ მრუდეებს აგებენ ზომით აღწერილი მეთოდის გამოყენებით, იმ მონაცემების საშუალო მნიშვნელობის საფუძველზე, რომელიც მიღებულია ნორმალური სმენის პირობებისაგან (სურ.9). ქვემოთა მრუდი შეესაბამება სმენადობის ზღვარს. ამ მრუდის მიხედვით ხმამაღლობის დონე ყველა სიხშირეზე ფ=0-ს. სურათიდან ჩანს, რომ ადამიანის ყური ყველაზე უფრო მგრძობიარეა 2500-3000 ჰც სიხშირის ბგერების მიმართ. ნრუდის მეშვეობით შეგვიძლია გავიგოთ მოცემული სიხშირისა და ინტენსივობის შესაბამისი ხმამაღლობა ( $\nu$ -სა და  $L$  გადაკვეთის შესაბამისი ხმამაღლობა). სმენითი შეგრძნების გაზომვის განხილულ მეთოდს აუდიომეტრიას უწოდებენ, ხოლო გაზომვის შედეგად მიღებულ სმენითი შეგრძნების ზღვარის (სმენადობის ზღვარის) სიხშირეზე დამოკიდებულების მრუდეებს აუდიოგრამებს. აუდიომეტრია ესაა ფიზიკური მეთოდი, რომელიც იკვლევს ადამიანის სმენის ორგანოს მგრძობიარობის დამოკიდებულებას ბგერის სიხშირეზე ე. ი. იმ მინიმალურ ინტენსიობას, რომელსაც ჯერ კიდევ შეიგრძნობს სმენის ორგანო. ავადმყოფის სმენადობის ზღვარის შესაბამის აუდიოგრამას ადარებენ ნორმალური სმენის ადამიანის ანალოგიურ აუდიოგრამას. ასეთი ანალიზი ექიმს ეხმარება დიაგნოზის დადგენაში.

აუსკულტაციის (სმენის) მეთოდი უძველესი დროიდანაა ცნობილი. შინაგანი ორგანოების მუშაობისას წარმოქმნილი ბგერითი ტალღები ორგანიზმის ზედაპირამდე ვრცელდება. ექიმი ამ ბგერებს ისმენს სპეციალური მოწყობილობის - სტეტოსკოპის ან ფონენდოსკოპის მეშვეობით. ფონენდოსკოპის ძირითადი ნაწილია მრგვალი ფორმის ღრუ კაპსულა, რომელსაც ზემოდან გადაკრული აქვს ბგერის გადამცემი მემბრანა. კაფსულას მეორე მხრიდან გაკეთებული აქვს რეზინის მილები, რომლის მეშვეობითაც ექიმი ისმენს გაძლიერებულ ბგერებს.

ფონენდოსკოპის მემბრანას ადებენ გამოსაკვლევი უბნის არეში კანზე. შინაგანი ორგანოებიდან გავრცელებული ბგერითი ტალღები კაფსულაში გამოიწვევს რეზონანსს და გაძლიერებულ ბგერას ადვილად მოისმენს ექიმი. მოსმენილი ბგერის ნორმიდან გადახრა (მაგ., სუნთქვითი ხმაური და ხიხინი ფილტვების მუშაობისას, გულის ტონების ცვლილება, შუილების წარმოქმნა) ეხმარება ექიმს დიაგნოზის დადგენაში. ამ მეთოდით შეიძლება მოუსმინოთ ნაყოფის გულისცემას და სხვა.

აუსკულტაცია უდევს საფუძვლად ფონოკარდიოგრაფიის მეთოდს, რომელიც გულსისხლძარღვთა სისტემის დაავადების დროს დიაგნოსტიკის მიზნით გამოიყენება. ხელსაწყო ფონოკარდიოგრაფის მეშვეობით ხდება გულის ტონებისა და შუილების გრაფიკული ჩაწერა ქაღალდზე. მას ფონოკარდიოგრამას უწოდებენ ნახ.10.



ნახ.10. ფონოკარდიოგრამა

ზემოთ განხილული მეთოდებისაგან განსხვავებით პერკუსიის დროს ექიმი სხეულის გამოსაკვლევად უბნის ზედაპირზე კაკუნით (თითების, ან ჩაქურჩის მეშვეობით) წარმოქმნის ბგერას. ორგანიზმის შინაგანი სიღრუეების ზედაპირიდან არეკვლის შემდეგ ამ ბგერით რხევებს ისმენს ექიმი. სხეულის ზედაპირზე კაკუნის დროს წარმოქმნილ ბგერებს სიხშირეთა ფართო დიაპაზონი აქვს. ორგანიზმში გარკვეული სიხშირის რხევები შთაინთქმება, ხოლო ის რხევები, რომელთა სიხშირე დაემთხვა სიღრუეების საკუთარ სიხშირეს, გაძლიერდება (რეზონანსის მოვლენა). სწორედ ეს არეკვლილი ბგერები აღწევს ექიმის ყურამდე და იგი პრაქტიკული გამოცდილების საფუძველზე ანალიზებს მოსმენილ რხევებს.

### ინფრაბგერა. ვიბრაცია

ინფრაბგერა დაბალი სიხშირის ( $\nu < 20$  ჰც) მექანიკური ტალღებია, რომელსაც, ადამიანის სმენის ორგანო ვერ აღიქვამს. ერთი შეხედვით სიხშირეთა ინტერვალი პატარაა, მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ ინფრაბგერის სიხშირე შეიძლება მათედი, მეასედი, მეათიათასედი და ა.შ. ჰერცის ტოლი იყოს, ეს ინტერვალი საკმაოდ დიდია. ინფრაბგერა ბგერასთან და ულტრაბგერასთან შედარებით ნაკლებად არის შესწავლილი, მაგრამ ისიც კი, რაც დღეისათვის ცნობილია, ცხადყოფს, რომ ინფრაბგერას დიდი მეცნიერული და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს. პირველ ყოვლისა, უნდა აღინიშნოს ის, რომ ინფრაბგერას დიდი შეღწევადობის უნარი ახასიათებს. მასთან ის თითქმის უდეკრემენტოდ (შესუსტების გარეშე) ვრცელდება საკმაოდ დიდ მანძილზე.

ინფრაბგერითი ტალღების წარმოქმნა ხდება სრულიად განსხვავებული მოვლენისა და პროცესის დროს: მაგ., მანქანა-დანადგარების მუშაობისას, ადამიანისა და ცხოველის მოძრაობის დროს, ქარიან ამინდში და ა.შ.; ჩვენ ვცხოვრობთ ინფრაბგერების სამყაროში ისე, რომ უმეტეს შემთხვევაში ამაზე წარმოდგენაც არ გვაქვს. ჩუმმა ინფრაბგერამ კი შეიძლება სერიოზული ზიანი მოგვაცენოს ან უკეთეს შემთხვევაში. ძალიან არასასურველი შეგრძნება გამოიწვიოს ჩვენს ორგანიზმში. ამის მიზეზი ის არის, რომ შინაგანი ორგანოების რხევის საკუთარი სიხშირე ინფრაბგერით დიაპაზონში დევს. ზოგიერთი შინაგანი ორგანოს რეზონანსული სიხშირე  $\nu_{\text{რ}}=6-8$  ჰც-ის ტოლია; ასეთი სიხშირის ინფრაბგერის მოქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს რეზონანსი და. შესაბამისად, არასასურველი შეგრძნება, ზოგ შემთხვევაში კი მძიმე შედეგიც. მიუხედავად იმისა, რომ ბიოლოგიური ობიექტის რხევის მიღწევადობის  $\beta$  კოეფიციენტი დიდია, მცირე სიმძლავრის ინფრაბგერასაც შეუძლია შინაგანი ორგანოს რხევით მოძრაობაში მოყვანა.

სწორედ ინფრაბგერა უნდა იყოს ქალაქის მცხოვრებთა და ხმაურიანი საწარმოს მუშების მძიმე და შეუქცევადი დადლილობის მიზეზი.

სხვადასხვა სახის ტექნიკურ მოწყობილობათა (მანქანა-დანადგარები, მექანიზმები) მექანიკურ რხევას ვიბრაციას უწოდებენ. მექანიკური რხევების ძირითადი ფიზიკური მახასიათებლები, როგორცაა რხევის სიხშირე, ამპლიტუდა, სიჩქარისა და აჩქარების ამპლიტუდა, არაპარამონიული რხევების სპექტრი, ენერგია და საშუალო სიმძლავრე, ვიბრაციის შემთხვევაშიც იგივეა.

ასეთი რხევები ადამიანს გადაეცემა ვიბრაციის წყაროს ზედაპირიდან უშუალოდ შეხების დროს. ვიბრაციის მოქმედება ადამიანზე არასასურველ ზეგავლენას ახდენს. ორგანიზმში გავრცელებული რხევები ქსოვილებში იწვევს მექანიკური ძაბვის (კუმშვის, გაჭიმვის, ღუნვის და ა.შ.) წარმოქმნას. თუ ასეთი ზემოქმედება ხანგრძლივია, ორგანიზმში ვითარდება ნორმალური ფიზიოლოგიური ფუნქციების შეუქცევადი დარღვევა. მაგ., ასეთი დარღვევები შეიძლება გამოვლინდეს თავისტკივილში, უძილობაში, გადაღლაში, გაღიზიანებაში, რაც ცენტრალური ნერვიული სისტემის ფუნქციის დარღვევაზე მიუთითებს. ვიბრაციის ზემოქმედების შედეგად ირღვევა ასევე შინაგანი ორგანოების ფუნქცია. ვიბრაციის პირობებში ხანგრძლივად მომუშავე ადამიანს პროფესიული (ვიბრაციული) დავადება უვითარდება.

ვიბრაცია ინფრაბგერის, ბგერის და ულტრაბგერის წყაროა. ამიტომ სპეციალურ ხელსაწყოს - ვიბრომეტრის მეშვეობით საწარმო-დაწესებულებებში ზომავენ ვიბრაციის ინტენსივობის დასაშვებ დონეს.

### **პიეზოელექტრული გარდამქნელები. ულტრაბგერითი გენერატორები. ულტრაბგერითი რხევებით გამოწვეული ფიზიკური ეფექტი**

ულტრაბგერა მექანიკური რხევებია, რომელთა სიხშირე, როგორც ვიცით, 20000 ჰერცზე მეტია. ასეთი სიხშირის რხევების მისაღებად დამუშავებულია ორი მეთოდი: ელექტროსტრიქციისა და მაგნიტოსტრიქციის მეთოდი. დიდ სიხშირეებზე (100000 ჰერცზე მეტი) მეცნიერული და პრაქტიკული მიზნებისთვის პირველ მეთოდს იყენებენ.

პიეზოელექტრული ეფექტი ჯერ კიდევ 1880 წელს აღმოაჩინეს ფრანგმა მეცნიერებმა, ძმებმა ჟაკ და პიერ კიურებმა. ამ ეფექტის არსი შემდეგში მდგომარეობს: თუ ფირფიტას, რომელიც კვარცის კრისტალიდან გარკვეული სახითაა გამოჭრილი, შევკუმშავთ, მის კიდებზე სხვადასხვა ნიშნის მუხტი გაჩნდება. შემდეგ თუ გაჭიმავთ ფირფიტას, მის კიდებზე გაჩენილი მუხტები ნიშნის იცვლის. მაშასადამე, ზოგიერთი სახის კრისტალზე მექანიკური ზემოქმედებისას, მის ზედაპირზე ელექტრული მუხტები ჩნდება (პიეზო - ბერძნული სიტყვაა და დახვეწას ნიშნავს). მასთან, რაც უფრო დიდია კუმშვა, ან გაჭიმვა, მით მეტი მუხტი ჩნდება ფირფიტის კიდებზე. უფრო ზუსტად ხდება მუხტების გადანაწილება.

ელექტროსტრიქციის მეთოდს საფუძვლად უდევს შებრუნებული პიეზოელექტრული ეფექტი. მისი არსი შემდეგში მდგომარეობს: ნივთიერებიდან, რომელსაც კარგი პიეზოელექტრული თვისებები გააჩნია (კვარცი, სეგნეტის მარილი, ბარიუმის ტიტანი და სხვა), ამზადებენ ფირფიტას (ან ღეროს). ელექტროდის როლს ასრულებს თხელი გამტარი ფენა, რომელიც ფირფიტის ზედაპირს ფარავს. ზედაპირებს შორის პოტენციალთა სხვაობას თუ შევქმნით, ველის ერთი მიმართულების შემთხვევაში ფირფიტის ზომა (სისქე) მოიმატებს, მიმართულების შეცვლისას კი შემცირდება. თუ

ელექტროდებს მივუერთებთ ცვლადი ელექტრული ძაბვის წყაროს, ფირფიტაში წარმოიქმნება მექანიკური რხევები, რომელთა სიხშირე მოდებული ცვლადი ძაბვის სიხშირის ტოლია. თუ ძაბვის სიხშირე აღემატება 20000 ჰერცს, გარემოში ულტრაბგერითი ტალღები გავრცელდება. ულტრაბგერის აპარატები (ულტრაბგერის გენერატორები) უმეტეს შემთხვევაში ერთი განსაზღვრული სიხშირის ტალღებს ასხივებენ. ამისთვის აუცილებელია დაცული იყოს რეზონანსის პირობა. სხვადასხვა სისქის ფირფიტების რხევის საკუთარი სიხშირე განსხვავებულია. ცხადია, რხევის საკუთარი სიხშირე სისქის გარდა დამოკიდებულია ფირფიტის მასალაზე. როდესაც ფირფიტის რხევის საკუთარი სიხშირე ემთხვევა მოდებული ძაბვის სიხშირეს, მექანიკური ტალღების გამოსხივება უფრო ეფექტურია.

ბერასთან შედარებით ულტრაბგერის ტალღის სიგრძე მცირეა (განსაკუთრებით მაღალი სიხშირეების დროს). მაგ., წყალში 1000 ჰც სიხშირის ბგერის ტალღის სიგრძე 1,4 მეტრია, ხოლო 10<sup>9</sup> ჰც სიხშირის ტალღის სიგრძე კი 1,4 მკმ (მიკრომეტრი). სხვა ტალღების მსგავსად ულტრაბგერასაც ახასიათებს არეკვლის, გარდატეხის, ინტერფერენციის, დიფრაქციის და სხვა თვისებები.

ულტრაბგერის მოქმედების არეში განვითარებული ეფექტი დამოკიდებულია აკუსტიკური ველის პარამეტრებზე (ინტენსივობაზე, სიხშირეზე, რხევის ფორმაზე) და გარემოს თვისებებზე. ულტრაბგერითი ტალღები გარემოში ვრცელდება კუმშვა-გაფართოების დეფორმაციის სახით, გარემოს ნაწილაკები ირხევა მათზე მოქმედი ცვლადი დრეკადი ძალის სიხშირით. გარკვეულ უბნებში წარმოიქმნება პერიოდული კუმშვა-გაფართოება, რაც იწვევს ცვლადი წნევის წარმოშობას.

სითხეში ულტრაბგერით გამოწვეული ცვლადი წნევა I ინტენსივობასთან შემდეგი ფორმულითაა დაკავშირებული:

$$P = \sqrt{pcI} \quad (26)$$

სადაც  $p$  სითხის სიმკვრივეა,  $c$  - ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე მაგალითად, თერაპიული ინტენსივობის შემთხვევაში ( $I = 0,5$  ვტ/სმ<sup>2</sup>), წნევა  $P = 0,4$  ატმ  $= 0,4 \cdot 10^5$  პა.

სითხეში ულტრაბგერის ზემოქმედების არეში მოსალოდნელია შემდეგი მოვლენები: 1. ბუმტების წარმოქმნა, რასაც თან სდევს დეგაზაცია, ან ფსევდოკავიტაცია. 2. ტემპერატურის აწევა აკუსტიკური ენერჯის შთანთქმის ხარჯზე. 3. მიკროდინების წარმოქმნა. 4. აქტიური რადიკალებისა და იონების წარმოქმნა.

### ულტრაბგერის ბიოლოგიური და სამკურნალო მოქმედების მექანიზმი

ბიოლოგიურ ობიექტებში ულტრაბგერით გამოწვეული ცვლილებების სიდიდე და ხასიათი, როგორც აღვნიშნეთ, ერთი მხრივ, დამოკიდებულია ულტრაბგერის სიხშირეზე, მის ინტენსივობასა და ზემოქმედების დროზე, ხოლო, მეორე მხრივ თვით ობიექტის სტრუქტურულ თავისებურებებზე, მის ფიზიკო-ქიმიურ თვისებებზე.

მთლიანი ორგანიზმის რეაქცია ულტრაბგერის ზემოქმედებაზე საკმაოდ მრავალფეროვანია. ზოგადად თუ ვიტყვით, ულტრაბგერა შეიძლება იწვევდეს დამაზიანებელ, დამთრგუნველ და მასტიმულირებელ მოქმედებას. 1 ვტ/სმ<sup>2</sup>-ზე ნაკლები ინტენსივობის ულტრაბგერა უმეტეს შემთხვევაში მასტიმულირებელ ზეგავლენას ახდენს

ცოცხალ ობიექტზე. დამორგუნველი და დამაზიანებელი ზემოქმედება ახასიათებს მაღალი (1.5-3 ვტ/სმ<sup>2</sup> და უფრო მეტი) ინტენსივობის ულტრაბგერას. მაღალი ინტენსივობის ულტრაბგერას იყენებენ ქირურგიული იარაღების სტერილიზაციისათვის.

ულტრაბგერის ცოცხალ სისტემაზე მოქმედების ბევრი საკითხი საკმაოდ კარგად არის შესწავლილი სტრუქტურული ორგანიზაციის თითქმის ყველა დონეზე. (ბიომოლეკულების, უჯრედების, ქსოვილების, ორგანოების და მთლიანად ორგანიზმის დონეზე); ულტრაბგერის მოქმედების შედეგად ორგანიზმში შეიძლება გამოვლინდეს ფიზიკურ-ქიმიური, ბიოქიმიური, ან ფიზიოლოგიური ხასიათის ცვლილებები. მაგრამ ყველა შემთხვევაში ძირითადია უჯრედის რეაქცია ზემოქმედებისადმი - მისი მემბრანის განვლადობის ცვლილება.

ფიქრობენ, რომ თერაპიული ინტენსივობის (0,4 ვტ/სმ<sup>2</sup>) ულტრაბგერის სამკურნალო მოქმედებას ძირითადად უნდა განაპირობებდეს სითბური ენერგია, რომელიც გამოიყოფა სხვადასხვა აკუსტიკური თვისებების მქონე ფაზათა გამყოფ საზღვრებზე. მაღალი ინტენსივობის ულტრაბგერას ახასიათებს დამაზიანებელი მოქმედება. მაგ., 20 წუთის განმავლობაში 4 ვტ/სმ<sup>2</sup> ინტენსივობის ულტრაბგერის მოქმედებით, ქსოვილში 2,5 სმ სიღრმეზე ტემპერატურა 4-5°C-ით მატულობს.

ულტრაბგერის ბიოლოგიურ მოქმედებაში მნიშვნელოვან როლს უნდა ასრულებდეს უჯრედში და უჯრედშორის არეში წარმოქმნილი მიკროდინება.

ულტრაბგერითი რხევა გავლენას ახდენს აგრეთვე მეტაბოლურ პროცესებზე და შესაბამისად იწვევს მათ გააქტიურებას ან დათრგუნვას. ასე მაგალითად, მათ შეუძლიათ მიტოქონდრიების, ლიზოსომების და უჯრედის სხვა ორგანოების დაზიანება, რაც იწვევს უჯრედებშიგა სუნთქვისა და ნივთიერებათა ცვლის დარღვევას. დადგენილია, რომ ულტრაბგერით ტალღებს შეუძლია მაღალმოლეკულური ნაერთების (მაგალითად C - ციტოქრომა) სტრუქტურის შეცვლა, რაც, თავის მხრივ, იწვევს მეტაბოლური პროცესების ინტენსივობის ცვლილებას.

დიდი ინტენსივობის ულტრაბგერა გავლენას ახდენს აგრეთვე უჯრედთა გაყოფის პროცესზე. ამ ფაქტის ახსნა შეიძლება ასეთი მსჯელობით: ულტრაბგერის მოქმედებისას წყლის არეში აზოტოვანი და აზოტმქავა იონები წარმოიქმნება. NO<sub>2</sub> ძლიერი მუტაგენია. ცნობილია, რომ NO<sub>2</sub> და ციტოზინის რეაქციის შედეგად წარმოიქმნება ურაცილი, რამაც შეიძლება გენეტიკური ინფორმაციის შეცვლა გამოიწვიოს.

მაშასადამე, როგორც მოყვანილი მაგალითებიდან ჩანს, ულტრაბგერის ბიოლოგიური მოქმედების მექანიზმში ძირითადია: 1. მოქმედების მექანიკური მხარე, 2. სითბური მხარე, 3. ფიზიკურ-ქიმიური მხარე.

მოქმედების მექანიკური მხარე გამოვლინდება მაკრომოლეკულებსა და უჯრედულ სტრუქტურებზე ცვლადი წნევის უშუალო ზემოქმედებით.

ულტრაბგერის მოქმედების მექანიზმში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია სითბურ მხარეს, რაც იმას ნიშნავს, რომ ფუნქციური თუ ფიზიკურ-ქიმიური ცვლილებები განპირობებული უნდა იყოს ბიოლოგიურ ობიექტში ტემპერატურის აწევით. მნიშვნელოვანია აგრეთვე ფიზიკურ-ქიმიური ცვლილებები - მაკრომოლეკულებისა და უჯრედული სტრუქტურების კონფორმაციული ცვლილებები, წყლიან ფაზაში აქტიური იონებისა და რადიკალების წარმოქმნა და სხვა.

ცხადია, ულტრაბგერის სიხშირის, ინტენსივობის, ზემოქმედების დროისა და ობიექტის თვისებების შესაბამისად შეიძლება წამყვანი იყოს რომელიმე მათგანი, მაგრამ მოქმედების სხვა მხარეებიც გასათვალისწინებელია. სწორედ მათი რთული ურთიერთკავშირი უნდა განაპირობებდეს ულტრაბგერის მოქმედების ხასიათს.

ფიზიოთერაპიაში სამკურნალო მიზნით გამოყენებულია სხვადასხვა სიხშირის ულტრაბგერა. დადებითი ბიოლოგიური ეფექტი მიიღება დაბალი ინტენსივობის დროს ( $I < 0,8$  ვტ/სმ<sup>2</sup>). ასეთი ინტენსივობა იწვევს ქსოვილთა თავისებურ მიკრომასაჟს, რის შედეგადაც ნორმალური ფიზიოლოგიური პროცესები აქტიურდება.

მაღალი ინტენსივობის ულტრაბგერის დამანგრეველ მოქმედებას იყენებენ უროლოგიაში თირკმლის ქვების დასაშლელად. ტრავმატოლოგიაში მოტეხილი ძვლის ნაწილების ერთმანეთთან შეერთების დასაჩქარებლად და ა.შ.

ულტრაბგერას წარმატებით იყენებენ სტომატოლოგიაში კბილის ქვის მოსაცილებლად. ასევე ფართოდ იყენებენ მას ფარმაცევტულ მრეწველობაში სხვადასხვა სამედიცინო პრეპარატების (მათ შორის ახალი პრეპარატების) დამზადების დროს.

ბოლო პერიოდში მეცნიერებმა შექმნეს სმენისა და მხედველობის ულტრაბგერითი აპარატები. მაგ., უსინათლოს ამ აპარატის მეშვეობით რამდენიმე მეტრზე შეუძლია „დაინახოს“ უძრავი და მოძრავი საგანი, გაარჩიოს ხელი გაშლილი თითებით მუშტად შეკრულისგან და სხვა.

## ლექცია IV

### ჰემოდინამიკის ფიზიკური საფუძვლები

შესავალი. ჰემოდინამიკა ბიომექანიკის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ნაწილია. მისი ძირითადი ამოცანაა სისხლძარღვთა სისტემაში სისხლის მოძრაობის გამოკვლევა.

სისხლი ორგანიზმის უმნიშვნელოვანესი სითხეა. მისი მეშვეობით ხდება ქსოვილებისა და ორგანოების მომარაგება ჟანგბადითა და მკვებავი ნივთიერებებით და, ასევე, ნივთიერებათა ცვლის საბოლოო პროდუქტების გამოტანა. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, ცხადია, სისხლი უზრუნველყოფს ორგანიზმის ანატომიური სტრუქტურების უწყვეტ ურთიერთკავშირს.

სისხლის ეს ძირითადი ფუნქცია გულ-სისხლძარღვთა სისტემის მეშვეობით ხორციელდება; ის უზრუნველყოფს სისხლის უწყვეტ დინებას სისხლძარღვების რთულად განშტოებულ და ხშირ ქსელში. სისხლძარღვები ორგანიზმში ქმნის სხვადასხვა დიამეტრის ელასტიკური (მოქნილი) მილბების ჩაკეტილ სისტემას.

გულიდან სისხლი მიედინება არტერიებში, რომლებიც თანდათან ვიწროვდება და გადადის არტერიოლებში, პრეკაპილარებსა და კაპილარებში. კაპილარებიდან სისხლი გადადის ვენულებში, შემდეგ ვენებში და უბრუნდება გულს.

ჰემოდინამიკას საფუძვლად უდევს ჰიდროდინამიკის კანონები, რომლის ძირითადი ამოცანაა უკუმშვადი სითხის მოძრაობისა და მყარ სხეულებთან მისი ურთიერთქმედების კანონზომიერებათა დადგენა.



მიღწევაში ერთგვაროვანი სითხის დინებისა და სითხეში მყარი სხეულის მოძრაობის ზოგადი ფიზიკურ-მათემატიკური კანონზომიერებები ჰიდროდინამიკაში დიდი ხანია დადგენილია.

საინტერესოა ის ფაქტი, რომ ჰიდროდინამიკის ძირითადი განტოლება ფრანგმა ექიმმა პუაზეილმა გამოიყვანა.

ჰემოდინამიკაში საქმე გაცილებით უფრო რთულად არის. სისხლი რთული შემადგენლობისაა. პლაზმაში, გახსნილ არაორგანულ ნივთიერებათა გარდა, სუსპენზირებულია მრავალი ორგანული ნაერთი (ცილები, ლიპიდები, ნახშირწყლები). სისხლში ძალიან დიდი რაოდენობითაა ფორმიანი ელემენტები - ერითროციტები, ლეიკოციტები და თრომბოციტები. ამასთან მთელი ეს მასა მოძრაობს არა ხისტკედლებთან მიღწევაში, არამედ განსხვავებული დიამეტრისა და ელასტიურობის მქონე მილების სისტემაში. სისხლძარღვებზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს იმ გარემომცველი ქსოვილების მექანიკური თვისებები, რომელზეც ის არის მიმაგრებული. კაპილარის მექანიკურ თვისებებს კი მთლიანად განსაზღვრავს გარემომცველი ქსოვილები. კაპილარის კედელი ხომ ენდოთელიუმური უჯრედების ერთი შრეა.

ჩამოვყალიბოთ უფრო კონკრეტულად ჰემოდინამიკის საგანი, რომელიც მოიცავს კვლევის სამ ძირითად მიმართულებას:

1. ფიზიკურ - მექანიკური მოვლენები, რომელიც ვითარდება სისხლძარღვებში სისხლის მოძრაობისას.

2. ამ მოვლენათა როლისა და მნიშვნელობის დადგენა ცოცხალი ორგანიზმისათვის.

3. კვლევის შედეგების გამოყენება კლინიკაში სადიაგნოსტიკო და სამკურნალო მიზნით.

ჰემოდინამიკის ძირითადი ფიზიკური საკითხების განხილვისათვის საჭიროა გავიხსენოთ ჰიდროდინამიკის ზოგიერთი ცნება, კანონი და კანონზომიერება.

### ჰიდროდინამიკის ძირითადი ცნებები და კანონები

სითხეებს თავისი აგებულებითა და თვისებებით შუალედური ადგილი უკავიათ აირებსა და მყარ სხეულებს შორის. მათი კუმშვადობა ძალიან მცირეა ( $\approx 1\%$  წნევის ყოველ 100 ატმოსფეროზე). უკუმშვად სითხეს, რომელშიც ხახუნის ძალები (სიბლანტე) არ მოქმედებს, იდეალური ეწოდება. ზოგიერთი ძირითადი კანონზომიერება სწორედ იდეალური სითხისთვისაა დადგენილი, გარკვეული მიახლოებით შეგვიძლია გამოვიყენოთ რეალური სითხისთვისაც, მიუხედავად იმისა, რომ რეალურ სითხეში ხახუნის ძალების მოქმედება არსებითად ცვლის დინების ხასიათს.

განვიხილოთ სითხის თვისების მახასიათებელი ძირითადი ფიზიკური სიდიდეები და ჰიდროდინამიკაში დადგენილი ზოგიერთი კანონზომიერება.

**სითხის წნევა.** უძრავი სითხის შიგნით მოქმედებს წნევის ძალა, რომელიც (თუ მის ზედაპირზე სხვა ძალები არ მოქმედებს) მხოლოდ მისი წონით არის გამოწვეული.

სითხის წნევა (ჰიდროსტატიკური წნევა) ეწოდება სითხის ფენის ან სითხის მხრიდან მყარი სხეულის ზედაპირის ფართობზე მართობულად მოქმედ ძალის ფარდობას ზედაპირის ფართობთან.

$$P = \frac{F}{S}$$
, სადაც  $P$  სითხის წნევაა,  $F$  - წნევის ძალა,  $S$  - ზედაპირის ფართობი.

SI სისტემაში წნევის ერთეულია პასკალი (პა). წნევა 1 პისკალის ტოლია, თუ

ფართობის ზედაპირზე მოქმედებს ზედაპირის მართობული 1 ნიუტონი ძალა;  
 $1 \text{ პა} = 1 \text{ ნ/მ}^2$ ;

**პასკალის კანონი.** პასკალის კანონის თანახმად, უძრავ სითხეზე მოქმედი წნევა უცვლელად გადაეცემა სითხის ყველა წერტილს მთელ მოცულობაში.

**ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდე.**  $h$  სიმაღლის სითხის სვეტი ჭურჭლის ფსკერზე (ასევე სითხის ფენაზე, ან მასში მოთავსებულ სხვა სხეულის ზედაპირზე) მოქმედებს წნევით, რომელიც ტოლია:

$$P = \rho gh \quad (27)$$

სადაც  $\rho$  სითხის სიმკვრივეა,  $g$  - სიმძიმის ძალის აჩქარება.

ჩვეულებრივ პირობებში სითხის (ასევე სხვა სხეულების) თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფეროს წნევა, რომელიც ზღვის დონეზე 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევას უდრის. ამ შემთხვევაში სითხეში წნევა  $P = P_0 + \rho g l$ , სადაც  $P_0$  ატმოსფეროს წნევაა.

ატმოსფეროს წნევის სისტემგარეშე ერთეულად მიღებულია 1 ატმოსფერო. 1 ატმ=760მმ Hg  $\approx 10^5$  პა. ეს ძალიან დიდი წნევაა. ასეთ წნევას ახდენს საყრდენზე 1 მეტრი სიგრძისა და 1 მეტრი სიგანის საყრდენი ფართობის მქონე ბეტონის ფილა, რომლის მასა 10 ტონაა.

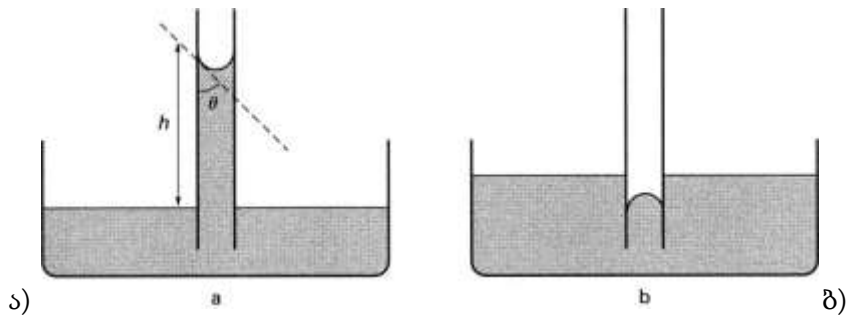
ჩვენ არ ვიჭყლიტებით მხოლოდ იმიტომ, რომ კანის შიგნითა მხრიდან საპირისპირო მიმართულებით მოქმედი წნევა აბათილებს ატმოსფერულ წნევას.

**არქიმედეს კანონი.** სითხეში (აირში) ჩაძირულ სხეულზე სითხის მხრიდან მოქმედებს ამომგდები ძალა, რომელიც სხეულის მიერ გამოდევნილი (ე.ი. მისი მოცულობის ტოლი) სითხის წონას უდრის ( $F = \rho g V$ );  $\rho$  - სითხის სიმკვრივეა,  $V$  - სხეულის მიერ გამოდევნილი სითხის მოცულობა

**ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა.** სითხეების ზედაპირი თითქმის თხელი ელასტიური აფსკით არის დაფარული (მწერების მოძრაობა სითხის ზედაპირზე მისი მაგალითია). გარკვეული ძალის მოქმედებაა საჭირო, რომ აფსკი გავარღვიოთ და სითხის შიგნით შევადწიოთ. აფსკის წარმოშობა სითხის მოლეკულების ურთიერთმიზიდვით აიხსნება. ყველა მათგანი ცდილობს სითხის შიგნით „შეძრომას“, რაც იწვევს ზედაპირის ფართობის შემცირებას. ზედაპირის ფართობი რომ გავადიდოთ,

გარკვეული მუშაობის ( $A$ ) შესრულებაა საჭირო:  $A = \sigma \cdot S$ , საიდანაც  $\sigma = \frac{A}{S}$ .  $\sigma$  -ს

ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტს უწოდებენ,  $S$  ზედაპირის ფართობია. როცა  $S = 1 \text{ მ}^2$ ,  $\sigma = A$ , ე.ი. ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი რიცხობრივად იმ მუშაობის ტოლია, რომელიც უნდა შესრულდეს ზედაპირის ფართობის ერთი ერთეულით ( $1 \text{ მ}^2$ ) გასადიდებლად. ზედაპირული დაჭიმულობა განაპირობებს კაპილარულ მოვლენას: სითხიან ჭურჭელში ჩაშვებულ მინის წვრილ მილში სითხის დონე მაღლა იწევს ჭურჭელში სითხის დონესთან შედარებით, თუ სითხე დამასველებელია. არადამასველებელი სითხის შემთხვევაში სითხის დონე მილში დაბლაა დაწეული. (ნახ. 11)



ნახ.11. კაპილარული მოვლენები; ა) დამსველებელი სითხე (წყალი); ბ) არადამსველებელი სითხე (ვერცხლისწყალი)

### ბერნულის განტოლება

ჯერ განვიხილოთ სითხის უწყვეტობის განტოლება. სითხის დინებას უწოდებენ უწყვეტს, თუკი სხვადასხვა განივკვეთის ფართობის მქონე მილში დროის ტოლ შუალედებში ტოლი (ერთდაიგივე) მოცულობის სითხე გაედინება  $V = \text{const}$ . დროის ერთეულში განივკვეთში გასული სითხის რაოდენობას (მოცულობა) მოცულობით სიჩქარეს უწოდებენ.

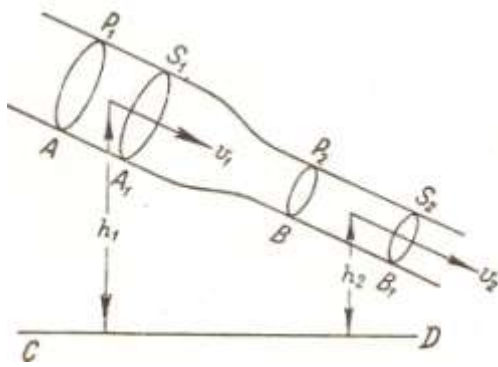
$$v = \frac{V}{t}$$

მედიცინაში მას სისტემგარეშე ერთეულებში გამოსახავენ მლ/წთ (მილილიტრი წუთში). ცხადია, სტაციონალური დინებისას ცვლადი განივკვეთის მილის რომელიმე  $S_1$  განივკვეთში დროის ერთეულში გასული სითხის  $V_1$  მოცულობა ტოლია ნებისმიერ  $S_2$  განივკვეთში გასული  $V_2$  მოცულობისა, ე.ი.  $V_1 = V_2$ ; ( $V = Sv$ ) ანუ  $S_1 v_1 = S_2 v_2$ ; ე.ი.  $Sv = \text{const}$  ამ განტოლებას უწყვეტობის განტოლებას უწოდებენ.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_1}{S_2} \tag{28}$$

ამგვარად, სხვადასხვა განივკვეთების მქონე მილში სითხის დინების სიჩქარეები განივკვეთის ფართობების უკუპროპორციულია (28).

განვიხილოთ იდეალური სითხის სტაციონარული დინება. გამოვყოთ სითხეში დენის მილის  $AB$  ნაწილი (ნახ.12).  $A$  და  $B$  კვეთებს შორის მოთავსებული სითხე არ არის იზოლირებული.  $A$  კვეთზე წნევას აწარმოებს მის მარცხნივ მყოფი სითხე. ეს წნევა აღვნიშნოთ  $p_1$ -ით. მაშინ კვეთზე მოქმედი სრული წნევის ძალა იქნება  $f_1 = p_1 S_1$ . ასევე



ნახ.12. ბერნულის განტოლების მიღება

$B$  კვეთზე მის წინ მყოფი სითხე აწარმოებს  $p_2$  წნევას და  $f_2 = p_2 S_2$ .  $\Delta t$  დროის შემდეგ ჩვენს მიერ შემოსაზღვრული სითხის ნაწილი მოთავსებული იქნება  $A_1 B_1$  კვეთში. ამ გადაადგილების დროს ენერგია შეიცვლება და ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად  $\Delta E = A$ . ენერგიის ცვლილების გასაგებად  $B$  კვეთიდან  $\Delta t$  დროში გამოსული სითხის ენერგიას უნდა გამოვაკლოთ  $A$  კვეთში ამავე დროში შესული სითხის ენერგია.

$A$  და  $B$  კვეთებისათვის უწყვეტობის განტოლების თანახმად:

$$s_1 v_1 \Delta t = s_2 v_2 \Delta t \quad \text{ან} \quad \Delta V = s_1 v_1 \Delta t = s_2 v_2 \Delta t \quad ,$$

სადაც  $\Delta V$  არის კვეთებში შესული და გამოსული სითხის მოცულობა; სიმკვრივეზე ( $\rho$ ) გამრავლებით ვღებულობთ:  $\Delta m = \Delta m_1 = \Delta m_2$ . კვეთებში სრული

ენერგია  $E_1 = \frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_1$  ;  $E_2 = \frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2$  , ხოლო ენერგიის ცვლილება

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2 - \frac{\Delta m v_1^2}{2} - \Delta m g h_1$$

$A$  კვეთაზე მოქმედებს წნევა  $f_1 = p_1 s_1$  ამიტომ  $A_1 = p_1 s_1 v_1 \Delta t = p_1 \Delta v$

$B$  კვეთზე -  $A_2 = p_2 s_2 v_2 \Delta t = p_2 \Delta v$  ; სულ მუშაობა  $A = p_1 \Delta v - p_2 \Delta v$

მაშინ  $\frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2 - \frac{\Delta m v_1^2}{2} - \Delta m g h_1 = p_1 \Delta v - p_2 \Delta v$  ანუ

$$\frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2 + p_2 \Delta v = \frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_1 + p_1 \Delta v \quad \text{გავყოთ} \quad \Delta v \text{-ზე} \quad \frac{\Delta m}{\Delta v} = \rho$$

$$\frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 = \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 \quad (29)$$

ამ განტოლებას ბერნულის განტოლება ეწოდება. იგი გამოსახავს ენერგიის მუდმივობის კანონს სითხისათვის.

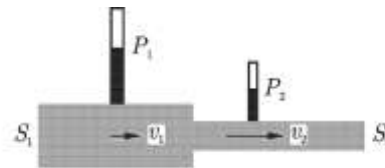
ზოგადად:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const \quad (30)$$

ბერნულის განტოლება ჰიდროდინამიკის ძირითად განტოლებას წარმოადგენს. როდესაც სითხე მიედინება ჰორიზონტალურ მილში, მაშინ  $h_1 = h_2$  და ბერნულის განტოლება მიიღებს უფრო მარტივ სახეს:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = const \quad (31)$$

$P$ -ს უწოდებენ ჰიდროსტატიკურ ან უბრალოდ სტატიკურ წნევას. იგი სითხეს ახასიათებს, როგორც უძრავ, ისე მოძრავ მდგომარეობაში;  $\frac{\rho v^2}{2}$ -ს უწოდებენ დინამიკურ წნევას. იგი მხოლოდ მოძრავი სითხისათვისაა დამახასიათებელი. ამ განტოლებიდან გამომდინარეობს დასკვნა, რომელსაც ხშირად ბერნულის წესს უწოდებენ, კერძოდ, ჰორიზონტალურ მილში მოძრავი არაბლანტი სითხის წნევა მეტია იქ, სადაც სიჩქარე ნაკლებია და პირიქით.



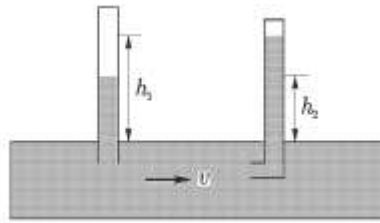
ნახ.13. ბერნულის განტოლებიდან გამომდინარე შედეგი: სითხის წნევა მეტია იქ, სადაც სიჩქარე ნაკლებია და პირიქით.

სტატიკური და დინამიკური - წნევათა ჯამს სრულ წნევას უწოდებენ.

მე-13 სურათიდან ჩანს, რომ სადაც სიჩქარე მეტია, იქ წნევა ნაკლებია (ბერნულის წესი). მილის შევიწროვებულ ნაწილში სითხის სიჩქარის გაზრდა წნევათა სხვაობითაა გამოწვეული ( $P_1 > P_2$ ). ეს ეთანხმება ენერგიის მუდმივობის კანონს. მართლაც, თუ  $P_1 > P_2$ , მაშინ  $P_1 V > P_2 V$ .  $PV$  როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული პოტენციური ენერგიაა. მისმა შემცირებამ კი კინეტიკური ენერგიის (ე.ი. სიჩქარის) გაზრდა გამოიწვია.

შეიძლება შეირჩეს დინების ისეთი პირობები, როცა მილის შევიწროვებულ ნაწილში წნევა ატმოსფერულ წნევაზეც ნაკლები იყოს (წყლის ჭავლიანი ტუმბო).

მილში მოძრავი სითხის სრული წნევის გასაზომად იყენებენ მართი კუთხით მოხრილ მილს (პიტოს მილაკი), რომელსაც ათავსებენ დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით, ხოლო სტატიკური წნევის გასაზომად დინებისადმი მართობულად მოთავსებულ მილს



ნახ.14. დინამიკური და სტატიკური წნევის გაზომვა

სითხის ნაწილაკები, რომლებიც შეაღწევს მოხრილ მილში, ჩერდება ( $v_2 = 0$ ). თუ გავიხსენებთ, რომ  $P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$ , მაშინ  $P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2$ , ე.ი. მოხრილ მილში

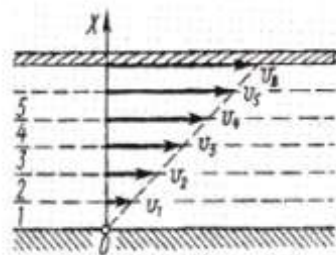
იზომება სრული წნევა. ხოლო დინამიკური წნევა იქნება  $P_1 - P_2 = \frac{\rho v_1^2}{2}$ .

ჩვენს მიერ ზემოთ განხილული უწყვეტობის განტოლებიდან გამომდინარეობს მნიშვნელოვანი დასკვნები ჰემოდინამიკისთვის. კერძოდ, მარტივი გამოთვლები გვიჩვენებს, რომ ნორმის პირობებში სისხლძარღვებში და მის განშტოებებში გაედინება სისხლის ერთი და იგივე მოცულობა. ასე მაგალითად, აორტაში, რომლის განივკვეთის ფართი  $S_1 = 8\text{სმ}^2$ , სისხლის სიჩქარე  $v_1 = 20\text{სმ/წმ}$ , სისხლის მოცულობა  $V_1 = S_1 \cdot v_1 = 160\text{სმ}^3/\text{წმ}$ , ხოლო დიდი წრის ყველა კაპილარის განივკვეთების ჯამური ფართობი  $S_3 = 3200\text{სმ}^2$ , სიჩქარე კი მათში  $v_3 = 0,05\text{სმ/წმ}$ ;  $V_3 = 160\text{სმ}^3/\text{წმ}$ , ე.ი.  $V_1 = V_3$ .

#### რეოლოგიის ძირითადი ცნებები. სითხის სიბლანტე. ნიუტონის ფორმულა

რეალური სითხის მოლეკულები გარკვეული ძალით ურთიერთქმედებენ. ეს ურთიერთქმედება განსაკუთრებით ნათლად ვლინდება რეალური სითხის დინების დროს. სითხის დინების დროს, სითხის ცალკეული ფენები ერთმანეთზე მოქმედებს მათი ზედაპირისადმი მხების გასწვრივ მიმართული ძალებით. მათ შინაგანი ხახუნის ძალებს (სიბლანტეს) უწოდებენ, მოვლენას კი - შინაგან ხახუნს.

განვიხილოთ სითხის დინება ღარებში, რომლის ფსკერი ცხადია უძრავია, სითხე დამსველებელია.



ნახ.15. სითხის სიჩქარეთა განაწილება

წარმოვიდგინოთ სითხე ცალკეული ფენების ერთობლიობად. ღარის ფსკერს მიკრული ფენა უძრავია. მისი მეზობელი ფენა მოძრაობს რაღაც  $v_1$  სიჩქარით, მომდევნო  $v_2$  - სიჩქარით და ა.შ.; მასთან  $v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_n$  -ზე; მაქსიმალური სიჩქარე ექნება ზედა ფენას. ეს ფენა ცდილობს ააჩქაროს მე-5 ფენა. მე-5 ფენა ზრდის მე-4 ფენის სიჩქარეს, მე-4 - მე-3 ფენის სიჩქარეს და ა.შ.; ის ფაქტი, რომ ფენების

სიჩქარე ფსკერის მიმართულებით მცირდება, შინაგანი ხახუნის ძალის მოქმედებით არის გამოწვეული. ეს ძალა მით მეტია, რაც უფრო დიდია ურთიერთქმედი ფენების ზედაპირის (შემხები ზედაპირის)  $S$  ფართობი, რაც უფრო დიდია სიჩქარის გრადიენტი  $\frac{dv}{dx}$  (სიჩქარის ცვლილება მისადმი მართობულ სიგრძის ერთეულზე), მით მეტი იქნება ხახუნის ძალაც. შინაგანი ხახუნის ძალის პროპორციული დამოკიდებულება  $S$  ფართობზე და სიჩქარის გრადიენტზე, შემდეგი მარტივი ფორმულით გამოისახება:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \cdot S \quad (32)$$

ფორმულაში  $\frac{dv}{dx}$  სიჩქარის გრადიენტი. პროპორციულობის კოეფიციენტს  $\eta$ -ს

შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტს, ანუ დინამიკურ სიბლანტეს (სიბლანტეს) უწოდებენ.

სიბლანტის ერთეულია - პა·წმ (32) ფორმულას ნიუტონის განტოლებას უწოდებენ.

უმეტესი სითხეების სიბლანტე  $\eta$  არ არის დამოკიდებული სიჩქარის გრადიენტზე.

ასეთი სითხეებისათვის (32) განტოლება მართებულია და მათ ნიუტონისეულ სითხეებს უწოდებენ.

ზოგიერთი სითხისათვის, რომელიც შედგება დიდი მოლეკულებისაგან (მაკრომოლეკულებისაგან), როგორცაა, მაგ., ბიოპოლიმერების ხსნარები, სისხლი და სხვა, (32) განტოლება არ არის მართებული. მათ არანიუტონისეულ სითხეებს უწოდებენ. არანიუტონისეული სითხის სიბლანტე ჩვეულებრივთან (ნიუტონისეულთან) შედარებით დიდია. ეს იმით არის გამოწვეული, რომ სითხის დინების დროს გარეშე ძალის მუშაობა იხარჯება მაკრომოლეკულათა სივრცული სტრუქტურის შეცვლაზე (დარღვევაზე).

### პუაზეილის ფორმულა. სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება რეინოლდსის რიცხვი

განვიხილოთ ბლანტი სითხის დინების მარტივი შემთხვევა. დავუშვათ, სითხე მიედინება ჰორიზონტალურ მილში, რომლის განივკვეთის ფართობი მთელ სიგრძეზე ერთი და იგივეა. მილის ცენტრალური ღერძის გასწვრივ დინების სიჩქარე უდიდესია, ხოლო მილის ზედაპირს მიკრული ფენა უძრავია. მილში სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა განაწილება ნაჩვენებია მე-16 სურათზე.



ნახ. 16. მილში სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა განაწილება

საინტერესოა ვიცოდეთ დროის ერთეულში მილიდან გასული სითხის მოცულობა  $V$  როგორ არის დამოკიდებული მილისა და ბლანტი სითხის მახასიათებლებზე. მილის

სიგრძე ავლნიშნოთ  $l$ -ით, რადიუსი -  $R$ -ით, სითხის სიბლანტე -  $\eta$ -ით, ხოლო წნევა მილის თავსა და ბოლოში შესაბამისად -  $P_1$  და  $P_2$  -ით.

ფრანგმა ექიმმა და ფიზიკოსმა პუაზეილმა დაადგინა, რომ ეს დამოკიდებულება შეიძლება შემდეგი ფორმულით გამოვსახოთ:

$$V = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta l} \quad (33)$$

თუ მილის სიგრძე, რადიუსი და  $P_1$  და  $P_2$  წნევა არ იცვლება, მაშინ რაც უფრო ნაკლები იქნება სითხის სიბლანტე, მეტი იქნება დროის ერთეულში მილიდან გასული სითხის მოცულობა.  $V$  განსაკუთრებით ძლიერ არის დამოკიდებული მილის რადიუსზე. (33) ფორმულის მიხედვით, თუ სხვა სიდიდეებს არ ვცლით, მილის რადიუსის 2-ჯერ შემცირება იწვევს სითხის  $V$  მოცულობის 16-ჯერ შემცირებას. ადვილი წარმოსადგენია, თუ რას გამოიწვევს სისხლძარღვის სანათურის მცირე შევიწროებაც. სისხლის მომარაგების მკვეთრი შემცირების გამო, შესაბამის უბანში პათოლოგიური პროცესი განვითარდება. (33) განტოლება ასე გადავწეროთ:

$$V = \frac{P_1 - P_2}{8\eta l / \pi R^4} \cdot \text{შემოვიტანოთ აღნიშვნა: } X = \frac{8\eta l}{\pi R^4} \cdot \text{მაშინ}$$

$$V = \frac{P_1 - P_2}{X} = \frac{\Delta P}{X} \quad (34)$$

ამ ფორმულიდან  $X = \frac{\Delta P}{V}$ . თუ ამ განტოლებას შევადარებთ ომის კანონს წრედის

უბნისათვის -  $I = \frac{u}{R}$  ან  $I = \frac{\phi_1 - \phi_2}{R}$ , ადვილად შევამჩნევთ მათ შორის მსგავსებას.

$\phi_1 - \phi_2$  პოტენციალთა სხვაობის როლს (4.2) განტოლებაში წნევათა სხვაობა  $P_1 - P_2$  ასრულებს,  $R$  ელექტრული წინაღობის როლს -  $X$ , ხოლო სითხის  $V$  მოცულობა, რომელიც მილიდან 1 წამში გაედინება  $I$  დენის ძალის ანალოგიურია.  $X = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$

სიდიდეს ჰიდრავლიკურ წინაღობას უწოდებენ.

ფორმულიდან ჩანს, რომ რაც მეტია სითხის სიბლანტე, მით მეტია მისი ჰიდრავლიკური წინაღობა.

ჰიდრავლიკურ და ელექტრულ წინაღობათა შორის ანალოგია საშუალებას გვაძლევს ზოგ შემთხვევაში გამოვიყენოთ ჯამური ელექტრული წინაღობის გამოსათვლელი ფორმულა გამტართა მიმდევრობითი და პარალელური შეერთების დროს. მაგ.,  $X_1$ ,  $X_2$  და  $X_3$  ჰიდრავლიკური წინაღობის მქონე 3 მილის მიმდევრობითი შეერთებისას ჯამური წინაღობა  $X = X_1 + X_2 + X_3$ . პარალელური შეერთებისას კი

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3}.$$

სისხლძარღვთა პერიფერიული წინაღობა განპირობებულია სისხლძარღვთა ტონუსით და ხახუნის ძალებით, რომელსაც სისხლი განიცდის სისხლძარღვებში მოძრაობის დროს განსაკუთრებით არტერიოლების მონაკვეთში, მაშინ პუაზეილის ფორმულიდან გამომდინარე ( $X = \frac{\Delta P}{V}$ ).



$$\text{საერთო პერიფერიული წინაღობა} = \frac{\text{გულის წუთმოცულობა (მლ/წმ)}}{\text{-----}}$$

**სითხის ლამინარული და ტურბულენტური დინება.** ნიუტონის განტოლება და პუაზეილის კანონის გამომსახველი ფორმულა მართებულია ბლანტი სითხის ლამინარული დინებისათვის. **ლამინარული** ეწოდება ისეთ დინებას, რომლის დროსაც სითხის ფენების ერთმანეთში არევა არ ხდება. ამ შემთხვევაში შინაგანი ხახუნის ძალა დინების სიჩქარის პროპორციულია. მასთან სითხის სხვადასხვა წერტილში ნაწილაკების სიჩქარე განსხვავებულია, მაგრამ დროის მიხედვით ის არ იცვლება. თუ სიჩქარის სიდიდე მეტი გახდება რაღაც გარკვეულ (კრიტიკულ) მნიშვნელობაზე, სითხის ნაწილაკები, გადატანით მოძრაობასთან ერთად, ბრუნვით (გრიგალურ) მოძრაობასაც იწყებს. ეს გარემოება განპირობებულია იმითაც, რომ ჰიდროსტატიკური წნევა მილის კედლებთან უფრო მეტია, ვიდრე მილის ცენტრში (ბერნულის წესი). წნევათა სხვაობის გამო ფენები ერთმანეთში აირევა და სიჩქარის განაწილების სურათი დაირღვევა (სითხის ნებისმიერ წერტილში ნაწილაკის სიჩქარე ქაოსურად და განუწყვეტლივ შეიცვლება). სითხის ასეთ მოძრაობას ტურბულენტურს (გრიგალურს) უწოდებენ. ტურბულენტური დინების დროს შინაგანი ხახუნის ძალა დაახლოებით სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია.

**რეინოლდსის რიცხვი.** რეინოლდსმა ცდებით დაადგინა, რომ სითხის დინების ხასიათი დამოკიდებულია მის სიმკვრივეზე ( $\rho$ ), სიბლანტეზე ( $\eta$ ), სიჩქარეზე ( $V$ ) და მილის რადიუსზე ( $r$ ). ამ დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს:

$$Re = \frac{2r\rho V}{\eta} \tag{35}$$

Re-ს რეინოლდსის რიცხვს უწოდებენ. მას განზომილება არა აქვს. თუ  $Re < 2000$ , დინება ყოველთვის ლამინარულია. როცა  $Re > 3000$ , დინება ტურბულენტური ხდება. 2000-დან 3000-მდე დინებას გარდამავალი ხასიათი აქვს: სითხის სხვადასხვა ადგილას ლამინარული დინება იცვლება ტურბულენტურით და პირიქით.

ფარდობას  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  კინეტიკურ სიბლანტეს უწოდებენ. ამის გათვალისწინებით, ფორმულა (35) შეიძლება ასე ჩავწეროთ:

$$Re = \frac{2rV}{\nu} \tag{36}$$

(35) და (36) ფორმულებიდან ჩანს, რომ რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკულ მნიშვნელობას სიჩქარის კრიტიკული მნიშვნელობა შეესაბამება, მოცემული  $r, \rho$ -სა და  $\eta$ -ს შემთხვევაში.

სითხეებიდან ბუნებაში ყველაზე გავრცელებულია წყალი. იგი ბიოლოგიური სითხეების (სისხლი, პლაზმა, უჯრედშორის სითხეები და სხვა) უდიდეს ნაწილს 80%-ზე მეტს შეადგენს.

## ლექცია V

### სითხის დინება სისხლძარღვთა სისტემაში

როდესაც სითხის დინებას მიღში უზრუნველყოფს რიტმულად მომუშავე ტუმბო, ადვილი მისახვედრია, რომ ხისტკედლიან მილში სითხის დინება იქნება წყვეტილი (სითხის ცალკეული ულუფების სახით). საკმაოდ ელასტიურკედლიან მილებში კი დინებას უწყვეტი ხასიათი ექნება. ეს გარემოება იმითაა გამოწვეული, რომ სითხის გადასროლისას ელასტიური მილი მიცულობაში იმატებს (გაიბერება) და ტუმბოს პაუზის შემთხვევაში დრეკადი კედლები იბრუნებს პირვანდელ მდგომარეობას და მასში არსებულ “ზედმეტ” სითხეს გაატარებს მილში, რითაც უზრუნველყოფილია დინების უწყვეტობა.

როგორც ცნობილია, სისხლის დინებას სისხლძარღვთა სისტემაში განაპირობებს გული - როგორც რიტმულად მომუშავე ტუმბო. სისხლის დინებისათვის საჭირო საწყის წნევას უზრუნველყოფს პარკუჭის შეკუმშვა (სისტოლა), რასაც მოსდევს მოდუნების ფაზა (დიასტოლა). განვიხილოთ მოვლენები, რომლებიც მიმდინარეობს სისხლის მიმოქცევის დიდ წრეში. მარცხენა პარკუჭის ყოველ შეკუმშვაზე სისხლის გარკვეული წნევით გავსებულ აორტაში დამატებით გადაიტყორცნება გარკვეული რაოდენობის (60-70 მლ) სისხლი, შემდეგ აორტის სარქველი იხურება. დამატებითი მოცულობის სისხლი იწვევს აორტის გაჭიმვა-გაგანიერებას და წარმოქმნის წნევას, რომელსაც **სისტოლური წნევას** უწოდებენ. წნევის მომატების ეს ტალღა ვრცელდება სისხლძარღვთა გასწვრივ. მას **პულსურ ტალღას** უწოდებენ. ტალღის გავრცელების სიჩქარე ძირითადად სისხლძარღვთა კედლების დრეკადობაზეა დამოკიდებული და დაახლოებით 6-8 მ/წმ შეადგენს.

დიასტოლის დროს სისხლძარღვთა კედლები თანმიმდევრულად იკუმშება, უზრუნველვს პირვანდელ მდგომარეობას და უბიძგებს სისხლს სისხლძარღვთა მომდევნო რგოლში გადასასვლელად. ამგვარად, უზრუნველყოფილია სისხლის უწყვეტი დინება. სისხლძარღვთა კედლების დრეკადი ჯერ გაჭიმვა და შემდგომ შეკუმშვა არა მარტო დინების უწყვეტობას უზრუნველყოფს, არამედ იგი ხელს უწყობს გულის მიერ გამომუშავებული ენერგიის ეკონომიურ ხარჯვას.

გულის კუნთის შეკუმშვისას (სისტოლა, ხანგრძლივობა ~ 0,3 წმ) ენერგიის მხილოდ ნაწილი გადაეცემა აორტაში სისხლს მისი კინეტიკური ენერგიის გაზრდაზე. ენერგიის მნიშვნელოვანი ნაწილი იხარჯება სისხლძარღვთა კედლების გაჭიმვაზე და გადადის მათ პოტენციურ ენერგიაში. დიასტოლის დროს, რომლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 0,6 წმ-ია, სისხლძარღვთა კედლების პოტენციური ენერგია გადაეცემა სისხლს (გადადის სისხლის კინეტიკურ ენერგიაში) და უზრუნველყოფს მის უწყვეტ დინებას.

ჩვეულებრივ პირობებში სისხლის დინება არტერიებში ლამინარულია. ტურბულენტური დინება გამოვლინდება მხოლოდ ზოგიერთ ადგილას, მაგ., აორტის სარქველთან ახლოს. ინფექციური დავადების დროს სიბლანტის შემცირების გამო რეინოლდსის რიცხვი (35) ფორმულის თანახმად) იზრდება. ის შეიძლება მეტი გახდეს კრიტიკულ მნიშვნელობაზე და დინება ტურბულენტურში გადადის. ტურბულენტური დინების წარმოქმნისას მატულობს შინაგანი ხახუნის ძალა. იმისთვის, რომ შენარჩუნდეს სისხლის ნაკადის ნორმალური დონე, ცხადია, გულს უხდება უფრო დიდი მუშაობის

შესრულება. ტურბულენტურ დინებას თან ახლავს ხმაური (შუილი), რაც შეიძლება გამოყენებული იქნეს სადიაგნოსტიკო მიზნით.

### შუილების წარმოქმნის მექანიზმი

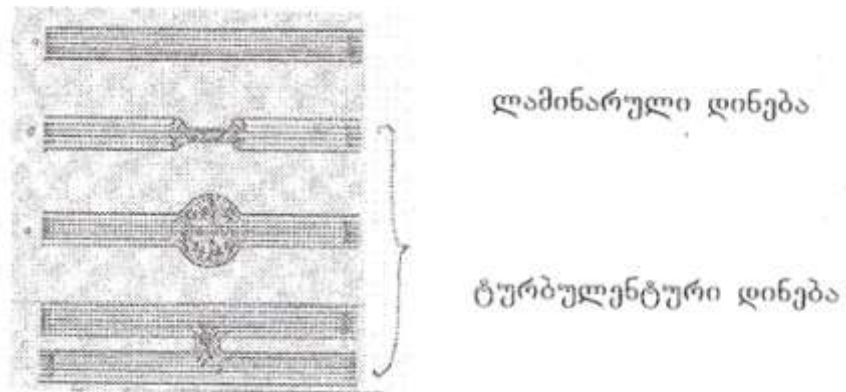
გულში შუილების წარმოქმნა შეიძლება ავხსნათ მილში სითხის მოძრაობის ფიზიკური კანონებით. ამისთვის საჭიროა სამი ფაქტორის არსებობა: 1. მილის დიამეტრის ცვლილება; 2. სითხის დინების სიჩქარე; 3. სითხის შემადგენლობა.

თუ სითხე მოძრაობს ერთნაირი დიამეტრის მილში, მუდმივი სიჩქარით, იგი იმოძრაავებს უხმაუროდ.

თუ სითხე მოძრაობს მილში ერთნაირი სიჩქარით, სადაც მცირე მონაკვეთი შევიწროვებულია, მაშინ ამ მონაკვეთის წინ და ბოლოს წარმოიქმნება ტურბულენტური მოძრაობა, სისხლძარღვში ჩნდება ათეროსკლეროზული ფოლაქი.

თუ სისხლძარღვის მცირე მონაკვეთზე გვაქვს გაფართოება (ანევრიზმა) და მასში გადის სისხლი მუდმივი სიჩქარით, ამ უბანში წარმოიშობა ასევე ტურბულენტური მოძრაობა და მივიღებთ შუილს. ამის მაგალითია აორტისა ან სხვა სისხლძარღვის ანევრიზმა.

შუილი შეიძლება წარმოიქმნას იმ შემთხვევაშიც, თუ სითხე გადის ორ მილში, რომლებიც ერთმანეთთან არიან დაკავშირებული. ამის მაგალითია ბოტალის სადინარის შეუხორცებლობა; ან არტერიო-ვენოზური ანევრიზმა.



ნახ. 17. ანევრიზმის წარმოქმნის მექანიზმი

ამასთან, რაც მეტია სითხის დინების სიჩქარე, მით ხმამაღალია შუილი. მსგავსი პირობები შეიძლება გაჩნდეს გულში სხვადასხვა პათოლოგიის დროს. ნორმაში, დიასტოლის დროს, სისხლი უხმაუროდ მოძრაობს წინაგულებიდან პარკუჭებში.

ხმაური შეიძლება მივიღოთ აორტისა და ფილტვის არტერიის დასაწყისის შევიწროების შედეგად, როდესაც სისხლი ვიწრო ხვრელში გაივლის პარკუჭოვანი სისტოლის დროს.

მსგავს შედეგთან გვაქვს საქმე სარქველების ნაკლოვანებების შედეგად. ამ შემთხვევაში სარქველი სრულად არ იხურება და სისხლი ნაწილობრივ ბრუნდება უკან.

### გულის მუშაობა და სიმძლავრე

გულის მუშაობის დროს დახარჯული ენერგია ხმარდება წნევის ძალის დაძლევის და სისხლისთვის კინეტიკური ენერგიის მინიჭებას. გამოვთვალოთ შესრულებული მუშაობა მარცხენა პარკუჭის ერთჯერადი შეკუმშვის დროს (სისხლის მიმოქცევის დიდი

წრე). იგი ორი მუშაობის ჯამის ტოლია:  $A = A_1 + A_2$ . ავლნიშნით  $V_0$ -ით სისხლის ულუფა (ერთი შეკუმშვის დროს პარკუჭიდან გამოსული სისხლის რაოდენობა). შეიძლება ჩაითვალოს, რომ სისხლის ამ მოცულობას გადატვირთვის გული  $S$  განიკვეთის აორტაში  $l$  მანძილზე,  $P$  საშუალო წნევის დროს. ამ დროს შესრულებული მუშაობა:

$$A_1 = F \cdot l = PSl = PV_0$$

ამავე დროს ამ მოცულობის სისხლს (ულუფას) მიენიჭება კინეტიკური ენერგია, რომელიც გულის მიერ შესრულებული  $A_2$  მუშაობის ტოლია.

$$A_2 = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho V_0 \cdot v^2}{2} \quad (m = \rho V)$$

სადაც  $\rho$  სისხლის სიმკვრივეა,  $v$  სისხლის სიჩქარე აორტაში. ამრიგად, მარცხენა პარკუჭის მიერ შესრულებული მუშაობა:

$$A_{\text{მარცხ}} = A_1 + A_2 = PV_0 + \frac{\rho V_0 \cdot v^2}{2}$$

რადგან მარჯვენა პარკუჭის მუშაობა მარცხენა პარკუჭის მუშაობის 0,2 ნაწილს შეადგენს, ამიტომ გულის სრული მუშაობა:

$$A = A_{\text{მარცხ}} + A_{\text{მარჯვ}} = A_{\text{მარცხ}} + 0,2 A_{\text{მარცხ}} = 1,2 (PV_0 + \frac{\rho V_0 \cdot v^2}{2})$$

ეს ფორმულა სამართლიანია ორგანიზმის როგორც მოსვენებულ, ასევე აქტიური მდგომარეობისათვის. ეს მდგომარეობები განსხვავდებიან სისხლის ნაკადის სიჩქარეებით.

თუ მუშაობის ფორმულაში შევიტანთ მასში შემავალი სიდიდეების რიცხვით მნიშვნელობებს ადვილად დავადგენთ გულის მუშაობას პერიოდის განმავლობაში. სისხლის სიმკვრივე  $\rho = 1,05 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>, სისხლი სიჩქარე აორტაში  $v = 0,5$  მ/წმ, აორტაში გადასროლილი სისხლის ულუფას თუ ჩავთვლით 80მლ-ის ტოლად  $V_0 = 80$  მლ =  $80$  სმ<sup>3</sup> =  $8 \cdot 10^{-5}$  მ<sup>3</sup>, წნევის საშუალო მნიშვნელობის  $= 13$  კპა (სისტოლის დასაწყისში  $P = 10$  კპა, დასასრულს -  $P = 16$  კპა), მაშინ გულის სრული მუშაობისათვის მივიღებთ  $A \approx 1,3$  ჯ. გული მუშაობას ასრულებს კუმშვისას, რომლის ხანგრძლივობა  $t \approx 0,3$  წმ, მაშინ სიმძლავრისათვის მივიღებთ:

$$N = \frac{A}{t} = 1,3 \text{ ჯ} / 0,3 \text{ წმ} = 4,3 \text{ ვტ}$$

ზემოთ მოყვანილი რიცხვითი მნიშვნელობები შეესაბამება გულის მუშაობას ნორმალურ პირობებში. როდესაც ფიზიკური დატვირთვა იზრდება შესაბამისად იზრდება სისხლის  $V_0$  მოცულობა და სიჩქარე  $v$  აორტაში. ასეთ პირობებში ცხადია გაიზრდება გულის მუშაობაც. მუშაობის  $A_2$  ნაწილი (კინეტიკური კომპონენტი) უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე  $A_1$  ნაწილი, რადგან  $A_2$  სიჩქარის კვადრატის ფუნქციაა.

გულის მარგი ქმედების კოეფიციენტი 14-25% შეადგენს, რაც მიუთითებს მნიშვნელოვან ენერგეტიკულ დანახარჯებზე. მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ)  $\eta = A_{\text{სასარ}} / A_{\text{მთლ}} \cdot 100\%$  ფიზიკური დატვირთვის დროს გულის მქკ მატულობს, არტერიული წნევის მატებისას დატვირთვა გულზე იზრდება, ხოლო მქკ კლებულობს. ამიტომ

გულის მუშაობის შემსუბუქების მიზნით სასურველია არტერიული წნევა იყოს დაბალი, ხოლო პარკუჭებიდან სისხლის განდევნა მეტი.

**გულის წუთმოცულობა.** გულის წუთმოცულობა წარმოადგენს სისხლის რაოდენობას, რომელსაც გადაისვრის მარცხენა პარკუჭი აორტაში ერთი წუთის განმავლობაში და იგი დამოკიდებულია შემდეგ ფიზიკურ ფაქტორებზე:

- სისხლის რაოდენობაზე, რომელიც მიედინება მარჯვენა წინაგულიდან;
- გულის დაჭირხვნის ფუნქციაზე, რომელიც განპირობებულია მიოკარდის კუმშვადი ფუნქციით;
- საერთო პერიფერიული წინაღობაზე;

გულის, როგორც ტუმბოს მუშაობის ეფექტურობა განისაზღვრება იმით, თუ რამდენად სრულად გადატუმბავს იგი სისხლს, რომელიც მიედინება გულის ღრუ ვენებით. ნორმაში გული 1 წუთში გადატუმბავს 5-6 ლიტრ სისხლს პერიფერიული წინაღობის გაზრდას მოსდევს გულის კუმშვითი მოცულობის შემცირება. გამოიანგარიშეთ დღე-ღამეში გადატუმბული სისხლის მოცუობა!

გულის წუთმოცულობა ასახავს მთლიანად ორგანიზმის მიერ სისხლის მოხმარებას, მაგრამ ცნობილია, რომ სხვადასხვა ორგანიზმსა და ქსოვილებში ნივთიერებათა ცვლა მიმდინარეობს სხვადასხვანაირად. მაგ. მეტაბოლიტური გარდაქმნები მაქსიმალურია ღვიძლში, ტვინსა და გულში. ღვიძლი წუთში იღებს 1500მლ სისხლს, გული - 250მლ, ტვინი - 750მლ სისხლს, თირკმელი - 1300მლ. როცა ადამიანის მასა არის 60კგ. სხვა დანარჩენი ორგანოებისა და კუნთოვანი ქსოვილის მთელ მასაზე მოდის მხოლოდ 1400-1500მლ. თუ გადავიყვანთ მიღებულ რიცხვებს 100გ ქსოვილზე, მივიღებთ შემდეგს:

100გრ ღვიძლის ქსოვილი იღებს 57,7მლ სისხლს, თირკმელი 420,0მლ, ტვინი - 53,6მლ. გულის კუნთი 84,0მლ, ჩონჩხის კუნთი 2,7მლ. სხვა ქსოვილები 1,4მლ, ხოლო მთელი ორგანიზმის ყოველ 100 გრამზე მოდის საშუალოდ 8,6მლ.

### **სისხლისა და სისხლძარღვთა კედლის მექანიკური (რეოლოგიური) თვისებები**

სისხლძარღვთა კედელი სამი ტიპის ქსოვილს - ელასტიკის, კოლაგენისა და გლუვი კუნთის ბოჭკოსაგან შედგება. ელასტიკი, რეზინის მსგავსად, ძალიან დიდი ჭიმვადობით ხასიათდება (დეფორმაციის სიდიდე 200-300%-ს აღწევს). სუფთა კოლაგენის ჭიმვადობა მცირეა (10%-მდე). გლუვი კუნთის ბოჭკოები იცვლიან სიგრძეს (იკუმშებიან) ნერვული, ან ქიმიური ზემოქმედებით. ჩამოთვლილი სამი ძირითადი კომპონენტის შემცველობა სისხლძარღვის ქსოვილში სხვადასხვა ადგილას განსხვავებულია. გულის სიახლოვეს ელასტიკისა და კოლაგენის თანაფარდობაა 2:1, ბარდაყის არტერიაში კი - 1:2. გულიდან დაშორებასთან ერთად აორტის კედელში მატულობს გლუვი კუნთის ბოჭკოების შემცველობა, არტერიაში კი ის უკვე ძირითადი კომპონენტია.

სისხლძარღვთა აქტიურ მოქმედებას განაპირობებს გლუვი კუნთი. მისი შეკუმშვის შედეგად იცვლება შესაბამისი სისხლძარღვის დიამეტრი და სისხლძარღვთა კედლის მექანიკური თვისებები. ასეთი სახით ხდება სისხლის ნაკადის ოპტიმალური განაწილება და რეგულირება.

სისხლძარღვთა სისტემაში სისხლის დინების ხასიათს ძირითადად განსაზღვრავს სისხლისა და სისხლძარღვთა კედლის ურთიერთქმედება. ამ პროცესში კი მთავარ როლს ასრულებს სისხლძარღვთა განლაგება და სისხლისა და სისხლძარღვთა კედლის რეოლოგიური თვისებები.

დადგენილია, რომ სისხლძარღვთა კედლები ბლანტი-დრეკადი თვისებებით ხასიათდება. ის პრაქტიკულად არ მოკლდება. გლუვი კუნთის შეკუმშვა იწვევს სისხლძარღვთა კედლის სიხისტის მატებას. აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ მცირე ზომის არტერიების გლუვ კუნთებს თვითაგზნების და შესაბამისად, საკუთარი ტონუსის (შეკუმშვის ხარისხის) მატების უნარი ახასიათებს.

სისხლძარღვთა კედლების სიმტკიცე გაზრდილი წნევის მიმართ, ემყარება ლაპლასის კანონებს. მისი მტკიცებით, ღრუ ჭურჭელში წნევა უდრის მისი კედლების დაძაბულობის (T) შეფარდებას რადიუსთან (r) შესაბამისად, სისხლძარღვებში

$$P = \frac{T}{r}; \quad T = Pr, \text{ რაც ნიშნავს:}$$

- წნევის მატება იწვევს კედლების დაძაბულობის (T) მატებას;
- ვინაიდან წნევა უკუპროპორციულია რადიუსის, აქედან გამომდინარე, უფრო წვრილ სისხლძარღვებს აქვთ უნარი გაუძლონ უფრო დიდ წნევას;
- დაძაბულობა (T) რადიუსის (r) პირდაპირპროპორციულია ( $T = Pr$ ), ე.ი. რაც მეტია რადიუსი, მით მეტია კედლების დაძაბულობა და პირიქით;

ლაპლასის თეორიის მიხედვით, მცირე ზომის სისხლძარღვებსა და გულის სისხლძარღვებს აქვთ უნარი გაუძლონ მომატებულ წნევას, დიდი დიამეტრის სისხლძარღვებთან შედარებით.

ლაპლასის კანონები მართებულია პასიური დაძაბულობის დროს, როდესაც იგი დამოკიდებულია სისხლძარღვთა კედლების სტრუქტურისაგან, მათში კოლაგენისა თუ ელასტინის შემცველობაზე.

სისხლი პლაზმაში შეტივტივებული ფორმიანი ელემენტების სუსპენზიაა. ძირითადი ფორმიანი ელემენტებია: სისხლის წითელი სხეულაკები - ერითროციტები, სისხლის თეთრი სხეულაკები - ლეიკოციტები და თრომბოციტები.

პლაზმა მცირე კონცენტრაციით შეიცავს მრავალ დაბალმოლეკულურ ორგანულ და არაორგანულ ნაერთებს და 7%-მდე ცილებს.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, მართებული იქნება დასკვნა: სისხლის რეოლოგიური თვისებები ძირითადად დამოკიდებულია პლაზმისა და ერითროციტების მექანიკურ თვისებებზე და ერითროციტების ფარდობით მოცულობაზე (ნორმალურ პირობებში ის სისხლის მოცულობის 45%-ის ტოლია).

0,1 სმ-დან 1 სმ-მდე დიამეტრის სისხლძარღვებთან შედარებით ერითროციტების ზომა გაცილებით მცირეა ( $8 \cdot 10^{-4}$  სმ), ამიტომ სისხლი ამ შემთხვევაში შეიძლება ერთგვაროვან სითხედ ჩავთვალოთ. ასეთი დაშვება, ცხადია, არ იქნება მართებული წვრილი სისხლძარღვებისა და კაპილარებისათვის.

**პულსური ტალღა.** გული შეკუმშვისას (სისტოლის ფაზა) განსაზღვრული მოცულობის სისხლს გადაისვრის აორტაში და მისგან გამოსულ არტერიებში.

სისხლძარღვთა კედელი რომ ხისტი (მაგარი) იყოს, აორტის დასაწყისში წარმოქმნილი წნევა პერიფერიულ სისხლძარღვებს გადაეცემოდა ბგერის სიჩქარით. მაგრამ სისხლძარღვთა კედელი დრეკადია. აორტაში გადასროლილი სისხლი ჭიმავს როგორც მის, ასევე არტერიებისა და ატერიოლების კედელს.

დიდი სისხლძარღვები სისტოლის დროს, პერიფერიაში გადადენილთან შედარებით, უფრო მეტი მოცულობის სისხლს ღებულობს. დიასტოლის დროს სისხლძარღვი

აღიდგენს საწყის ზომას, ხოლო გაჭიმვისას შემცირებული პოტენციალური ენერგია სისხლის კინეტიკურ ენერგიად გარდაიქმნება.

სისხლძარღვთა კედლის ზომის (დიამეტრის) პერიოდული ცვლილება იწვევს სისხლის წნევის შესაბამის ცვლილებას (პულსურ რხევას). ასეთი პროცესი მთელი სისხლძარღვის გასწვრივ ვითარდება (კაპილარების გარდა - ისინი არ პულსირებენ).

წნევის პულსური რხევის გავრცელებას სისხლძარღვების გასწვრივ, **პულსური ტალღა** ეწოდება.

პულსური ტალღა 5-10 მ/წმ და უფრო მეტი სიჩქარითაც ვრცელდება. სისხლის დინების სიჩქარე (0,3-0,5 მ/წმ), ცხადია, გაცილებით მცირეა. სისტოლის განმავლობაში (დაახლოებით 0,3 წმ) ტალღა 1,5-3 მ მანძილზე გავრცელდება. ეს იმას ნიშნავს, რომ პულსური ტალღის ფრონტი კიდურებს აორტაში წნევის დაცემამდე (დიასტოლამდე) უფრო ადრე მიაღწევს.

### სისხლის მოძრაობა ბლანტ სითხეში. სტოქსის კანონი

სიბლანტე დინამიური მოვლენაა. ის ვლინდება სითხის დინებისას, ან მასში სხეულის მოძრაობის დროს. სითხეში მცირე სიჩქარით მოძრავ სხეულზე მომქმედი წლნაადმდეგობის ძალისათვის ნიუტონის განტოლება მართებულია. შინაგანი ხახუნის ძალა სიბლანტის პროპორციულია და დამოკიდებულია სითხეში მოძრავი სხეულის სიჩქარეზე და მის ზომებზე.

სითხეში სფერული სხეულის მოძრაობის შემთხვევაში, სტოქსის კანონის თანახმად, შინაგანი ხახუნის ძალა

$$F=6\pi\eta r \cdot v \quad (17. 1)$$

სადაც  $v$  სხეულის მოძრაობის სიჩქარეა,  $r$  - მისი რადიუსი,  $\eta$  - სითხის სიბლანტე.

მარტივი მსჯელობით შეიძლება დავამტკიცოთ, სითხეში რომ ბურთულას ვარდნის სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$v = \frac{2(p_{sb} - P_{სით}) r^2 g}{9\eta} \quad (37)$$

ამ ფორმულაში  $P_{sb}$  და  $P_{სით}$  სხეულის (ბურთულას) და სითხის სიმკვრივეა,  $g$  - სიმძიმის ძალის აჩქარება. ზემოთ განხილული ფორმულა უდევს საფუძვლად სისხლის სიბლანტის გაზომვის ერთ-ერთ მეთოდს.

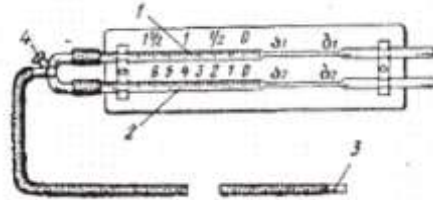
### სითხის სიბლანტის გაზომვა. სისხლის კლინიკური მეთოდი.

#### ერთროგიტების დალექვის სიჩქარე

სითხეების სიბლანტეს ვისკოზიმეტრის მეთოდით ზომავენ. სისხლის სიბლანტის გასაზომად იყენებენ კაპილარული ვისკოზიმეტრის მეთოდს, რომელიც პუაზეილის ფორმულის საფუძველზეა დამუშავებული. მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს: ზომავენ სიმძიმის ძალის მოქმედებით კაპილარში გარკვეული მოცულობის სისხლის ჩამოდინების დროის ინტერვალს. შემდეგ პუაზეილის ფორმულის მეშვეობით გამოითვლიან სიბლანტეს (ფორმულაში შემავალი სხვა სიდიდეები მოცემულია). სიბლანტის გაზომვის მეორე მეთოდი - ბურთულას ვარდნის მეთოდი სტოქსის

კანონზეა დაფუძნებული. სპეციალური ვისკოზიმეტრით ზომავენ ბურთულას თანაბარი ვარდნის სიჩქარეს გამოსაკვლევ სითხეში. (37) ფორმულის მეშვეობით, იციან რა მის მარჯვენა ნაწილში შემავალი სიდიდეები, გამოთვლიან სიბლანტეს (17).

ამჟამად კლინიკაში სისხლის სიბლანტის გაზომვისათვის იყენებენ ჰესის ვისკოზიმეტრს.



ნახ. 18. ჰესის ვისკოზიმეტრი

ეს ვისკოზიმეტრი შედგება ორი პარალელურად განლაგებული ერთნაირი კაპილარისაგან. თითოეულ მათგანთან მიერთებულია დანაყოფებიანი მილი. მილები სამმაგი ონკანის მეშვეობით შეერთებულია რეზინის მილთან. ონკანს დავაყენებთ ისე, რომ რეზინის მილით დისტილირებული წყალი შევიწვოთ პირველ კაპილარში გარკვეულ, ვთქვათ, 0 დანაყოფამდე. შემდეგ ონკანს გადავრთავთ მეორე კაპილარზე და შევიწვოთ სისხლს ისევ 0 დანაყოფამდე. მესამე მდგომარეობაში ონკანი გახსნილია ორივე კაპილარისათვის. სითხეებს ერთდროულად შევიწვოთ ისე, რომ სისხლი ავიდეს I დანაყოფამდე. ვინაიდან სითხეების სიბლანტე განსხვავებულია, წყლის აწევის დონე და, შესაბამისად, მისი მოცულობა მილში სხვა იქნება. პუაზეილის ფორმულის მარტივი გარდაქმნით ვღებულობთ:

$$\frac{V_{\text{წყ}}}{V_{\text{სისხ}}} = \frac{\eta_{\text{სისხ}}}{\eta_{\text{წყ}}}$$

სადაც  $V_{\text{წყ}}$  და  $V_{\text{სისხ}}$  მილებში წყლისა და სისხლის მოცულობაა, ხოლო  $\eta_{\text{წყ}}$  და  $\eta_{\text{სისხ}}$  - მათი სიბლანტეები. ცდის დროს გაზომილი მოცულობების ფარდობა ტოლი იქნება სიბლანტეთა შებრუნებული ფარდობისა (უკუპროპორციული დამოკიდებულება).

ამ შეფარდებას სისხლის ფარდობით სიბლანტეს უწოდებენ. ადამიანის სისხლის სიბლანტე ნორმაში 0,4-0,5 პა·წმ-ის ფარგლებშია. დაავადების შემთხვევაში სიბლანტე მკვეთრად იცვლება: 0,17-დან - 2,29 პა. წმ-მდე. ამის გამო იცვლება ერთროციტების დალექვის სიჩქარეც. ვენური სისხლის სიბლანტე მეტია არტერიულთან შედარებით. ტიფის და ტუბერკულოზის დროს სისხლის სიბლანტე მცირდება, სხვა ზოგიერთი დაავადების დროს კი მატულობს. მძიმე ფიზიკური შრომის დროს სისხლის სიბლანტე იზრდება, ამიტომ, ცხადია, გულს უფრო მეტი მუშაობის შესრულება უხდება.

**ერთროციტების დალექვის სიჩქარე.** თუ ვერტიკალურად დადგმულ მინის კაპილარულ მილში მოვათავსებთ სისხლს, რომელსაც დამატებული აქვს შედედების საწინააღმდეგო პრეპარატი, ერთროციტები წარმოქმნიან მონეტების სვეტს და დაიწყებენ დალექვას მილის ფსკერზე. კლინიკურ ლაბორატორიებში ზომავენ მანძილს, რომელზეც წაინაცვლებს (აიწევს) ერთროციტების მიერ დაკავებული მოცულობის ზედა საზღვარი პირველი ერთი საათის განმავლობაში. ამ სიდიდეს სადიაგნოსტიკო მიზნით იყენებენ და მას ერთროციტების დალექვის სიჩქარეს (ედს) უწოდებენ - ნორმაში ედს პირობითად მიღებულია 10 მმ/სთ-ის ტოლად.



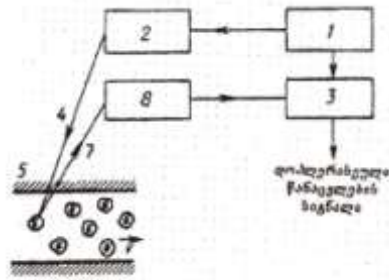
სხვადასხვა დავადების დროს ედს შეიძლება გაიზარდოს სამჯერ და უფრო მეტად. პლაზმაში ერთდროულად მატულობს ფიბროგენისა და გლობულინების კონცენტრაცია. ეს ცილები ხელს უწყობს ერთროციტების მომენტების სვეტის წარმოქმნას. მკვლევართა ვარაუდით, ასეთი აგრეგატების დალექვა უნდა იყოს ერს-ს გაზრდის მიზეზი. ეს ფაქტორი არ არის გამოწვეული პლაზმის სიბლანტის მატებით. პლაზმის სიბლანტის გაზრდამ უნდა გამოიწვიოს ედს-ს შემცირება.

### **სისხლის წნევისა და დინების სიჩქარის გაზომვა**

არტერიებში სისხლის ლამინარული დინება „ჩუმი“ პროცესია, ტურბულენტური კი, პირიქით - „ხმაურიანი“; თუ რაიმე ზემოქმედებით სისხლის დინებას არტერიაში ტურბულენტურში გადავიყვანთ, მასზე სტეტოსკოპის (ფონენდროსკოპის) დადებით შეგვიძლია მოვისმინოთ მახასიათებელი ბგერები. სწორედ ეს უდევს საფუძვლად სისხლის წნევის გაზომვის ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს - კოროტკოვის მეთოდს. მეთოდი უსისხლოა, მაგრამ არაპირდაპირი. სინამდვილეში ზომავენ ორ განსხვავებულ წნევას - სისტოლურ (მაქსიმალურ) და დიასტოლურ (მინიმალურ) წნევას.

არტერიის ნებისმიერი ხელოვნური შეკუმშვა (გადაჭერა) ტურბულენტური დინების წარმოქმნას იწვევს. წნევას მხრის არტერიაში ზომავენ. ხელზე, იდაყვის ზემოთ, შემოახვევენ გასაბერ ფართო მანჟეტს, შემდეგ მასში ჩქტუმბავენ ჰაერს. მანჟეტში წნევა ატმოსფერულზე მეტი ხდება. გარკვეულ წნევაზე მანჟეტი გადაკეტავს არტერიას და მასში სისხლის დინება შეწყდება. გასაბერი მანჟეტის მეორე რეზინის მილი შეერთებულია წნევის გამზომ ხელსაწყოსთან (ვერცხლის-წყლიანი სტიგომანომეტრი, ან სფიგომანომეტრი მეტალის მემბრანით); შემდეგ მანჟეტის სარქველს ცოტათი გახსნიან, ჰაერი გამოსვლას დაიწყებს და მასში წნევა თანდათან კლებულობს. მანჟეტში ჰაერის გარკვეულ წნევაზე, რომელიც სისტოლურ წნევაზე ნაკლებია, სისხლი გადაკეტილ არტერიაში გასვლას დაიწყებს. დინება ამ დროს ტურბულენტურია ბგერების მოსმენის მიზნით სტეტოსკოპის მემბრანას ათავსებენ არტერიაზე. მანომეტრზე ფიქსირდება პირველივე ბგერის შესაბამის წნევა. ეს მაქსიმალური (სისტოლური) წნევაა; მანჟეტიდან ჰაერის გამოშვება გრძელდება. გარკვეულ წნევაზე სტეტოსკოპში ბგერა შეწყდება - დინება ლამინარულში გადადის. სწორედ ეს წნევაა მინიმალური, ანუ დიასტოლური წნევა. ფიზიკური სიდიდე - წნევა დიდ როლს ასრულებს სხვადასხვა დავადების დიაგნოსტიკაში.

ზოგიერთი დავადების დროს სისხლის დინების სიჩქარე იცვლება ექიმის ჩარევის გარეშე; მას შეიძლება შეუქცევადი ხასიათი ჰქონდეს. ასეთ შემთხვევაში სისხლის დინების სიჩქარის განსაზღვრა ექიმს ეხმარება სწორი დიაგნოზის დასმაში. დღეისათვის სისხლის დინების სიჩქარის გაზომვისათვის რამდენიმე მეთოდი დამუშავებული. ერთ-ერთი მათგანი - ულტრაბგერითი - დოპლერის ეფექტზეა დაფუძნებული. დანადგარის ბლოკსქემა 19-ე სურათზეა ნაჩვენები.



ნახ.19. სისხლის დინების სიჩქარის გაზომვის ულტრაბგერითი მეთოდი

ულტრაბგერის გენერატორიდან (1) სიგნალი მიეწოდება სიხშირის შედარების ბლოკს (3) და ულტრაბგერის გამომსხივებელს (2) ულტრაბგერითი ტალღები (4) შეაღწევს სისხლძარღვებში (5) და აირეკლება მოძრავი ერთროციტებიდან (6); არეკლილი ტალღა (7) ეცემა მიმღებ მოწყობილებას (8), საიდანაც სიგნალი შედის სიხშირის შედარების ბლოკში. არეკლილი და გენერატორის მიერ გამოსხივებული ტალღების სიხშირეთა შედარების საფუძველზე ხდება სიხშირეთა დოპლერისული წანაცვლების განსაზღვრა. ერთროციტების სიჩქარეს განსაზღვრავენ ფორმულით  $V_{\text{ე}} = V_{\text{ულ}} / 2 \cdot \Delta v_{\text{დ}} / v_{\text{ულ}}$ ; სადაც  $V_{\text{ულ}}$  - ულტრაბგერის სიჩქარეა,  $\Delta v_{\text{დ}}$  - დოპლერის წანაცვლება,  $v_{\text{ულ}}$  - ულტრაბგერის სიხშირეა. დიდ სისხლძარღვებში ერთროციტების სიჩქარე სხვადასხვაა: კედელთან ის მინიმალურია, ცენტრში - მაქსიმალური. ულტრაბგერითი ტალღა აირეკლება განსხვავებული სიჩქარით მოძრავი ერთროციტებიდან, ამიტომ დოპლერისული წანაცვლება მიიღება არა ერთი სიხშირის, არამედ სიხშირეთა განსაზღვრული ინტერვალის სახით ეს საშუალებას გვაძლევს გავზომოთ არამარტო საშუალო სიჩქარე, არამედ სისხლის სხვადასხვა ფენის მოძრაობის სიჩქარეც.

## ლექცია VI

### ბიოლოგიური სისტემების თერმოდინამიკა

#### ბიოლოგიური თერმოდინამიკის საგანი

ცოცხალი მატერიის წარმოშობისა და განვითარების, მისი აგებულობის და ფუნქციონირების პრობლემის შესწავლისთვის უდიდესი მნიშვნელობა ენიჭება იმ კანონების დადგენას, რომლებიც საფუძვლად უდევს ცოცხალ სისტემებში ენერჯის მიღებას გარემო არედან, მის გარდაქმნას, შენახვასა და გამოყენებას.

სწორედ ამ საკითხების გადაჭრაა ბიოფიზიკური მეცნიერების შედარებით ახალი დარგის - ბიოლოგიური თერმოდინამიკის ძირითადი ამოცანა.

კვლევის თერმოდინამიკური მეთოდები თავისი არსით სტატისტიკური მეთოდებია. როგორ უნდა გავიგოთ ეს? ეს იმას ნიშნავს, რომ თერმოდინამიკა სწავლობს ენერჯის მიღებასა და გარდაქმნას მაკროსკოპულ სხეულებში, ე.ი. ისეთ სხეულებში, რომლებიც შედგებიან ატომებისა და მოლეკულების ძალიან დიდი რიცხვისაგან. როგორც ცნობილია, ნებისმიერი ნივთიერების მოლი ნორმალურ პირობებში შეიცავს  $6.02 \cdot 10^{23}$

მოლეკულას (ავოგადროს რიცხვი). ამიტომ ცხადია, რაგინდ მცირე უნდა იყოს მიკროსკოპული, მასში ნაწილაკთა რიცხვი ძალიან დიდია.

ისეთ სხეულს ან სხეულთა ჯგუფს, რომლებიც გარემოსაგან შეიძლება გამოვყოთ რაიმე სახის საზღვრით, სისტემას უწოდებენ. თუ ასეთი სისტემის მდგრადობას ვსწავლობთ თერმოდინამიკური პარამეტრების - ტემპერატურის, წნევის ან თერმოდინამიკური ფუნქციების (ენერგია, ენტროპია და სხვა) მეშვეობით, მაშინ მას თერმოდინამიკურ სისტემას უწოდებენ.

ცხადია, არავითარი აზრი არა აქვს სისტემის ერთი მოლეკულის ტემპერატურას, ან წნევას. თერმოდინამიკური მეთოდის სტატისტიკური ხასიათი სწორედ იმაში გამოიხატება, რომ მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეები, ვთქვათ, იგივე ტემპერატურა და წნევა, ასახავს სისტემის შემადგენელი, ძალიან დიდი რიცხვი მოლეკულების ურთიერთქმედებას.

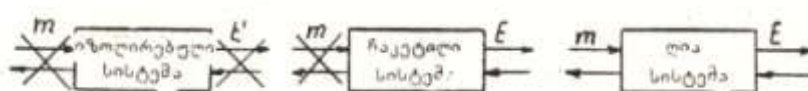
გარემოსა და სისტემის გამყოფი საზღვრის თვისების მიხედვით სისტემა შეიძლება იყოს იზოლირებული, ჩაკეტილი ან ღია.

თუ სისტემა გარემოსთან არ ახორციელებს ნივთიერებისა და ენერგიის გაცვლას, მას იზოლირებულს უწოდებენ.

სისტემა ჩაკეტილია, თუ იგი გარემოსთან ახორციელებს მხოლოდ ენერგიის გაცვლას.

იმ შემთხვევაში, როდესაც სისტემასა და გარემოს შორის მიმდინარეობს როგორც ენერგიის, ისე ნივთიერების ცვლა, მას ღიას უწოდებენ.

თერმოდინამიკური სისტემები სქემატურად შეიძლება წარმოვიდგინოთ ქვემოთ მოყვანილი სახით, სადაც  $E$  არის ენერგია,  $m$  – ნივთიერების მასა.



ნახ.20

ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესები ექვემდებარება ფიზიკურ კანონებს. ჩვენთვის ეს ცხადია და ბიოლოგიური თერმოდინამიკის მიზანი არ არის მტკიცება. მაშ, რას შეისწავლის ბიოლოგიური თერმოდინამიკა?

ბიოლოგიური თერმოდინამიკა სწავლობს საკითხს - როგორ მუშაობს ესა თუ ის ბიოლოგიური სისტემა, როგორია მათში პროცესების მიმართულება.

იმის ცოდნას კი, თუ როგორი მიმართულებით ვითარდება პროცესი (განსაკუთრებით რაიმე პათოლოგიის დროს), დიდი მნიშვნელობა აქვს ბიოლოგიისა და მით უფრო მედიცინისათვის.

მაგრამ ბიოლოგიურ თერმოდინამიკას არ შეუძლია პასუხის გაცემა კითხვაზე - როგორია პროცესის ბუნება, მისი მექანიზმი?

მოვიყვანოთ ასეთი მაგალითი: როგორც ვიცით, წყალში მიმდინარეობს რეაქცია - გლუკოზა - 1 - ფოსფატი → გლუკოზა +P არაორგან.

თერმოდინამიკას შეუძლია დაამტკიცოს, რომ თავისთავად პროცესი უნდა წარიმართოს ასეთი გზით და არა საპირისპირო მიმართულებით. მაგრამ იგი ვერ ხსნის ამ პროცესის მექანიზმს.

უფრო კონკრეტულად, ბიოლოგიური თერმოდინამიკა სწავლობს ცოცხალ ორგანიზმში მიმდინარე პროცესებს ორი ძირითადი მიმართულებით:

1. ენერგეტიკული გარდაქმნის გამოთვლა ცოცხალ ორგანიზმებში, ცალკეულ ორგანოში და უფრო მარტივი ორგანიზაციის ბიოლოგიურ სისტემებში, ბიოლოგიური პროცესების მარგი ქმედების კოეფიციენტის გამოთვლა, ბიოქიმიური ნაერთების კავშირის ენერჯის განსაზღვრა.

2. ცოცხალი ობიექტების, როგორც ღია, არაწონასწორული თერმოდინამიკური სისტემების, გამოკვლევა მათში მიმდინარე შეუქცევადი რეაქციების გათვალისწინებით.

მაშასადანე, როგორც ვხედავთ, თერმოდინამიკური მიდგომა შეიძლება მეტად პროდუქტული გამოდგეს როგორც ცალკეული პროცესის კვლევის დროს, ასევე მთლიანი ბიოლოგიური სისტემების ქცევისა და ფუნქციონირების შესწავლის საქმეში.

ცოცხალი სისტემების თერმოდინამიკური მეთოდებით კვლევას ახასიათებს გარკვეული თავისებურებანი. დავიწყოთ იქედან, რომ კლასიკური თერმოდინამიკა იხილავს იზოლირებულ სისტემებს. ზუსტი გაგებით, სისტემის იზოლაციის მიღწევა, ალბათ, შეუძლებელია. ბიოლოგიის სფეროში კი ასეთი ტერმინი საერთოდ გაუგებარია. ცოცხალი სისტემა გარემოსთან ახორციელებს როგორც ენერჯის, ასევე ნივთიერების ცვლას და ამიტომ იგი ღია სისტემაა.

მეორე მხრივ, კლასიკური თერმოდინამიკის კანონები მართებულია წონასწორობის მდგომარეობაში მყოფი სისტემისათვის. ცოცხალი სისტემები კი ღია არაწონასწორულ მდგომარეობაშია, ვინაიდან მათი ფუნქციონირება თერმოდინამიკური წონასწორობის მდგომარეობის, ე.ი. ისეთი მდგომარეობის დროს, როცა არ ხდება გარემოსთან მასისა და ენერჯის ცვლა და ყველა ფიზიკური პარამეტრი მუდმივია დროში, შეუძლებელია. თერმოდინამიკური წონასწორობა დამყარდება მხოლოდ ორგანიზმის სიკვდილის შემდეგ.

ცოცხალ სისტემებში მიმდინარე მოვლენებს სწავლობს მეცნიერების დარგი, რომელსაც შეუქცევადი პროცესების თერმოდინამიკას ან არაწონასწორულ თერმოდინამიკას უწოდებენ.

აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ არაცოცხალი სისტემებისაგან განსხვავებით, ბიოლოგიური სისტემები შედგება მრავალრიცხოვანი კომპონენტებისაგან. მასთან, ჩვენ არ შეგვიძლია ცოცხალი სისტემებიდან რომელიმე კომპონენტის გამოყოფა ისე, რომ

ამან არ გამოიწვიოს მისი თვისებების მნიშვნელოვანი ცვლილება, ან ზიგ შემთხვევაში სრული გაქრობა (მაგალითად, ბიოპოლიმერთა ან სხვა სტრუქტურების თვისებების შესწავლისას სინჯარაში არ შეგვიძლია ვამტკიცოთ, რომ მათ ზუსტად ასეთივე თვისებები ექნება ორგანიზმშიც).

ზემოთ ვახსენეთ შექცევადი და შეუქცევადი პროცესები. როგორ პროცესს შეიძლება ვუწოდოთ შექცევადი?

ვთქვათ, სისტემა გადადის რაიმე მდგომარეობიდან სხვა მდგომარეობაში გარკვეული რაოდენობის მუშაობის დახარჯვით. თუ იგივე რაოდენობის მუშაობის შესრულებით სისტემას შეუძლია დაუბრუნდეს საწყის მდგომარეობას, მაშინ ასეთ პროცესს შექცევადი ეწოდება. სხვანაირად რომ ვთქვათ, შექცევადი პროცესის დროს საწყის მდგომარეობაში დასაბრუნებლად სისტემას არ სჭირდება ენერჯის დამატებით ხარჯი.

თუ იგივე რაოდენობის მუშაობის შესრულებით სისტემა ვერ უბრუნდება საწყის მდგომარეობას, ასეთ პროცესს შეუქცევადს უწოდებენ. ეს იმას ნიშნავს, რომ შეუქცევადი პროცესის შემთხვევაში სისტემის საწყის მდგომარეობაში გადასაყვანად აუცილებელია ენერჯის დამატებითი ხარჯი.

ასეთი გაგებით, შექცევადი პროცესი მიმდინარეობს როგორც პირდაპირი, ისე უკუ მიმართულებით. შეუქცევადი პროცესები კი მიმდინარეობს მხოლოდ ერთი მიმართულებით. ზისტად თუ ვიმსჯელებთ, შექცევადი პროცესის მიღწევა შეუძლებელია, შეიძლება მხოლოდ გარკვეული დაშვებით მივუახლოვდეთ მას. უფრო სწორი უქნება, თუ ვიტყვით: ყველა რეალური პროცესი შეუქცევადი ხასიათისაა.

### ორგანიზმის სითბური ენერჯია

ბიოლოგიური სისტემები, როგორც ადრე აღვნიშნეთ, ღია თერმოდინამიკური სისტემებია და იმყოფება არაწონასწორულ მდგომარეობაში. ასეთი მდგომარეობის შენარჩუნებისათვის აუცილებელია მუდმივი ენერჯეტიკული დანახარჯი. ენერჯიას კი სისტემა ღებულობს გარემოდან ძირითადად საკვები პროდუქტების სახით. მათი „წვის“ დროს გამოყოფილი ენერჯია ხმარდება ცოცხალ სისტემაში მიმდინარე თითქმის ყველა სახის პროცესის რეალიზაციას. ექსპერიმენტული მონაცემებით დასტურდება, რომ პროცესთა უმეტესობის მარგი ქმედების კოეფიციენტი საკმაოდ დაბალია. ამის ერთ-ერთი ძირითადი მიზეზი იმაში მდგომარეობს, რომ ენერჯის მნიშვნელოვანი ნაწილი ხმარდება ცოცხალი სისტემის სითბური ენერჯის შენარჩუნებას. მასთან, ენერჯის გარდაქმნის პროცესი ცოცხალ ორგანიზმში ხორციელდება რამდენიმე სტადიის გავლით. ეს აუცილებლობაა, ვინაიდან, ვთქვათ, გლუკოზას ან ცხიმოვანი მჟავას დაჟანგვა ერთ სტადიაში რომ მომხდარიყო, რამდენიმე ასეულ კჯ გამოყოფილ სითბოს ორგანიზმი სასარგებლოდ ვერ გამოიყენებდა, ტემპერატურა მკვეთრად აიწევდა და უჯრედი დაიღუპებოდა.

სითბურ ენერჯიას ხშირად უწოდებენ ენერჯის დეგრადირებულ, გაუფასურებულ სახეს. უნდა აღვნიშნოთ, რომ ასეთი გამოთქმა არ შეესაბამება მოვლენის რეალურ არსს.

სითბური ენერჯის განუწყვეტელი გენერაცია ერთ ერთი ძირითადი და აუცილებელი პირობაა ცოცხალი და მით უმეტეს მაღალორგანიზებული სისტემების აქტიური ფუნქციონირებისათვის. გავიხსენოთ, რომ ცოცხალ ორგანიზმთა უმრავლესობას ნორმალური ფუნქციონირება შეუძლია ტემპერატურის საკმაოდ მცირე შუალედში. უფრო მცირეა ეს შუალედი ორგანიზმში რეაქციების (განსაკუთრებით ფერმენტული რეაქციების) მიმდინარეობისათვის.

მართალია, ორგანიზმი სითბურ ენერჯიას ვერ იყენებს მუშაობის შესრულებისათვის, მაგრამ, მეორე მხრივ, ამ ერთი შეხედვით გაუფასურებული ენერჯის გარეშე შეუძლებელი გახდებოდა მუშაობის შესრულება და ორგანიზმის ფუნქციონირება საერთოდ.

ორგანიზმი ღია სისტემაა, იგი განსაკუთრებულ მდგომარეობაშია - სტაციონარულ მდგომარეობაში. ამ მდგომარეობის შენარჩუნება კი შეუძლებელია სითბური ენერჯის ხარჯის გარეშე.

ცოცხალ ორგანიზმებში სითბური ენერჯის პროდუცირება დაკავშირებულია იმ რეაქციებთან, რომელიც თან სდევნენ სისტემაში მიმდინარე ბიოქიმიურ პროცესებს. სითბოს გამოყოფა ხდება მჟავებისა და ტუტეების ნეიტრალიზაციის დროს, ნივთიერების გახსნისას, იონიზაციისა და ქიმიური ნაერთების წარმოქმნის დროს და სხვა.

მაგრამ სითბოს გამოყოფის დროს მისი უდიდესი წილი მოდის ჟანგვით რეაქციებზე. ასე რომ, გარკვეული მიახლოებით შეგვიძლია ვთქვათ: ორგანიზმის სითბური ენერჯის სიდიდეს განსაზღვრავს ჟანგვითი რეაქციების ინტენსივობა. ორგანიზმის სითბური ენერჯიას პირობითად ყოფენ პირველად (ძირითადად) და მეორად (აქტიურ) სითბოდ. პირველადი სითბო ორგანიზმში გამოიყოფა ნივთიერებათა ცვლის დროს, ბიოქიმიური რეაქციების შეუქცევადობის გამო. ასეთი რეაქციების მიმდინარეობისას ენერჯის გარკვეული ნაწილი გარდაიქმნება სითბურ ენერჯიად. პირველადი სითბოს გამოყოფა იწყება კვების პროდუქტებისა და ჟანგბადის შთანთქმისთანავე.

მეორადი სითბო წარმოიქმნება მაშინ, როცა ორგანიზმი აქტიურ მდგომარეობაშია, ე.ი. ასრულებს რაიმე მუშაობას. ამ დროს იხარჯება ენერჯიით მდიდარ ნაერთებში დაგროვილი ენერჯის ნაწილი. ასეთი მოვლენა ვითარდება, მაგალითად, კუნთის შეკუმშვისას. მეორადი სითბოს გამოყოფა თან სდევს მუშაობის თითქმის ყველა სახეს, რომელიც სრულდება ორგანიზმის შიგნით გარკვეული პროცესების მიმდინარეობისათვის. მუშაობის მნიშვნელოვანი წილი გარდაიქმნება მეორად სითბოდ, ნაწილი კი - სხვა სახის ენერჯიად.

ნორმალურ პირობებში სითბოს ამ ორ სახეს შორის გარკვეული თანაფარდობაა. ექსპერიმენტალურ პირობებში, ვთქვათ, თბილსისხლიანი ორგანიზმების გადაცივებისას, სითბოს ამ ორ სახეს შორის თანაფარდობა ირღვევა. ვთქვათ, ორი ორგანიზმი, ერთი სიცივისადმი არადაპტირებული, ხოლო მეორე - ადაპტირებული, იმყოფება დაბალი ტემპერატურის პირობებში. ცხადია, ამ შემთხვევაში სითბოს გაცემას უფრო ინტენსიური ხასიათი აქვს. ორგანიზმების სითბური ენერჯის გარკვეული დონის შენარჩუნება

შეიძლება მოხდეს ორი გზით; პირველი გზაა მეორადი სითბოს გაზრდა კუნთის შეკუმშვის ინტენსივობის გაძლიერების (კანკალი) ხარჯზე. ასეთი პროცესი მიმდინარეობს არაადაპტირებულ ორგანიზმში. მეორე გზა გულისხმობს პირველადი სითბოს გამოყოფის ზრდას. იგი დამახასიათებელია სიცვისადმი ადაპტირებული ორგანიზმებისათვის. ასეთ ორგანიზმებს მეტაბოლური პროცესების ციკლის გარკვეულ უბნებში აქვთ ალტერნატიული გზები. პროცესი წარმართება იმ სტადიის გავლით, რომელსაც თან სდევს უფრო მეტი პირველადი სითბოს გამოყოფა (ქანგვადი მეტაბოლიზმის ციკლში ხდება ძირითადი გზის გადართვა დიფოსფოპირიდინწყლუოტიდიდან შემოვლის გზით ტრიფოსფოპირიდინწყლუოტიდზე).

### სითბოს ცვლის სახეები

როგორც ვხედავთ, ერთი მხრივ, ორგანიზმში პროდუცირებულ და გარემო არედან მიღებულ (სითბური ენერჯის შთანთქმის ხარჯზე) სითბოსა და, მეორე მხრივ, გადაცემულ სითბურ ენერჯიას შორის უნდა არსებობდეს დინამიკური წონასწორობა. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, სითბური ენერჯიის წარმოქმნის ინტენსივობა სითბოს გაცემის ინტენსივობის ტოლი უნდა იყოს. მხოლოდ ასეთ შემთხვევაში შეუძლია ორგანიზმს მუდმივი ტემპერატურის შენარჩუნება.

ცხადია, ეს არ ნიშნავს, რომ ორგანიზმის ყველა უბანს ზუსტად განსაზღვრული ერთი და იგივე ტემპერატურა აქვს. ორგანიზმში სივრცული ტემპერატურული ველი საკმაოდ რთული სახისაა. ორგანიზმის ცალკეული უბნის ტემპერატურათა შორის განსხვავებამ შეიძლება  $1^{\circ}\text{C}$ -საც მიაღწიოს. ამავე დროს ტემპერატურა არ რჩება მუდმივი, იგი დროის მიხედვით პერიოდულად იცვლება. მაგრამ უბნებს შორის ტემპერატურის აღნიშნული განსხვავება და დროის მიხედვით მისი რხევის ამპლიტუდა საკმაოდ მცირეა, ამასთან საკმაოდ სტაბილურია ნორმალურ პირობებში.

ორგანიზმი სითბოს გაცემს გამოსხივების, აორთქლების, კონვექციისა და სითბოგამტარობის მეშვეობით. ნორმალურ პირობებში სითბური გაცემა გამოსხივების ხარჯზე მთელი სითბური დანაკარგის 60%-ს შეადგენს.

ადამიანის სითბური გამოსხივება მოიცავს ინფრაწითელი უბნის 5 მკ-დან 20 მკ-მდე ტალღის სიგრძეთა დიაპაზონს. გამოსხივების მაქსიმუმი  $7-9$  მკ-ზეა.

საკმარისად დიდი სითბოს რაოდენობა იხარჯება აგრეთვე სხეულის ზედაპირიდან წყლის აორთქლებაზე. როგორც ცნობილია, წყლის აორთქლად ქცევის კუთრი სითბო დიდია. მაგალითად, სხეულის ზედაპირიდან აორთქლებულ 1 გ წყალს მიაქვს 2430 ჯ სითბოს რაოდენობა. აორთქლებაზე მოდის ორგანიზმის მთელი სითბური გაცემის 25%. ეს მაჩვენებელი ეხება იმ შემთხვევას, როცა გარემის ტემპერატურა უფრო მაღალია, მაშინ სითბური გაცემის წილი, რომელიც აორთქლებაზე მოდის, შესამჩნევად იზრდება. სითბური დანაკარგების გაზომვა, რომელიც ხორციელდება კონვექციის გზით, საკმაოდ ძნელია. სითბოს ეს რაოდენობა დამოკიდებულია ჰაერის მასაზე, რომელიც ეხება სხეულის ზედაპირს. ასევე ძნელია სითბოგამტარობის გზით გაცემული სითბოს

რაოდენობის გაზომვა, ვინაიდან იგი დამოკიდებულია კონტაქტში მყოფი სხეულის შემხები ზედაპირის ფართობის სიდიდეზე, ამ სხეულის თერმულ მახასიათებლებზე და სხვა.

სითბოგამტარობისა და კონვექციის გზით გაცემულ ჯამურ სითბოს გამოთვლიან არაპირდაპირი გზით. მთელ გაცემულ სითბოს აკლებენ სითბოს რაოდენობას, რომელიც გადაეცემა გარემოს გამოსხივებისა და აორთქლების შედეგად, და ლეზულობენ საძიებელი სიდიდის გარკვეულ მნიშვნელობას.

**თერმოდინამიკის კანონები. თერმოდინამიკური ფუნქციები: ენტროპია, თავისუფალი ენერგია, ელექტროქიმიური პოტენციალი**

კლასიკური თერმოდინამიკა ემყარება ორ ძირითად კანონს. ცნობილია აგრეთვე ე.წ. ნერნსტის პრინციპი, რომელსაც ხშირად თერმოდინამიკის III კანონს უწოდებენ. იგი განიხილავს თერმოდინამიკურ სისტემას  $0^\circ$  ტემპერატურაზე კულვინის სკალით. ბიოლოგიური სისტემების მიმართ ამ პრინციპის გამოყენებას აზრი არა აქვს, ამიტომ მას არ შევხებით.

თერმოდინამიკის პირველი კანონი ფაქტიურად ენერჯის შენახვის კანონია. ჩაკეტილი სისტემისათვის პირველი კანონის ფორმულირება ასეთია: სისტემის შინაგანი ენერჯის ნამატი გადაცემული სითბოსა და სისტემაზე გარედან შესრულებული მუშაობის ჯამის ტოლია (იგულისხმება, რომ თვითონ სისტემა მუშაობას არ ასრულებს და მიღებული ენერგია მთლიანად იხარჯება შინაგანი ენერჯის ზრდაზე).

მათემატიკური სახით თერმოდინამიკის პირველი კანონი ასე ჩაიწერება:

$$du = \delta A + \delta Q, \tag{38}$$

სადაც  $du$  შინაგანი ენერჯის ცვლილებაა,  $\delta A$  - გარეშე ძალთა მუშაობა, ხოლო  $\delta Q$  - გადაცემული სითბოს რაოდენობა. ვინაიდან შინაგანი ენერგია მდგომარეობის ფუნქციაა, მისთვის აღებულია სრული დიფერენციალი. მუშაობა და სითბო თერმოდინამიკური პარამეტრებია (და არა მდგომარეობის ფუნქციები), ამიტომ ვიღებთ მათ კერძო წარმოებულებს.

თუ სისტემა იზოლირებულია, ცხადია  $\delta A = 0$  და  $\delta Q = 0$ , მაშინ  $du = 0$  და  $\int_1^2 du = 0$ , საიდანაც  $u_1 - u_2 = 0$  და  $u_1 = u_2$ . მაშასადამე, იზოლირებული სისტემის შინაგანი ენერგია უცვლელია, იგი ინახება

თუ სისტემას გადაეცა მხოლოდ სითბოს რაოდენობა, ცხადია,  $du = \delta Q$ , მაგრამ თუ ამ დროს სისტემა თვითონ ასრულებს მუშაობას, მაშინ

$$\delta Q = du + \delta A. \tag{39}$$



მაშასადამე, გადაცემული სიტბოს რაოდენობა ხმარდება სისტემის მიერ მუშაობის შესრულებას და მისი შინაგანი ენერჯის ზრდას. ამ პრინციპზე მუშაობს სიტბური მანქანა.

როგორც (38) ფორმულიდან ჩანს, თერმოდინამიკის პირველი კანონი ამყარებს რაოდენობრივ თანაფარდობას სხეულის შინაგან ენერჯიას, სიტბოსა და მუშაობას შორის. მაგრამ იგი არაფერს გვეუბნება პროცესის მიმართულებაზე.

სისტემაში მიმდინარე პროცესების მიმართულებას და ხასიათს ადგენს თერმოდინამიკის მეორე კანონი. ცნობილია ამ კანონს რამდენიმე ფორმულირება. ერთ-ერთი პირველი ფორმულირება, რომელიც ეკუთვნის კლაუზიუსს ასეთია: შეუძლებელია სიტბო თავისთავად გადავიდეს დაბალი ტემპერატურის სხეულში.

მეორე კანონი ფორმულირებული იყო აგრეთვე პლანკის, კარნოს, კელვინისა და სხვათა მიერ. ისინი ერთსა და იმავე აზრს გამოხატავენ: ჩაკეტილ სისტემაში პროცესი ყოველთვის მიმართულია მაღალი დონიდან დაბლისაკენ. ამ დროს თავისთავად მიმდინარე პროცესების მეშვეობით სისტემა გადადის წონასწორულ მდგომარეობამდე. ასეთი პროცესები შეუქცევადია.

ჩაკეტილ სისტემებში პროცესების მიმდინარეობისათვის აუცილებელი პირობაა გრადიენტის არსებობა. თუ სისტემის ნებისმიერ ორ სხვადასხვა წერტილში, მის მახასიათებელ რომელიმე სიდიდეს აქვს სხვადასხვა მნიშვნელობა, ვამბობთ, რომ სისტემაში არსებობს ამ სიდიდის გრადიენტი. სხვანაირად რომ ვთქვათ, გრადიენტი მოცემული პარამეტრის კლებადობის ან ზრდადობის საზომია. მათემატიკურად რაიმე  $c$  სიდიდის გრადიენტი ასე ჩაიწერება:

$$\Gamma = \frac{dc}{dx},$$

სადაც  $dc$  სიდიდის ცვლილებაა მოცემულ ორ წერტილს შორის, ხოლო  $dx$  – მანძილი ამ წერტილებს შორის.

სისტემაში შეიძლება არსებობდეს სხვადასხვა სახის გრადიენტი, როგორცაა, მაგალითად, კონცენტრაციული, ტემპერატურული, წნევის, სხვადასხვა სახის პოტენციალის გრადიენტი და სხვა. თავისთავად მიმდინარე პროცესების დროს ენერჯიისა და ნივთიერების გადატანა ხდება გრადიენტის მიმართულებით.

ცოცხალ ორგანიზმებში მეტად საინტერესო მოვლენა მიმდინარეობს. ბევრ შემთხვევაში ნივთიერების გადატანა ხდება გრადიენტის საწინააღმდეგო მიმართულებით. ბიოლოგიურ მემბრანებში ასეთ პროცესს ნივთიერების „აქტიურ ტრანსპორტს“ უწოდებენ. ასეთი პროცესის მიმდინარეობისათვის აუცილებელია მეტაბოლური ენერჯიის დახარჯვა. ამ მოვლენას ხსნიან ე.წ. მეტაბოლური „ტუმბოების“ არსებობით ( $Na - K$  ტუმბო და სხვა.).

თერმოდინამიკის განტოლებები ერთმანეთთან აკავშირებს სისტემის მდგომარეობის მახასიათებელ სიდიდეებს. მათ მდგომარეობის ფუნქციებს უწოდებენ. ხშირ შემთხვევაში სისტემის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადაყვანა შეიძლება რამდენიმე გზით. თუ

თერმოდინამიკური სიდიდის მნიშვნელობა მეორე მდგომარეობაში არ არის დამოკიდებული გადასვლის გზებზე, მაშინ იგი მდგომარეობის ფუნქციაა. განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა აქვს შემდეგ ფუნქციებს:

$U$  – შინაგანი ენერჯია;

$H$  – ენტალპია (სითბომცემელობა)  $H = U + PV$ , სადაც  $P$  წნევაა;

$V$  – მოცულობა

$F$  – ჰელმჰოლცის თავისუფალი ენერჯია  $F = U - TS$ , სადაც  $T$  – კელვინის სკალით ათვლილი ტემპერატურაა,  $S$  – ენტროპია;

$G$  – გიბსის თავისუფალი ენერჯია  $G = H - TS = U + PV - TS = F + PV$  ;

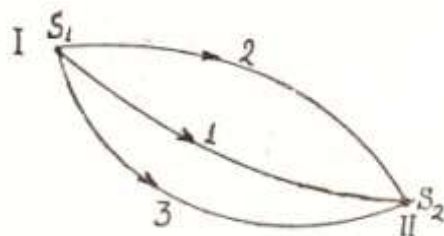
$S$  – ენტროპია.

სისტემის შინაგანი ენერჯიის უშუალო გაზომვა ცდის პირობებშიარ ხერხდება. დღეისათვის არ არსებობს მაკროსკოპული სისტემის ცალკეულ მოლეკულათა ენერჯიის ან მთელი სისტემის შინაგანი ენერჯიის გაზომვის მეთოდები. უფრო მეტიც, ძალიან ბევრ შემთხვევაში ჯერჯერობით არ გვაქვს მეთოდები შინაგანი ენერჯიის ზუსტი თეორიული გამოთვლისათვის.

თერმოდინამიკის მეორე კანონის მათემატიკური გამოსახვისათვის იყენებენ სისტემის მდგომარეობის ფუნქციას - ენტროპიას. (ენტროპია ბერძნული სიტყვაა და ნიშნავს გარდექმნას, განვითარებას).

ვთქვათ, სისტემა იზოთერმულად გადადის I მდგომარეობიდან II მდგომარეობაში. პროცესი შეუქცევადია. მიღებული სითბოს რაოდენობა ამ შემთხვევაში დამოკიდებულია იმაზე, თუ რომელი (1, 2 თუ 3) გზით ხდება ეს გადასვლა. მაგრამ სითბოს რაოდენობის შეფარდება შესაბამის ტემპერატურასთან  $Q_{შეძგ.}/T$  არ არის დამოკიდებული გადასვლის გზაზე.

ეს ფაქტი იმაზე მიუთითებს, რომ იცვლება მდგომარეობის რომელიღაც ფუნქცია და მისი ცვლილება  $Q_{შეძგ.}/T$  ფარდობის ტოლია. სწორედ ამ ფუნქციას უწოდებენ ენტროპიას. მაშასადამე, ენტროპია



ნახ.21. ენტროპიის ცვლილება

სითბოს რაოდენობის, ტემპერატურის, წნევისა და სხვ. განსხვავებით მდგომარეობის ფუნქციაა.

განსაზღვრის თანახმად,  $\Delta S = S_2 - S_1 = Q_{\text{შეცვ.}}/T$

თუ სისტემა პროცესის მიმდინარეობის დროს სითბოს გასცემს, მაშინ:

$$\Delta S = Q_{\text{შეცვ.}}/T .$$

შექცევადი, წონასწორული ციკლის დროს

$$\Delta S = Q_{\text{შეცვ.}}/T + (-Q_{\text{შეცვ.}}/T)=0$$

ე.ი. ამ შემთხვევაში ენტროპია არ იცვლება. შეუქცევადი წონასწორული ციკლის დროს

$$\Delta S > \frac{Q}{T} \tag{40}$$

მაშასადამე, ჩვენ ვაჩვენებთ, რომ ენტროპია მდგომარეობის ფუნქციაა. რა ფიზიკური აზრი აქვს ამ სიდიდეს?

ენტროპია სისტემის თერმოდინამიკური ფუნქციაა, რომელიც განსაზღვრავს პროცესის მიმართულებას მასში და გვიჩვენებს რას უდრის სისტემის ამა თუ იმ მდგომარეობაში გადასვლის ალბათობა.

ენტროპია შეიძლება ასეც განვმარტოთ: იგი სისტემის მოუწესრიგებლობის საზომია, რაც ასე უნდა გავიგოთ: მეტია სისტემის მოუწესრიგებლობა, მეტია მისი ენტროპიაც. მაგალითად, თუ გავადნობთ კრისტალს, მისი ნატიფი, მოუწესრიგებელი სტრუქტურა დაიშლება. მოლეკულათა მდგრადი მოწესრიგებული განლაგება ირღვევა და გადადის ქაოსიურ მოძრაობაში. გამდნარი კრისტალის მოუწესრიგებლობა იზრდება მისი ენტროპიაც.

(40) განტოლება დიფერენციალური ფორმით ზოგად შემთხვევაში ასე ჩაიწერება:

$$\Delta S \geq \frac{\delta Q}{T} , \tag{41}$$

სადაც,  $\delta Q$  სისტემის მიერ მიღებული ან გაცემული სითბოს რაოდენობაა,  $T$  - აბსოლუტური ტემპერატურა. ტოლობის ნიშანი იქნება შექცევადი პროცესის დროს, ხოლო მეტობის ნიშანი - შეუქცევადი პროცესის შემთხვევაში. თუ (4.4) გამოსახულებაში შევიტანთ  $\delta Q$ -ს მნიშვნელობას (40) განტოლებიდან, შექცევადი პროცესისათვის მივიღებთ:

$$dS = \frac{dU + \delta A}{T} . \tag{42}$$

ამ განტოლებას უწოდებენ თერმოდინამიკის ძირითად განტოლებას; რომელიც ასე გადავწეროთ:

$$TdS = dU + \delta A,$$

საიდანაც  $\delta A = -(du - TdS)$  იზოთერმული პროცესის დროს  $T = const$ . ამიტომ შეგვიძლია  $T$  შევიტანოთ დიფერენციალის ნიშნის ქვეშ

$$\delta A = -d(U - TS);$$

$U - TS$ -ს უწოდებენ სისტემის თავისუფალ ენერგიას და აღნიშნავენ  $F$ -ით, ე.ი.  $F = U - TS$ ; მაშასადამე,

$$\delta A = -dF. \quad (43)$$

ფორმულა გვიჩვენებს, რომ იზოთერმულად შექცევადი პროცესის დროს თავისუფალი ენერგიის ცვლილება შესრულებული მუშაობის ტოლია. ნიშანი მინუსი გვიჩვენებს, რომ თუ სისტემა ასრულებს მუშაობას, მისი თავისუფალი ენერგია მცირდება ეკვივალენტური რაოდენობით, და, პირიქით, თუ მუშაობას გარეშე ძალა ასრულებს, სისტემის თავისუფალი ენერგია იზრდება.

$TS$  ნარავლს უწოდებენ ბმულ (შეკავშირებულ) ენერგიას, აღვნიშნოთ იგი  $G$ -თი, მაშინ  $F = U - G$ , საიდანაც

$$U = F + G. \quad (44)$$

მაშასადამე, სისტემის შინაგანი ენერგია თავისუფალი და ბმული ენერგიების ჯამის ტოლია.

სისტემის შინაგანი ენერგია მისი შემადგენელი ნაწილაკების კინეტიკური და პოტენციალური ენერგიის, სითბური ენერგიის და, აგრეთვე, ყველა სხვა ენერგიის (რომელიც აქვს სისტემას) ჯამია.

ვთქვათ, სისტემა რომელიღაც 1 მდგომარეობიდან გადადის მე-2 მდგომარეობაში. სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება იქნება:

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

$U_1$  და  $U_2$  სიდიდეებს, როგორც აღვნიშნეთ, ცდაში ვერ გავზომავთ, მაგრამ მისი ცვლილება  $\Delta U$  შეიძლება გამოვსახოთ ცდით გაზომილი სიდიდეებით. მაგალითად, სისტემის მდგომარეობის უსასრულოდ მცირე ცვლილებისათვის შეიძლება დავეწეროთ შემდეგი სახის დიფერენციალური განტოლება:

$$dU = \delta Q - (\delta A_{\text{ბმ}} + \sum \delta A_{\text{ს}}). \quad (45)$$

(45) განტოლება თერმოდინამიკის პირველი კანონია, რომელშიც

$$\delta A_{\text{ბმ}} + \sum \delta A_{\text{ს}} = \delta A.$$

$\delta A_{\text{მეც}}$  სისტემის მიერ გარეშე ძალების დაძლევაზე შესრულებული მუშაობაა,  $\delta A_{\text{კი}}$  განსაზღვრავს ყველა სხვა სახის მუშაობას, მექანიკურის გარდა (ცდით გაზომილი  $\delta Q$  და  $\delta A$  სიდიდეები ახასიათებს რომელიღაც პროცესებს, მაგრამ არ გამოხატავს მოცემული სისტემის მდგომარეობას).

დავარქვათ სასარგებლო იმ მუშაობას, რომელიც მიიღება სრული მუშაობიდან გაფართოების (მექანიკური) მუშაობის გამოკლების შედეგად

$$\delta A_{\text{ს}} = \delta A + \delta A_{\text{მეც}} = \delta A - PdV. \quad (46)$$

თერმოდინამიკის ძირითადი განტოლების თანახმად,

$$\delta A = -dU + TdS = -d(U - TS) \quad (47)$$

ვინაიდან  $U - TS = F$  (4.10) განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ:

$$-A = \int_1^2 d(U - TS) = (U_2 - TS_2) - (U_1 - TS_1) = \Delta F;$$

(47) და (46) განტოლებების შედარება გვაძლევს შემდეგ გამოსახულებას:

$$\delta A_{\text{ს}} = -dU + TdS - PdV. \quad (48)$$

დავუშვათ, რომ სისტემას ახასიათებს ორი ცვლადი მექანიკური სიდიდე - წნევა და მოცულობა და ორი ცვლადი თერმული სიდიდე - ენტროპია და ტემპერატურა. გარკვეული კონკრეტული შემთხვევებისათვის 4 ცვლადი სიდიდიდან ორი მნიშვნელობა თანმიმდევრულად დავაფიქსიროთ, მაშინ (48) განტოლებიდან მივიღებთ:

1.  $V = \text{const}; \quad S = \text{const} \rightarrow \delta A_{\text{ს}} = -dU;$
2.  $P = \text{const}; \quad S = \text{const} \rightarrow \delta A_{\text{ს}} = -d(U + PV) = -dH;$
3.  $V = \text{const}; \quad T = \text{const} \rightarrow \delta A_{\text{ს}} = -d(U - TS) = -dF;$
4.  $P = \text{const}; \quad T = \text{const} \rightarrow \delta A_{\text{ს}} = -d(U - TS + PV) = -dG$

ბიოლოგიურ სისტემებში წნევა და მოცულობა, ჩვეულებრივ, მუდმივია. მაშინ 1-ლი და მე-2 შემთხვევიდან გამოდის, რომ  $\Delta U = \Delta H$ .

მე-3 და მე-4 შემთხვევის თანახმად, თავისუფალი ენერჯის ცვლილება შესრულებული მუშაობის ტოლია. ამ მუშაობას, რომელიც შეიძლება იყოს ქიმიური, ელექტრული, ფოტოქიმიური, ან ოსმოსური, ხშირად სუფთა ან სასარგებლო მუშაობას უწოდებენ.

ბმული ენერჯია შინაგანი ენერჯის ის ნაწილია, რომელიც არ არის გამოყენებული სასარგებლო მუშაობის შესრულებისათვის. მუდმივი ტემპერატურის პირობებში რაც მეტია ენტროპია, მით უფრო დიდია ბმული ენერჯია.

უნდა აღვნიშნოთ, რომ შინაგანი ენერჯის დაყოფა „ბმულ“ და „თავისუფალ“ ენერჯიად პირობითია. ორგანიზმში არავითარი თავისუფალი და ბმული ენერჯია არ არის, არის მხოლოდ შინაგანი ენერჯია, რომლის შეცვლაც შესაძლებელია მრავალი გზით. ასეთი ტერმინებით შინაგანი ენერჯის ნაწილების აღნიშვნის აზრი იმაში მდგომარეობს, რომ ვაჩვენოთ შინაგანი ენერჯის რა ნაწილი ხმარდება სასარგებლო მუშაობას. შინაგანი ენერჯის დანარჩენი წილი განსაზღვრავს სისტემის მდგომარეობის სხვა მხარეს. ცნობილია, რომ თავისთავად მიმდინარე პროცესების დროს ენერჯისა და მასის გადატანა ხდება გრანდიენტების მიმართულებით. ასეთი პროცესი შეუქცევადი ხასიათისაა და არ საჭიროებს რაიმე სახის ენერჯის მიწოდებას. ბიოლოგიური სისტემისათვის ერთ-ერთი ძირითადი მახასიათებელი თვისებაა გრადიენტის საწინააღმდეგო მიმართულებით ენერჯისა და ნივთიერების გადატანა, ე.წ. აქტიური ტრანსპორტი.

ასეთი პროცესის განხორციელება შეუძლებელია ენერგეტიკული დანახარჯების გარეშე.

ცოცხალ სისტემაში (და საერთოდაც) ელექტრული, ოსმოსური და ქიმიური ენერჯის გარდაქმნის რაოდენობრივი საზომია გიბსის თავისუფალი ენერჯის ცვლილება

$$\Delta G = m \cdot \Delta V. \quad (49)$$

სადაც  $m$  ნივთიერების მოლებით გამოსახული რაოდენობაა,

$V$  – ელექტროქიმიური პოტენციალი.

ბიოლოგიურ სისტემებში ენერჯისა და მასის პასიური და აქტიური ტრანსპორტი არ მიმდინარეობს ცალკე-ცალკე ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად. გადატანის ორივე სახე დინამიკურ ურთიერთკავშირშია. უნდა ვივარაუდოთ, რომ მთლიანი პროცესის გარკვეულ სტადიებზე აღინიშნება მასისა და ენერჯის აქტიური გადატანა, ზოგ სტადიებზე კი - პასიური გადატანა.

პასიური გადატანის დროს, თუ დიფუნდირებადი ნივთიერების ნაწილაკები იონებია, მაგალითად, ნატრიუმის იონები, რომლებიც არათანაბრად არიან განაწილებული მემბრანის ორივე მხარეს, აღიძვრება ორი სახის პოტენციალის გრადიენტი: ქიმიური პოტენციალის გრადიენტი  $\frac{d\mu}{dx}$  და ელექტრული პოტენციალის გრადიენტი  $\frac{nFdE}{dx}$ ; მათ ჯამს ელექტროქიმიური პოტენციალის გრადიენტს უწოდებენ. თუ ელექტროქიმიურ პოტენციალს აღვნიშნავთ  $V$ -თი, მაშინ განმარტების თანახმად.

$$\frac{\Delta V}{dx} = \frac{d\mu}{dx} + nF \frac{dE}{dx}. \quad (50)$$

ცხადია,

$$V = \mu + nFE, \quad (51)$$

სადაც  $\mu$  ქიმიური პოტენციალია,  $n$  - იონის ნუბტი,  $F$  - ფარადეის მუდმივა,  $E$  - ელექტრული პოტენციალი.

იმის მიხედვით, თუ რომელი პარამეტრები რჩება მუდმივი, ქიმიური პოტენციალი შეიძლება გამოვსახოთ, როგორც შინაგანი ენერჯის, ენტალპიის, ან თავისუფალი ენერჯის წარმოებული:

$$\mu_i = \left( \frac{dU}{dn_i} \right)_{S,V,n_i} = \left( \frac{dH}{dn_i} \right)_{S,P,n_i} = \left( \frac{dG}{dn_i} \right)_{T,P,n_i} \quad (52)$$

აქ  $n_i$   $i$ -ური კომპონენტის მასაა, გამოსახული ნივთიერების მოლებით.

მაშასადამე, ქიმიური პოტენციალის ფიზიკური აზრი იმაში მდგომარეობს, რომ იგი პარციალური მოლური შინაგანი ენერჯიაა, ან ენტალპია, ან თავისუფალი ენერჯია.

ვინაიდან ცოცხალ სისტემაში ქიმიური პროცესები მიმდინარეობს მუდმივი ტემპერატურისა და წნევის პირობებში, ამიტომ უმჯობესია ქიმიური პოტენციალი განვსაზღვროთ, როგორც პარციალური მოლური თავისუფალი ენერჯია.

მაკროსკოპული ცვლილებებისათვის ქიმიური პოტენციალის ნამატი ერთი მოლისათვის მუდმივი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში იქნება:

$$\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1 = \Delta G, \quad (53)$$

ხოლო ელექტროქიმიური პოტენციალის ცვლილება სისტემის რაიმე 1-ელი მდგომარეობიდან მე-2-ში გადასვლის დროს გამოისახება ფორმულით:

$$\Delta V = \mu_{02} - \mu_{01} + RT \ln \frac{C_2}{C_1} + nF \Delta E, \quad (54)$$

სადაც  $\mu_{01}$  და  $\mu_{02}$  ქიმიური პოტენციალებია შესაბამისად 1-ელ და მე-2 მდგომარეობაში,  $R$  - უნივერსალური მუდმივა,  $T$  - აბსოლუტური ტემპერატურა,  $C_1$  და  $C_2$  კონცენტრაციები,  $n$  - იონის მუხტი,  $F$  - ფარადეის რიცხვი, ხოლო  $\Delta E$  - პოტენციალის სხვაობა.

ელექტროქიმიური პოტენციალის ფიზიკური აზრი იმაში მდგომარეობს, რომ, (54) ფორმულიდან გამომდინარე, მისი ცვლილება იმ მუშაობის ტოლია, რომელიც საჭიროა:

ა) საწყისი ნივთიერებისაგან (1-ელი მდგომარეობა) 1 მოლი ნივთიერების სინთეზისათვის (მე-2 მდგომარეობა) და გამხსნელში მოთავსებულად ( $\mu_{02} - \mu_{01}$  შესაკრები (54) ფორმულაში);

ბ)  $C_1$  მნიშვნელობიდან ხსნარის კონცენტრაციის გასაზრდელად  $C_2$  -მდე  $\left( RT \ln \frac{C_2}{C_1} \right)$  შესაკრები )

გ) იონთა გადაადგილების დროს  $\Delta E$  პოტენციალთა სხვაობის აღძრული ძალების გადასალახავად ( $nF\Delta E$  შესაკრები).

თუ სისტემის მდგომარეობის ცვლილებისას ქიმიური გარდაქმნა არ ხდება, მაშინ ელექტროქიმიური პოტენციალის გრადიენტის მიმართულებით ერთი მოლი ნივთიერების იონების გადატანას თავისუფალი ენერგიის ჯამური ცვლილება გამოისახება ფორმულით:

$$\Delta G = RT \ln \frac{C_1}{C_2} + nF\Delta E. \quad (55)$$

მარჯვენა მხარეს პირველი წევრი გვიჩვენებს თავისუფალი ენერგიის ცვლილებას კონცენტრაციული გრადიენტის არსებობის გამო, ხოლო მეორე წევრი - თავისუფალი ენერგიის ცვლილების იმ წილს, რომელიც გამოწვეულია ელექტრული მუხტის გადაადგილებით.

## ლექცია VII

### ცოცხალ სისტემებში თერმოდინამიკის პირველი კანონი

ადრე აღვნიშნეთ, რომ თერმოდინამიკის პირველი კანონი სრულდება ჩაკეტილი სისტემებისათვის. ბიოლოგიური სისტემები კი ღიაა. ამიტომ უნდა ვიფიქროთ, რომ თერმოდინამიკის როგორც პირველი, ასევე მეორე კანონი კლასიკური სახით ბიოლოგიური სისტემებისათვის მართებული არ არის. ამაში შეგვიძლია ადვილად დავრწმუნდეთ ლიტერატურაში ცნობილი მაგალითის მოყვანით.

როგორც ვიცით, თერმოდინამიკის პირველ კანონს სითბური მანქანებისათვის აქვს ასეთი სახე:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (56)$$

ფორმულის ფიზიკური აზრი შემდეგში მდგომარეობს. მანქანისათვის გადაცემული  $\delta Q$  სითბოს რაოდენობის ნაწილი ხმარდება  $\delta A$  მუშაობის შესრულებას, ნაწილი კი გარდაიქმნება მანქანის  $du$  შინაგან ენერგიადა. (ეს ნიშნავს, რომ იზრდება მანქანის ცალკეული მექანიზმებისა და დეტალის ტემპერატურა).

ჩვენ ქვეცნობიერად ვგრძნობთ, რომ ბიოლოგიური სისტემისათვის ანალოგიური პრინციპი არ გამოდგება.

ორგანიზმი ან ცალკეული ორგანო ვერ იმუშავებს, როგორც სითბური მანქანა, ვინაიდან გარედან მიწოდებული სითბოს ხარჯზე იგი მუშაობას ვერ შეასრულებს. განვიხილოთ ასეთი მაგალითი: ვთქვათ, კუნთი მუშაობს  $25^\circ C$  გარემოს ტემპერატურის პირობებში და ამ დროს მისი მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მ.გ.კ.) უდრის 30%-ს ( $\eta = 0,3$ ); გამოვთვალოთ რა ტემპერატურამდე უნდა გაცხელდეს კუნთი სითბოს გადაცემისას. მ.ქ.კ.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (57)$$

სადაც  $T_1$  კუნთის აბსოლუტური ტემპერატურაა, ხოლო  $T_2$  - გარემოსი (მაცივრის).

4.20) ფორმულიდან განვსაზღვროთ  $T_1 \cdot \eta T_1 = T_1 - T_2$ ;  $T_2 = T_1 - \eta T_1 = T_1(1 - \eta)$  და  $T_1 = \frac{T_2}{1 - \eta}$ . თუ ამ გამოსახულებაში შევიტანთ  $T_2 = 273 - 25 = 248$  და  $\eta = 0,3$ ,



მივიღებთ  $T_1 = \frac{298^\circ k}{1-0,3} \approx 426^\circ k, \quad t_1 = 153^\circ C.$  ცხადია, ასეთ ტემპერატურაზე კუნთი ვერ

იმუშავებს, ვინაიდან კუნთის შეკუმშვადი ცილები დენატურაციას განიცდის უკვე  $40-60^\circ C$  -ზე.

მაშასადამე, თერმოდინამიკის პირველი კანონი თითქმის არ არის მართებული ცოცხალი სისტემებისათვის. ცხადია, ასეთი დასკვნა აწორი არ არის. ცოცხალ ორგანიზმზე და მათ შორის ადამიანებზე ჩატარებულმა ცდებმა გვიჩვენა, რომ თერმოდინამიკის პირველი კანონი მართებულია ცოცხალი სისტემების შემთხვევაშიც.

საქმე იმაში მდგომარეობს, რომ სითბური მანქანა მიღებულ სითბოს პირდაპირ გარდაქმნის მექანიკურ ენერგიად - მუშაობად. ცოცხალი სისტემა კი გარემოდან ღებულობს სხვადასხვა სახის ენერგიას. მათ შორის ძირითადია კვების პროდუქტები. ხდება კვების პროდუქტების ენერგიის გარდაქმნა რთული ფიზიკურ-ქიმიური რეაქციების გზით და მათი შენახვა სხვადასხვა ბიოქიმიურ ნაერთებში. მაკროერგიულ ნაერთებში ინახება ჟანგვითი პროცესების დროს წარმოქმნილი ენერგიის დაახლოებით 50%. საჭირო მიმენტში ბიოქიმიური ნაერთების ენერგიას ორგანიზმი გამოიყენებს მუშაობის შესასრულებლად. ენერგიის მნიშვნელოვანი ნაწილი გარდაიქმნება სითბურ ენერგიად, ხმარდება ორგანიზმის მუდმივი ტემპერატურის შენარჩუნებას.

ასეთი თვალთხედვით თუ მივუდგებით საკითხს, მაშინ თერმოდინამიკის პირველი კანონი მართებულია ცოცხალი ორგანიზმებისათვისაც.

### **ჰესის კანონი და გამოყენება ბიოლოგიური პროცესების სითბური ეფექტების გამისათვლელად**

თერმოდინამიკის პირველი კანონის რთ-ერთი შედეგია ჰესის კანონი. კანონის ფორმულირება ასეთია: რაიმე პროცესის დროს შთანთქმული ან გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა არ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ რამდენი სტადიის გავლით მიმდინარეობს პროცესი. იგი დამოკიდებულია სისტემის მხოლოდ საწყის და საბოლოო მდგომარეობაზე. უფრო მარტივად:

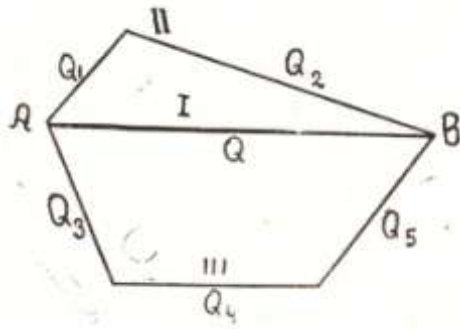
რეაქციის სითბური ეფექტი უდრის საწყისი პროდუქტების წვის სითბოს ჯამს გამოკლებული საბოლოო პროდუქტების წვის სითბოს ჯამი. კანონი მათემატიკურად ასე ჩაიწერება:

$$\Delta H = \sum (\Delta H)_{\text{საწყ}} - \sum (\Delta H)_{\text{საბ}}, \quad (58)$$

სადაც  $\sum (\Delta H)_{\text{საწყ}}$  - საწყისი კომპონენტების წვის სითბოს ჯამია,  $\sum (\Delta H)_{\text{საბ}}$  - რეაქციის საბოლოო პროდუქტების წვის სითბოს ჯამი.  $\Delta H$  - სითბური ეფექტი სითბოს იმ რაოდენობის ტოლია, რომელიც გამოიყოფა ქიმიური რეაქციის დროს.

ჰესის კანონის შინაარსს ასახავს ქვემოთ მოყვანილი სქემეტიური სურათი.

ვთქვათ,  $A$  ნივთიერებას რეაქციის შედეგად  $B$  ნივთიერებაში გადასვლა შეუძლია სამი გზით. ჰესის კანონის თანახმად,



ნახ.22. ჰესის კანონი: სითბური ეფექტის ტოლობა სამივე შემთხვევაში

მნიშვნელობა არა აქვს, რომელი გზით (რამდენი სტადიის გავლით) ხდება გადასვლა  $A$ -დან  $B$  ნივთიერებაში. სითბური ეფექტი სამივე შემთხვევაში ერთმანეთის ტოლია:

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5$$

ჰესის კანონის მეშვეობით შეგვიძლია გარკვეული სიზუსტით გამოვთვალოთ რთული ბიოქიმიური რეაქციის სითბური ეფექტი რომელიმე ორგანოსა, ან მთლიან ორგანიზმში. ამისათვის, როგორც აღვნიშნეთ, საჭირო არ არის შუალედური სტადიების ცოდნა, აუცილებელია მონაცემები მხოლოდ რეაქციის საწყის და საბოლოო პროდუქტებზე.

ჰესის კანონის მართობულობა მრავალი ექსპერიმენტითაა დასაბუთებული. ასეთი ექსპერიმენტის არსი შემდეგში მდგომარეობს:

კალორიმეტრულ დანადგარში ზომავენ ორგანოს ან მთლიან ორგანიზმში საკვების დაჟანგვისას გამოყოფილ სითბოს რაოდენობას და მას ადარებენ კალორიმეტრში იმავე საკვების პირდაპირი დაწვისას გამოყოფილ სითბოს რაოდენობას.

მოვიყვანოთ ერთ-ერთი ასეთი ცდის მაგალითი, რომელიც ჩაატარა ეტუოტერმა. თბოიზოლირებულ კამერაში ადამიანი ღებულობდა 1879 კკალ ეკვივალენტურ საკვებს. ამ დროს გამოყოფილი სითბო შეადგენდა 1859 კკალ-ს. სითბური ბალანსი, როგორც ვხედავთ, დაცულია 1% სიზუსტით.

აუცილებელია ხაზი გავუსვათ ერთ გარემოებას. ჰესის კანონის საფუძველზე გამოთვლა კარგ დამთხვევას იძლევა მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა ორგანიზმი არ ასრულებს მუშაობას (მოსვენებულ მდგომარეობაშია). ამასთან, ორგანიზმში არ უნდა ხდებოდეს ენერჯის დაგროვება მასის სახით (ე.ი. ნივთიერებათა სინთეზი).

## თერმოდინამიკის მეორე კანონი ბიოლოგიაში

### ორგანიზმი, როგორც ღია სისტემა. სტაციონარული მდგომარეობა და მისი განმასხვავებელი ნიშნები

თერმოდინამიკის მეორე კანონი მართებულია იზოლირებული სისტემებისათვის, რომლებშიც ენტროპია ან იზრდება ან მუდმივი რაჩება. ასეთ სისტემებში პროცესები შექცევადია და იგი თავისთავად მიდის წონასწორული მდგომარეობისაკენ. თავისუფალი ენერჯია მცირდება და აღწევს მინიმუმს. ეს ფაქტი ასე აიხსნება: ვინაიდან გარემოსთან ნივთიერების ცვლა არ ხდება, მორეაგირე კომპონენტების რაოდენობა შემოფარგლულია და პროცესის დამთავრებისას სისტემა გადადის წონასწორობის მდგომარეობაში.

წონასწორულ მდგომარეობას ახასიათებს ენტროპიის მაქსიმალური მნიშვნელობა -  $S = \max$ . ასეთ მდგომარეობაში იზოლირებულ სისტემას შეუძლია ყოფნა განუსაზღვრელად დიდი დროის განმავლობაში. ცხადია, ასეთი სახით თერმოდინამიკის მეორე კანონი ბიოლოგიური სისტემებისათვის მართებული არ არის. ამის ძირითადი მიზეზია ის, რომ კლასიკური თერმოდინამიკა შეისწავლის წონასწორობის მდგომარეობაში მყოფი იზოლირებული სისტემების მაკროსკოპულ თვისებებს. ბიოლოგიური სისტემა კი ღია სისტემაა და მასში მიმდინარე პროცესები შეუქცევადი ხასიათისაა. იგი გარემოსთან ახორციელებს როგორც ენერგიის, ასევე ნივთიერების განუწყვეტელ ცვლას. სწორედ ასეთი პროცესი უდევს საფუძვლად იმ ფაქტს, რომ ნებისმიერი ცოცხალი სისტემა ყოველთვის არაწონასწორულ მდგომარეობაშია. თერმოდინამიკური წონასწორობა ცოცხალ სისტემაში მყარდება მხოლოდ მისი სიკვდილის შემდეგ.

ცოცხალ სისტემებში მყარდება ე.წ. სტაციონარული მდგომარეობა. ეს ისეთი მდგომარეობაა, როცა სისტემაში განუწყვეტლივ მიმდინარეობს ენერგიისა და ნივთიერების შთანთქმა და გამოყოფა. თერმოდინამიკურ წონასწორობას და სტაციონარულ მდგომარეობას ერთი საერთო მახასიათებელი ნიშანი აქვს. ორივე შემთხვევაში სისტემის თვისებები დროის მიხედვით მუდმივი რჩება, მაგრამ თვისებების ამ მუდმივობაში პრინციპული განსხვავებაა. მაგალითად, თერმოდინამიკური წონასწორობის თავისუფალი ენერგიის ცვლილება საერთოდ არ ხდება ( $dF = 0$ ), ხოლო სტაციონარული მდგომარეობის შემთხვევაში თავისუფალი ენერგია განუწყვეტლივ იცვლება და მისი ცვლილების სიჩქარე მუდმივია ( $dF = const$ ). ანალოგიურად იზოლირებული სისტემის ენტროპია თერმოდინამიკური წონასწორობისას მაქსიმალურია, ხოლო ღია სისტემაში იგი, თუმცა მუდმივია, მაგრამ ყოველთვის ნაკლებია მაქსიმალურ მნიშვნელობაზე. სისტემა სტაციონარულ მდგომარეობას ინარჩუნებს არა იმიტომ, რომ თავისუფალი ენერგია მინიმალურია, როგორც თერმოდინამიკური წონასწორობის შემთხვევაში; სტაციონარულ მდგომარეობას ღია სისტემა ინარჩუნებს გარემოდან თავისუფალი ენერგიის განუწყვეტელი მიღების საფუძველზე, რაც აკომპენსირებს სისტემაში თავისუფალი ენერგიის ხარჯს. და, ბოლოს, კინეტიკის თვალსაზრისით წონასწორობის მდგომარეობაში პირდაპირი და უკუმიმართულებით რეაქციების სიჩქარე ტოლია, მაშინ როცა სტაციონარული მდგომარეობის შემთხვევაში რეაქციის სიჩქარე ერთი მიმართულებით დროის მიხედვით მუდმივი რჩება.

თერმოდინამიკური წონასწორობისა და სტაციონარული მდგომარეობის ძირითადი განმასხვავებელი ნიშნები შეიძლება ქვემოთ მოყვანილი სახით ჩამოვაცალიბოთ:

- თერმოდინამიკური წონასწორობა
1. სისტემა იზოლირებულია
  2. სისტემაში არ არსებობს გრადიენტები
  3. თავისუფალი ენერგიის ცვლილება  $dF = 0$
  4. ენტროპია  $S = \max$

სტაციონარული მდგომარეობა

1. სისტემა ღიაა
2. სისტემაში მოქმედებს მუდმივი გრადიენტები
3.  $dF = const$
4.  $S = const < \max$

სტაციონარული მდგომარეობის ნათელი მაგალითია ცოცხალი ორგანიზმების დამახასიათებელი ჰომეოკინეზი ( $pH$ -ის, ტემპერატურის, ოსმიური წნევის, ოსმიური და სხვა სახის გრადიენტების მუდმივობა).

## ლექცია VIII

### ქსოვილთა და ორგანოთა ელექტრული ველი

#### პოტენციალთა აღძვრის ბიოფიზიკური საფუძვლები

ცხოველური და მცენარეული ორგანიზმების ფუნქციონირებისას მათში მიმდინარე თითქმის ყველა პროცესს თან სდევს ელექტრომომძრავებელი ძალის წარმოქმნა. ეს იწვევს ორგანიზმის შიგნით და მის ზედაპირზე სხვადასხვა სიდიდის პოტენციალის აღძვრას. ორგანიზმში წარმოიქმნება ელექტრული ველი.

ცოცხალი ორგანიზმი ღია, თვითმარეგულირებელი და თვითწარმომქმნელი სისტემაა, რომელიც ფუნქციონირებს სტაციონარულთან მიახლოებულ რეჟიმში და იმყოფება არაწონასწორულ მდგომარეობაში. ასეთი მდგომარეობის შენარჩუნებისა და სასიცოცხლო ფუნქციების განხორციელებისათვის აუცილებელია გარემო-ორგანიზმს შორის ნივთიერების (დამუხტული და უმუხტო ნაწილაკების) ორმხრივ მიმართული ნაკადის არსებობა, ორგანიზმის რთული, არაერთგვაროვანი (კონდენსატორის ტიპის) სტრუქტურის გამო, მის სხვადასხვა უბანს ახასიათებს განსხვავებული გამტარობა. ეს იწვევს გარედან მიღებული ელექტროლიტების არათანაბარ განაწილებას მთელ მოცულობაში, მუხტის განსხვავებული ლოკალური კონცენტრაციის წარმოქმნას. ამ პროცესში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ორგანიზმში მიმდინარე ბიოქიმიური რეაქციები, ელექტროგენური ტუმბოს მოქმედება, სტრუქტურული წარმონაქმნების ბიოფიზიკური თვისებები და სხვა (კლასიკური მაგალითია მემბრანა). ამის შედეგია განსხვავებული სიდიდის პოტენციალის და, მაშასადამე, ელექტრული გრადიენტების წაქრმოქმნა ორგანიზმში. ზემოთ აღნიშნული პროცესების მნიშვნელობაზე მეტყველებს ის, რომ უმეტესი ფიზიოლოგიური აქტები ძირითადად ელექტრული პროცესების მეშვეობით ხორციელდება.

ჩვეულებრივ, ბიოპოტენციალების სიდიდე არ აღემატება 50 - 150 მვ-ს. გამოწვევისაა ზოგიერთი ზღვის თევზის ელექტრული ორგანო, რომლის განმუხტვის ძაბვა ასობით ვოლტს შეადგენს. თუმცა უნდა აღვნიშნოთ, რომ

ელექტრული ორგანოს განმუხტვა მიმდევრობით შეერთებული დიდი რაოდენობით „ელექტრული ელემენტის“ ჯამური განმუხტვაა. თითოეული „ელექტრული ელემენტის“ ელექტრომაგომძრავებელი ძალა კი არ აღემატება 100 – 150 მგ-ს.

თუ ცოცხალი სხეულის სხვადასხვა უბანს დავადებთ ელექტროდებს, ადვილად შეგვიძლია მათ შორის პოტენციალთა სხვაობის გაზომვა. ორგანიზმის სხვადასხვა უბანს შორის აღძრული პოტენციალის სხვაობა არ არის მუდმივი - იგი დროის ფუნქციაა. მიუხედავად იმისა, რომ ორგანიზმში ვლინდება ცალკეული უბნის ელექტრული ველების საკმაოდ რთილი სახის სუპერპოზიცია, ადვილად ხერხდება ორგანოს ან ქსოვილის ფუნქციონირებით გამოწვეული პოტენციალთა სხვაობის დროზე, დამოკიდებულების მრუდს ელექტროგრამას უწოდებენ. ელექტროგრამის სახელწოდება მიუთითებს იმ ორგანოზე, რომლის ფუნქციონირების შედეგად ვლინდება რეგისტრირებული პოტენციალთა სხვაობა.

ამჟამად კვლევითი და სამედიცინო-სადიაგნოსტიკო მიზნით ფართოდ იყენებენ ელექტროკარდიოგრამის (ეკგ), ელექტროენცეფალოგრამის (ეეგ), ელექტრომიოგრამისა (ემგ) და სხვათა სარეგისტრაციო ხელსაწყოებს.

ბიოპოტენციალები თავისი ხანგრძლივობით მნიშვნელოვანად განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. ბიოპოტენციალის ამპლიტუდის მნიშვნელობამდე მიღწევის დრო 0,1 მწმ-დან რამდენიმე საათამდე ინტერვალის ფარგლებშია. შესაბამისად ბიოპოტენციალთა სიხშირული მახასიათებელი 0-დან 10-კჰც-მდე იცვლება.

## მემბრანული პოტენციალები

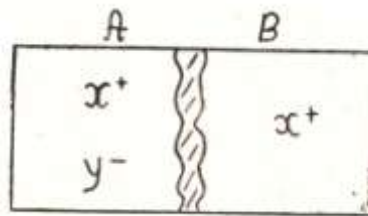
მემბრანული ელექტრული პოტენციალები ორგანიზმის თითქმის ყველა უჯრედის მახასიათებელია. ზოგიერთი უჯრედის მემბრანა „აგზნებადია“ - შეუძლია ელექტროქიმიური იმპულსების გენერაცია. ელექტრული იმპულსები შემდეგი მემბრანის გასწვრივ ვრცელდება ზუსტად განსაზღვრული მისამართით. ასეთი მემბრანები აქვს ნერვულ და კუნთოვან ქსივილებს. მემბრანული პოტენციალები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სხვა ტიპის უჯრედების ფუნგციონირებაშიც, როგორცაა, მაგალითად, ჯირკვლოვანი უჯრედები, მაკროფაგები, ცილიარული უჯრედები და სხვა. წინმდებარე თავში ძირითადად განხილული იქნება მემბრანული პოტენციალები, რომლებიც წარმოქმნიებიან აგზნებად უჯრედებში, როგორც მისვენების მდგომარეობაში, ასევე აგზნების დროს.

### ტრანსმემბრანულ პოტენციალთა სხვაობა

განვიხილოთ სისტემა, რომელიც ნახევრად გავლადი მემბრანით გამოყოფილია ორ:  $A$  და  $B$  ნაწილად. თითოეულ ნაწილში მოვათავსოთ  $xy$  ელექტროლიტის

წყალხსნარი განსხვავებული კონცენტრაციით. მემბრანა თავისუფლად ატარებს  $x^+$  კატიონებს, მაგრამ გაუვლადია  $y^-$  ანიონოსათვის. დავუშვათ, მოცემული ნივთიერების კონცენტრაცია მეტია  $A$  ნაწილში. ცხადია,  $x^+$  კატიონები გადაადგილდება კონცენტრაციული გრადიენტის მიმართულებით და გარკვეული რაოდენობით გადავა  $A$ -დან  $B$  ნაწილში. მუხტების გადაადგილება გამოიწვევს მემბრანის ზედაპირებს შორის პოტენციალთა სხვაობის წარმოქმნას.

ცხადია, ელექტრული გრადიენტი მიმართული იქნება კონცენტრაციული გრადიენტის საწინააღმდეგოდ. რაც უფრო მეტი რაოდენობით  $x^+$  კატიონი გადავა მეორე მხარეს, მით უფრო დიდი იქნება პოტენციალთა სხვაობა და მით უფრო ძნელი გახდება ამ იონების გადატანა ელექტრული გრადიენტის საწინააღმდეგოდ. გარკვეული დროის შემდეგ კონცენტრაციული და ელექტრული გრადიენტებით გამოწვეული ძალები აკომპენსირებს ერთმანეთს. დამყარდება დინამიკური წონასწორობა  $A$ -დან  $B$ -ში და პირუკუ მიმართულებით გადატანილი იონების რიცხვი საშუალოდ ერთმანეთის ტოლი გახდება.



ნახ.23. ტრანსმემბრანული პოტენციალთა სხვაობა

ამ დროს წარმოქმნილი პოტენციალთა სხვაობა (წონასწორობის პოტენციალი  $x^+$  იონისათვის) გაპირობებულია  $A$  და  $B$  ნაწილებში  $x^+$  იონების კონცენტრაციათა სხვაობით. ასეთი სისტემა ცნობილია კონცენტრაციული ელემენტების სახელწოდებით.

წრმოვიდგინოთ, რომ  $x^+$  იონების მცირეოდენი რაოდენობა ( $dm$ ) მემბრანის გავლით მოძრაობს  $B$ -დან  $A$ -სკენ კონცენტრაციული გრადიენტის საწინააღმდეგოდ მიმართულებით. მუშაობა, რომელიც საჭიროა ასეთი გადაადგილებისათვის ( $dA_c$ ) გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$dA_c = dmRT \ln \frac{[x]_A}{[x]_B}. \quad (59)$$

რაც შეეხება ელექტრულ მუშაობას, რომელიც უნდა შესრულდეს იმისათვის, რომ  $x^+$  იონების  $dm$  რაოდენობა ელექტრული გრადიენტის საწინააღმდეგოდ გადაადგილდეს  $A$ -დან  $B$  ნაწილში, მისი განსაზღვრა შეიძლება ფორმულით:

$$dA_c = dmzF\Delta\phi, \quad (60)$$

სადაც  $z$  იონის მუხტია,  $F$  - ფარადეის რიცხვი, ხოლო  $\Delta\phi$  ამ ორ ნაწილს შორის პოტენციალთა სხვაობა.

წონასწორობის დროს ურთიერთსაწინააღმდეგოდ მიმართულებით გადატანილი  $x^+$  იონების რაოდენობა ერთმანეთის ტოლია. ამიტომ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$dA_c = dA_e$$

ანუ

$$dmzF\Delta\varphi = dmRT \ln \frac{[x]_A}{[x]_B},$$

საიდანაც

$$\Delta\varphi = \varphi_e = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[x]_A}{[x]_B}. \quad (61)$$

(61) განტოლება ცნობილია ნერნსტის განტოლების სახელწოდებით, სადაც  $\varphi$  მემბრანული პოტენციალია მის ორივე მხარეზე განაწილებული იონთა პისიური წონასწორობის დროს.

დიფუზიის შედეგად ნერნსტის პოტენციალის განვითარებისათვის ორი პირობაა აუცილებელი: ა) მემბრანა უნდა იყოს ნახევრად განვლადი - თავისუფლად ატარებდეს ფორმებში ერთი ნიშნის მუხტის მქონე იონებს და არ ატარებდეს საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტის იონებს. ბ) დიფუნდირებადი იონების კონცენტრაცია მემბრანის ერთ მხარეზე უნდა ჭარბობდეს მეორე მხარეზე მის კონცენტრაციას.

იონების ასიმეტრიული განაწილება და, აქედან გამომდინარე, მემბრანული პოტენციალის წარმოქმნა სამი მიზეზით შეიძლება ავხსნათ: ა) იონების არათანაბარი დიფუზიის შედეგად, ბ) დონანის წონასწორობის დამყარების შედეგად, გ) ელექტროგენური იონური ტუმბოს მოქმედების შედეგად.

**დიფუზიური პოტენციალი.** ორი ერთნაირი შედგენილობის, მაგრამ განსხვავებული კონცენტრაციის ხსნარის ერთმანეთთან შეხებისას შედარებით სწრაფად მოძრავი იონები უფრო დიდი სიჩქარით დადავა მაღალი კონცენტრაციის არიდან დაბალი კონცენტრაციის უბანში, ვიდრე მცირე ძვრადობის მქონე იონები. ეს გამოიწვევს მუხტების დროებით გადაწილებას. ამით აიხსნება ორ ხსნარს შორის პოტენციალთა სხვაობის - ამ შემთხვევაში ეგრეთ წოდებული დიფუზიური პოტენციალის წარმოქმნა.

დიფუზიური პოტენციალის გამოთვლა შესაძლებელია შემდეგი განტოლებით:

$$\varphi = \frac{(U_+ - U_-)RT}{(U_+ + U_-)zF} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (62)$$

სადაც  $U_+$  დადებითი იონის, ხოლო  $U_-$  უარყოფითი იონის ძვრადობაა.

ასეთი უაღრესად არამდგრადი პოტენციალის წარმოქმნას შეიძლება არც კი ჰქონდეს დიდი მნიშვნელობა უჯრედისათვის, პლანმურ მემბრანას რომ არ ახასიათებდეს შერჩევითი განვლადობა. სწორედ მემბრანის შერჩევითი განვლადობა განაპირობებს სხვადასხვა იონის დიფუზიის სიჩქარის მნიშვნელოვან განსხვავებას, რაც თავის მხრივ, განსაზღვრავს დიფუზიური პოტენციალის სიდიდეს.

**დონანის წონასწორობა.** დიფუზიური პოტენციალის ზღვრულ შემთხვევასთან გვაქვს საქმე ეგრეთ წოდებული დონანის წონასწორობის დროს. ასეთი წონასწორობა დამყარდება მაშინ, როდესაც მემბრანა აბსოლუტურად გაუვლადია რომელიმე ნიშნის მუხტისათვის.

დონანის წონასწორობა დამახასიათებელია ისეთი ხსნარებისათვის, რომლებიც შეიცავენ როგორც მცირე ზომის მემბრანაში განვლად იონებს, ასევე დამუხტულ მაკრომოლეკულებს. ასეთი მაკრომოლეკულებისათვის მემბრანა გაუვლადია, რაც იწვევს პიტარა ზომის იონების ასიმეტრიულ განაწილებას მემბრანის სხვადასხვა მხარეს.

დონანის წონასწორობის დროს ორივე ნიშნის იონთა კონცენტრაციების ნამრავლი მემბრანის შიგნით და გარეთ ერთმანეთის ტოლი უნდა იყოს.

დონანის პოტენციალის მაღალი მნიშვნელობა ნერვიული და კუნთის ქსოვილის უჯრედებისათვის (მინუს 60 მვ-დან მინუს 90 მვ-მდე) არ შეიძლება ავხსნათ მხოლოდ დონანის პოტენციალით.

**ნატრიუმ-კალიუმის ტუმბო.** იონური ტუმბოები დიდ როლს ასრულებს იონთა ტრანსმემბრანული კონცენტრაციის ასიმეტრიულ განაწილებაში, და, მაშასადამე, მემბრანული პოტენციალების ფორმირებაში. იონური ტუმბოების არსებობა დადგენილია ნატრიუმის, კალიუმის, ქლორის და კალციუმის იონებისათვის. მემბრანული პოტენციალების ფორმირებისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს ნატრიუმის (ასევე კალიუმის) იონების აქტიურ გადატანას, რაც იწვევს ნატრიუმის ელექტროქიმიური გრადიენტის წარმოქმნას, რომელიც მიმართულია გარემოდან უჯრედის შიგნით.

### **მოსვენების მემბრანული პოტენციალი**

როგორც აღვნიშნეთ, თითქმის ყველა უჯრედის მემბრანა პოლარიზებულია. მემბრანის შიგნითა ზედაპირი გარეთას მიმართ უარყოფითად არის დამუხტული. მემბრანული პოტენციალის სიდიდე სხვადასხვა უჯრედისათვის განსხვავებულია. მაგალითად, აგზნებად ქსოვილებში მოსვენების მდგომარეობაში იგი 70 მვ-დან 100 მვ-მდე ფარგლებშია და საშუალოდ 90 მვ-ის ტოლია.

მემბრანის შიგნით და გარეთ იონები არათანაბრად არის განაწილებული. ყველაზე დიდი განსხვავებაა კალიუმის იონებისათვის. ამ იონების კონცენტრაცია უჯრედის შიგნით 20 – 100-ჯერ აღემატება მათ კონცენტრაციას უჯრედის გარეთ. ნერვიული ბოჭკოს შიგნით მათი ნორმალური კონცენტრაციაა დაახლოებით 140 მმოლ/ლ, ხოლო გარეთ - 4 მმოლ/ლ. თუ დავუშვებთ, რომ ნერვიული უჯრედის მემბრანა განვლადია მხოლოდ კალიუმის იონებისათვის, მაშინ ნერნსტის განტოლების შესაბამისად წონასწორული პოტენციალი კალიუმისათვის 94 მვ-ს ტოლი იქნება.

ნატრიუმის კონცენტრაცია უჯრედის შიგნით მის უჯრედ გარეთა კონცენტრაციაზე 5 -15-ჯერ ნაკლებია. თუ დავუშვებთ, რომ უჯრედის მემბრანა განვლადია მხოლოდ ნატრიუმის იონებისათვის, მაშინ ნერნსტის განტოლების თანახმად, ნატრიუმის წონასწორული პოტენციალი 61 მვ-ის ტოლი იქნება.

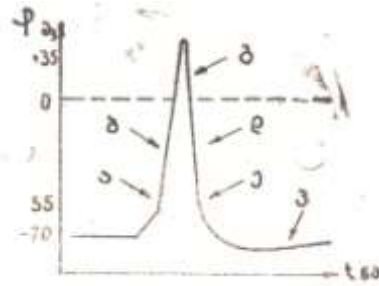
ქლორის იონების განაწილება კალიუმის იონების განაწილების საპირისპიროა. მათი უჯრედგარეთა კონცენტრაცია 20 – 100-ჯერ მეტია უჯრედშიგა კონცენტრაციაზე. სხვა იონებისათვის ეს განსხვავება უფრო მცირეა. მაგალითად, კალციუმის იონების უჯრედგარეთა კონცენტრაცია 15 – 20-ჯერ, ხოლო მაგნიუმისა 5-ჯერ მეტია ამ იონების უჯრედშიგა კონცენტრაციაზე.

### **მოქმედების პოტენციალი**

ორგანიზმში ნერვიული უჯრედის ფუნქციაა ინფორმაციის მიღება, მისი გადაცემა ნერვიული სისტემის გარკვეული უბნებისადმი, შედარება სხვა წყაროებიდან მიღებულ ინფორმაციასთან, და ბოლოს, განსაზღვრული უჯრედების მოქმედების რეგულაცია. ნერვებიდან მიღებული სიგნალები იწვევს კუნთოვანი ქსოვილის შეკუმშვას. როცა ეს



ორი ტიპის უჯრედები „აქტიურ“ (აგზნების) მდგომარეობაშია, ვლინდება მემბრანული პოტენციალის სწრაფი ცვლილება დადებითი მიმართულებით



ნახ.24. მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნა

ასეთ ცვლილებას ახასიათებს „რევერსია“ - ხდება პოტენციალის ნისნის შეცვლა.

მემბრანის მიერ გენერირებული პოტენციალის აღნიშნული სახის ცვლილებას („რევერსიას“), რომელსაც მილევადი ხასიათი აქვს, მოქმედების პოტენციალს უწოდებენ. იგი ახასიათებს მხოლოდ აგზნებად ქსოვილებს და ნერვიული სისტემის უნივერსალური კოდია. ნერვიულ ბოჭკოში მოქმედების პოტენციალი აქსონის გასწვრივ ვრცელდება.

ბუნებრივ პირობებში ორგანიზმში მოქმედების პოტენციალები წარმოიქმნება მგრძნობიარე ბოჭკოების დაბოლოებებსა ან სინაპსებში. ექსპერიმენტებში აგზნების პროცესის იმიტირება შეიძლება უჯრედის მემბრანაში დენის გატარებით.

ზემოთ უკვე აღვნიშნეთ, რომ თითქმის ყველა უჯრედის მემბრანა პოლარიზებულია. ამასთან, მისი შიგნითა ზედაპირი გარეთას მიმართ უარყოფითად არის დამუხტული. თუ მემბრანაზე მოვახდენთ ისეთ ზემოქმედებას (მექანიკურს, ელექტრულს, ქიმიურს და სხვა), რომელიც გამოიწვევს მემბრანის პოლარიზაციის შემცირებას რაიმე კრიტიკულ დონემდე (დეპოლარიზაციის კრიტიკული დონე, ანუ აგზნების ზღურბლი), მემბრანული პოტენციალი სწრაფი ფეთქებადი ხასიათის ისეთ ცვლილებას განიცდის, რომელიც უკვე აღარ არის დამოკიდებული გამაღიზიანებელი აგენტის ხასიათსა და ძალაზე. მემბრანის პოტენციალი სწრაფად მცირდება ნულამდე (დეპოლარიზაციის ფაზა). მაგრამ პროცესი ამით არ მთავრდება; იწყება მემბრანის გადამუხტვა, მისი პოლარობა იცვლება (რევერსია, ანუ ოვერშუტი), რაც გრძელდება მანამ, სანამ ზემოქმედების უბანში მემბრანის შიგნითა ზედაპირის პოტენციალი არ მაღწევს დაახლოებით 35 მვ მნიშვნელობას. ამის შემდეგ პროცესი საპირისპირო მიმართულებით მიმდინარეობს. მემბრანის პოტენციალი სწრაფად მცირდება ნულამდე, მისი პოლარობა ისევ იცვლება და უახლოვდება პოლარიზაციის საწყის დონეს (რეპოლარიზაციის ფაზა). პოტენციალის სიდიდე მიაღწევს საწყისი მნიშვნელობის 70%-ს, მისი ცვლილების სიჩქარე მნიშვნელოვნად მცირდება და პროცესი გაცილებით უფრო ნელა მიმდინარეობს.

მემბრანის პოტენციალის აღნიშნულ მკვეთრ ცვლილებას ეწოდება პიკის პოტენციალი, ხოლო მოსვენების დონემდე მის შენელებულ მიმდინარეობას - კვალის დეპოლარიზაცია. მოსვენების მდგომარეობის შესაბამისი დონის მიღწევის შემდეგ პოტენციალის ცვლილება გრძელდება და მემბრანა საკმაოდ ხანგრძლივი დროის განმავლობაში ხდება მცირეოდენად ზედმეტად პოლარიზებული (კვალის დეპოლარიზაცია). აგზნების პროცესის განხილვის შედეგად მოქმედების პოტენციალი შეიძლება ასეც განვსაზღვროთ: მოქმედების პოტენციალი აგზნების დროს მიმდინარე მემბრანული პოტენციალის ცვლილებათა მთლიანობაა

ამრიგად, მოქმედების პოტენციალი აუტოგენერატორული პროცესია, რომელიც ჩაირთვება, როგორც კი მემბრანის დეპოლარიზაცია მიაღწევს კრიტიკულ დონეს. მოქმედების პოტენციალის გენერირების უნარი მხოლოდ აგზნებად უჯრედებს აქვს.

მოქმედების პოტენციალს შემდეგი თავისებურებანი ახასიათებს:

1. იგი ტრიგერული პროცესია, რომელიც მიმდინარეობს პრინციპით: „ან სულ, ან არაფერი“. გამღიზიანებელი ფაქტორის, ვთქვათ, დენის ძალის სიდიდისა და ზემოქმედების დროის გაზრდა არ იწვევს მოქმედების პოტენციალის ამპლიტუდისა და ხანგრძლივობის შესაბამის გადიდებას.

გარკვეულ ფარგლებში გაღიზიანების ზღვრულზე დასაშვად უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია მისი მოქმედების ხანგრძლივობასთან.

2. ყოველ მოქმედების პოტენციალს ახასიათებს „იძულებითი სიჩუმის“ პერიოდი (რეფრაქტერობა), რომლის განმავლობაში შეუძლებელია მეორე მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნა. რეფრაქტერობისა და „ან სულ, ან არაფერის“ პრინციპი გამორიცხავს მოქმედების პოტენციალების შეჯამების შესაძლებლობას.

3. მოქმედების პოტენციალი ჩაუქრობლად, ანუ უდეკრემენტოდ ვრცელდება.

### **მოქმედების პოტენციალის წარმოქმნის „ნატრიუმის თეორია“**

მოსვენების პოტენციალის ფორმირება, როგორც ცნობილია, ძირითადად კალიუმის იონების მიმართ მემბრანის შერჩევითი განვლადობით არის გაპირობებული. აგზნებისას მემბრანის პოტენციალი, როგორც ვიცით, არა თუ მცირდება ნულამდე (როგორც ბერნშტეინი მიიჩნევდა), არამედ მისი ხანმოკლე რევერსია ხდება, ამ მოვლენის ახსნა შესაძლებელი გახდა ჰოჯკინის, კატცის და კეინსის მიერ ჩატარებული საინტერესო ცდების შედეგად (უჯრედგარეთა და უჯრედშიგა სითხის შედგენილობის შეცვლა, რადიაქტიური იზოტოპების გამოყენება და სხვა). მათი შეხედულებით, აგზნებისას ნატრიუმის იონების მიმართ მემბრანის განვლადობა სპეციფიკურად მატულობს, რაც გარკვეული დროის შემდეგ იცვლება კალიუმის იონების განვლადობის მკვეთრი გაზრდით (წონასწორობის პოტენციალი კალიუმისათვის 94 მვ-ს ტოლია). მოქმედების პოტენციალის განვითარებისას მემბრანული პოტენციალი იცვლის პოლარობას და მიისწრაფვის ნატრიუმის წონასწორობის პოტენციალისაკენ (61 მვ), თუმცა ვერ აღწევს მას (რევერსიის პოტენციალი საშუალოდ უდრის 35 მვ-ს). უნდა აღვნიშნოთ, რომ რევერსიის პოტენციალი არ არის იმდენად ახლოს ნატრიუმის წონასწორობის პოტენციალთან, როგორც მოსვენების პოტენციალი კალიუმის წონასწორობის პოტენციალთან. ამის მიზეზი ის არის, რომ მოქმედების პოტენციალის პიკის დროს ამ იონთა განვლადობის კოეფიციენტების თანაფარდობა:  $P_{Na} : P_K = 20 : 1$  არასოდეს არ არის ისეთი დიდი მნიშვნელობის, როგორც მოსვენების მდგომარეობაში:  $P_K : P_{Na} = 75 : 1$ .

ნატრიუმის იონების უჯრედში შესვლა იწვევს უარყოფითი მუხტის შემცირებას და საბოლოოდ მემბრანის გადამუხტვას (მემბრანის შიგნითა ზედაპირი დადებითი ხდება), ხოლო კალიუმის გამოსვლა - საპირისპირო ეფექტს. ამქვარად, ნატრიუმის თეორიიდან გამომდინარეობს, რომ მოქმედების პოტენციალის დეპოლარიზაციის ფაზა გამოწვეულია ნატრიუმის იონების უჯრედში შესვლით, ხოლო რეპოლარიზაციის ფაზა - კალიუმის იონების უჯრედიდან გამოსვლით.

## ლექცია IX

### ელექტროდინამიკის საფუძვლები

სიტყვები „ელექტრობა“, „ელექტრული მუხტი“ „ელექტრული დენი“ ხშირად გვესმის და მიჩვეულიც ვართ მათ გამოყენებას ყოველდღიურად. მაგრამ აბა სინჯეთ უპასუხოდ კითხვას: „რა არის ელექტრული მუხტი?“ დარწმუნდებით, რომ ეს არც ისე მარტივია.

თანამედროვე წარმოდგენები ელექტრულ მოვლენებზე ჩამოყალიბდა ხანგრძლივი განვითარების შედეგად. დაწყებითი ცნობები სხეულების ხახუნით დაელექტროების შესახებ არსებობდა ჯერ კიდევ VII საუკუნეში ჩვენს წელთაღრიცხვამდე, ელექტრული მოვლენების მეცნიერული შესწავლა კი დაიწყო მხოლოდ XVII საუკუნიდან.

თითქმის XIX საუკუნის ბოლომდე, ელექტრულ მოვლენებს ხსნიდნენ ელექტრული სითხის (ერთი ან ორი ელექტრული სითხის) არსებობით ან ეთერის დაჭიმულობით.

აზრი ელექტრული მუხტების დისკრეტულობის შესახებ წარმოიშვა ელექტროლიზის კანონების ჩამოყალიბების შემდეგ, ხოლო ელექტრონის აღმოჩენის შემდეგ (1897წ.) უშუალო ცდებით იქნა დამტკიცებული, რომ ყველა ელექტრული მუხტი შედგება უმცირესი ელემენტარული მუხტებისაგან, ე.ი. ელექტრულ მუხტებს დისკრეტული აგებულება აქვთ. ელექტრული მუხტი არის ზოგიერთი ელემენტარული ნაწილაკის განუყოფელი თვისება. საზოგადოდ, ელემენტარულ ნაწილაკების რიცხვს მიეკუთვნება ელექტრონი (უარყოფითი მუხტის მატარებელი  $-e$ ), პროტონი (დადებითი მუხტის მატარებელი  $+e$ ) და ნეიტრონი (მისი მუხტი ნულის ტოლია). ამ ნაწილაკებისაგან არის შედგენილი ნებისმიერი ნივთიერების ატომები და მოლეკულები, ამიტომ ცხადია ელექტრულ მუხტებს შეიცავს ყველა სხეული. ელემენტარული ელექტრული მუხტი ელექტრონის (პროტონის) მუხტია, რომელიც უდრის  $1,6 \cdot 10^{-19}$  კულონს. ყველა დანარჩენი მუხტი ელექტრონის მუხტის ჯერადაა.

რადგან ყოველი მუხტი  $q$  წარმოიქმნება ელემენტარული მუხტების ერთობლიობით, ამიტომ ის შეიძლება განვიხილოთ, როგორც  $e$ -ს მთელი რიცხვის ( $N$ ) ჯერადა:

$$q = \pm Ne \quad (63)$$

თუ ფიზიკურ სიდიდეს შეუძლია მიიღოს გარკვეული დისკრეტული მნიშვნელობები, ამბობენ, რომ ეს სიდიდე იკვანტება. ფორმულა (1) მიუთითებს, რომ ელექტრული მუხტი იკვანტება.

გრავიტაციული ძალებიგან განსხვავებით, ელექტრულ ძალებს შეიძლება ჰქონდეს როგორც მიზიდვის, ისე განზიდვის ხასიათი. აქედან გამომდინარე, წარმოიშვა აზრი ორგვარი ელექტრული მუხტის არსებობის შესახებ. პირობითად, დადებითად ჩათვალეს ის მუხტი, რომელიც ჩნდება მინაზე აბრეშუმით გახეხვის შედეგად, ხოლო უარყოფითად - მუხტი, რომელიც ჩნდება ებონიტზე, ქარვაზე შალით ან ბეწვით გახეხვის შედეგად. ცდებით დამტკიცებულ იქნა, რომ ერთნაირი ნიშნის მუხტები განიზიდავენ ერთმანეთს, სხვადასხვა ნიშნის მუხტები კი ერთმანეთს იზიდავენ.

ყველა ნივთიერების ატომებში ატომბირთვის მუხტი უდრის ელექტრონების მუხტების ჯამს, ამიტომ თითოეული ატომი ნეიტრალურია და სხეულებიც ნეიტრალურია იმის გამო, რომ მათში დადებითი და უარყოფითი მუხტების ჯამი ერთმანეთის ტოლია. სხეულების დამუხტვის დროს ხდება მუხტის გადასვლა ერთი სხეულიდან მეორეში ან მათი გადანაცვლება თვით სხეულის შიგნით, ე.ი. ხდება არსებული მუხტების განცალკება. ერთ სხეულზე (ან სხეულის ერთ ნაწილში) ამ დროს წარმოიშობა ჭარბი დადებითი მუხტი, მეორეზე კი - იგივე რაოდენობის ჭარბი უარყოფითი მუხტი, ე.ი. ერთი ნიშნის მუხტის წარმოშობას ყოველთვის თან ახლავს მისი ტოლი და საწინააღმდეგო მუხტის გაჩენა. მაგალითად, როდესაც ორ სხეულს ერთმანეთზე გავხეხავთ, ორივე სხეული იმუხტება, ამასთან, ამ სხეულების მუხტები ერთმანეთის ტოლია და საწინააღმდეგო; ხოლო მუხტების საერთო რაოდენობა უცვლელი რჩება.

ელექტრული მუხტები შეიძლება გაქრეს და თავიდან წარმოიშვას. თუმცა ყოველთვის ჩნდება და ქრება ორი ელემენტარული მუხტი ურთიერთსაწინააღმდეგო ნიშნით. მაგალითად, ელექტრონი და პოზიტრონი (დადებითი ელექტრონი). საერთო ჯამი ისევ უცვლელი იქნება.

მრავალრიცხოვანი ცდების საფუძველზე ჩამოყალიბებულ იქნა მუხტის მუდმივობის კანონი, რომლის თანახმად იზოლირებულ სისტემაში მუხტების ალგებრული ჯამი მუდმივი სიდიდეა (ელექტრულად იზოლირებული ისეთ სისტემას ეწოდება, რომლის შიგნით არ შედიან ან რომლიდანაც არ გამოდიან დამუხტული ნაწილაკები)

ეს კანონი ფიზიკის ერთ-ერთ ფუნდამენტურ კანონს წარმოადგენს და, ენერჯის მუდმივობის კანონის მსგავსად, ვრცელდება ყველა ცნობილ მოვლენაზე.

ამგვარად, ელექტრული მოვლენების შესწავლის საფუძველზე დადგენილ იქნა მუხტების სამი ძირითადი თვისება: მათი დისკრეტულობა (კვანტურობა), ორნიშნეობა და მუდმივობა.

### კულონის კანონი

ისეთ დამუხტულ სხეულებს, რომელთა ზომა მცირეა, მათ შორის მანძილთან შედარებით, წერტილოვანი მუხტები ეწოდება.

წერტილოვანი მუხტების ურთიერთქმედების კანონი ჩამოაყალიბა ფრანგმა მეცნიერმა კულონმა 1785 წელს ცდების საფუძველზე, რომლებსაც იგი აწარმოებდა გრებიითი სასწორის საშუალებით ნახ.1), მსგავსად კავენდიშისა, რომელმაც განსაზღვრა გრავიტაციული მუდმივა.

კულონის კანონის თანახმად, ორი წერტილოვანი მუხტის ურთიერთქმედების ძალა პირდაპირპროპორციულია მუხტების სიდიდეების ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა.

აღნიშნოთ მუხტების სიდიდე  $q_1$ -ით და  $q_2$ -ით, მთ შორის მანძილი  $r$ -ით, მაშინ, კულონის კანონის თანახმად, მათი ურთიერთქმედების ძალა სიდიდით შემდეგნაირად გამოისახება

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (64)$$

სადაც  $K$  არის პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია ამ ფორმულაში შემავალი სიდიდეების ერთეულების შერჩევაზე.

კულონი ცდებს აწარმოებდა ჰაერში მყოფ დამუხტულ სხეულებზე. უფრო გვიან გამოიკვია, რომ ურთიერთქმედების ძალა დამოკიდებულია აგრეთვე იმ გარემოს თვისებებზე, რომელშიაც მუხტებია მოთავსებული და ფორმულა (2) გამოსადეგია იმ შემთხვევაში, როდესაც დამუხტული სხეულები მოთავსებულია სივარცელში.

### ელექტრული ველი

დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედების ასახსნელად ისტორიულად ჩამოყალიბდა ორი თეორია - შორსქმედებისა და ახლოქმედების თეორიები. შორსქმედების თეორიის თანახმად, დამუხტული სხეულები ურთიერთქმედებენ მანძილზე შუალედური გარემოს მონაწილეობის გარეშე და ურთიერთქმედების გადაცემა მყისიერად წარმოებს, ე.ი. გადაცემის სიჩქარე უსასრულოდ დიდია. ახლოქმედების თეორიის თანახმად, დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედება ხორციელდება ელექტრული ველის საშუალებით. პირველი მუხტი გარს შემორტყმულია თავისი ველით, რომელიც მოქმედებს მეორეზე. მეორე მუხტის ველი თავის მხრივ, მოქმედებს პირველზე, მასთან, ურთიერთქმედების გავრცელება წარმოებს სასრულო სიჩქარით, რომელიც უდრის სინათლის სიჩქარეს სივარცელში. ველის ცნება ფარადეიმ შემოიღო დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედებების ასახსნელად. შემდეგ იგი გავრცელეს სხვა სახის ურთიერთქმედებებზედაც.

თანამედროვე ფიზიკაში კი ერთადერთი მიღებული თეორია არის ახლოქმედების თეორია, რომლის მიხედვით ყველა ურთიერთქმედება წარმოებს რაიმე ველის საშუალებით: უძრავი მუხტების ურთიერთქმედება ხორციელდება ელექტროსტატიკური ველის, ხოლო მოძრავი მუხტებისა - მაგნიტური ველების საშუალებით.

ელექტრული ველის შესწავლის მიზნით ველში შეაქვთ ე.წ. სასინჯი წერტილოვანი მუხტი, რომელიც საკმაოდ მცირე უნდა იყოს, რომ არ დაამახინჯოს შესასწავლი ელექტრული ველი. ამ მუხტზე იმოქმედებს ელექტრული  $F$  ძალა, რომელიც დამოკიდებულია როგორც ველის თვისებებზე, ისე ველში შეტანილ მუხტზე. კულონის კანონიდან გამომდინარეობს, რომ ველში მოთავსებულ სასინჯ  $q_0$  მუხტზე მოქმედი ძალა ამ მუხტის სიდიდის პირდაპირპროპორციულია. ამიტომ, თუ  $F$  ძალას გავყოფთ ველში შეტანილ  $q_0$  მუხტზე, მაშინ  $\frac{F}{q_0}$  შეფარდება  $q_0$ -ზე აღარ იქნება დამოკიდებული და დაახასიათებს ელექტრულ ველს იმ წერტილში, სადაც სასინჯი მუხტია მოთავსებული. მას ველის დაძაბულობა ეწოდება. აღვნიშნოთ ველის დაძაბულობა  $\vec{E}$ -თი, მაშინ, განმარტების თანახმად

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (65)$$

თუ  $q_0 > 0$ , მაშინ  $E$  ვექტორს  $F$  ძალის მიმართულება ექნება, ე.ი. დაძაბულობას აქვს ველის მოცემულ წერტილში მოთავსებულ დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულება.

დაძაბულობის ფიზიკური აზრის განსაზღვრის მიზნით დავუშვათ, რომ  $q_0 = 1$ , მაშინ  $E = F$ , ე.ი. დაძაბულობა რიცხობრივად უდრის ველში შეტანილ ერთეულოვან მუხტზე მოქმედ ძალას.

ერთეულთა საერთაშორისო სისტემაში დაძაბულობის ერთეულის მისაღებად დავუშვათ, რომ  $q_0 = 1$  კლ,  $F = 1$  ნ, მაშინ  $E = 1$  ნ/კლ. ე. ი. დაძაბულობის  $SI$  ერთეულად მიღებულია დაძაბულობა ველის ისეთ წერტილში, რომელშიაც 1 კულონ მუხტზე მოქმედებს 1 ნიუტონი ძალა.

## ლექცია X

### ცოცხალ ქსოვილთა ელექტროგამტარობა მუდმივი და ცვლადი დენის შემთხვევაში

იმის მიხედვით, ელექტრული მუხტი, როგორ მდგომარეობაშია, წარმოიქმნება სხვადასხვა სახის ველი. თუ მუხტი მოძრაობს თანაბრად, მაშინ ის ელექტრული ველის გარდა ქმნის მაგნიტურ ველსაც. ამრიგად, მოძრავი მუხტების (ელექტრული დენი) ველის დასახასიათებლად გარდა ელექტრული ველის დაძაბულობისა, საჭიროა მაგნიტური ველის მახასიათებლის ( $\vec{B}$  ინდუქციის ვექტორი ან  $\vec{H}$  - მაგნიტური დაძაბულობა) მოცემა სივრცის ყველა წერტილში.

თუ გამტარში შევქმნით ელექტრულ ველს, ელექტრული ძალის მოქმედებით გამტარის თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები ამოძრავდებიან გარკვეული მიმართულებით.

ელექტრული დენი ეწოდება დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ (მიმართულ) მოძრაობას. თუ დენი წრედში სიდიდით და მიმართულებით არ იცვლება, მაშინ მას მუდმივი დენი ეწოდება. წრედში დენის არსებობა მისი მოქმედებით მჟღავნდება: სითბური მოქმედება, მაგნიტური და ქიმიური. გამტარი გამავალი დენის ძალა დამოკიდებულია გამტარის თვისებებზე. გამტარის თვისებას წინააღმდეგობა გაეწიოს ელექტრულ დენს წინაღობა ( $R$ ) ეწოდება. მისი ერთეულია 1 ომი.

გამტარის წინაღობა დამოკიდებულია გამტარის გეომეტრიულ ზომებზე და ტემპერატურაზე:

#### ომის კანონი:

წრედის უბნისათვის ომის კანონის თანახმად, გამტარში გამავალი  $I$  დენი გამტარის ბოლოებზე არსებული  $U$  ძაბვის პროპორციულია  $I = gU$ .

პროპორციულობის  $g$  კოეფიციენტს ელექტროგამტარობას უწოდებენ.  $g$  -ს

შებრუნებული სიდიდე გამტარის წინაღობაა.  $R = \frac{1}{g}$

ომის კანონი პირველი გვარის გამტარებისათვის (ლითონები) ასე ჩაიწერება:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (66)$$

საიდანაც  $U = IR$ . ამ ფორმულიდან გამომდინარე, თუ გამტარის ბოლოებს შორის პოტენციალთა სხვაობა, ე. ი. ძაბვა არ იცვლება, არც დენის ძალა უნდა იცვლებოდეს.

ჯოულ-ლენცის კანონი: დენის მიერ გამტარში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა ( $Q$ ) პირდაპირპროპორციულია დენის ძალის კვადრატის ( $I^2$ ) წინაღობისა ( $R$ ) და დენის დინების დროისა ( $t$ ):

$$Q = I^2 R t \quad (67)$$

ამ კანონებს დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ელექტროთერაპიაში. დიათერმია ანუ ენდოთერმია - ელექტროთერაპიის ერთ-ერთი სახეა: მაღალი სიხშირის რამდენიმე ასეული ვოლტის ძაბვისა და დიდი დენის ძალის სხეულში გატარებისას, დენის მიმართ ქსოვილების წინააღმდეგობის შედეგად ელექტროენერგია სითბურ ენერგიად იქცევა და ღრმად მდებარე ორგანოებსა და ქსოვილებში წარმოიქმნება სითბო (ჯოულ-ლენცის კანონის თანახმად), რომელსაც სამკურნალო მიზნით იყენებენ. ეს სითბო აყურებს ტკივილს, სპაზმურად შეკუმშულ კუნთებს, იწვევს ჰიპერემიით დაავადებულ ქსოვილებში რასაც, თავისთავად, თან ახლავს ადგილობრივი კვების გაუმჯობესება.

### დაბალი სიხშირისა და დაბალი ძაბვის იმპულსური დენები

მუდმივი დენი, რომელიც პერიოდულად წყდება, იმპულსური დენია. იმპულსურ დენს იყენებენ კუნთების ელექტროსტიმულაციის მიზნით ან კუნთების მოძრაობითი ფუნქციის დარღვევებისას, მათი ვარჯიშის მიზნით. იმპულსური დენების სამკურნალო გამოყენებისას, კუნთების აგზნების და დასვენების პერიოდები ცვლიან ერთმანეთს თანმიმდევრობით. ამ დროს თითოეული პერიოდის ამპლიტუდა და იმპულსი თანდათან ძლიერდება - ნულიდან უმაღლეს დონემდე და შემდეგ ასევე თანდათანობით ქვეითდება ნულამდე.

როგორც გამოკვლევებმა ცხადყო, ომის კანონი  $I = \frac{U}{R}$  მეორე გვარის გამტარებისა (ელექტროლიტები) და ბიოლოგიური ობიექტებისათვის არ არის მართებული. ამ შემთხვევაში უცვლელი გარეშე ძაბვის დროს დენი მუდმივი არ რჩება. დენის ძალა კლებულობს და მხოლოდ გარკვეული დროის შემდეგ აღწევს მუდმივ მნიშვნელობას. ეს ფაქტი პოლარიზაციული მოვლენებით აიხსნება. მუდმივი დენის გავლის დროს ბიოლოგიურ სისტემაში წარმოიქმნება ელექტრომაგნიტური ძალის (ემძ), რომელიც გარესე ველის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული. მას პოლარიზაციის ემძ-ს უწოდებენ. ომის კანონს ამ შემთხვევაში ასეთი სახე აქვს:

$$I = \frac{\varepsilon - \varepsilon(t)}{R}, \quad (68)$$

სადაც  $\varepsilon(t)$  დროის ფუნქციაა და იგი პოლარიზაციის ემძ-ა.

პოლარიზაციის ემ წარმოშობა შეიძლება შემდეგნაირად ავხსნათ: გარეშე ველის ზემოქმედებით ხდება თავისუფალი და ბმული მუხტების ისეთი გადანაწილება, რომელიც იწვევს გარეშე ველის საწინააღმდეგოდ მიმართული ემ წარმოშობას. სიციხადისათვის შეიძლება მოვიყვანოთ ასეთი მაგალითი. ვთქვათ, გამოსაკვლევი ობიექტი შეიცავს პოლარულ (დიპოლურ) მოლეკულებს.

გარეშე ელექტრულ ველში ასტი მოლეკულები შემობრუნდება და ორიენტირდება სრულიად გარკვეული მიმართულებით.

დიპოლური მოლეკულების ორიენტაციის შედეგად აღძრული  $\vec{E}$  დაძაბულობის ვექტორი გარეშე  $\vec{E}_0$  დაძაბულობის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული და ამცირებს მას.

ასეთი სახის პოლარიზაციას დიპოლურ პოლარიზაციას უწოდებენ. იგი ახასიათებს ისეთ ნივთიერებას, რომლის მოლეკულებს აქვს დიდი დიპოლური მომენტი (მაგ., წყალს, სპირტს, მაკრომოლეკულათა ხსნარებს და სხვა).

დროის ინტერვალს, რომელიც საჭიროა მოლეკულების შემობრუნებისა (ორიენტირებისა) და, ე.ი. პოლარიზაციის მაქსიმალური ემ წარმოშობისათვის, რელაქსაციის დროს უწოდებენ. იგი დამოკიდებულია მოლეკულათა ზომებზე, სიბლანტეზე, ტემპერატურაზე და სხვა.

სტოქსის ფორმულის თანახმად, დიპოლური რელაქსაციის დრო გამოისახება ფორმულით:

$$t = 4\pi \frac{\eta r^3}{KT}, \quad (69)$$

სადაც  $\eta$  სიბლანტეა,  $r$  - დიპოლის საშუალო რადიუსი,  $K$  - ბოლცმანის მუდმივა,  $T$  - აბსოლიტური ტემპერატურა. დიპოლური პოლარიზაციის რელაქსაციის დრო ცვალებადობს საკმაოდ დიდ ფარგლებში -  $10^{-6} - 10^{-12}$  წმ.

ცნობილია პოლარიზაციის სხვა სახეებიც: ელექტრონული, იონური, მაკროსტრუქტურული, ზედაპირული და ელექტროლიტური პოლარიზაცია.

ყველაზე მცირე რელაქსაციის დრო ( $10^{-16} - 10^{-14}$  წმ) აქვს ელექტრონულ პოლარიზაციას. ყველაზე დიდი რელაქსაციის დროით ხასიათდება ზედაპირული პოლარიზაცია ( $t - 10^3 - 1$  წმ).

ბიოლოგიურ ობიექტში ვლინდება ზემოთ ჩამოთვლილი ყველა სახის პოლარიზაცია ამა თუ იმ ფორმით, მეზისმიერი სახის პოლარიზაცია ამცირებს გარეშე ელექტრული ველის დაძაბულობას. ამიტომ ელექტრული ველის დაძაბულობა ნივთიერებაში  $E$  ყოველთვის ვაკუუმში  $E_0$  დაძაბულობაზე ნაკლებია. როგორც ვიცით,

დიელექტრიკული შეღწევადობა  $\epsilon = \frac{E_0}{E}$ ; დიელექტრიკული შეღწევადობის მიხედვით

შეგვიძლია შევაფასოთ გამოსაკვლევ ობიექტში პოლარიზაციული ეფექტის სიდიდე.

როცა წრედში გამავალი დენი სიდიდით და მიმართულებით პერიოდულად იცვლება, ამბობენ, რომ გვაქვს ცვლადი დენი. ცვლადი დენი ხასიათდება სიხშირით ( $\omega$ ), პერიოდით ( $T$ ), ამპლიტუდით ( $A$ ), ფაზით ( $\omega_0 t + \phi_0$ ). წრედში გარდა აქტიური ე.წ. ომური წინაღობისა  $R$  (სადაც დენის გავლისას გამოიყოფა სითბო), გვხდება რეაქტიული (ტევადური და ინდუქციური) წინაღობა. მათი ცვლადი დენის გავლისას ენერგია არ გამოიყოფა; ხდება მხოლოდ გარკვეულ ინტერვალებში ენერგიის



პერიოდული დაგროვება: კონდენსატორში ელექტრული, ხოლო კოჭაში მაგნიტური ველის სახით.

როგორც ცნობილია ცოცხალი უჯრედი არაერთგვაროვანი ჰეტროგენული სისტემაა. უჯრედის შემადგენელი სტრუქტურული ელემენტები ელექტროლიტურ ხსნარებში შეწონილია ბმული ან თავისუფალი სახით და ქმნის მეტად რთულ დინამიკურ ურთიერთკავშირს. ასეთი გაგებით, უჯრედი დისპერსიული სისტემაა, რომელშიც მრავლადაა წარმოდგენილი ფაზათა გამყოფი საზღვრები. სტრუქტურული აგებულობის ასეთი სირთულის გამო ცოცხალ უჯრედთა ელექტროგამტარობის მექანიზმი მეტად რთულია.

ცოცხალ ქსოვილებს ახასიათებს აქტიური (ომური) და რეაქტიული (ტევადური) წინაღობა. (ცოცხალ ქსოვილებში ინდექციური უბნები არ ვლინდება). მათ პასიურ ელექტრულ პარამეტრებს უწოდებენ.

ცვლადი დენის საშუალებით ელექტროგამტარობის გაზომვის დროს მარტო ომური წინაღობით ვერ შემოვიფარგლებით. როგორც აღვნიშნეთ, ბიოლოგიურ სისტემას ახასიათებს სხვადასხვა გამტარობის უბნები, რაც იწვევს მათში დენის გავლისას მუხტების დაგროვებას. სხვანაირად რომ ვთქვათ, კონდენსატორული ტიპის უბნები წარმოიქმნება. ელექტროგამტარობის გაზომვის დროს რომ მივიღოთ უფრო სრული ინფორმაცია, საჭიროა, გარდა ომური წინაღობისა, ტევადური წინაღობაც განვსაზღვროთ.

ტევადური წინაღობა  $R_c = \frac{1}{\omega c}$ , სადაც: ციკლური სიხშირე  $\omega = 2\pi f$ , ხოლო  $f$  - ცვლადი დენის სიხშირეა.

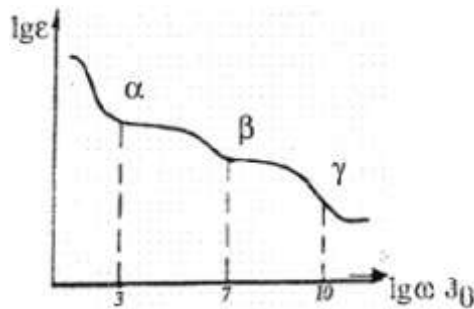
ცნობილია, რომ კონდენსატორი ცვლადი დენისათვის, მუდმივისგან განსხვავებით, დიდი წინაღობა არ არის. ამიტომ ცვლადი დენის შემთხვევაში ბიოლოგიური ობიექტის ელექტროგამტარობის გაზომვით შეგვიძლია უფრო მდიდარი ინფორმაციის მიღება.

ცვლადი დენით გაზომვის დროს ობიექტის წინაღობა შედგება ორი: აქტიური ანუ ომური და რეაქტიული ანუ ტევადური წინაღობისაგან. ინდექციური წინაღობა ცოცხალ სისტემას არ გააჩნია. ამ ჯამურ წინაღობას იმპედანსს უწოდებენ:  $Z = \sqrt{R_0^2 + R_c^2}$ .  $R_0$  - ომური წინაღობაა,  $R_c$  - ტევადური.

ბიოლოგიური სისტემა შეიძლება წარმოვიდგინოთ ომური და ტევადურ წინაღობათა შეერთების ისეთ კომბინაციად, რომელშიც არის როგორც პარალელურად, ასევე მიმდევრობით შეერთებული უბნები.

ცვლადი დენის სიხშირის გაზრდით იმპედანსი მცირდება, ე.ი. გამტარობა მატულობს. ეს იმით არის გამოწვეული, რომ სიხშირის ზრდასთან ერთად მცირდება ტევადური წინაღობა. მეორე მხრივ, პოლარიზაციული ეფექტის სიდიდე დამოკიდებულია ცვლადი დენის სიხშირეზე; თუ ცვლადი დენის პახევარპერიოდი რომელიმე სახის პოლარიზაციის დროზე მეტია, მაშინ პოლარიზაცია აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას და ნივთიერება დახასიათდება დიელექტრიკული შეღწევადობის გარკვეული ეფექტური მნიშვნელობით, თუ ცვლადი დენის ნახევარპერიოდი რელაქსაციის დროზე ნაკლები გახდება, პოლარიზაციის ემპ ვერ ასწრებს მაქსიმალური მნიშვნელობის მიღწევას. მაშასადამე, სიხშირის ზრდას პოლარიზაციული ეფექტები მცირდება, ხოლო გამტარობა მატულობს.

სიხშირის რომელიღაც მნიშვნელობაზე მოცემული საახის პოლარიზაცია ფაქტიურად ისპობა. დიელექტრიკულ შეღწევადობას და გამტარობას განსაზღვრავს უკვე სხვა სახის, უფრო ნაკლები რელაქსაციის დროის მქონე პოლარიზაცია.



ნახ.26. იმპედანსის დისპერსია

როგორც სურათიდან ჩანს,  $\alpha$  უბანი მოიცავს დიაპაზონს  $10^3$  ჰც სიხშირის ახლო უბანში.

ფიქრობენ, რომ სიხშირის მატებასთან ერთად დიელექტრიკული შეღწევადობისა და ქსოვილის წინაღობის შემცირება მოცემულ დიაპაზონში გამოწვეული უნდა იყოს ზედაპირული პოლარიზაციის შემცირებით.

$\beta$  - დისპერსიის უბანი მოიცავს სიხშირეთა შედარებით უფრო ფართო ინტერვალს ( $10^3 - 10^7$ ). სიხშირეთა ამ დიაპაზონში, როგორც ჩანს, მთავარ როლს ასრულებს მაკროსტრუქტურული პოლარიზაცია. როგორც ვიცით, ბიოლოგიურ სისტემებს (უჯრედი) ახასიათებს ჰეტროგენული სტრუქტურა. მათში მრავლადაა ფაზათა გამყოფი უბნები. პოლარიზაცია ვლინდება უჯრედის მთელ მოცულობაში. სიხშირეთა მოცემულ ინტერვალში მაკროსტრუქტურული პოლარიზაციის ეფექტის შემცირება იწვევს დიელექტრიკული შეღწევადობისა და წინაღობის შემცირებას.

$\gamma$  - დისპერსია თავს იჩენს უფრო მაღალ ( $f > 10^8$  ჰც) სიხშირეზე. სიხშირის ამ ინტერვალში მკვეთრად მცირდება პოლარიზაციული ეფექტი, რომელიც ძირითადად გამოწვეულია წყლის დიპოლური მოლეკულებით,  $f > 10^{10}$  ჰც სიხშირეებზე წყლის მოლეკულებით გამოწვეული პოლარიზაციის ეფექტი საერთოდ ქრება. სისტემაში ვლინდება მხოლოდ ყველაზე მცირე რელაქსაციის დროის მქონე პოლარიზაცია, როგორცაა იონური და ელექტრონული პოლარიზაცია. მათ მიერ გამოწვეული პოლარიზაციული ეფექტები მცირეა.

### ბიოლოგიურ ობიექტთა ფუნქციური მდგომარეობის შეფასება პასიური ელექტრული პარამეტრების მიხედვით

ელექტროგამტარობის გაზომვის მეთოდი ბიოლოგიასა და მედიცინაში გამოყენებულია, ერთი მხრივ, ცოცხალ სისტემათა ელექტროფიზიკური მახასიათებლების შესასწავლად, მეორე მხრივ კი, და ეს მეტად მნიშვნელოვანია, მათი ფუნქციური მდგომარეობის შეფასებისათვის.

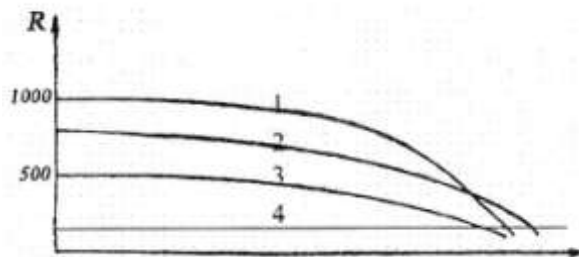
ცოცხალ ობიექტთა ელექტრული პარამეტრების მნიშვნელობა არსებითად არის დამოკიდებული სხვადასხვა ფაქტორზე. მაგ., ადამიანის კანის ელექტროგამტარობა

იცვლება მეტეოროლოგიური ფაქტორების: ტემპერატურის, წნევის, ტენიანობის და სხვა შეცვლის დროს. მათი მნიშვნელობა ასევე არსებითად არის დამოკიდებული ობიექტის ფუნქციურ მდგომარეობაზე.

ბიოლოგიური ობიექტები, როგორც ცნობილია, ჰეტეროგენული, დისპერსიული სისტემებია მკვეთრად გამოხატული დიდი რიცხვი ფაზათა გამყოფი საზღვრებით. ჯამური წინაღობის (იმპედანსის) სიდიდე განისაზღვრება უჯრედის შიგნითა და უჯრედშორისი გარემოს გამტარობით. იონურ (აქტიურ) გამტარობაზე პასუხისმგებელია ძირითადად უჯრედშორისი და უჯრედშიგა ელექტროლიტური სისტემები. რეაქტიული მდგენელის სიდიდეს კი განსაზღვრავს მემბრანული და სხვა დიელექტრიკული ტიპის სტრუქტურული წარმონაქმნები.

ორგანოთა და ქსოვილთა წინაღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების ხასიათს მისი ფუნქციური მდგომარეობა განსაზღვრავს. იმის მიხედვით, თუ სტრუქტურული ორგანიზაციის რომელ დონეზეა ცვლილება, დისპერსიის მრუდზე ვლინდება,  $\alpha$ ,  $\beta$  და  $\gamma$  უბნების მაქსიმუმის შესაბამისი სიხშირული წანაცვლება ან მათი გაქრობა საერთოდ.

ცდებით დადგენილია, რომ ელექტროგამტარობის დისპერსია ქსოვილთა კვდომის პროცესში თანდათან მცირდება, მკვდარი ქსოვილისთვის კი დისპერსია საერთოდ არ აღინიშნება. მახასიათებელი პოლარიზაციული ეფექტები და ელექტროგამტარობის დისპერსია მხოლოდ ცოცხალი ობიექტებისათვის არის დამახასიათებელი.



ნახ. 27. წინაღობის სიხშირეზე დამოკიდებულება ქსოვილთა კვდომის პროცესში

სურათიდან ნათლად ჩანს, რომ მკვდარი ქსოვილის წინაღობა სიხშირეზე არ არის დამოკიდებული.

ქსოვილთა ცხოველქმედების შესაფასებლად იყენებენ სიდიდეს, რომელიც განისაზღვრება დაბალ და მაღალ სიხშირეზე გაზომილი წინაღობების ფარდობით. მას პილარიზაციის კოეფიციენტი ( $K$ ) უწოდებენ.

$$K = \frac{R_{10^4}}{R_{10^6}}$$

მრიცხველი  $10^4$  ჰერცზე გაზომილი წინაღობის სიდიდეა, ხოლო მრიცხველი - წინაღობის მნიშვნელობა  $10^6$  ჰერცზე.

ორგანოთა და ქსოვილთა უმეტესობას მაქსიმალური ელექტროგამტარობა ახასიათებს  $10^6$  ჰერცზე. თუმცა ზოგიერთი უჯრედისა და ქსოვილისათვის მაქსიმუმი გაცილებით

უფრო მაღალი სიხშირისაკენ არის წანაცვლებული. ამიტომ ზოგჯერ  $10^6$  ჰერცის მაგივრად იღებენ გაცილებით მაღალ სიხშირეს.

ნორმალური ქსოვილისათვის  $K$ -ს მნიშვნელობა ყოველთვის მუდმივია და 1-ზე მეტია და დამოკიდებულია ქსოვილში ნივთიერებათა ცვლის ინტენსივობაზე (დვიძლისა და ელენთისათვის  $K$ -ს მნიშვნელობა უფრო მეტია, ვიდრე სხვა ორგანოებისათვის). ქსოვილთა კვდომის პროცესში  $K$ -ს მნიშვნელობა თანდათან 1-ს უახლოვდება.

ქსოვილთა ცხოველქმედების შესაფასებლად იყენებენ დიელექტრიკული დანაკარგის კუთხის ტანგენსს. როგორც ცნობილია, თუ წრედი შეიცავს მხოლოდ ომურ წინაღობას, დენისა და ძაბვის ცვლილება ერთმანეთს თანხვედბა ფაზით და ამ დროს ფაზათა წანაცვლების კუთხე ნულის ტოლია. ტევადური წინაღობის შემთხვევაში ცვლადი დენის ძალასა და ძალას შორის ფაზათა წანაცვლება  $90^\circ$ -ის ტილია.

ბილოგიური სისტემები, როგორც ვიცით, შეიცავს როგორც ომურ, ასევე ტევადურ უბნებსაც. ფაზათა წანაცვლების კუთხე, რომელიც ომური და ტევადური წინაღობის ფარდობით განისაზღვრება, მათთვის საკმაოდ დიდია. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ჯამურ წინაღობაში ტევადური წინაღობის წილი საკმაოდ მაღალია. კუთხეს, რომელიც ფაზათა წანაცვლების კუთხეს ავსებს  $90^\circ$ -მდე, დიელექტრიკული დანაკარგის კუთხეს ( $\delta$ ) უწოდებენ.  $\delta = 90^\circ - \varphi$ .

ცოცხალ ქსოვილს ახასიათებს ორი მეტად მნიშვნელოვანი თვისება. ერთი მხრივ, მასში საკმარისად არის თავისუფალი მუხტები, ამიტომ ის შეიძლება ელექტრულ გამტარად ჩავთვალოთ. მეორე მხრივ, ქსოვილი შეიცავს ასევე ბმულ მუხტებსაც, რაც მასში დიელექტრიკულ ეფექტებს განაპირობებს. ცხადია, ამ ორი თვისების გამო ქსოვილის სხვადასხვა სტრუქტურებში იმპედანსის სიდიდე (განაწილების სურათი) განსხვავებული იქნება.

გამოკვლევებით დადგინდა, რომ ცოცხალ ობიექტში ელექტროგამტარობის (ან იმპედანსის) სივრცული განაწილების მიხედვით შეიძლება მივიღოთ მისი გამოსახულება.

იმისათვის, რომ ელექტროგამტარობა გამოვიყენოთ ვიზუალიზაციისათვის, აუცილებელია მოიძებნოს სიხშირეტა ისეთი ინტერვალი, რომელშიც ელექტროგამტარობასა და ძაბვას შორის დამოკიდებულება წრფივი იქნება. გამოკვლევებით დადგინდა, რომ ეს პირობა 100 ჰც - 1000 კჰც სიხშირეთა ინტერვალში სრულდება. სათანადო დამუშავებისა და დახვეწის შემდეგ ვიზუალიზაციის ეს მეთოდი შეიძლება წარმატებით გამოვიყენოთ სადიაგნოსტიკო მიზნით.

### **მუდმივი ელექტრული დენის გავლენა ბილოგიურ ობიექტებზე**

მუდმივი მცირე დენის ძალით (რამდენიმე მილიამპერი) ორგანიზმის ქსოვილზე ზემოქმედების მეთოდს **გალვანიზაცია** ეწოდება. ფიზიკის კურსიდან ცნობილია, რომ, თუ წყალში ან სხვა დიელექტრიკულ სითხეში ნივთიერება გახსნილ მდგომარეობაში იგი ხდება დენის გამტარი და მას ელექტროლიტი ეწოდება. ელექტროლიტები მუდმივი დენის გატარების შემთხვევაში იშლებიან დადებით იონებად (მოძრაობენ კათოდისაკენ) და უარყოფით იონებად (მოძრაობენ ანოდისაკენ). **ელექტროლიტური პოლარიზაცია** ეწოდება ელექტროლიტში დენის ძალის შემცირებას, რომელიც გამოწვეულია

ელექტროდებთან იონების კონცენტრაციის გაზრდით და აირების ( $H_2$ ,  $Cl_2$ ,  $O_2$ ) ბუშტების გამოყოფით.

ცოცხალ ორგანიზმში კანისა და სხვა ქსოვილების ელექტროგამტარობა არ არის მუდმივი სიდიდე. ის იცვლება ისეთი ფაქტორების ზემოქმედებით, რომლებიც იწვევენ ქსოვილებში წყალ-ელექტროლიტური წონასწორობის დარღვევას. ჰიპერემიული ან შემუპებული ქსოვილები ჯამრთელებთან შედარებით ავლენენ უფრო მაღალ ელექტროგამტარობას. ქსოვილების ელექტროგამტარობა დამოკიდებულია ნერვიულ (განსაკუთრებით ვეგეტატიურ) და ჰორმონალ სისტემებზე. ბიოლოგიურ ქსოვილებში დენის გავლას თან ახლავს ფიზიკო-ქიმიური ძვრები, რაც საფუძვლად უდევს გალვანიზაციაზე ორგანიზმის პირველადი რეაქციის წარმოქმნას.

ქსოვილების გალვანიზაციის დროს წარმოიქმნება ელექტრული პოლარიზაცია - მემბრანასთან უარყოფითად დამუხტული იონების დაგროვება, რომელიც წარმოქმნის ელექტრომომძრავებელ ძალას. ყველაზე მეტად პოლარიზაცია გამოხატულია კანში, რომლისთვისაც დამახასიათებელია რთული მემბრანული სტრუქტურა. პოლარიზაცია ახასიათებს აგრეთვე ღრმად განლაგებულ ქსოვილებსაც, რომლებიც მდებარეობენ დენის გატარების გზაზე. პოლარიზაცია აისახება უჯრედების მემბრანების გამტარებლობაზეც. პოლარიზაცია ქრება თანდათან, რამდენიმე საათის განმავლობაში, რაც გარკვეულწილად დაკავშირებულია მუდმივი დენის ხანგრძლივ ზემოქმედებასთან.

გალვანიზაციის მოქმედების მექანიზმში მთავარი როლი უკავია გალვანური (მუდმივი) დენის ბუნებით განპირობებულ ფიზიკო-ქიმიურ პროცესებს; მისი მოქმედება აისახება ქსოვილებში იონების რაოდენობრივ და ხარისხობრივ თანაფარდობაზე. კანში მუდმივი დენის გავლისას კათიონები მიემართებიან კათოდისაკენ, ანიონები - ანოდისაკენ. იონების გადანაწილების არათანაბარი სიჩქარე დაკავშირებულია მათ სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებთან (მუხტი, რადიუსი, ჰიდრატაცია და სხვა). ამიტომ გალვანიზაციის შემდეგ წარმოიქმნება იონური ასიმეტრია, რომელიც აისახება უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობაზე, ბიოფიზიკურ, ბიოქიმიურ და ელექტროფიზიოლოგიური პროცესების მიმდინარეობის სიჩქარეზე.

გალვანიზაციის დროს ქსოვილებში ასევე აღინიშნება იონური აქტივობის მომატება, რაც განსაკუთრებით გამოხატულია გალვანური დენის ზემოქმედების პირველ წუთებში. კანსა და ქსოვილებში ასევე აღინიშნება მჟავა-ტუტოვანი წონასწორობის ცვლილებები. მჟავა-ტუტოვანი წონასწორობის ცვლილებები აისახება ფერმენტების აქტივობაზე, ქსოვილოვან სუნთქვაზე, ბიოკოლიოდების მდგომარეობაზე, რაც განსაზღვრავს უჯრედების ფუნქციურ მდგომარეობას.

გალვანიზაციის დროს იონების გადაადგილებასთან ერთად სითხეც მოძრაობს კათოდის მიმართულებით (ელექტროოსმოსი), ქსოვილებში წყლის გადაადგილების შედეგად კათოდის ქვეშ აღინიშნება შემუპება და გაფუჭება, ხოლო ანოდის ქვეშ - უჯრედის შეჭმუხვნა და გამკვრივება.

გალვანური დენის მეშვეობით სამკურნალო ნივთიერებების ორგანიზმში შეყვანას **სამკურნალო ელექტროფორეზი** ეწოდება. იგი უზრუნველყოფს სამკურნალო ნივთიერებების სპეციპიკურ ზემოქმედებას აქტიური ბიოლოგიური გამლიზიანებლის - გალვანური დენის მოქმედების ფონზე. ბუნებრივია, რომ საპასუხო რეაქცია არ წარმოადგენს ერთიანი სამკურნალო კომპლექსის შემადგენელი უბრალო ორი ფაქტორის ჯამს.

ელექტროფორეზის დროს წამლის ქსოვილში შეღწევის ძირითად გზას წარმოადგენს საოფლე და ცხიმის ჯირკვლების გამომტანი სადინარები, ნაკლებად კი - უჯრედშიდა და უჯრედშორისი სივრცეები. ელექტროფორეზით შეყვანილი სამკურნალო ნივთიერების რაოდენობა დამოკიდებულია მის თვისებებზე (ზომებზე, ხსნადობაზე, მუხტზე), მოქმედი ხსნარის პარამეტრებსა (გამხსნელის ტიპზე, კონცენტრაციაზე, pH, პრეპარატის სისუფთავის ხარისხზე) და პროცედურის ჩატარების პირობებზე (დენის ძალაზე, ზემოქმედების ხანგრძლივობაზე, სხვა სამკურნალო ღონისძიებების გამოყენებაზე და სხვა). მკურნალობის მიზნით ანოდიდან შეჰყავთ  $Ca$ , ნოვაკაენი, ხოლო კათოდიდან ასკორბინის მჟავა, ბრომი, იოდი.

ელექტროფორეზი ფართოდ გამოიყენება აგრეთვე ბიოქიმიასა და იმუნოლოგიაში დიაგნოსტიკის მიზნით.

## ლექცია XI

### მაგნიტური ველი

#### მაგნიტური ველის გავლენა ორგანიზმზე. ბიომაგნეტიზმი

მაგნიტური ველი ელექტრომაგნიტური ველის გამოვლენის ერთ-ერთი ფორმაა. XIX საუკუნემდე მეცნიერები იცნობდნენ მხოლოდ ბუნებრივი მაგნიტის მაგნიტურ ველს. ასეთი ველი ერთი შეხედვით არ ავლენს რაიმე კავშირს ელექტრულ ველთან. ამიტომ, ბუნებრივია, ელექტრული და მაგნიტური მოვლენები ადრე განიხილებოდნენ, როგორც ერთიმეორისაგან სრულიად დამოუკიდებელი. ამ მოვლენებს შორის კავშირი პირველად შეამჩნია დანიელმა ფიზიკოსმა ერსტედმა 1820 წელს დენიან გამტართან მაგნიტური ისრის ორიენტაციის ცვლილებებით. იმავე წელს ამპერმა აღმოაჩინა მუდმივი მაგნიტის მოქმედება დანიან გამტარზე და დენიანი გამტარების ურთიერთქმედება.

მატერიის სახეს, რომლის მეშვეობითაც ხორციელდება ძალური ურთიერთქმედება მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებს, დენიან გამტარებს და დენიან გამტარებსა და მუდმივი (ბუნებრივი) მაგნიტებს შორის, მაგნიტური ველი ეწოდება. მაგნიტურ ველში მოძრავ ელექტრულ მუხტზე მოქმედებს ძალა (ლორენცის ძალა). ეს ძალა არ არის რაღაც ახალი ფუნდამენტური ძალა. მაგნიტური ძალა ელექტრული ძალის გამოვლინებაა იმ შემთხვევაში, როცა ელექტრული მუხტები ერთმანეთის მიმართ მოძრაობს.

მაგნიტებს (ელექტრული მუხტების მსგავსად) ერთი საერთო თვისება ახასიათებს. მაგნიტის ერთსახელიანი პოლუსები ერთმანეთს განიზიდავს. სხვადასხვა სახელიანი კი - იზიდავს. თუ სწორ მაგნიტს შუაზე გადავტეხავთ, მივიღებთ, ორ მაგნიტს, რომელთა ჩრდილოეთი და სამხრეთი პოლუსი ისეა ორიენტირებული, როგორც ჰგონდა მთლიან მაგნიტს. იგივე შედეგს მივიღებთ, თუ გავაგრძელებთ მაგნიტების შემდგომ დაყოფას: უმცირესი ზომის ახალ მაგნიტსაც პოლუსები საწყისი მაგნიტივით ექნება ორიენტირებული. რა მოხდება თუ დაყოფას გავაგრძელებთ ატომის დონემდე? შეგვეძლება თუ არა მაშინ ჩრდილოეთისა და სამხრეთის პოლუსების განცალკევება? ცდა ადასტურებს, რომ ცალკეული ატომი ისე იქცევა, როგორც მიკროსკოპული ზომის

მაგნიტი - მათი პოლუსების განცალკევება შეუძლებელია (მათ დამოუკიდებლად არსებობა არ შეუძლიათ).

1821 წელს ამპერის მიერ წამოყენებული ჰიპოთეზის მიხედვით ყოველ მოლეკულაში (ატომში) არსებობს წრიული დენები, ე.ი. ყოველ მოლეკულას შეესაბამება ელემენტარული მაგნიტური ველი. მივთიერების საერთო მაგნიტური ველი კი განისაზღვრება მისი მოლეკულების ელემენტარული მაგნიტური ველების გეომეტრიული ჯამით. ცხადია, ყოველივე ეს გასაგები გახდა მხოლოდ XX საუკუნის დასაწყისში, რადგან ამპერის მოღვაწეობის პერიოდში ატომის პლანეტარულ მოდელზე წარმოდგენა არ არსებობდა. მაგნიტი ელექტრულად ნეიტრალურია, მაგრამ მისი ატომის და მაშასადამე, მთელი მაგნიტის მაგნიტიზმს ელექტრული მუხტის - ელექტრონის ბირთვის გარშემო მოძრაობა განაპირობებს.

მუდმივ ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს შორის რაიმე კავშირი არ არსებობს, მათ შეუძლიათ ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად არსებობა. რაც შეეხება ცვლად ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს, ისინი ერთმანეთთან მჭიდრო კავშირში არიან, რაც დაადასტურა ინგლისელი მეცნიერის ფარადეის აღმოჩენამ (1831წ.), რომელმაც ექსპერიმენტულად დაადგინა, რომ ცვლადი მაგნიტური ველი მის ირგვლივ სივრცეში ყოველთვის წარმოშობს ცვლად ელექტრულ ველს (ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა). ასეთივეა ინგლისელი მეცნიერის მაქსველის თეორიის ერთ-ერთი ძირითადი შედეგი: ცვლადი ელექტრული ველი მის ირგვლივ სივრცეში წარმოშობს ცვლად მაგნიტურ ველს. ამრიგად, ცვლადი ელექტრული ველი და მაგნიტური ველები ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად არ არსებობენ! ისინი ქმნიან ელექტრომაგნიტურ ველს.

### **მუდმივი და ცვლადი მაგნიტური ველის მოქმედება ორგანიზმზე**

ორგანიზმის ქსოვილები დიდი რაოდენობით შეიცავს წყალს. წყალი დიამაგნიტური ნივთიერებაა, ამიტომ, ცხადია, ცოცხალი ქსოვილები დიამაგნიტური თვისებებით ხასიათდება. ორგანიზმი ასევე შეიცავს პარამაგნიტურ მოლეკულებსა და იონებს, ფერომაგნიტური ნაწილაკები ორგანიზმში არ არის.

მაგნიტური ველი გარკვეულ გავლენას ახდენს მასში მყოფ ნივთიერებაზე, მათ შორის ცოცხალ ორგანიზმზე. გამოწვეული ცვლილებების უმრავლესობა შექცევადია, ე.ი. ფუნქციური ხასიათისაა, თუმცა ზოგ შემთხვევაში შეიძლება პათოლოგიური დაზიანებებიც ჩამოყალიბდეს. ეს დამოკიდებულია მაგნიტური ველის სახეზე (მუდმივი თუ ცვლადი, ერთგვაროვანი თუ არაერთგვაროვანი), მის ინტენსივობაზე, ზემოქმედების დროზე, ორგანიზმის ფუნქციურ მდგომარეობაზე და სხვა.

ცოცხალ სისტემაში მაგნიტური ველით გამოწვეული პირველადი პროცესები ფიზიკური და ფიზიკურ-ქიმიური ხასიათისაა.

არაერთგვაროვან მუდმივ მაგნიტურ ველში მოქმედებს მაგნიტური ველის დამაბულობის გრადიენტი და ამ გრადიენტის პროპორციული ძალა, რომელიც იწვევს ცოცხალი ქსოვილების შეკუმშვას. არაერთგვაროვანი მაგნიტური ველის მოქმედებით იცვლება მოლეკულების ორიენტაცია, იონების კონცენტრაცია, აგზნებისას ნერვიული იმპულსების გავრცელება და სხვა. დიდი ინტენსივობის არაერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დროზოფილები იღუპება.

მუდმივი ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის მოქმედებით ცოცხალ სისტემაში ვლინდება მორფოლოგიური ცვლილებები. ნებისმიერი უჯრედი, ნებისმიერი ბიოლოგიური სისტემა გარკვეული რეჟციით პასუხობს მაგნიტური ველის ზემოქმედებას, მაგრამ ასეთ ზემოქმედებაზე ყველაზე პირველად ნერვული სისტემა რეაგირებს. ვინაიდან ნერვული სისტემა ცალკე არ არსებობს და ის პირდაპირი და უკუკავშირებით დაკავშირებულია ორგანიზმის ყველა სისტემასთან, რომელიმე უბანში რეგისტრირებული რეაქცია, ცხადია, არ აქნება პირველადი.

სისხლის პლაზმა დიდი რაოდენობით შეიცავს  $\text{Na}^+$  და  $\text{Cl}^-$  იონებს. თუ არტერია მოთავსებულია მუდმივ მაგნიტურ ველში, სისხლთან ერთად მოძრავ ამ იონებზე იმოქმედებს ლორენცის ძალა. ამ ძალის მოქმედებით  $\text{Na}^+$  და  $\text{Cl}^-$  იონები წინაცვლებენ არტერიის კედლებისაკენ საპირისპირო მიმართულებით. გამოვლინდება პოლარიზაცია. სწორედ ეს მოვლენა უდევს საუბვლად სისხლის სიჩქარის განსაზღვრის ერთიერთ მეთოდს (სისხლის სიჩქარის ელექტრომაგნიტური მთვლეელი).

მუდმივი მაგნიტური ველის მოქმედებით ბიომოლეკულებში, იზოლირებულ უჯრედებში, ქსოვილებში და ორგანოებში რომ მივიღოთ ბიოლოგიურად მნიშვნელოვანი ეფექტი, ველის დამაბულობა ათასჯერ და უფრო მეტად უნდა აღემატებოდეს ბუნებრივ მაგნიტურ ველს (გეომაგნიტურ ველს).

ცდებით დადგინდა მეტად საინტერესო ფაქტი: ბიოლოგიურ ეფექტსა და მაგნიტური ველის ინტენსივობას შორის პირდაპირპროპორციული კავშირი არ ასებობს. ზოგ შემთხვევაში ეფექტს იწვევს რომელიღაც ” ოპტიმალური“ ინტენსივობა, სხვა შემთხვევაში ეფექტი მატულობს ინტენსივობის შემცირებისას, ზოგჯერ კი დაბალი და მაღალი ინტენსივობის დროს რეაქციებს ურთიერთსაწინააღმდეგო ხასიათი აქვს. მუდმივი მაგნიტური ველის მიმართ ყველაზე მაქსიმალური მგრძნობელობით ხასიათდება მთლიანი ორგანიზმი და არა იზოლირებული უჯრედები და ორგანოები. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ბუნებრივი სუსტი მაგნიტური ველის აღქმა სრულად გამოვლინდება მხოლოდ მთლიან ორგანიზმში. მათი ასეთი მაღალი მგრძნობიარობა, როგორც ჩანს, ევოლუციის პროცესში ჩამოყალიბდა.

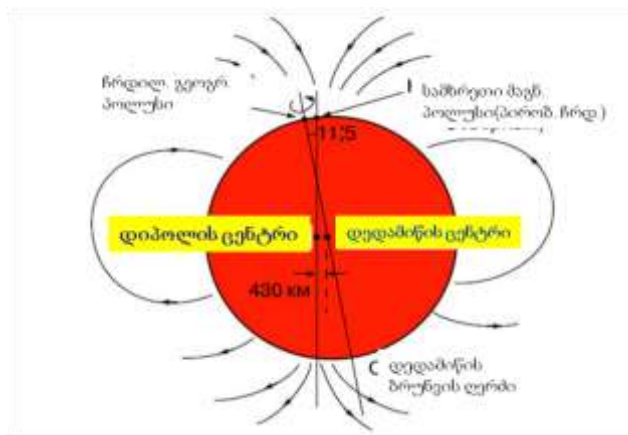
შედარებით ცოტაა ცდისეული მონაცემები ორგანიზმზე ცვლადი მაგნიტური ველის მოქმედების შესახებ. ეს განსაკუთრებით ეხება დაბალი სიხშირის (ინფრაბგერითი სიხშირის) მაგნიტურ ველებს. ადამიანის ორგანიზმმა გამოიმუშავა განსაკუთრებული მექანიზმები, რომელიც უზრუნველყოფს ბუნებრივი მაგნიტური ველის ცვლილებების მიმართ ადაპტაციას, ოღონდ ცვლილებათა საკმაოდ ვიწრო საზღვრებში. როცა ველის ცვლილებები ამ საზღვრის გარეთ გამოდის (ე.ი. ველის ცვლილება დიდია), ორგანიზმში შეიძლება გამოვლინდეს სხვადასხვა სახის დარღვევები. ასეთი დარღვევები ორგანიზმისათვის განსაკუთრებით საშიშია იმ შემთხვევაში, როცა მაგნიტური ველის ცვლილების სიხშირე ემთხვევა რომელიმე ფიზიოლოგიური სისტემის საკუთარ სიხშირეს. ამ შემთხვევაში ველის მოქმედებით ვლინდება რეზონანსული ეფექტი.

დღეისათვის მაგნიტური ველის ცოცხალ ორგანიზმზე მოქმედების მექანიზმები ჯერ კიდევ არ არის საბოლოოდ დადგენილი, მაგრამ მრავალი ექსპერიმენტული მონაცემის ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ მაგნიტური ველი უმეტეს შემთხვევაში ორგანიზმზე მავნე ზეგავლენას ახდენს.



## დედამიწის მაგნიტური ველის - გეომაგნიტური ველის გავლენა ადამიანის ორგანიზმზე

დედამიწას გააჩნია საკუთარი მაგნიტური ველი. დედამიწის იმ წერტილებს, რომელშიც მაგნიტური ველის დაძაბულობა ვერტიკალურად ზევით არის მიმართული მაგნიტურ პოლუსებს უწოდებენ. დედამიწას ორი მაგნიტური პოლუსი აქვს: ჩრდილოეთი და სამხრეთი. წრფეს, რომელიც პოლუსებზე გადის, დედამიწის მაგნიტურ ღერძს უწოდებენ. მაგნიტური ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში დიდი წრის შემომსახვრელ წრეწირს მაგნიტურ ეკვატორს უწოდებენ. დედამიწის მაგნიტური ეკვატორი  $11^\circ$  არის დახრილი გეოგრაფიული ეკვატორის მიმართ. დედამიწის მაგნიტური ეკვატორის სიბრტყეში ველის დაძაბულობას ჰორიზონტალური მიმართულება აქვს.



ნახ.28. დედამიწის მაგნიტური ველი

მაგნიტურ ეკვატორზე ველის დაძაბულობა 0,34 ერსტედია, ხოლო მაგნიტურ პოლუსზე 0,66 ერსტედი. მაშასადამე, ეკვატორიდან პოლუსამდე განედების მიხედვით მაგნიტური ველის დაძაბულობა იცვლება. იცვლება ასევე დაძაბულობის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მდგენელები.

გეომაგნიტური ველის პარამეტრები (ელემენტები) დროის მიხედვით იცვლება (დროითი ვარიაციები), ე.ი. იცვლება მაგნიტური აქტიურობა. ასეთ ცვლილებებს, რომელიც ერთი შეხედვით ნებისმიერი ხასიათისაა, მაგნიტურ შემფოთებას უწოდებენ. თუ ცვლილებები დიდია მაშინ მას უკვე მაგნიტური ქარიშხალი ეწოდება. მაგნიტური შემფოთება სამი სახისაა: 1. სინფაზური, რომელიც მთელ პლანეტაზე ერთდროულად მიმდინარეობს. 2. ლოკალური - რომელიც ვლინდება დედამიწის ზედაპირის განსაზღვრულ უბნებში. 3. პერმანენტული შემფოთება, რომელიც განუწყვეტლივ აღინიშნება დედამიწის ზოგიერთ არეებში.

მაგნიტური აქტივობის ყველა ეს სახე მზის აქტიურობითაა გამოწვეული, რომელიც თავის მხრივ დაკავშირებულია მზეზე ლაქებისა და აფეთქების რიცხვის მატებასთან. მზის აქტივობა იმ მოვლენების საერთო სახელწოდებაა, რომელიც მზეზე ხდება - მაგალითად, მზის ლაქების რაოდენობის ცვლილება, აფეთქებები და სხვა.; დედამიწის მაგნიტურ ველზე და ატმოსფეროს მახასიათებელ პარამეტრებზე გავლენას ახდენს "მზის ქარი". "მზის ქარი" კორპუსკულური (ნაწილაკების) გამოსხივებაა, რომელიც

მზიდან ყველა მიმართულებით ვრცელდება. ეს გამოსხივება ძირითადად პროტონების, ელექტრონების და  $\alpha$  ნაწილაკების მცირე ნაწილის დიდი სიჩქარის ნაკადებია. ეს ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ ატმოსფეროს შემადგენელ ატომებთან და მოლეკულებთან და იწვევენ მათ იონიზაციას. მაშასადამე, ყველა პროცესი და მათ შორის ელექტრომაგნიტურიც ძირითადად მზეზე მიმდინარე მოვლენებით არის განპირობებული.

დედამიწის მაგნიტური აქტივობის ცვლილება პერიოდული ხასიათისაა და უშუალოდ არის დაკავშირებული მზისა და გეოფიზიკურ ციკლთან - მზის ბრუნვის პერიოდთან (27 დღე-ღამე), დედამიწის ბრუნვის პერიოდთან (24 საათი), მზის აქტიურობის ციკლთან (11 წელი) და სხვა.

### **ცოცხალ ქსოვილთა მაგნიტური თვისებები. მაგნიტოგრაფიის ფიზიკური საფუძვლები**

ორგანიზმის ფუნქციონირებისას მის ცალკეულ ქსოვილებში და ორგანოებში უმეტეს შემთხვევაში ლოკალური ბიოდენები წარმოიქმნება. ასეთი ბიოდენები მაგნიტური ველის სუსტი წყაროებია. სუსტი მაგნიტური ველი წარმოიქმნება ორგანიზმში ელექტრული სიგნალების, ნერვული გზებით მოქმედების პოტენციალის გავრცელებისას. მაგალითად, ბაყაყის საჯდომ ნერვში მოქმედების პოტენციალის გავრცელებისას წარმოქმნილი მაგნიტური ველის ინდუქცია დაახლოებით  $0,12$  ნტლ-ის ტოლია ( $1$  ნტლ= $10^{-9}$  ტლ); ხელის გაშლის, ან მხრის მოხრის დროს, მის ზედაპირზე წარმოქმნილი მაგნიტური ველის ინდუქცია კი  $11 \cdot 10^{-5}$  ტლ-ს უდრის. ადამიანის ორგანოებს შორის გულის მაგნიტური ველი ყველაზე უფრო დიდია და დახლოებით დედამიწის მაგნიტურ ველზე ( $\bar{H} \approx 0,5$  ერსტედი) მილიონჯერ ნაკლებია. გულის მაგნიტური ველის დამაბულობა ცვლადი სიდიდეა. მისი სიხშირე 8-12 ჰც-ს ფარგლებშია. მაგნიტური ველი გულის ელექტრული ველის ცვლილების სინქრონულია. მიუხედავად იმისა, რომ ორგანოები და ქსოვილები სუსტ მაგნიტურ ველს წარმოქმნიან, თანამედროვე მეთოდებით შესაძლებელია მათი დამაბულობის (მაგნიტური ინდუქციის) გაზომვა. ასეთ მეთოდებს მაგნიტოგრაფიას უწოდებენ.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გულის ბიოდენებით წარმოქმნილი მაგნიტური ინდუქციის დროში ცვლილების რეგისტრაცია. სწორედ ეს პრინციპი უდევს საფუძვლად დიაგნოსტიკურ მეთოდს - მაგნიტოკარდიოგრაფიას. მაგნიტოკარდიოგრამა ელექტროკარდიოგრამის მსგავსია. მაგნიტოგრაფია ელექტროგრაფიისგან განსხვავებით არაკონტაქტური მეთოდია, ველის რეგისტრაცია შეიძლება საკონტაქტო ელექტროდების გარეშე, ობიექტიდან გარკვეულ მანძილზე. მაგნიტოგრაფიის მეთოდების დამუშავება და განვითარება შესაძლებელი გახდა სპეციალური გადამწოდების - ზეგამტარული კვანტური ინტერფერომეტრული გადამწოდების შექმნის შემდეგ, ასეთი გადამწოდის მუშაობის პრინციპში გასარკვევად აუცილებელია გავეცნოთ ზეგამტარობის მოვლენას.

**ზეგამტარობა.** ეს მოვლენა 1911 წელს აღმოაჩინა კამერლინგ-ონესმა. მოვლენის არსი შემდეგში მდგომარეობს: ზოგიერთი ნივთიერება და შენადნობი დაბალ, რაღაც კრიტიკულზე უფრო მცირე ტემპერატურაზე ( $T_c$ ), ზეგამტარის მდგომარეობაში გადადის. ეს იმას ნიშნავს, რომ მათი ელექტრული წინაღობა პრაქტიკულად ნულის ტოლი ხდება. მაგალითად ნიობიუმისათვის  $T_c = 9,22^0 K$ , მისი შენადნობისთვის

$Nb_3Cl$  კრიტიკული ტემპერატურა -  $T_c = 23,2^0 K$  თუ ზეგამტარისგან დამზადებულ რგოლში წარმოვქმნით დენს, ის ძალიან დიდი ხნის განმავლობაში არ მიიღვეს. ზეგამტარულ მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურა, როგორც ვხედავთ, აბსოლუტურ ნულთან ახლოსაა. ასეთი ტემპერატურის მიღება შესაძლებელია მხოლოდ თხევადი ჰელიუმის მეშვეობით. ეს კი გარკვეულ ტექნიკურ სიმძნელებთან არის დაკავშირებული.

ზეგამტარობის მოვლენა უდევს საფუძვლად ძლიერი მაგნიტური ველის მიღების მეთოდს. ასეთი დიდი დამაბულობის მაგნიტურ ველს იყენებენ ბმრ - ტომოგრაფიაში (ბმრ - ბირთვული მაგნიტური რეზონანსი, ტომოგრაფია - ობიექტის შორეული გამოსახულების მიღების მეთოდი). ბმრ - ტომოგრაფიის ცილინდრულ ღრუში, სადაც გამოსაკვლევი პიროვნება უნდა მოთავსდეს, ზეგამტარული მაგნიტები ქმნიან 15-20 ათას ერსტედი დამაბულობის ველს. ზეგამტარული კვანტური ინტერფერომეტრული გადამწოდის (ზკიგ) მუშაობას საფუძვლად უდევს ჯოზეფსონის ეფექტი; 1962 წელს ინგლისელი ფიზიკოსის ჯოზეფსონის მიერ გამოთქმული იყო მოსაზრება: თუ ორ ზეგამტარს შორის მოვათავსებთ თხელ დიელექტრიკს (1 ნმ სისქის) იგი განსაზღვრულ პირობებში შეიძლება გადავიდეს ზეგამტარის მდგომარეობაში. ეს მოვლენა მალე იქნა აღმოჩენილი. თუ დენის ძალა არის მცირე, რაღაც კრიტიკულ მნიშვნელობაზე ნაკლები, მაშინ დიელექტრიკზე ძაბვის ვარდნა არ ხდება. დიელექტრიკი გადის ზეგამტარის მდგომარეობაში. თუ დენის ძალა კრიტიკულზე მეტი გახდება, დიელექტრიკზე გაჩნდება ძაბვის ვარდნა და ელექტრომაგნიტური ტალღა გამოსხივდება.

ზკიგი წრიული გამტარია, რომელსაც ერთ ან ორ ადგილას აქვს "სუსტი" უბანი - ე.წ. ჯოზეფსონის კონტაქტი. თუ ასეთ გამტარს გავაცივებთ  $T_c$ -ზე უფრო დაბალ ტემპერატურამდე, ის ზეგამტარის მდგომარეობაში გადავა. სუსტი მაგნიტური ველის მოქმედებისას მასში ინდუცირდება დენი, რომელიც ხდება კრიტიკულზე მეტი (10-100 მკა) და ჯოზეფსონის კონტაქტებში არღვევს ზეგამტარობას. ესწ იწვევს ძაბვის ვარდნის გაჩენას და შესაბამისად სიგნალის გამოსხივებას.

დენის ძალის კრიტიკული მნიშვნელობა განსაკუთრებით მგძნობიარეა გარეშე მაგნიტური ველისადმი. ეს საშუალებას იძლევა მაღალი სიზუსტით გავზომოთ სუსტი მაგნიტური ველი ( $H \approx 10^{-7}$  ა/მ). განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ის ფაქტი, რომ გამოსხივებული სიგნალი წრფივად არის დამოკიდებული გარეშე მაგნიტური ველის ცვლილებაზე. ამიტომ პრაქტიკულად შესაძლებელია ადამიანის ყველა ორგანოს ბიომაგნიტური სიგნალების რეგისტრაცია და საკმაოდ სწრაფად მიმდინარე პროცესების დაფიქსირებაც.

სამედიცინო-ბიოლოგიური კვლევის მიზნით დღეისათვის დამუშავებულია სხვადასხვა ტიპის ზკიგ-მაგნიტომეტრები. მთი მეშვეობით ჩვეულებრივ განსაზღვრავენ ველის დამაბულობის ვექტორის მხოლოდ ერთ კომპონენტს. სრული ვექტორული სიდიდის გასაზომად აუცილებელია სამი ურთიერთმართობული მიმართულებით ორიენტირებული ზკიგი, მათთან შეერთებული ინდუქციის კოჭათი.

ზკიგ-მაგნიტომეტრების მეშვეობით შესაძლებელია ქსოვილთა მაგნიტური ამთვისებლობის გაზომვა, ორგანიზმის გარკვეულ უბნებში მაგნეტიტის არსებობის დადგენა და სხვა; ზოგ შემთხვევაში ბიოგენური მაგნეტიტი პათოლოგიური პროცესების შედეგად დაგროვილი რკინის ანომალური ჩანართია. ბიოგენური მაგნეტიტის

ლოკალიზაციის დადგენას და მის გამოკვლევას დიდი მნიშვნელობა აქვს მაგნიტორეცეპციის საკითხის შესწავლისათვის.

ცდებით დადგენილია, რომ ზოგიერთ ცხოველს და მცენარეს შეუძლია სუსტი მაგნიტური ველის, მაგალითად, დედამიწის მაგნიტური ველის აღქმა. გეომაგნიტურ ველზე ორიენტაციის უნარი აქვთ გადამფრენ ფრინველებს, თევზის ზოგიერთ სახეობას (როლებიც დიდ მანძილზე მიგრირებენ), მწერებს და სხვა; დღეისათვის მაგნიტორეცეპტორული სისტემის არსებობის მხოლოდ ორი შემთხვევაა ცნობილი, თუმცა მაგნიტორეცეპციის მოვლენა შეიძლება დადგენილ ფაქტებად ჩაითვალოს.

## ლექცია XII

### კვანტური ბიოფიზიკის ელემენტები

#### კვანტური ბიოფიზიკის საგანი

კვანტური ბიოფიზიკის ძირითადი ამოცანაა მაკრომოლეკულების (პირველ რიგში ბიოლოგიურად აქტიური მოლეკულების) სტრუქტურის გამოკვლევა. მისი მიზანია დაადგინოს ბიომოლეკულების სივრცული სტრუქტურა, გამოიკვილოს მათი ელექტრონული სტრუქტურა კვანტური ფიზიკის მეშვეობით. ელექტრონული სიმკვრივის განაწილების ხასიათის დადგენა საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ მაკრომოლეკულების ბევრი ფიზიკურ-ქიმიური თვისება, რომელიც საფუძვლად უდევს ორგანიზმში მიმდინარე სასიცოცხლო პროცესებს.

ცნობილია, რომ რაიმე რეალური პროცესის განხორციელებისათვის საჭიროა მორეაგირე კომპონენტებს მივანიჭოთ გარკვეული სიდიდის ენერგია - აქტივაციის ენერგია. მოლეკულათა მიერ ენერგიის შთანთქმა იწვევს მათში ელექტრონული (ან ზოგ შემთხვევაში სხვა სახის) ენერგიის შეცვლას - ელექტრონის გადასვლას აგზნებულ დონეზე. აგზნების ეს ენერგია ხმარდება პროცესის განხორციელებას. შთანთქმული ენერგიის სახისა და სიდიდის შესამამისად აღინიშნება სხვადასხვა სახის ელექტრონული გადასვლა. მასთან, ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში ელექტრონის ახალ ენერგეტიკულ დონეზე გადასვლა მიმდინარეობს ზუსტად განსაზღვრული წესებისა და კანონზომიერებების საფუძველზე.

კვანტური ბიოფიზიკა განხილავს შემდეგ კონკრეტულ საკითხებს:

1. ბიომოლეკულათა ელექტრონული ენერგეტიკული დონეების სტრუქტურას;
2. ბიომოლეკულათა დონორ-აქცეპტორულ თვისებების;
3. ელექტრონულ გადასვლას სინათლის შთანთქმისა და ლუმინესცენციის დროს;
4. თავისუფალი რადიკალების თვისებებს და თავისუფალ - რადიკალური პროცესების მექანიზმებს;
5. აგზნებულ მოლეკულათა ქიმიურ გარდაქმნას, პირველადი ფოტოპროდუქტების ბუნებას და მათი ქიმიურ აქტიურობას;
6. ქემილუმინესცენციის მექანიზმებს.

ამ საკითხების კვლევის შედეგებს უდიდესი მნიშვნელობა აქვს მედიცინისთვის. პრეფორმირებული ფიზიკური ფაქტორების სამკურნალო მიზნით გამოყენებისას ორგანიზმში ხშირ შემთხვევაში ზემოჩამოთვლილი პროცესების ინიცირება ვლინდება. მათი მექანიზმების ცოდნა კი საშუალებას იძლევა მიზანმიმართულად და მეტი ეფექტურობით ვებრძოლოთ პათოლოგიურ დარღვევას ორგანიზმში. ზემოჩამოთვლილი საკითხების შესწავლის მიზნით კვანტურ ბიოფიზიკაში ფართოდ იყენებენ თანამედროვე ფიზიკის ექსპერიმენტულ და თეორიულ მეთოდებს: სპექტროფოტომეტრული და ლუმინესცენციური ანალიზის მეთოდით იკვლევენ ისეთ პროცესებს, რომლებიც თან სდევნენ ბიოპოლიმერებში კვანტის შთანთქმასა და გამოსხივებას (ლუმინესცენციას).

ბირთვული მაგნიტური რეზონანის (ბმრ) და ელექტრონული პარამაგნიტური რეზონანსის (ეპრ) მეთოდს მსგავსი პრინციპები უდევს საფუძვლად. ბმრ-ის მეთოდი ემყარება ბირთვის მაგნიტური ველისა და გარეშე მაგნიტური ველის, ხოლო ეპრ-ის მეთოდი - ელექტრონის მაგნიტური ველისა და გარეშე მაგნიტური ველის ურთიერთქმედებას.

ეპრ-ის სიგნალს იძლევა მოლეკულა, რომელსაც გაუწყვილებელი ელექტრონი აქვს. ასეთ მოლეკულათა გაუწყვილებელი ელექტრონების ნებისმიერად ორიენტირებული მაგნიტური მომენტები, გარეშე ველის მოქმედებით მოწესრიგდება ველის თანმხვედრი ან საწინააღმდეგო მიმართულებით.

ამასთან, ველის თანმხვედრი მიმართულებით ორიენტირებულ ელექტრონებს გარკვეული სიდიდით ნაკლები ენერგია აქვს (ანტიპარალელური მომენტის მქონე ელექტრონთან შედარებით).

მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ველით (მიკროტალღების დიაპაზონი) ზემოქმედებისას ელექტრონები გადადის ერთი ენერგეტიკული მდგომარეობიდან მეორეში. ვინაიდან ველის გასწვრივ ორიენტირებული ელექტრონების რაოდენობა თავიდან უფრო მეტია, ენერგიის რეზონანსული შთანთქმა ხორციელდება.

ეპრ-ის სპექტრის ჩაწერა ხდება შთანთქმული ჯამური სიმძლავრის პირველი წარმოებულის სახით მაგნიტური ველის დამაბულობის ყოველი მნიშვნელობისათვის.

ბმრ-ისა და ეპრ-ის სპექტრის ანალიზი საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ კვანტურ დონეზე რეალიზებული ბევრი პროცესი, განსაკუთრებით კი ისეთი პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობენ თავისუფალი რადიკალების მონაწილეობით.

ამჟამად ბიოპოლიმერთა გამოკვლევისათვის განსაკუთრებით პერსპექტიული ხდება მოლეკულური ორბიტალების მეთოდი. ჩვენ არ შევხებით ამ მეთოდის თეორიულ მხარეს, იგი საკმაოდ რთულია. აღვნიშნავთ მხოლოდ იმ ფაქტს, რომ მოლეკულური ორბიტალების თეორიას საფუძვლად უდევს ჰიპოთეზა: მოლეკულური ორბიტალები უნდა შეადგენდეს მოლეკულაში შემავალი ატომური ორბიტალების წრფივ კომბინაციას.

ამ მეთოდის გამოყენებით შეიძლება შევაფასოთ მოლეკულის ელექტრონული ენერგია და მასში ელექტრონული სიმკვრივის განაწილების ხასიითი განსაზღვრავს ბიოპოლიმერის ისეთ თვისებებს, რომლებიც საფუძვლად უდევს ცოცხალ სისტემაში მის ფუნქციონირებას.

### **ატომებისა და მოლეკულების ენერგია: ბრუნვითი, რხევითი და ელექტრონული ენერგია**

ცოცხალ სისტემებში მიმდინარე პროცესებში მინაწილე კომპონენტების ატომებისა და მოლეკულების ენერგია იცვლება. რა განსაზღვრავს ატომებისა და მოლეკულების ენერგიას?

ატომის ენერგიას განსაზღვრავს მხოლოდ მისი ელექტრონული ენერგია. ოლეკულებში ვლინდება მოძრაობის უფრო რთული სახე, ვიდრე ატომებში, ამიტომ ცხადია, მათ ენერგეტიკულ დონეებს უფრო რთული სტრუქტურა უნდა ჰქონდეს. მოლეკულის ენერგია შედგება სამი დამოუკიდებელი ნაწილისგან: ბრუნვითი და ელექტრონული ენერგიისგან. მოლეკულათა ბრუნვითი ენერგია მეასედი ევ-ის რიგისაა, რხევითი ენერგია - მეათედი ევ-ის რიგის, ხოლო ელექტრონული ენერგია რამდენიმე ევ-ის ფარგლებში იცვლება. როგორც ვიცით, 1 ევ (ერთი ელექტრონვოლტი) იმ მუშაობის შესაბამისი ენერგიაა, რომელიც სრულდება ელექტრული ველის ორ წერტილს შორის ელექტრონის გადაადგილებისას, როდესაც მათ შორის პოტენციალთა სხვაობა 1 ვოლტის ტოლია.

$$1\text{ევ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ჯ.}$$

ბრუნვითი ენერგეტიკული დონის შესაცვლელად საჭიროა ენერგიის ის მნიშვნელობა, რომელიც აქვს სინათლის კვანტს ტალღის სიგრძეთა 0,2 – 20 მმ დიაპაზონში ( $1,5 \cdot 10^{12}$  - დან  $1,5 \cdot 10^{10}$  ჰც-მდე რხევათა სიხშირით).

ასეთი ენერგია აქვს ტალღებს შორეული ინფრაწითელ უბანში და მიკროტალღებს.

რხევითი ენერგეტიკული დონის შესაცვლელად სინათლის კვანტს უნდა ჰქონდეს სიხშირე  $1,5 \cdot 10^{13} - 2,4 \cdot 10^{14}$  ჰც-ის ინტერვალში, რომელიც შეესაბამება სპექტრის ინფრაწითელ უბანს. უფრო მეტი ენერგიაა საჭირო იმისათვის, რომ შეიცვალოს ელექტრონული ენერგეტიკული დონე. ასეთი ენერგია აქვს ელექტრომაგნიტურ ტალღებს სპექტრის ხილულ და ულტრაიისფერ უბანში (მათ შეესაბამება  $3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$  ჰც სიხშირეთა ინტერვალს).

### **ელექტრონული გადასვლა კვანტის შთანთქმისას**

ატომის ბირთვთან ყველაზე სუსტად დაკავშირებულია სავალენტო ელექტრონები. ისინი ადვილად გადაინაცვლებენ ელექტრომაგნიტური ტალღების (სინათლის) მოქმედებით. ეს იწვევს ატომში ელექტრონული სიმკვრივის გადანაწილებას, რაც

განაპირობებს სინათლის სიჩქარის შემცირებას  $\left(n = \frac{c}{V}\right)$ . ნივთიერებასთან ასეთი ურთიერთქმედება დამახასიათებელია ელექტრომაგნიტური ტალღების მთელი სკალისათვის.

განსხვავებულ ეფექტთან გვაქვს საქმე მახასიათებელი შთანთქმის დროს. როგორც აღვნიშნეთ, ელექტრონი სინათლის კვანტის შთანთქმის შედეგად ძირითადი ენერგეტიკული დონიდან გადადის აგზნებულ დონეზე, შემდეგ მცირე დროის განმავლობაში კარგავს ენერგიას უპირატესად სითბური გაბნევის შედეგად და ბრუნდება ძირითად დონეზე. ამის შემდეგ მახასიათებელი სიხშირეების უბანში აღიძვრება თითოეული ელექტრონის დამახასიათებელი შთანთქმის ზოლები. მაშასადამე, სინათლის შთანთქმა ატომებისა და მოლეკულების მიერ ზუსტად რეზონანსული ხასიათისაა.

შთანთქმის ელექტრონული ზოლების სიგანე საკმაოდ დიდია. ეს იმით აიხსნება, რომ ელექტრონულ აგზნებას თან სდევს მოლეკულის გადასვლა უფრო მაღალ რხევით და ბრუნვით ქვედონეზე. ამ შემთხვევაში გარკვეული მიახლოებით მართებულია ფრანკ-კონდონის პრინციპი, რომლის თანახმადაც ელექტრონული გადასვლის დროის განმავლობაში ( $10^{-15} - 10^{-16}$  წმ) ატომის ბირთვებს შორის მანძილი მოლეკულაში არსებითად არ იცვლება. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ძირითად და აგზნებულ მდგომარეობაში მოლეკულის გეომეტრია თითქმის არ განსხვავდება.

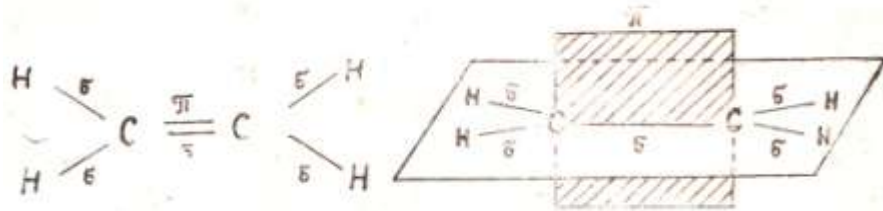
ახლა განვიხილოთ საკითხი იმის შესახებ, თუ რა ტიპის ელექტრონული გადასვლაა შესაძლებელი მოლეკულაში.

ატომებს შორის ქიმიური კავშირის წარმოქმნისას სავალენტო ელექტრონების ორბიტები იცვლება. მოლეკულაში ელექტრონის მდგომარეობის მიხედვით არჩევენ ორბიტების 3 ძირითად ტიპს.

პირველია  $\sigma$  ორბიტები. თუ ელექტრონი, რომელიც განსაზღვრულ ორბიტაზე ბრუნავს, ურთიერთქმედებს ქიმიური ჯგუფის 1 და 2 ატომთან, მაშინ ასეთი ელექტრონი ატომებს შორის ქმნის ძლიერ კავშირს. ასეთი ელექტრონის ორბიტებს  $\sigma$  ორბიტები ეწოდება.  $\sigma$  ორბიტები ყოველთვის ლოკალიზებულია და შევსებულია ელექტრონებით. ამ შემთხვევაში ელექტრონის გადასვლისათვის (აგზნებისათვის) სხვა ორბიტაზე დიდი ენერგიაა საჭირო და იგი შეესაბამება ძლიერ მოკლე ტალღის მქონე ულტრაიისფერ გამოსხივებას.

მეორე ტიპს მიეკუთვნება  $\pi$  ორბიტა. თუ ელექტრონი ერთნაირად ურთიერთქმედებს დიდი რაოდენობით ახლომდებარე ატომებთან, ზოგჯერ კი - მოლეკულის თითქმის ყველა ატომთან, მაშინ ასეთ ელექტრონს  $\pi$  ელექტრონი ეწოდება, ხოლო ორბიტას  $\pi$  ორბიტა.

ასეთი სახის კავშირია უმეტესად ბიომოლეკულებში სინათლის კვანტის მოქმედებით ელექტრონი  $\pi$  ორბიტიდან გადადის უფრო მაღალ  $\pi \bullet$  აგზნებულ ორბიტაზე. ელექტრონის ასეთ გადასვლას  $\pi \rightarrow \pi \bullet$  გადასვლას უწოდებენ. ასეთი პროცესი ხშირია ბიოლოგიურ მკრომოლეკულებში.



ნახ.29. ელექტრონული გადასვლის სახეები

მნიშვნელოვანია აგრეთვე მესამე ტიპის ელექტრონული გადასვლა ისეთი ელექტრონების მონაწილეობით, რომლებსაც უკავია ნორმალური, შევსებული და ლოკალიზებული  $n$  ორბიტები. ისინი ქიმიური კავშირის წარმოქმნაში არ მონაწილეობენ. ენერგიის კვანტის მოქმედებით  $n$  - ელექტრონი შეიძლება გადავიდეს დაუკავებელ (შეუვსებელ)  $\pi$ • ორბიტაზე, ე.ი. მოხდეს  $n \rightarrow \pi$ • გადასვლა. როგორც  $\pi \rightarrow \pi$ • ასევე  $n \rightarrow \pi$ • გადასვლა ვლინდება სპექტრის ულტრაიისფერ უბანში (ე.ი. ულტრაიისფერი სხივების მოქმედებით).

**ელექტრონული გადასვლა ბიოლოგურად მნიშვნელოვან მოლეკულებში.**

**ფლუორესცენცია და ფოსფორესცენცია.**

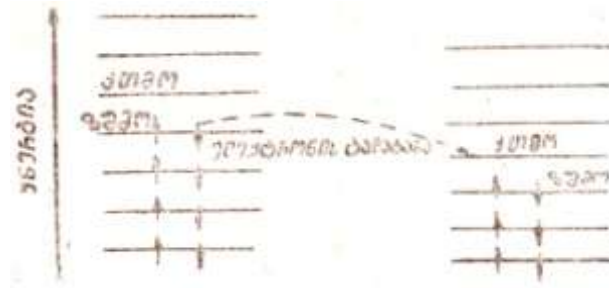
სხიური ენერგიის კვანტის შთანთქმის დროს, როგორც ვიცით, მოლეკულა გადადის აგზნებულ მდგომარეობაში. ეს იმას ნიშნავს, რომ ელექტრონები, რომელთაც შთანთქმეს ენერგია, გადადის უფრო მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე. რაც უფრო დიდია შთანთქმული კვანტის ენერგია, მით უფრო მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე გადადის ელექტრონი. ზოგ შემთხვევაში კი დიდი ენერგიის მქონე კვანტების (ულტრაიისფერი სხივები) შთანთქმისას შეიძლება ატომმა დაკარგოს ელექტრონი.

მოლეკულის ქიმიური და ოპტიკური თვისებებისათვის ყველაზე მნიშვნელოვანია ორი ენერგეტიკული ელექტრონული დონე: ზედა შევსებული მოლეკულური ორბიტალი (ზშმო) და ქვედა თავისუფალი მოლეკულური ორბიტალი (ქთმო). პირველი დონის ენერგიის მნიშვნელობა განსაზღვრავს მოლეკულის იონიზაციის პოტენციალს, ე.ი. იმ ენერგიის სიდიდეს, რომელიც უნდა დაიხარჯოს მოლეკულიდან ელექტრონის მოსაწყვეტად. რაც მეტია ზშმო-ს ენერგია, მით უფრო მცირეა იონიზაციის პოტენციალი და, მაშასადამე, მოლეკულას მით უფრო გამოხატული აქვს დონორული თვისებები.

ასეთი თვისებები ახასიათებს E ვიტამინს, ამიტომ იგი ადვილად გაცემს ელექტრონს თავისუფალ რადიკალებთან რეაქციის დროს. სწორედ ეს ფაქტი განაპირობებს მის ანტიოქსიდანტურ თვისებებს.

მეორე დონე (ქთმო) განსაზღვრავს მოლეკულის აქცეპტორულ თვისებებს. რაც უფრო მცირეა ამ დონის ენერგია, მით უფრო ადვილად იერთებს მოლეკულა ელექტრონს. ყველაფერი ეს კარგად ჩანს ქვემოთ მოყვანილი სქემატური ნახაზიდან.



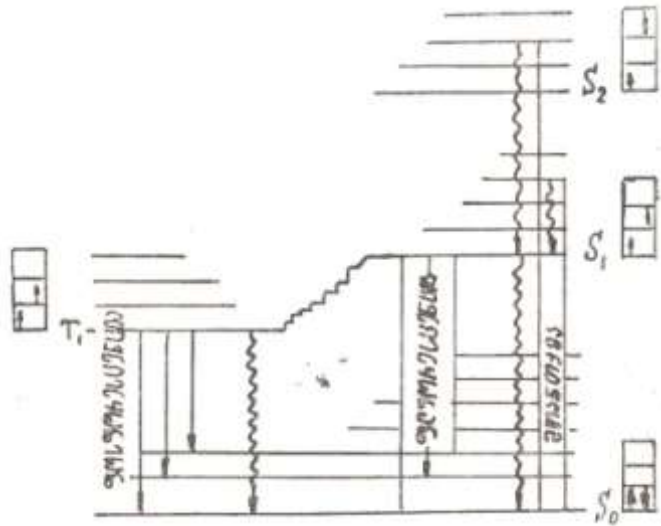


ნახ.30. ელექტრონული გადასვლა ენერგეტიკულ დონეებს შორის

ყოველ შვესებულ ენერგეტიკულ დონეზე შეიძლება იყოს მხოლოდ ორი, საწინააღმდეგოდ მიმართული სპინის (საკუთარი მაგნიტური მომენტის) მქონე ელექტრონები.

ატომი ან მოლეკულა, რომელიც გადადის აგზნებული მდგომარეობის უფრო მაღალ დონეზე, სწრაფად კარგავს რხევითი ენერჯიის ნაწილს სხვა (გარემომცველი) მოლეკულებთან შეჯახების გამო, ასევე შინაგანი კონვერსიის, ან ინტერკომბინაციური კონვერსიის შედეგად. შინაგანი კონვერსია პროცესია, როცა მოლეკულა ერთ-ერთი აგზნებული ელექტრონული დონის დაბალი რხევითი ქვედონიდან გადადის ძირითადი დონის ერთ-ერთ მაღალ რხევით ქვედონეზე, ხოლო ინტერკომბინაციური კონვერსიის შედეგად გადადის ტრიპლეტურ მდგომარეობაში. გავიხსენოთ, რომ თუ მოლეკულაში ყველა ელექტრონი შეუღლებულია, მაშინ მისი ჯამური სპინური კვანტური რიცხვი ნულის ტოლია და ასეთ მდგომარეობას სინგლეტური ეწოდება. თუ მოლეკულაში ერთი გაუწყვილებული ელექტრონია, მაშინ იგი მონორადიკალია (მაგალითად, OH). მოლეკულას ორი გაუწყვილებული ელექტრონით ბირადიკალს უწოდებენ. ასეთი მოლეკულის ჯამური სპინური კვანტური რიცხვი  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$  და სპინის პროექციას შეუძლია სამი +1, 0 და -1 მნიშვნელობების მიღება. ეს მნიშვნელობები შეესაბამება ენერჯიათა სამ სხვადასხვა მნიშვნელობას და ამიტომ ამბობენ, რომ მოლეკულა ტრიპლეტურ მდგომარეობაშია.

დავუბრუნდეთ ისევ ზემოთ მოყვანილს. მაშასადამე, აღნიშნული მიზეზების გამო მოლეკულა კარგავს ენერჯიის ნაწილს და ჩამოდის პირველი აგზნებული დონის ( $S_1$  დონე) ნულოვალ ქვედონეზე.  $S_0, S_1, \dots, S_n$  დონეებს.



ნახ. 31. ფლოუორესცენცია და ფოსფორესცენცია

სინგლეთურ დონეებს უწოდებენ. მათ შორის გადასვლის დროს ელექტრონის სპინი არ იცვლება. აგზნებულ  $S_1$  სინგლეთურ დონეზე მოლეკულის ყოფნის ხანგრძლივობა  $10^{-8} - 10^{-9}$  წმ-ის ტოლია.

სწორედ  $S_1$  დონეზე წყდება აგზნების ენერჯის ბედი. გარკვეული ალბათობით ამ ენერჯის გარდაქმნა შეიძლება განხორციელდეს რამდენიმე გზით:

1.  $S_1 \rightarrow S_0$  - აგზნების ენერჯია გადადის სითბურ ენერჯიაში.
2.  $S_0 \rightarrow S_0 + h\nu_{\text{ფლ}}$  - გამოსხივდება ფლოურესცენციის კვანტი.
3.  $S_1 \rightarrow$  პროდუქტი - ენერჯია იხარჯება ფოტოქიმიური რექციის წარმოქმნისათვის.
4. აგზნების ენერჯია რეზონანსულად გადაეცემა სხვა მოლეკულას.
5.  $S_1 \rightarrow T_1$  - ენერჯია იხარჯება სპინის შესაბრუნებლად და მოლეკულა გადადის ტრიპლეთურ მდგომარეობაში.

$T_1$  მდგომარეობიდან  $S_0$  მდგომარეობაში პირდაპირ გადასვლა ელექტრონს არ შეუძლია, ვინაიდან ამ ორ მდგომარეობაში ელექტრონების სპინები ერთნაირია.

ტრიპლეთური  $T_1$  დონის აგზნების ენერჯია შეიძლება დაიხარჯოს რამდენიმე გზით:

- 1).  $T \rightarrow_1 S_0$  ენერჯია იხარჯება სპინის შებრუნებისათვის და  $S_0$  დონეზე გამოსხივების გარეშე გადასვლისათვის.
- 2)  $T_1 \rightarrow S_0 + h\nu_{\text{ფოს}}$  ენერჯია გამოსხივდება ფოსფორესცენციის სახით.

3) ენერგია იხარჯება ფოტოქიმიური რეაქციის განხორციელებისათვის.

4) აგზნების ენერგია რეზონანსულად გადაეცემა სხვა მოლეკულას.

გამოსხივებას, რომელიც თან სდევს  $S_1$  აგზნებული დონიდან ელექტრონის გადასვლას  $S_0$  ძირითად დონეზე, ფლოურესცენციას უწოდებენ. მისი სიციცხლის ხანგრძლივობაა  $10^8 - 10^9$  წმ. თუ ტრიპლეტური  $T_1$  აგზნებული დონიდან  $S_0$  ძირითად დონეზე დაბრუნება ხდება გამოსხივების გზით, მაშინ გამოსხივების ამ ტიპს ფოსფორესცენციას უწოდებენ.

ტრიპლეტური დონე ენერგეტიკული თვალსაზრისით გაცილებით უფრო დაბლაა, ვიდრე შესაბამისი სიგნალეტური დონე. ეს კარგად ჩანს მე-27 ნახაზიდან, რომელზეც გამოსახულია კვანტის შთანთქმის შედეგად მიღებული ფლოურესცენცია და ფოსფორესცენცია. გამოსხივების ამ სახეებისათვის, როგორც ზემოთქმულიდან ჩანს, სრულდება სტოქსის წესი: ფლოურესცენციის ტალღის სიგრძე ყოველთვის მეტია შთანთქმული კვანტის ტალღის სიგრძეზე -  $\lambda_{\text{ფლ}} > \lambda_{\text{შთ}}$ .

### ბიომოლეკულათა ფოტოლუმინესცენცია

ზოგიერთი სახის ქიმიურ რეაქციას თან სდევს გამოსხივება - ქემილუმინესცენცია ელექტრომაგნიტურ ტალღათა სკალის ხილულ (ზოგჯერ ულტრაიისფერ) უბანში. ასეთი სახის გამოსხივებას - ნათებას ბიოლოგიურ სისტემაში ბიოლუმინესცენციას უწოდებენ.

იგი ფოტოქიმიური რეაქციის შეზღუდებული პროცესია. სინათლის გამოსხივებას იწვევს ქიმიური რეაქცია, რომელიც კატალიზდება გარკვეული ფერმენტით. ბიომოლეკულებში ლუმინესცენციას განაპირობებს განსაკუთრებული ატომური ჯგუფები, რომელთაც ლუმინოფორებს უწოდებენ. ხშირად ლუმინოფორულ თვისებებს ამჟღავნებს ციკლური  $\pi$  ელექტრონული სისტემები. ამ შემთხვევაში ფოტოლუმინესცენციის ტალღის სიგრძე 220 ნმ-ის ზემოთაა. ცილებში ასეთია, მაგალითად, არომატული ამინომჟავების ნაშთები: ფენილალანინი, თიოთონინი და ტრიფტოფანი. პირველის ფლოურესცენციის გაზომვა ძნელია, ორი უკანასკნელისათვის კი ადვილად შეიძლება გამოსხივების რეგისტრირება.

ბიოლუმინესცენციის უნარი აქვს ცხოველების ბევრ სახეობას, ბაქტერიებსა და მარტივ ორგანიზმებს. თითქმის ყველა შემთხვევაში ბიოლუმინესცენციას განაპირობებს გარკვეული თერმოსტაბილური სუბსტრატის ფერმენტული ჟანგვა. ასეთ ნაერთს უწოდებენ ლუციფერინს, ხოლო შესაბამის ფერმენტს ლუციფერაზას.

ლუციფერინის და ლუციფერაზას ბუნება სხვადასხვა ორგანიზმში შეიძლება სრულიად განსხვავებული იყოს. უნდა აღვნიშნოთ, რომ ბევრი ასეთი რეაქციის მექანიზმი და მორეაგირე კომპონენტების სტრუქტურა დღეისათვის ჯერ კიდევ არ არის გაშიფრული.

ბიოლოგიური ნიმუშების გამოსხივების ბიოლუმინესცენციის სპექტრის შესწავლას ახორციელებენ სპეციალური ხელსაწყოების - ფლოურომეტრების საშუალებით. ეს ხელსაწყოები გამოირჩევა მაღალი მგძნობიარებით. თანამედროვე ფოტოგამამრავებელი, რომელიც ფლოურომეტრის ერთ-ერთი ძირითადი ელემენტია, საშუალებას იძლევა „დავითვალოთ“ გამოსხივებული სინათლის კვანტების რიცხვი. ლუმინესცენციის სპექტრის ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავადგინოთ, რომელი ბიომოლეკულა იძლევა გამოსხივებას ნიმუშში, რომელი ლუმინოფორი განაპირობებს ფლოურესცენციას. მდიდარ ინფორმაციას გვაძლევს სპექტრის რაოდენობრივი ანალიზი. ფლოურესცენციას ახასიათებენ გარკვეული პარამეტრებით, ასე მაგალითად, შეიძლება გავზომოთ აგზნებული მდგომარეობის ხანგრძლივობა - ფლოურესცენციის სიცოცხლის ხანგრძლივობა  $\tau$  და გამოსხივების ინტენსივობა  $I$ .

### ფოტობიოლოგიური პროცესების პირველადი სტადია

ცოცხალ სისტემაში მიმდინარე პროცესებს, რომლებიც წარმოქმნება სინათლის კვანტის შთანთქმის შედეგად, ფოტობიოლოგიური პროცესებს უწოდებენ.

ფოტობიოლოგიურ პროცესებს მიეკუთვნება ისეთი მოვლენები, როგორცაა, მაგალითად, ბიოლოგიურად მნიშვნელოვანი ნაერთების ფოტოსინთეზი, მხედველობითი აქტი, ფოტოტაქსისი, ფოტოტროპიზმი, ფოტოპერიოდიზმი და სხვა. მედიცინისათვის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ფოტობიოლოგიური პროცესები, რომელთა შედეგადაც ვლინდება ბიოპოლინერთა დესტრუქცია, რაც იწვევს ცოცხალი სტრუქტურების დაზიანებას. ასეთი ცვლილების გამოწვევის უნარი აქვს მოკლე ტალღის სიგრძის ულტრაიისფერ სხივებს.

გარკვეული ინტენსივობის ხილული და ინფრაწითელი სხივების მოქმედებით ცოცხალ სისტემებში ვითარდება ფოტობიოლოგიური პროცესები, რომლებიც მასტიმულირებელ გავლენას ახდენენ მათზე.

არჩვენ ნეგატიურ (მაკნე) და პოზიტიურ (სასარგებლო) ფოტობიოლოგიურ პროცესებს.

ნეგატიურს მიაკუთნებენ ფოტოტოქსიკურ და ფოტოალერგიულ პროცესებს. ფოტოტოქსიკურს უწოდებენ სინათლის მოქმედებით კანის, ან თვალის დაზიანებას (ერითემა, პიგმენტაცია, ბროლის შემღვრევა და სხვა), ხოლო ფოტოალერგიულს - იმ პროცესებს, რომლებსაც საფუძვლად უდევს ალერგიული სენსიბილიზაციის პირველადი იმუნოლოგიური მექანიზმი.

პოზიტიური ფოტობიოლოგიური პროცესებია: მხედველობა, ფოტოპერიოდიზმი,  $D$  ვიტამინის წარმოქმნა და სხვა. (მეცნიერებაში ფოტოსინთეზი, ფოტოპერიოდიზმი და სხვა).

ფოტობიოლოგიური პროცესი შეიძლება დავეყთ შემდეგ სტადიებად:

1. კვანტის შთანთქმა.

ვთქვათ,  $A$  მოლეკულა შთანთქავს კვანტს და გადადის აგზნებულ მდგომარეობაში  $A \xrightarrow{h\nu} A^*$ , რაც თავის მხრივ, იწვევს ფოტოფიზიკურ პროცესებს. კვანტის ენერგიის შესაბამისად მოლეკულაში შეიძლება შეიცვალოს ბრუნვითი, რხევითი ან ელექტრონული ენერგეტიკული დონე.

2. ენერგიის გაცვლის შიგამოლეკულური პროცესები.

3. აგზნების ენერგიის მოლეკულათაშორისი გადატანა.

ზოგიერთ შემთხვევაში  $A$  მოლეკულამ აგზნების ენერგია შეიძლება რეზონანსულად გადასცეს სხვა რომელიმე  $B$  მოლეკულას და უკვე ამ მოლეკულამ მიიღოს მონაწილეობა ფოტოქიმიურ პროცესებში.



4. პირველადი ფოტოქიმიური აქტი.

5. ბიოქიმიური რეაქციები ფოტოპროდუქტების მონაწილეობით.

6. ზოგადფიზიოლოგიური პასუხი სინათლის მოქმედებაზე.

### სპექტროფოტომეტრიისა და ლუმინესცენციური ანალიზის გამოყენება ბიოლოგიაში და მედიცინაში

შთანთქმის სპექტრის გასაზომად გამოყენებულ ხელსაწყოებს სპექტრომეტრი ეწოდება. მათი საშუალებით გაზომვის ჩატარება შესაძლებელია სპექტრის იმფრაწითელ, ხილულ და ულტრაიისფერ არეში. ცხადია, თითოეულ შემთხვევაში ხელსაწყოს კონსტრუქციას გარკვეული სპეციფიკურობა ახასიათებს.

სპექტროფოტომეტრიის მეთოდებმა დიდი გამოყენება ჰპოვა ბიოლოგიაში. იმფრაწითელი სპექტროსკოპის საშუალებით შეგვიძლია მოვახდინოთ ნაერთის ინდენტიფიკაცია, გავზომოთ ამა თუ იმ რეაქციის სიჩქარე, გამოვიკვლიოთ მოლეკულათა კონფორმაცია, მათ შორის ურთიერთქმედების ხასიათი და სხვა.

მოვიყვანოთ ასეთი მაგალითი: ცნობილია, რომ წყალბადური ბმის წარმოშობას თან სდევს იმფრაწითელი სპექტრის ცვლილება. ამ მეთოდის საშუალებით შეგვიძლია გამოვიკვლიოთ წყალბადური ბმის წარმოქმნის პროცესი, რაც, თავის მხრივ, საშუალებას მოგვცემს დავადგინოთ ბიოპოლიმერთა სპირალიზაციის ხარისხი. ხილული და ულტრაიისფერი სპექტროფოტომეტრების საშუალებით შეგვიძლია ჩავატაროთ

ბიოპოლიმერთა რაოდენობრივი ანალიზიც, ე.ი. განვსაზღვროთ მათი კონცენტრაცია. მეთოდის ღირსებად უნდა ჩაითვალოს ის, რომ ამ უბანსი შთანთქმის სპექტრების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია დავადგინოთ ქრომოფორების კომფორმაციული მახასიათებლები.

სპექტროფოტომეტრიული მეთოდი ფართოდ არის გამოყენებული სამედიცინო ანალიზურ პრაქტიკაში. ბიოლოგიური სითხეების თვისებრივი და რაოდენობრივი ანალიზის შედეგებს დიდი წარმატებით იყენებენ სადიაგნოსტიკო მიზნებისათვის.

საკმაოდ მდიდარ და საინტერესო ინფორმაციას გვაძლევს ფლოურომეტრიის მეთოდის გამოყენება ბიოლოგიაში. სპეციალური ხელსაწყოების - ფლოურომეტრების საშუალებით ახორციელებენ გამოსხივების სპექტრის - ფლოურესცენციის გამოკვლევას.

ცილების, ნუკლეინმჟავებისა და სხვა ბიოპოლიმერების ფლოურესცენციის შესწავლა გვაძლევს მნიშვნელოვან მონაცემებს მათ კონფორმაციულ გარდაქმნასა და ასეთი გარდაქმნის დინამიკაზე.

განსაკუთრებით საინტერესოა ის ფაქტი, რომ ზოგიერთი ცილის ფლოურესცენციის პროცესში აუცილებელია ამა თუ იმ იონის მინაწილეობა. მაგალითად, ფოტოცილა ეკვორინის და მისი მონათესავე ცილების ნათებისათვის აუცილებელია კალციუმის იონები. ფლოურომეტრიული მეთოდის მგრძობიარობა საშუალებას გვაძლევს ეს ცილები გამოვიყენოთ კალციუმის იონების კონცენტრაციის განსაზღვრისათვის. ანალოგიური სახით შეიძლება ზოგიერთი ფლოურესცირებადი სისტემის - ლუციფერინ - ლუციფერაზას გამოყენება ატფის რაოდენობის შეფასებისათვის.

უკანასკნელ ხანებში ფლოურომეტრიულ მეთოდს იყენებენ ცოცხალი უჯრედების ნათების შესასწავლად. კვლევის შედეგები მოწმობს, რომ ამ მეთოდმა შეიძლება მეტად მნიშვნელოვანი როლი შეასრულოს სამედიცინო პრაქტიკაში. ცნობილია, რომ პათოლოგიური ქსოვილის, მაგალითად, ავთვისებიანი ქსოვილის გამოსხივების სპექტრი სპეციფიკურად განსხვავდება ნორმალური ქსოვილის სპექტრისაგან. ეს კი საშუალებას იძლევა მეთოდი გამოყენებული იყოს დიაგნოსტიკური მიზნებისათვის.

### **თავისუფალი რადიკალების როლი ბიოლოგიურ სისტემებში**

ცოცხალ სისტემაში მიმდინარე პროცესებში, როგორც ცნობილია, მინაწილეობას ღებულობს მოლეკულები, თავისუფალი რადიკალები, იონები და სხვადასხვა ტიპის კომპლექსი. ამ მხრივ განსაკუთრებით დიდ ინტერესს იწვევს თავისუფალი რადიკალების როლი.

ამ საკითხის შესწავლა პერსპექტიული გახდა ელექტრონული პარამაგნიტური რეზონანსის მეთოდის შექმნის შემდეგ. სწორედ ამ მეთოდით დადგინდა, რომ

თავისუფალი რადიკალები აქტიურად მონაწილეობს უჯრედში მიმდინარე უმნიშვნელოვანეს სასიცოცხლო პროცესებში.

თავისუფალ რადიკალებს უწოდებენ ნაწილაკებს, რომელთაც მოლეკულურ ან გარე ატომურ ორბიტაზე აქვთ გაუწყვილებელი ელექტრონი. ცნობილია 3 ტიპის თავისუფალი რადიკალი: დადებითად დამუხტული, უარყოფითად დამუხტული და ნეიტრალური ნაწილაკები (ნაერთები). ერთი გაუწყვილებელი ელექტრონის შემთხვევაში რადიკალს მონორადიკალს უწოდებენ, ხოლო თუ მას ორი გაუწყვილებელი ელექტრონი აქვს, ასეთ რადიკალს ბირადიკალს უწოდებენ.

მონორადიკალია, მაგალითად, - OH (თავისუფალი ჰიდროქსელი),  $\text{CH}_3$  (თავისუფალი მეთილი),  $\text{C}_2\text{H}_5$  (თავისუფალი ეთილი) და სხვა.

ბირადიკალის კლასიკური მაგალითია ჟანგბადის მოლეკულა, მას აქვს ორი გაუწყვილებელი ელექტრონი პარალელური სპინებით:  $\dot{\text{O}}-\dot{\text{O}}$ .

თავისუფალ რადიკალს, როგორც აღვნიშნეთ, გაუწყვილებელი ელექტრონი აქვს. ასეთი გაუწყვილებელი ელექტრონის არსებობა რადიკალს ანიჭებს ორ მეტად მნიშვნელოვან თვისებას: ჯერ ერთი, ის ძლიერ აქტიურია, ე.ი. ქიმიური გარდაქმნისას რეაქციაში შესვლის მაღალი უნარი აქვს და, მეორე - ახასიათებს მაგნიტური მომენტი, რომელიც გამოწვეულია გაუწყვილებელი ელექტრონის არაკომპენსირებული სპინით. ამ უკანასკნელი თვისების გამო მონორადიკალი იძენს საერთო მაგნიტურ მომენტს, რომელიც ერთი გაუწყვილებელი ელექტრონის მომენტის, ე.ი. ბორის მაგნეტონის ტოლია.

თავისუფალ რადიკალებს რექციის სხვადასხვა უნარი აქვს. მათი აქტივობა დამოკიდებულია ტემპერატურასა და გარემომცველი მოლეკულების კონცენტრაციაზე. ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე მაღალი აქტივობის მქონე რადიკალების იმობილიზაცია შესაძლებელია დიდი სიბლანტის მინაში ან კრისტალებში, სადაც მათ დიდი ხნის განმავლობაში შეუძლიათ არსებობა. ეპრ-ის მეთოდით შესწავლისას სწორედ ასეთ იმობილიზებულ რადიკალებს იყენებენ ხოლმე.

ზოგიერთი რადიკალი (მაგალითად, ქლორის ატომი. ჰიდროქსილის რადიკალი და სხვა) იმდენად აქტიურია, რომ ისინი რეაგირებენ პრაქტიკულად იმავე სიჩქარით, რა სიჩქარითაც ეჯახებიან სხვა მოლეკულებს.

თავისუფალი რადიკალების აღმოჩენისა და რეგისტრაციისათვის იყენებენ კვლევის ქიმიურ და ფიზიკურ მეთოდებს.

ქიმიური მეთოდებით კვლევას საფუძვლად უდევს ქიმიური რეაქციის კინეტიკის შესწავლა. მაღალი აქტივობის გამო თავისუფალი რადიკალები ადვილად შედის რეაქციაში ნივთიერებასთან და საბოლოო პროდუქტების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება მათი ბუნების დადგენა. სხვა შემთხვევაში იკვლევენ პოლიმერიზაციის ისეთ

ჯაჭვურ რეაქციებს, რომლებიც მიმდინარეობენ კატალიზატორებისგან წარმოქმნილი თავისუფალი რადიკალების მონაწილეობით.

კვლევის ფიზიკურ მეთოდებს მიეკუთვნება მაგნიტური შეღწევადობის გაზომვა, მასსპექტრომეტრია, აბსორციული სპექტროფოტომეტრია და სხვა.

თავისუფალი რადიკალები ინტენსიურად შთანთქმავს სპექტრის ხილულ და შორეულ წითელ უბანში. ეს კი იმის საშუალებას იძლევა, რომ ისინი აღმოვაჩინოთ და გავზომოთ სპექტროფოტომეტრიული მეთოდით. საქმე ის არის, რომ ერთი და იგივე ნაერთის დაჟანგული და აღდგენილი ფორმები, როგორც წესი, მკვეთრად განსხვავდება ერთმანეთისაგან.

თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნაზე, მათ ბუნებასა და რეაქციებში მონაწილეობაზე საკმაოდ მნიშვნელოვან ინფორმაციას გვაძლევს ორგანიზმის ცოცხალი უჯრედების ქემილუმინესცენციის გამოკვლევა.

გამოკვლევებით დადგინდა, რომ ქემილუმინესცენცია აღიძვრება იმ ენერჯის ხარჯზე, რომელიც გამოთავისუფლდება თავისუფალი რადიკალების რეკომბინაციის დროს. ნათების ინტენსივობა რეკომბინაციის სიჩქარის პროპორციულია.

### **თავისუფალი რადიკალების მონაწილეობით მიმდინარე პროცესების როლი პატოლოგიაში**

დღეისათვის შეიძლება დასაბუთებულად ჩაითვალოს ის ფაქტი, რომ თავისუფალი რადიკალები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ორგანიზმში მიმდინარე სასიცოცხლო პროცესებში. თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები საშუალებას იძლევა ვამტკიცოთ, რომ ბევრი ძირითადი ბიოქიმიური რეაქცია მიმდინარეობს თავისუფალი რადიკალების უშუალო მონაწილეობით. ამ პრობლემის შესწავლა შესაძლებელი გახდა ელექტრონული პარამაგნიტური რეზონანსის (ეპრ-ის) აღმოჩენისა და მისი რეგისტრაციის მეთოდის შემდგომი დამუშავების შემდეგ. ექსპერიმენტატორებს საშუალება მიეცათ უშუალოდ განესაზღვრათ თავისუფალი რადიკალები ფერმენტული დაჟანგვის მიმდინარეობის დროს. პირველსავე შრომებში დადგინდა, რომ მეტაბოლური პროცესების დონით აქტიური ქსოვილების 1 გრამი მშრალი წონა შეიცავს თავისუფალ რადიკალებს  $10^{-6} - 10^{-8}$  მოლი კონცენტრაციით. ეპრ-ის სიგნალი მიიღება ფერმენტული აქტივობის პროცესში ფერმენტის, სუბსტრატისა და ჟანგბადის ურთიერთქმედებისას. ცალკე აღებული ფერმენტი, სუბსტრატი და ფერმენტ-სუბსტრატი ჟანგბადის გარეშე არ იძლევა ეპრ-ის სიგნალს.

განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა აქვს თავისუფალი რადიკალების როლის შესწავლას მემბრანული პროცესების მიმდინარეობის დროს. დღეისათვის დაგროვილია საკმაოდ დიდი ექსპერიმენტული მონაცემები, რომელთა ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ სარწმუნო დასკვნა: მემბრანის ლიპიდურ ფაზაში წარმოიქმნება თავისუფალი



რადიკალები და მიმდინარეობს ჯაჭვური რადიკალური პროცესები. ამ დროს მემბრანის ლიპიდები ზიანდება, რაც შემდეგ ვრცელდება მემბრანის სხვა, მაგალითად, ცილის მოლეკულებზე.

განსაკუთრებით დიდ ინტერესს იწვევს თავისუფალი რადიკალების როლის დადგენა ავთვისებიანი სიმსივნის ზრდის პროცესში.

ქსოვილები შეიცავს ბუნებრივ ინჰიბიტორებს, რომლებიც არეგულირებს მათში თავისუფალი რადიკალების დონეს. ამიტომ, ბუნებრივია, ვიფიქროთ, რომ ქსოვილებში ინჰიბიტორების რაოდენობასა და თავისუფალი რადიკალების კონცენტრაციას შორის უნდა არსებობდეს გარკვეული თანაფარდობა. დადგენილია, რომ სინსივნური პროცესის განვითარების დროს მნიშვნელოვნად იცვლება თავისუფალი რადიკალების კონცენტრაცია. მაგალითად, ლეიკოზური პროცესის დროს ქსოვილებში (ღვიძლი, ელენთა) მკვეთრად მატულობს თავისუფალი რადიკალების კონცენტრაცია და მაქსიმუმს აღწევს მე-4 დღეს. საინტერესოა ის ფაქტი, რომ თავისუფალი რადიკალების კონცენტრაციის ცვლილება წინ უსწრებს სისხლსა და ძვლის ტვინში ლეიკოზის მახასიათებელი ნიშნების (ლეიკოციტებისა და ჰემოციტობლასტების რიცხვის გაზრდა) გამოვლინებას.

ბოლო ხანებში მიღებული ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები საფუძველს იძლევა ვივარაიდოთ, რომ ჯაჭვური რეაქციები თავისუფალი რადიკალების მონაწილეობით მნიშვნელოვან როლს ასრულებს დაბერების პროცესში.

ცალკეული ფერმენტული სისტემის ფუნქციონირებისას ზოგიერთი ჩვეულებრივი კომპონენტის მონაწილეობით შეიძლება წარმოიქმნას ძლიერ აქტიური რადიკალები, რომელთაც შეუძლიათ უჯრედში ჯაჭვური რეაქციების ინიცირება.

თუნდაც ასეთი რამ იშვიათად ხდებოდეს და ერთეული შემთხვევის შედეგს არ ჰქონდეს დიდი მნიშვნელობა, საკმაოდ დიდი დროის განმავლობაში ასეთი დარღვევების ჯამური შედეგი შეიძლება დამლუპველი აღმოჩნდეს ორგანიზმისათვის. სწორედ ასეთი მოსაზრება უდევს საფუძვლად დაბერების ეგრეთ წოდებულ რადიკალურ ჯაჭვურ თეორიას.

ცდებმა ცხადყო, რომ მემბრანული ლიპიდების დაჟანგვის რეაქციები თავისუფალი რადიკალების მონაწილეობით გარკვეულ კორელაციაშია სიცოცხლის ხანგრძლივობასთან. მაგალითად, ცხოველების (ნემატოდა) რაციონში  $\alpha$  - ტოკოფეროლის შეტანა მაღალი კონცენტრაციით სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობას ზრდიდა 35-დან 46 დღემდე.

სხვა შემთხვევაში ტოკოფეროლის ჩამატება ადამიანის ფიბრობლასტების კულტურის გარემოში (10-100 მკგ 1 მლ-ზე) იწვევდა სიცოცხლის ხანგრძლივობის ორჯერ გაზრდას.

ზემომოყვანილი მცირერიცხოვანი მონაცემებიდანაც ჩანს, თუ რა დიდი მნიშვნელობა აქვს კვლევით მუშაობას ამ მიმართულებით. იგი საშუალებას მოგვცემს დავადგინოთ ბევრი პითოლოგიური პროცესის მექანიზმი, რაც, თავის მხრივ, გადამწყვეტ როლს

შეასრულებს სამკურნალო პრეპარატების შექმნისა და მკურნალობის რაციონალური პრინციპების დამუშავების საქმეში.

## ლექცია XIII

### ელექტრომაგნიტური გამოსხივება

#### გამოსხივების მოქმედება ორგანიზმზე და გამოყენება მედიცინაში

ელექტრომაგნიტური რხევები ეწოდება მუხტის, დენის, ელექტრული და მაგნიტური ველის დაძაბულობათა პერიოდულ და ურთიერთდაკავშირებულ ცვლილებას. სივრცეში ასეთი რხევები ელექტრომაგნიტური ტალღების სახით ვრცელდება. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ელექტრომაგნიტური ტალღები ერთმანეთთან დაკავშირებული ცვლადი ელექტრული და მაგნიტური ველების ერთობლიობაა, რომელიც სივრცეში სასრული სიჩქარით (სინათლის სიჩქარით) ვრცელდება. ელექტრომაგნიტურ ტალღაში ელექტრული და მაგნიტური ველის დაძაბულობა კოსინუსის კანონით (ჰარმონიულად) იცვლება:

$$E = E_0 \cos \omega \left( t - \frac{X}{V} \right) \quad \text{და} \quad H = H_0 \cos \omega \left( t - \frac{X}{V} \right)$$

ამ ფორმულაში  $E_0$  და  $H_0$  ელექტრული და მაგნიტური დაძაბულობის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა, ხოლო  $X$  იმ წერტილის კოორდინატია, რომელშიც  $V$  სიჩქარით გავრცელებულმა ტალღამ მიაღწია. გავიხსენოთ ელექტრომაგნიტური ტალღების რამდენიმე მნიშვნელოვანი თვისება:

1. ელექტრომაგნიტური ტალღები განივი ტალღებია -  $E$  და  $B$  (ე.ი.  $H$ ) ვექტორები ბრტყელ ტალღაში ურთიერთპერპენდიკულარულია და მასთან ყოველთვის ტალღის გავრცელების მიმართულების მართობულია;

2. ყველა სახის ელექტრომაგნიტური ტალღების (რადიოტალღები, სინათლე, რენტგენის სხივები და სხვა) გავრცელების სიჩქარე ვაკუუმში ერთნაირია და უდრის -  $C=3 \cdot 10^8$  მ/წმ;

3. ელექტრომაგნიტურ ტალღებს გადააქვთ ენერგია და მოძრაობის რაოდენობა (იმპულსი);

4. სივრცეში გავრცელებულ ელექტრომაგნიტურ ველს ახასიათებს როგორც ტალღური, ასევე კორპუსკულური (ნაწილაკის) თვისებები.

#### ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სკალა. მედიცინაში მიღებული

##### სიხშირული ინტერვალების კლასიფიკაცია

ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სიხშირეთა სხვადასხვა დიაპაზონს განსხვავებული სახელწოდება აქვს. მაქსველის თეორიის თანახმად ყველა სახის ელექტრომაგნიტურ ტალღებს, მათ შორის სინათლესაც, ერთნაირი ბუნება აქვს. ისინი მხოლოდ სიხშირეებით განსხვავდება. ელექტრომაგნიტური ტალღების ერთიანი სკალა

6 დიაპაზონად არის დაყოფილი: რადიოტალღები (გრძელი, საშუალო და მოკლე), ინფრაწითელი, ხილული, ულტრაიისფერი, რენტგენისა და გამა ( $\gamma$ ) გამოსხივება.

რადიოტალღებს წარმოქმნის გამტარში გამავალი ცვლადი დენი და ელექტრონული ნაკადები. ინფრაწითელ, ხილულ და ულტრაიისფერ გამოსხივებას კი - ატომები, მოლეკულები და დიდი სიჩქარით მოძრავი დამუხტული ნაწილაკები.

რენტგენულ სხივებს წარმოქმნის ატომის შიგნით მიმდინარე პროცესი, ხოლო  $\gamma$  - სხივები ბირთვული წარმოშობისაა. დიაპაზონებს შორის არ არის ზუსტი საზღვარი. ზოგიერთ შემთხვევაში დიაპაზონები ერთმანეთს გადაფარავს.

მედიცინაში მიღებულია ელექტრომაგნიტური რხევების სიხშირულ დიაპაზონებად შემდეგი პირობითი დაყოფა:

დაბალი	(დს) -----	20 ჰც - მდე
ბგერითი	(ბს) -----	20 ჰც - 20 კჰც
ულტრაბგერითი	(უბს)-----	20კჰც - 200კჰც
მაღალი	(მს) -----	200კჰც - 30მჰც
ულტრამაღალი	(უმს)-----	30მჰც - 300მჰც
ზემაღალი	(ზემს)-----	300მჰც-ზე მეტი

თუმცა ყველა სახის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება თავის ბუნებით ერთმანეთის მსგავსია, განსხვავებული სიხშირის გამო ნივთიერებასთან მათი ურთიერთქმედების ხასიათი სხვადასხვაა. მაგალითად, თვალი მხოლოდ ხილული სინთლის მიმართ არის მგრძობიარე, მაშინ როცა კანი სითბური გამოსხივებისადმი აჩენს მგრძობელობას, რადიოტალღებს თხელი ფირფიტა არ ატარებს, რენტგენისა და  $\gamma$  სხივები კი მასში თავისუფლად გადის და სხვა.

ელექტრული ვიბრატორების გამოსხივება				მოლეკულების, აგომების და ბირთვების გამოსხივება									
დაბალსიხშირული რხევები		რადიო ტალღები		ინფრაწითელი გამოსხივება		ხილული გამოივება		ულტრაიისფერი გამოსხივება		რენტგენის გამოსხივება		გამა-გამოსხივება	
ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)	ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)	ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)	ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)	ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)	ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)	ტალღის სიგრძე (მ)	სიხშირე (ჰც)
$10^6-10^4$	$3 \cdot 10^2-10^4$	$10^4-10^4$	$10^4-10^{13}$	$10^{-4}-10^{-6}$	$10^{-3}-10^{14}$	$4 \cdot 10^{-7}-8 \cdot 10^{-7}$	$10^{14}$	$10^{-7}-10^{-8}$	$10^{14}-10^{16}$	$10^{-8}-10^{-11}$	$10^{16}-10^{19}$	$10^{-11}-10^{-13}$	$10^{19}-10^{20}$

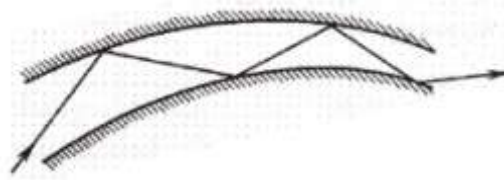
ნახ. 32. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სკალა

გეომეტრიული ოპტიკის კანონები - დამოუკიდებლად!

**ბოჭკოვანი ოპტიკის გამოყენება მედიცინაში**

ბოჭკოვანი ოპტიკა გეომეტრიული ოპტიკის ნაწილია. ის შეისწავლის სინათლისა და გამოსახულების გადაცემას სპეციალური შუქგამტარებით. ბიჭკოვან ოპტიკას საფუძვლად

უდევს სინათლის სრული არეკვლის მოვლენა. სინათლე შედის გამჭირვალე ბოჭკოში, რომლის გარდატეხის მაჩვენებელი მეტია გარემომცველი ნივთიერების გარდატეხის მაჩვენებელთან შედარებით. ბოჭკოს შიგა ზედაპირზე მრავალჯერადი სრული არეკვლის გზით სინათლე ვრცელდება ბოჭკოს გასწვრივ;



ნახ. 33. სინათლის გავრცელება ბოჭკოს შიგნით

მრავალჯერადი არეკვლისას ბოჭკოს ნივთიერება შთანთქავს სინათლის ენერგიის მნიშვნელოვან ნაწილს (მაგალითად, 1 მ სიგრძის ბოჭკო სინათლის ენერგიის 30-70%-ს შთანთქავს).

იმისათვის, რომ სინათლის გამტარი სისტემა მოქნილი იყოს და მასთან შესაძლებელი გახდეს სინათლის დიდი ნაკადის გადაცემა, ცაკეულ ბოჭკოებს აერთიანებენ კონებად. შუქგამტარი სწორედ ასეთი ბოჭკოების კონაა. შუქგამტარის მეშვეობით ხორციელდება ორგანიზმის სიღრუეების შიგნითა ზედაპირების როგორც სინათლით განათება, ისე ზედაპირის გამოსახულების გადაცემა დამკვირვებლამდე. დიაგნოსტიკის მიზნით მედიცინაში გამოყენებულ ასეთ მოწყობილობას ენდოსკოპს უწოდებენ. მისი მეშვეობით იკვლევენ კუჭის, ნაწლავის სიღრუეს და სხვა; შუქგამტარით შეიძლება ლაზერული გამოსხივების გადაცემა შინაგანი ორგანოების სიღრუეებშიც, ხშირად ასეთი გამოსხივება საჭიროა ქსოვილზე ზემოქმედებისათვის, სამკურნალოდ ან თუ დაზიანებულია ქსოვილი - მის მოსაწვავად.

### ლაზერული გამოსხივება. მისი გამოყენება მედიცინაში

კვანტური გადასვლის დროს ელექტრონი (ატომი ან მოლეკულა) ნახტომისებურად გადადის ერთი ენერგეტიკული დონიდან მეორეზე. მასთან თუ გადასვლა ხდება მაღალი ენერგეტიკული დონიდან დაბალზე ელექტრონი გასცემს ენერგიას. თუ, პირიქით, ელექტრონი გადადის დაბალი ენერგეტიკული დონიდან მაღალზე, ის შთანთქავს ენერგიას. იმ შემთხვევაში, როცა აგზნებულ დონეზე მყოფი ელექტრონი ყოველგვარი ზემოქმედების გარეშე უბრუნდება ძირითად ენერგეტიკულ დონეს და გამოსახივებს კვანტს, ასეთ გამოსხივებას სპონტანურ (თავისთავად) გამოსხივებას უწოდებენ.

სპონტანური გამოსხივების გარდა ცნობილია ატომის ე.წ. იძულებითი, ანუ ინდუცირებული გამოსხივება. ამ შემთხვევაში  $h\nu = E_n - E_m$ . ენერგიის კვანტის მოქმედებით აგზნებული ატომი ზედა  $E_n$  ენერგეტიკული დონიდან გადადის ქვედა  $E_m$  დონეზე და გამოსახივებს ისეთივე ენერგიის კვანტს. იძულებითი გამოსხივების შესაბამისი დროის ინტერვალი საკმაოდ დიდია ( $\sim 10^{-3}$  წმ). რატომ არ გადადის თავისთავად ატომი საწყის ენერგეტიკულ დონეზე? ამის მიზეზი ის არის, რომ ატომებს

გააჩნია ე.წ. მეტასტაბილური (თითქმის სტაბილური) ენერგეტიკული დონეები. რომელიმე კვანტური როცხვის შენახვის კანონი კრძალავს ასეთი დონიდან თავისთავად გადასვლას. გადასვლა რომ განხორციელდეს აუცილებელია გარკვეული ენერგიის კვანტის ზემოქმედება ატომზე.

უნდა აღინიშნოს ის ფაქტი, რომ პირველადი კვანტის მიერ ატომის გადაყვანა  $E_n$ -დან  $E_m$  დონეზე (იძულებითი გამოსხივება) და პირიქით,  $E_m$ -დან  $E_n$  დონეზე გადაყვანა (შთანთქმა) ერთი და იგივე ალბათობით მიმდინარეობს. ამიტომ, იმისგან დამოკიდებულებით თუ როგორია  $E_m$  და  $E_n$  დონის მიხედვით ატომების განაწილება გარემოში, მასში გამავალი სინათლე შეიძლება შესუსტდეს ან გაძლიერდეს.

ჩვეულებრივ პირობებში დაბალ ენერგეტიკულ დონეზე ( $E_m$ ) ატომების უფრო მეტი რაოდენობა იმყოფება. ასეთ განაწილებას ნორმალური განაწილება ეწოდება და ატომთა „დასახლება“ ბოლცმანის კანონით გამოისახება.

$$N_i = ce^{-\frac{E_i}{kT}},$$

სადაც  $N_i$  ატომების რიცხვია, რომელიც  $E_i$ -ს შესაბამის ენერგეტიკულ დონეებზეა დასახლებული.  $k$  - ბოლცმანის მუდმივაა,  $T$  - აბსოლუტური ტემპერატურა,  $C$  - ნორმირების კოეფიციენტი.

თუ ასეთ გარემოში გადის  $h\nu = E_n - E_m$  ენერგიის კვანტი, ატომი შთანთქმავს მას და  $E_m$  დონიდან  $E_n$  დონეზე გადავა. მაშასადამე, ამ შემთხვევაში გარემოში გამავალი სინათლის ინტენსივობა შემცირდება. ამ მოვლენას გამოხატავს ბუგერის კანონი:

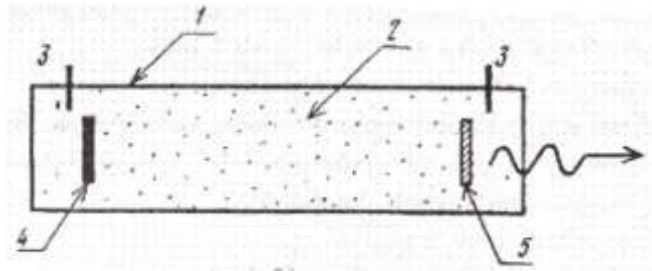
$$I = I_0 e^{-\beta l}$$

სადაც  $I_0$  სინათლის საწყისი ინტენსივობაა,  $I$  - ნივთიერების  $l$  - სისქის ფენაში გასული სინათლის ინტენსივობა, ხოლო  $\beta$  - შთანთქმის კოეფიციენტი.

დავუშვათ, რომ  $E_n$  მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე მყოფი აგზნებული ატომების რიცხვი უფრო მეტია. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ატომთა „დასახლება“ ნორმალურის შებრუნებულია. ატომთა ასეთ განაწილებას ინვერსიულ დასახლებას უწოდებენ და ის გამოისახება ბოლცმანის განაწილების შებრუნებული კანონით. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ასეთი განაწილება შეიძლება გამოვლინდეს იმ შემთხვევაში, როცა ნივთიერების ატომებს მეტასტაბილური დონეები გააჩნია. ასეთ გარემოში კვანტის მოძრაობისას უფრო ხშირი იქნება ატომის გადასვლა  $E_n$  დონიდან  $E_m$  დონეზე (ვიდრე პირიქით) და მეორადი კვანტის გამოსხივება. ეს ცხადია, გამოიწვევს ნივთიერებაში გასული სინათლის ინტენსივობის გაძლიერებას.

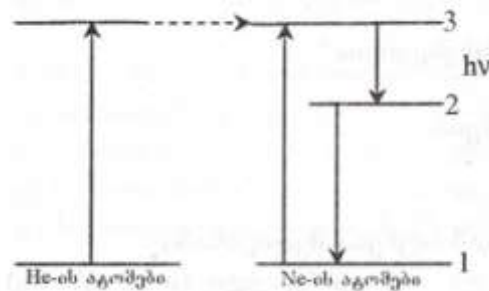
მოწყობილებას, რომელშიც ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გაძლიერება ხდება ინვერსიულად დასახლებული გარემოს გამოყენებით, კვანტურ გენერატორს უწოდებენ. თუ ხელსაწყო ხილულ არეს (სინათლეს) აძლიერებს, მას ოპტიკური კვანტური გენერატორი - ლაზერი ეწოდება.

განვიხილოთ ჰელიუმ-ნეონიანი გაზური ლაზერის მოწყობილობა და მუშაობის პრინციპი. ჰელიუმ-ნეონიანი ლაზერი წარმოადგენს 7 მმ დიამეტრის კვარცის აირგანმუხტვის მილს, რომელშიც მოთავსებულია He-სა და Ne-ის ნარევი, მასთან ჰელიუმის კონცენტრაცია 10-ჯერ აღემატება ნეონისას.



ნახ.34 ჰელიუმ-ნეონიანი გაზური ლაზერის მოწყობილობა

ელექტრული განმუხტვის შედეგად ხდება He-ის აგზნება და მათი გადასვლა 2s მეტასტაბილურ დონეზე. ამ დონეზე ხდება მათი დაყოვნება ( $t_{დაყ} = 10^{-3}$  წმ). დროის ამ ინტერვალში ჰელიუმის ატომები ეჯახებიან ნეონის ატომებს. ვინაიდან He-ის 2s აგზნებული დონის ენერგია ნეონის 3s აგზნებული დონის ენერგიის ტოლია, მოხდება ორი იძულებითი გადასვლა: ჰელიუმის ატომში  $2s \rightarrow 1s$ , ხოლო ნეონის ატომში კი  $1s \rightarrow 3s$



ნახ.35. ლაზერული გამოსხივება

ამის შემდეგ ნეონის ატომში 2 სპონტანური გადასვლა ხდება  $3s \rightarrow 2p$  და  $2p \rightarrow 1s$ ; ლაზერულ გამოსხივებას გვაძლევს  $3s \rightarrow 2p$  გადასვლა. 3s დონის დასახლებას უზრუნველყოფს ჰელიუმის ატომები. მასთან აუცილებელია 2p დონის განტვირთვა. ამ მიზნით აირგანმუხტვის მილის ზომები ისეა შერჩეული, რომ ნეონის ატომი დაჯახებისას მილის კედელს გადასცემს ენერგიას და 2p დონიდან უბრუნდება 1s დონეს. 4 და 5 სარკეებს შორის მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად გამჭირვალე სარკიდან (5) უწყვეტად გამოდის მონოქრომატული, წრფივად პოლარიზებული და ლოკალიზებული ლაზერული გამოსხივება.

ამ თვისებების გამო ძალიან მცირე განიკვეთის პარალელურ სხივთა კონაში შესაძლებელია საკმაოდ დიდი სიმძლავრის კონცენტრირება. ლაზერულ სხივებს წარმატებით იყენებენ მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვადასხვა სფეროში.

ლაზერული გამოსხივება ფართოდ არის გამოყენებული მედიცინაშიც. განსაზღვრული ინტენსივობის ლაზერულ სხივებს შეუძლია დაანგრიოს (დაშალოს) ცოცხალი ქსოვილი, გამოიწვიოს ცილის კოაგულაცია. ლაზერის ამ თვისებას იყენებენ ცოცხალი ქსოვილის უსისხლო გაკვეთისათვის. მაგალითად, თვალის ბადურის აშრეების ოპერაციის გარეშე მკურნალობისათვის შექმნილია აპარატი ოფთალმოკოაგულატორი. მასთან სინათლის

(ლაზერის) "უსისხლო დანა" სტერილიზაციას არ საჭიროებს. გლაუკომის შემთხვევაში ლაზერული სხივის მეშვეობით, აკეთებენ 50-100 მკმ დიამეტრის ხვრელს თვალისშიგა სითხის უკუდენისათვის. ლაზერულ სხივებს იყენებენ კიბოს უჯრედების გასანადგურებლად, კბილის მკურნალობის დროს ნადების და დენტინის დასაშლელად და სხვა.

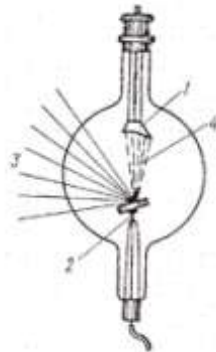
## ლექცია XIV

### რენტგენული გამოსხივება. მისი გამოყენება მედიცინაში

#### რენტგენული მილს მოწყობილობა

ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას, რომლის ტალღათა სიგრძე მოიცავს 10 ნმ-დან  $3 \cdot 10^{-2}$  ნმ-მდე დიაპაზონს, რენტგენულ სხივებს უწოდებენ. გრძელი ტალღის სიგრძის (10 ნმ) რენტგენული გამოსხივება ესაზღვრება მოკლე ტალღის სიგრძის ულტრაიისფერ გამოსხივებას, ხოლო მოკლე ტალღის სიგრძის ( $3 \cdot 10^{-2}$  ნმ) სხივები კი გრძელტალღოვან  $\gamma$  გამოსხივებას.

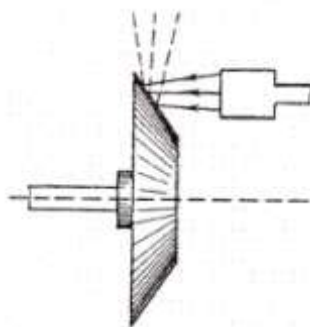
რენტგენული გამოსხივების ყველაზე გავრცელებული ხელოვნური წყაროა რენტგენული მილი. მისი ძირითადი ელემენტები ნაჩვენებია სურათზე. (სურ. 30)



ნახ. 36. რენტგენული მილი

მინის ბალონში, რომლიდანაც ჰაერი ამოტუმბულია (წნევა  $p \approx 10^{-4}$  პა) ჩარჩილურია ორი ელექტროდი: კათოდი (1), რომელიც ვარვარების ძაფით ხურდება და ელექტრონებს ამოაფრქვევს, და დახრილი ზედაპირის მქონე ანოდი (2) (ანტიკათოდი). ანოდს და კათოდს შორის ძაბვა  $40 \cdot 10^3 - 60 \cdot 10^3$  ვ-ის ფარგლებში იცვლება. თერმოელექტრონული ემისიის შედეგად კათოდიდან ამოფრქვეული ელექტრონები (4) აჩქარებით მოძრაობს დადებითი პოტენციალის მქონე ანოდისაკენ. დიდი კინეტიკური ენერჯის მქონე ელექტრონების ანოდზე დამუხრუჭების შედეგად წარმოიქმნება რენტგენული გამოსხივება (3) სადიაგნოსტიკო მიზნებისათვის აუცილებელია რენტგენულ გამოსხივებას იძლეოდეს წერტილოვანი წყარო. ეს იმას ნიშნავს, რომ ელექტრონები

უნდა ეცემოდეს ანოდს ზედაპირის ერთ ადგილზე. ამ მიზნით ახდენენ ელექტრონების ნაკადის ფოკუსირებას. ანოდის ერთი ადგილის ელექტრონებით ბომბარდირება კი, თავისი მხრივ, იწვევს ანოდის გადახურებას. ასეთ არასასურველ ეფექტს თავიდან იცილებენ შემდეგი გზით: ჯერ ერთი, ანოდის ზედაპირი მზადდება ძნელად დნობადი ლითონისაგან (ვოლფრამი,  $t_{\text{დნ}} = 3400^{\circ}\text{C}$ ); მეორე მხრივ კი, ანოდს აცივებენ წყლით, ან ზეთით, ან ამზადებენ სპეციალური კონსტრუქციის რენტგენულ მილს, რომელშიც ანოდი ბრუნავს.



ნახ.37. რენტგენის მილი მბრუნავი ანოდით

ამ შემთხვევაში ელექტრონების ნაკადი ანოდის სხვადასხვა უბანზე ეცემა და ის არ გადახურდება.

### დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივება

კათოდიდან ამოფრქვეული ელექტრონები აჩქარებით მოძრაობს ანოდისაკენ. მათი კინეტიკური ენერგია  $\frac{mV^2}{2} = eU$ , სადაც  $m$  ელექტრონის მასაა,  $V$  - მისი სიჩქარე ანოდის ზედაპირთან,  $e$  - ელექტრონის მუხტი, ხოლო  $U$  - ძაბვა კათოდსა და ანოდს შორის.

ანოდის შემადგენელი ატომების ელექტრონებისა და ბირთვის ელექტროსტატიკური ველის გავლენით ანოდის ზედაპირზე დაცემული ელექტრონი მუხრჭდება. ამ პროცესის შედეგად გამოსხივდება ელექტრომაგნიტური ტალღა. თუ ტალღის სიხშირე ემთხვევა რენტგენული სხივების სიხშირეთა დიაპაზონს, მაშინ ასეთ გამოსხივებას დამუხრუჭებით რენტგენულ გამოსხივებას უწოდებენ.

დამუხრუჭებითი რენტგენული გამოსხივების მექანიზმი შეიძლება მარტივად ასე ავხსნათ: მოძრავ ელექტრონს (ისევე როგორც ელექტრულ დენს) გარს აკრავს მაგნიტური ველი, რომლის ინდუქციის სიდიდე დამოკიდებულია ელექტრონის სიჩქარეზე. ელექტრონის დამუხრუჭებისას მისი მაგნიტური ველის ინდუქცია თითქმის ნულამდე მცირდება. მაშასადამე, ელექტრონის მაგნიტური ველი იცვლება. მაქსველის თეორიის თანახმად, ასეთი ველი სივრცის მეზობელ უბანში აღძრავს ცვლად ელექტრულ ველს, რომელიც, თავის მხრივ, ასევე წარმოშობს ცვლად მაგნიტურ ველს და ა. შ.; ამრიგად, გარემოში გავრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღა, რომელიც, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ელექტრონის დამუხრუჭების შედეგად გამოსხივდება. დამუხრუჭებისას რენტგენულ გამოსხივებად გარდაიქმნება ელექტრონის კინეტიკური ენერგიის



დაახლოებით 3%, დანარჩენი 97% სითბურ ენერგიაში გადადის (სწორედ ეს იწვევს ანოდის გადახურებას).

ელექტრონის ენერგიის ასეთი თანაფარდობით გარდაქმნა შემთხვევითია, ამიტომ დიდი ტაოდენობით ელექტრონების დამუხრუჭებისას წარმოქმნილი გამოსხივების სპექტრი უწყვეტია.

დავუშვათ, რომ ელექტრონის კინეტიკური ენერგია მთლიანად გადადის რენტგენული გამოსხივების ფოტონის ენერგიაში. მაშინ, ცხადია, მართებული იქნება ასეთი ტოლობა:

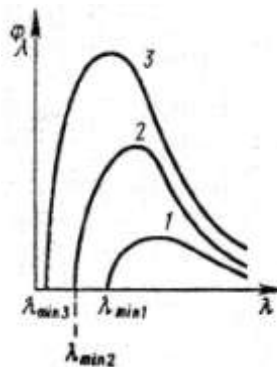
$$eU = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}, \quad \text{საიდანაც:}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU} \quad (70)$$

ამ ფორმულაში  $\lambda_{\min}$  - რენტგენული გამოსხივების მინიმალური ტალღის სიგრძეა ( $\lambda \approx 10^{-10}$  მ),  $h$  - პლანკის მუდმივაა,  $c$  - სინათლის სიჩქარე. თუ  $h$ ,  $c$  და  $e$ -ს მნიშვნელობებს შევიტანთ (70) ფორმულაში, მივიღებთ:

$$\lambda_{\min} = \frac{12,3}{U} \cdot 10^{-9} \text{ მ} = \frac{12,3}{U} \text{ ნმ} \quad (71)$$

მაშასადამე, რენტგენულ მილში ძაბვის (რენტგენული გამოსხივების ნაკადის) გაზრდა ან შემცირება იწვევს  $\lambda_{\min}$ -ის (მასთან მთელი სპექტრის) წანაცვლებას უფრო მოკლე, ან გრძელი ტალღებისაკენ.



ნახ.38. რენტგენული გამოსხივების ნაკადის სპექტრალური დამოკიდებულება

თუ კათოდის ვარვარების ტემპერატურას გავრზდით, მატულობს დენის ძალა მილში (ამოფრქვეული ელექტრონების რიცხვი) და შესაბამისად რენტგენული გამოსხივების ნაკადიც.

ცდისეული მონაცემებით დასტურდება, რომ რენტგენული გამოსხივების ნაკადი  $\Phi$  გამოითვლება ფორმულით:

$$\Phi = KIU^2Z, \quad (72)$$

სადაც  $I$  - დენის ძალაა მილში,  $U$  - ძაბვა,  $Z$  - ანოდის ნივთიერების რიგითი ნომერი, ხოლო  $K$  - პროპორციულობის კოეფიციენტი.

### მახასიათებელი რენტგენული გამოსხივება

რენტგენულ მილში ძაბვის გაზრდისას, მისი გარკვეული სიდიდის დროს, უწყვეტი სპექტრის ფონზე გამოჩნდება შედარებით კაშკაშა ხაზები (ხაზოვანი სპექტრი). რენტგენული გამოსხივების ასეთ წყვეტილ სპექტრს მახასიათებელი გამოსხივება ეწოდება.

მახასიათებელი რენტგენული გამოსხივების წარმოქმნა შეიძლება ავხსნათ ატომის აგებულებაზე თანამედროვე წარმოდგენის საფუძველზე.

ატომში ელექტრონის მდგომარეობა ხასიათდება ოთხი კვანტური რიცხვით:  $n$  - მთავარი კვანტური რიცხვით,  $l$  - ორბიტალური კვანტური რიცხვით,  $m$  - სპინური მაგნიტური კვანტური რიცხვით.

მთავარი კვანტური რიცხვი  $n$  განსაზღვრავს ელექტრონის ენერგიის მნიშვნელობას (ენერგეტიკულ დონეს). ელექტრონები, რომელთაც  $n$ -ის ერთი და იგივე მნიშვნელობა შეესაბამება (ე.ი. ერთნაირი ენერგია გააჩნია) წარმოქმნის ერთ ელექტრონულ შრეს.  $n=1$  შესაბამის შრეს  $K$  - შრეს უწოდებენ,  $n=2-l$  შრეს,  $n=3-N$  შრეს,  $n=4-N$  შრეს,  $n=5-O$  შრეს და ა.შ.; ატომის ბირთვთან ყველაზე ახლოს  $K$  შრის ელექტრონებია, ყველაზე დაშორებით  $O$  შრის ელექტრონები.

რეიტინგულ მილში ძაბვის რაღაც  $U_0$  მნიშვნელობაზე ანოდზე დაცემული ელექტრონის კინეტიკური ენერგია საკმარისია იმისათვის, რომ მან შეაღწიოს ანოდის ატომის შიგნით და  $O$  შრიდან ამოაგდოს ელექტრონი (მოახდინოს იონიზაცია);  $O$  შრეზე წარმოქმნილ თვისუფალ ადგილზე გადმოდის ელექტრონი შედარებით მაღალი ენერგეტიკული დონიდან. ახლა ამ დონეზე გაჩნდება თავისუფალი ადგილი, რომელსაც იკავებს უფრო მაღალი ენერგეტიკული დონიდან გადმოსული ელექტრონი და ა. შ.; თითოეულ ასეთ გადასვლას თან ახლავს რენტგენული ფოტონის გამოსხივება. ამის შედეგად მივიღებთ მახასიათებელი გამოსხივების  $O$  სერიის სპექტრულ ხაზებს. ამაჩქარებელი ძაბვის შემდგომი გადიდებისას, მათი რაღაც  $U_N, U_M, U_L$  და  $U_K$  მნიშვნელობაზე ( $U_N < U_M < U_L < U_K$ ), მახასიათებელი გამოსხივების სპექტრში გაჩნდება  $N, M, L$  და  $K$  სერიის ხაზებიც. ელექტრული გადასვლებისა და მახასიათებელი გამოსხივების მექანიზმი ამ შრეებზეც  $O$  შრის ანალოგიურია. ცხადია, რომ  $K$  სერიის გამოსხივებისას აღიგზნება  $L, M, N$  და  $O$  სერიებიც,  $L$  - სერიის აგზნებისას  $M, N$  და  $O$  სერიები და ა.შ.;

ოპტიკური სპექტრისგან განსხვავებით სხვადასხვა ელემენტის ატომთა მახასიათებელი რენტგენული გამოსხივების სპექტრი ერთი ტიპისაა. ეს იმით აიხსნება, რომ მათი შიგა შრეები ერთნაირია და მხოლოდ ენერგეტიკულად განსხვავდება. ელემენტის რიგითი ნომრის ზრდასთან ერთად ბირთვის ურთიერთქმედების ძალა მატულობს ეს კი იმას ნიშნავს, რომ ბირთვის მუხტს გადიდებასთან ერთად მახასიათებელი სპექტრი გადაინაცვლებს უფრო მაღალი სიხშირისაკენ.

ამ კანონზომიერებას ასახავს მოზილის კანონი:

$$\sqrt{\omega} = c(z - \sigma), \quad (73)$$

სადაც  $\omega$  სპექტრული ხაზის სიხშირეა,  $z$  - ანოდის ატომის რიგითი ნომერი, ხოლო  $c$  და  $\sigma$  - მუდმივია.

ოპტიკური სპექტრისგან განსხვავებით ატომის მახასიათებელი რენტგენული სპექტრი არ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ რომელ ქიმიურ ნაერთში შედის ის.

მაგალითად,  $O$ ,  $O_2$  და  $H_2O$  მახასიათებელი სპექტრები ერთნაირია. სწორედ ამიტომ უწოდეს ასეთ სპექტრს მახასიათებელი.

### რენტგენული გამოსხივების ურთიერთქმედება ნივთიერებასთან

რენტგენული სხივების ცოცხალ სისტემაზე მოქმედება, მისი გამოყენება სადიაგნოსტიკო და სამკურნალო მიზნით ეფუძნება იმ პირველად პროცესებს, რომლებიც ვითარდება რენტგენული გამოსხივების ფოტონის ნივთიერების ატომებთან და მოლეკულებთან ურთიერთქმედების დროს.

ფოტონის ენერგიასა და იონიზაციის (ატომის შიგა შრებიდან ელექტრონის ამოგდება) ენერგიის თანაფარდობისაგან დამოკიდებულებით შესაძლებელია 3 ძირითადი პროცესის განვითარება:

1. კოჰერენტული გაბნევა დაიშორება იმ შემთხვევაში, როცა ფოტონის ენერგია (გრძელტალღოვანი რენტგენული გამოსხივება) ნაკლებია იონიზაციის ენერგიაზე -  $\varepsilon = h\nu < \varepsilon_{\text{იონ.}}$ ; ამ დროს ფოტონისა და ატომის ენერგია არ იცვლება, ასეთ გაბნევას კოჰერენტუს უწოდებენ. თვითონ კოჰერენტული გაბნევა ბიოლოგიურ მოქმედებას არ იწვევს, მაგრამ რენტგენულ გამოსხივებისაგან დაცვისათვის მისი გათვალისწინება აუცილებელია.

2. თუ რენტგენული გამოსხივების ფოტონის ენერგია მეტია იონიზაციის ენერგიაზე, ე.ი.  $h\nu > \varepsilon_{\text{იონ.}}$ , მაშინ ფოტონის ენერგია შეიძლება დაიხარჯოს ელექტრონის ამოსაგდებად, მისთვის კინეტიკური ენერგიის მინიჭებისათვის და ახლი, გაბნეული რენტგენული ფოტონის წარმოსაქმნელად. ე.ი.  $h\nu = h\nu_0 + \varepsilon_{\text{იონ.}} + E_k$ . ამ მოვლენას კომპტონის ეფექტს უწოდებენ, ხოლო უფრო გრძელი ტალღის გაბნეული ფოტონის ( $h\nu_0$ ) წარმოქმნას - არაკოჰერენტულ გაბნევას.

3. ზოგ შემთხვევაში ატომის მიერ დიდი ენერგიის ფოტონის შთანთქმის შედეგად მისგან ამოვარდება ელექტრონი, ხოლო თვითონ ატომი იონად გადაიქცევა. ამ მოვლენას ფოტოეფექტი ეწოდება. თუ ფოტონის ენერგია საკმარისი არ არის, ელექტრონის მოცულობა არ ხდება, მაგრამ ატომი აგზნებულ მდგომარეობაში გადავა.

ჩამოთვლილი პირველადი პროცესები ნივთიერებაში იწვევს მეორეულ, მესამეულ და ა.შ. მოვლენებს.

### რენტგენული გამოსხივების გამოყენება მედიცინაში

რენტგენული გამოსხივება ფართოდ გამოიყენება სამედიცინო პრაქტიკაში სადიაგნოსტიკო (რენტგენოდიაგნოსტიკა) და სამკურნალო (რენტგენოთერაპია) მიზნით. დაავადების დიაგნოზის დადგენისათვის ყველაზე უფრო მნიშვნელოვანია შინაგანი ორგანოების „გაშუქება“ რენტგენული სხივების მეშვეობით. ამ მიზნით იყენებენ 60-120 კეე (1 კეე =  $10^3$  ეე) ენერგიის ხისტ გამოსხივებას, რომელიც ნივთიერების განჭოლის დიდი უნარით ხასიათდება. მასთან ასეთი ტალღის სიგრძის გამოსხივების შთანთქმის უნარი სხვადასხვა ქსოვილისათვის მკვეთრად განსხვავებულია (განსაკუთრებით ძვლის ქსოვილისათვის). სწორედ ეს გვამღვეს საშუალებას დავინახოთ ადამიანის შინაგანი ორგანოების ჩრდილის პროექცია. იყენებენ რენტგენო-დიაგნოსტიკის ორ ვარიანტს:

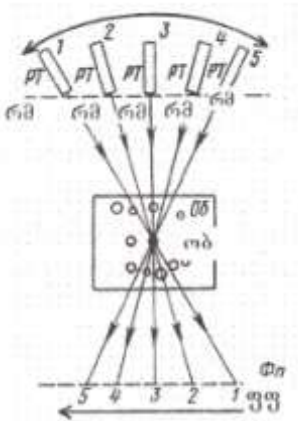
1. რენტგენოსკოპიის დროს დაავადებული ორგანოს გამოსახულებას გამოიკვლევენ განათებულ - ე.წ. რენტგენოლუმინესცირებად ეკრანზე.

2.რენტგენოგრაფიის შემთხვევაში კი ორგანოს გამოსახულებას აფიქსირებენ სპეციალურ ფოტოფირზე.

თუ გამოსაკვლევი ორგანოს გარემომცველი ქსოვილების შთანთქმის უნარი დაახლოებით ერთნაირია, იყენებენ სპეციალურ კონტრასტულ ნივთიერებას. მაგალითად, კუჭისა და ნაწლავის „გაშუქებისას“ ავადმყოფს აძლევენ ბარიუმის ფოსფატისაგან დამზადებულ ფაფას. ამ ნივთიერებით სავსე კუჭისა და ნაწლავის გამოსახულება მკვეთრია.

მაღალი ხარისხის, ნათელი გამოსახულების მისაღებად საჭიროა დიდი ინტენსივობის რენტგენული სხივების გამოყენება. მაგრამ ასეთ გამოსხივებას შეუძლია გამოწვიოს არასასურველი ბიოლოგიური ეფექტები. მცირე ინტენსივობის სხივების გამოყენებისას გამოსახულების ხარისხის გასაუმჯობესებლად მიმართავენ სხვადასხვა ტექნიკურ საშუალებას. მაგალითად, ფლუოროგრაფიული მეთოდის გამოყენების დროს პატარა ზომის მგრძნობიარე ფირზე აფიქსირებენ გამოსახულებას დიდი ზომის ლუმინისცირებადი ეკრანიდან. მიღებულ სურათს სპეციალური გამადიდებლის მეშვეობით გამოიკვლევენ.

ბოლო ხანებში შეიმუშავეს ეგრეთწოდებული რენტგენული ტომოგრაფიის მეთოდი - ორგანოს შრეული სურათის გადაღების მეთოდი. მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს: ობიექტის ერთ მხარეზე ათავსებენ რენტგენის მილაკს, ხოლო მეორეზე - ფოტოფირს. მათ პერიოდულად გადაადგილებენ ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით (საწინააღმდეგო ფაზებით) ისე, რომ რენტგენის სხივი მილაკის ნებისმიერი მდებარეობის დროს გადის ერთსა და იმავე წერტილში (მიკროუბანში). ამ წერტილის (მოდრაობის ცენტრის) გამოსახულება საკმაოდ მკვეთრია, ვინაიდან ასეთი პერიოდული მოძრაობის დროს ორგანიზმის სხვა გაუმჭვირი უბნები (მაგალითად, ძვლები) ყოველთვის არ ჩრდილავს „საკვლევ უბანს“.



ნახ.39. რენტგენული ტომოგრამის გადასაღები მოწყობილობის სქემა: რმ-რენტგენის მილი; ობ-ობიექტი; ფფ-ფოტოფირი; ციფრები 1,2,3,4,5 გვიჩვენებს ზემოთ რენტგენის მილის მდებარეობას, ქვევით - საკვლევი უბნის გამოსახულების მდებარეობას ფოტოფირზე

რენტგენის მილაკისა და ფოტოფირის მოძრაობის ცენტრის ცვლილებით შეიძლება საკვლევი ობიექტის შრეული სურათის - ტომოგრამის გადაღება. ფირის ადგილზე მეცნიერება ხაუნსფილდმა და მაკ-კორმაკმა მოათავსეს ეკრანი, რომელიც შედგებოდა

მაიონებელი გამოსხივების ნახევარგამტარული დეტექტორებისაგან. მონაცემები დეტექტორებიდან გადაეცემა ელექტრონულ- გამომთვლელ მანქანას, რომელიც ახორციელებდა მიღებული სიგნალების ანალიზს და დამუშავებას. რენტგენის სხივებისადმი მიკროუბნების შთანთქმის უნარის განსხვავება არ აღემატებოდა 0,1%-ს. ასეთი დანადგარის საშუალებით შესაძლებელია 2 მმ ზომის დეტალის გარჩევა. კომპიუტერული რენტგენული ტომოგრაფის შექმნისათვის ხაუნსფილდსა და მაკ-კორმაკს ნობელის პრემია მიენიჭეს.

სამკურნალო მიზნით რენტგენული სხივების გამოყენებას საფუძვლად უდევს მისი დამანგრეველი მოქმედება. გამოსხივებისადმი განსაკუთრებით მგრძობიარეა ახალგაზრდა, ზრდის პროცესში მყოფი უჯრედები (მაგალითად, სიმსივნური უჯრედები).

## ლექცია XV

### მაიონებელი გამოსხივება

#### მაიონებელი გამოსხივების სახეები

ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებისას ატომებისა და მოლეკულების დაიონებას (იონიზაციას) იწვევს მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება და დიდი ენერგიის ნაწილაკების ნაკადი. თუ ატომის (მოლეკულის) მიერ შთანთქმული ენერგია მეტი იქნება იონიზაციის ენერგიასთან შედარებით, ელექტრონი ამოვარდება ატომიდან.

მაიონებელი გამოსხივება თავისი ბუნებით იყოფა ორ სახედ: კორპუსკულურ და მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებად.

მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას მიეკუთვნება რენტგენის სხივები და  $\gamma$  გამოსხივება. რენტგენის სხივების ტალღის სიგრძე  $10^8 - 10^{11}$  მ ტალღის სიგრძეთა დიაპაზონშია, ხოლო  $\gamma$  - სხივების ტალღის სიგრძე  $10^{-11}$  მ-ზე ნაკლებია.

რენტგენისა და  $\gamma$  - სხივების კვანტის ენერგია გამოითვლება ფორმულით:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
, სადაც  $E$  კვანტის ენერგიაა,  $\lambda$  - ტალღის სიგრძე,  $c$  - სინათლის სიჩქარე,  $h$  - პლანკის მუდმივა.

კვანტის ენერგია იზრდება ელექტრონვოლტებით (ეე);  $1\text{ეე} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  კ.ვ.  $= 1,6 \cdot 10^{-19}$  ჯ.

რენტგენის სხივების ენერგია შეიძლება ასეული ელექტრონვოლტიდან რამდენიმე ათეულ კილოელექტრონვოლტამდე (კეე) დიაპაზონში იცვლებოდეს, ხოლო  $\gamma$  - კვანტების ენერგია კი რამდენიმე მილიონ ელექტრონვოლტს (მეე) აღწევს ( $1\text{კეე} = 10^3$  ეე,  $1\text{მეე} = 10^6$  ეე).

რენტგენის სხივები წარმოიქმნება რადიოაქტიური დაშლის დროს. ტექნიკაში ამ გამოსხივებას ღებულობენ ე.წ. რენტგენის მილაკებში.

მაღალი ენერგიის რენტგენულ გამოსხივებას ღებულობენ ბირთვული ნაწილაკების სპეციალურ მაჩქარებლებში - ბეტატრონებში.

$\gamma$  - კვანტებს გამოასხივებს ატომები ბირთვული რეაქციის განხორციელებისას.

კორპუსკულური გამოსხივება ელემენტარული ნაწილაკების ნაკადია, რომელიც წარმოიქმნება რადიოაქტიური იზოტოპების დაშლისა და ბირთვული რეაქციის დროს. ასეთია, მაგალითად:

1.  $\alpha$  - ნაწილაკების გამოსხივება; ეს ნაწილაკები ჰელიუმის ბირთვებია.
2.  $\beta$  - ნაწილაკების გამოსხივება; ეს ნაწილაკები ელექტრონების ან პოზიტრონების ნაკადია.
3. პროტონებისა და დეიტრონების გამოსხივება; ისინი მსუბუქი (p) და მძიმე (np) წყალბადის ბირთვებია.
4. ნეიტრონების - უმუხტო ნაწილაკების გამოსხივება.

ნაწილაკების შემთხვევაში ენერგია განისაზღვრება ფორმულით  $E_3 = \frac{mv^2}{2}$ , სადაც  $E_3$  კინეტიკური ენერგიაა, m - ნაწილაკის მასა, v - მისი სიჩქარე.

### **მაიონებელი გამოსხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების ფიზიკური მექანიზმები**

მაიონებელი გამოსხივების ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების დროს ატომების იონიზაცია ხდება. ატომები (მოლეკულები) გარდაიქმნება დადებით იონებად, ხოლო ამოგდებული ელექტრონები შეიძლება შეუერთდეს ნეიტრალურ ატომებს ან მოლეკულებს და წარმოქმნას უარყოფითი იონები.

იონიზაციის ეფექტის არსი შემდეგში მდგომარეობს: მაღალი ენერგიის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების კვანტისა (რენტგენისა და  $\gamma$  - სხივები) და ნაწილაკების ( $\alpha$  - და  $\beta$  - ნაწილაკები, პროტონები, დეიტრონები, ნეიტრონები და სხვა) ნივთიერებაში გავლისას ისინი ეჯახებიან ატომებს და მოლეკულებს და გადსცემენ მათ ენერგიას. ენერგიის შთანთქმის მექანიზმი განსხვავებულია, მაგრამ ეს პროცესები ერთსადაიმავე საბოლოო შედეგს იძლევა. ნივთიერებაში წარმოიქმნება იონები, აგზნებული ატომები და მოლეკულები.

რენტგენული გამოსხივების ფოტონების ან  $\gamma$  - კვანტების ატომებთან და მოლეკულებთან ურთიერთქმედების ხასიათი დამოკიდებულია თვითონ შთანთქმული გარემოს თვისებებსა და შედგენილობაზე. მაგალითად, ზოგ შემთხვევაში  $\gamma$  - კვანტი მთლიანად აძლევს თავის ენერგიას ატომიდან ან მოლეკულიდან ამოგდებულ ელექტრონს და თვითონ შეწყვეტს არსებობას (ფოტოეფექტი). სხვა შემთხვევაში იგი ამოგდებულ ელექტრონს აძლევს ენერგიის მხოლოდ ნაწილს. ამ დროს ელექტრონი ატომიდან ან მოლეკულიდან გამოიტყოტცნება ერთი მიმართულებით, ხოლო კვანტი, რომლის ენერგია შემცირებულია, სხვა მიმართულებით (კომპტონის ეფექტი). ასეთი ელექტრონი თავის კინეტიკურ ენერგიას ხარჯავს სხვა ატომების (მოლეკულების) იონიზაციასა და აგზნებაზე. კვანტი კი განაგრძობს ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებას, სანამ ფოტოეფექტის შედეგად გაქრება.

ნივთიერებაში დამუხტული ნაწილაკის გავლისას იგი ურთიერთქმედებს ატომის ან მოლეკულის გარეთა შრის ელექტრონთან, რის შედეგადაც ელექტრონისა და ატომს შორის კავშირი წყდება. ატომი (მოლეკულა) გადაიქცევა დადებით იონად. მაშასადამე, წარმოიქმნება იონთა წყვილი: დადებითი იონი და ატომიდან ამოგდებული ელექტრონი. ასეთი წყვილის წარმოქმნაზე მაიონებელი ნაწილაკი ხარჯავს ენერგიის მხოლოდ ნაწილს. ნაწილაკის მთელი ენერგიის შთანთქმისას წარმოიქმნება იონთა ბევრი წყვილი. ნაწილაკის დაჯახების შედეგად ატომიდან ამოგდებული ელექტრონი, თავის მხრივ, ახდენს სხვა ატომებისა და მოლეკულების იონიზაციას მანამ, სანამ ენერგიას დაკარგავს,

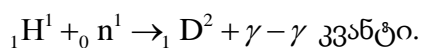
ასეთი ელექტრონი შემდეგ უერთდება ნეიტრალურ ატომს (მოლეკულას) და წარმოქმნის უარყოფით იონს.

ყოველი წყვილი იონის წარმოქმნას თან სდევს რამდენიმე ატომის ან მოლეკულის აგზნება. აგზნებისას ელექტრონი გადადის უფრო მაღალ (დაშორებულ) ენერგეტიკულ დონეზე. საწყის დონეზე დაბრუნებისას ელექტრონი ასხივებს ჭარბ ენერგიას ხილული, ულტრაიისფერი ან რენტგენული გამოსხივების ფოტონების სახით. ამოგდებული ელექტრონი

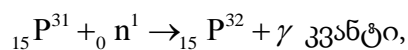
განსხვავებულ ეფექტთან გვაქვს საქმე ნივთიერებასთან უმუხტო ნაწილაკების, მაგალითად, ნეიტრონების ურთიერთქმედების დროს.

მაღალი ენერგიის (1 მევ) ნეიტრონი ნივთიერებაში გავლისას ეჯახება წყალბადის ბირთვს - პროტონს და გადასცემს მას თავისი კინეტიკური ენერგიის ნაწილს. ასეთ პროტონს უკუცემის პროტონს უწოდებენ. სწორედ ასეთი პროტონები იწვევს უშუალოდ ატომებისა და მოლეკულების იონიზაციას. ნეიტრონები რამდენიმე დაჯახების შედეგად კარგავს ენერგიას და გადადის ნელი, სითბური ნეიტრონების კატეგორიაში. სითბური ნეიტრონი ძირითადად მონაწილეობს რეაქციაში, რომელიც რადიაციული წატაცების სახით არის ცნობილი.

ნეიტრონების წატაცებას თან სდევს  $\gamma$  - კვანტის გამოსხივება. ასეთი რეაქციის მაგალითია მსუბუქი წყალბადის ბირთვის მიერ ნეიტრონის წატაცება, რის შედეგადაც წარმოიქმნება მძიმე წყალბადი:



ცოცხალ ორგანიზმში ნეიტრონების შთანთქმისას ასევე რადიოაქტიური ატომები წარმოიქმნება. სწორედ ასეთ პროცესს ქვემოთ მოყვანილი ორი რეაქცია:



სადაც:  ${}_{11}\text{Na}^{24}$  - ნატრიუმის, ხოლო  ${}_{15}\text{P}^{32}$  - ფოსფორის რადიოაქტიური იზოტოპია. ნელი ნეიტრონების შთანთქმის შემთხვევაში იონიზაციას ზემოთ მოყვანილი მაგალითების ანალოგიური რეაქციის დროს გამოსხივებული  $\gamma$  - კვანტები.

### **დოზიმეტრის საკითხები. გამოსხივების დოზა და მისი ერთეულები.**

#### **ფარდობითი ბიოლოგიური ეფექტურობა**

მაიონბეული რადიაციის რაიმე ობიექტზე, განსაკუთრებით კი ცოცხალ სისტემაზე მოქმედების ხარისხი დამოკიდებულია შთანთქმული ენერგიის სიდიდეზე. სხვადასხვა ტიპის გამოსხივების მოქმედებას ხშირად აფასებენ მის მიერ გამოწვეული იონიზაციური ეფექტით. Si სისტემაში რენტგენისა და  $\gamma$  - გამოსხივების დოზის ერთეულად მიღებულია 1 კულონი/კგ. ეს ასეთი დოზაა, რომელიც (თუ გამოსხივების მთელი ენერგია ხმარდება იონიზაციას) 1 კგ მშრალ ჰაერში წარმოქმნის 1 კულონის ტოლ ერთ ნიშნის იონთა ჯამურ მუხტს. CGSE სისტემაში ერთეულად მიღებულია 1 რენტგენი. მთლიანი იონიზაციური შთანთქმის დროს, თუ 1 სმ<sup>3</sup> ჰაერში წარმოქმნილი ერთი ნიშნის იონების ჯამური მუხტი 1 CGSE-ს ტოლია, შთანთქმული (გამოსხივებული) დოზა 1 რენტგენს უდრის. 1 რენტგენი 85 ერგი/გ სიდიდის ეკვივალენტურია. ამ სიდიდეს რენტგენის მექანიკურ, ანუ ფიზიკურ ეკვივალენტს უწოდებენ (რფე). ეს იმას

ნიშნავს, რომ თუ ნორმალურ პირობებში ( $t=0^{\circ}\text{C}$ ,  $P=760$  მმ ვწყ. სვ.) 1 გ მშრალი ჰაერი შთანთქავს მაიონებელი გამოსხივების 85 ერგ ენერგიას, მაშინ ასეთი დოზა რენტგენის ფიზიკური ეკვივალენტია.

ზოგადად, მაიონებელი გამოსხივების მიერ რაიმე მოცულობისათვის გადაცემული ენერგია განისაზღვრება ფორმულით:

$$E = \sum E_1 - \sum E_2 - \sum U,$$

სადაც  $\sum E_1$  ამ მოცულობაში შესული ყველა მაიონებელი ნაწილაკის ჯამური ენერგიაა (მათი უძრაობის ენერგიის გამოკლებით),  $\sum E_2$  - ამ მოცულობიდან გამოსული მაიონებელ ნაწილაკთა ჯამური ენერგიაა (უძრაობის ენერგიის გამოკლებით), ხოლო  $\sum U$  ბირთვებისა და ელემენტარული ნაწილაკების გარდაქმნის დროს გამოყოფილი ჯამური ენერგია (ამ გარდაქმნის დროს დახარჯული ენერგიის გამოკლებით)

ფარდობას  $W = \frac{E}{m}$ , სადაც  $m$  აღებულ მოცულობაში ნივთიერების მასაა,

გადაცემულ კუთრ ენერგიას უწოდებენ. გადაცემული კუთრი ენერგია მნიშვნელოვნად განსხვავდება შთანთქმული დოზისაგან. შთანთქმული დოზის ერთეულად მიღებულია 1 გრეი. 1 გრეი=1ჯ/კგ. შთანთქმული დოზის სიმძლავრის სპეციალური ერთეულია - 1გრეი/წმ.

სხვადასხვა მაიონებელი გამოსხივების ერთი და იგივე დოზა (ენერგიის რაოდენობა) იძლევა განსხვავებულ ბიოლოგიურ ეფექტს. ასევე არ არსებობს ერთნიშნა დამოკიდებულება საბოლოო ბიოლოგიური ეფექტის სიდიდესა და მაიონებელი ნაწილაკების ენერგიას შორის. მაგალითად, 2,5 მევ ენერგიის  $\alpha$  ნაწილაკი უფრო ეფექტურია, ვიდრე 27 მევ ენერგიის  $\beta$  ნაწილაკი. მეორე მხრივ, ერთი და იგივე ენერგიის მქონე  $\beta$  და  $\alpha$  ნაწილაკების დამაზიანებელი მოქმედება არსებითად განსხვავებულია.

მაიონებელი გამოსხივების მოქმედების ბიოლოგიური ეფექტურობის შეფასებისათვის შემოღებულია სიდიდე - ნაწილაკის ენერგიის დიფერენციალური დანაკარგი ერთეულ მანძილზე -  $\frac{dE}{dx}$ . მას „ენერგიის წირით გადაცემას“ (ეწვ)

უწოდებენ. მათემატიკურ გამოსახულებაში იგი  $L$  -ით არის აღნიშნული.

ნაწილაკის მიერ ნივთიერებისათვის გადაცემული ენერგია (კევ)

$$L = \text{-----}$$

ნაწილაკის მიერ გავლილი გზა (მკმ)

გამოყენებულია აგრეთვე სიდიდე  $\frac{L}{\rho}$ , სადაც  $\rho$  ნივთიერების სიმკვრივეა. ეს

სიდიდე სიმკვრივეზე არ არის დამოკიდებული.  $L$  სიდიდე გვიჩვენებს ენერგიის განაწილებას ნაწილაკის ტრეკის (ტრაექტორიის) გასწვრივ. თუ ვიცით  $L$  -ის მნიშვნელობა, ადვილად გამოვითვლით ნაწილაკის მიერ გავლილი გზის ერთეულზე წარმოქმნილ იონთა საშუალო რიცხვს. ამისათვის  $L$  უნდა გავყოთ იონთა ერთი წყვილის წარმოსაქმნელად საჭირო ენერგიის მნიშვნელობაზე.



თუ პროცესს ამ სიდიდით დავახასიათებთ, ნაწილაკის ან კვანტის ფიზიკური ბუნება არ მოახდენს გავლენას ბიოლოგიური მოქმედების სპეციფიკაზე. მაგალითად, ტოლი  $L$ -ის მქონე რენტგენის გამოსხივება და  $\alpha$  ნაწილაკები ერთნაირი ეფექტურობით თრგუნავს უჯრედთა გამრავლებას.

ვინაიდან ერთი და იმავე დოზის სხვადასხვა ტიპის გამოსხივებას განსხვავებული ბიოლოგიური მოქმედება ახასიათებს, შემოიღეს სიდიდე - ფარდობითი ბიოლოგიური ეფექტურობა (ფბე). იგი გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ მეტია რომელიმე სახის გამოსხივების ბიოლოგიური ეფექტურობა რენტგენის სხივების ასეთივე ფიზიკური დოზის ეფექტურობასთან შედარებით.

საკვლევი გამოსხივების ბიოლოგიური ეფექტურობა

$$\text{ფბე} = \frac{\text{200 კეV ენერგიის რენტგენის სხივების ბიოლოგიური ეფექტურობა}}{\text{ცდებით დადგენილია, რომ } L \text{-ის ზრდასთან ერთად მატულობს მაიონენელი ნაწილაკების ფარდობითი ბიოლოგიური ეფექტურობაც.}}$$

200 კეV ენერგიის რენტგენის სხივების ბიოლოგიური ეფექტურობა  
ცდებით დადგენილია, რომ  $L$ -ის ზრდასთან ერთად მატულობს მაიონენელი ნაწილაკების ფარდობითი ბიოლოგიური ეფექტურობაც.

### მაიონებელი გამოსხივების ბიოფიზიკური მოქმედების მექანიზმი

მაიონებელი გამოსხივების მოქმედებით ორგანიზმში ვითარდება ფიზიკურ-ქიმიური პროცესები, რომელსაც თან სდევს აგზნებული ატომებისა და მოლეკულების, იონების, აქტიური რადიკალებისა და ზეჟანგის წარმოქმნა. ასეთი ნაერთები შეიძლება წარმოიქმნას როგორც წყლიან, ასევე უწყლო ფაზაში. მათი მონაწილეობა ორგანიზმში მიმდინარე რთულ ბიოქიმიურ რეაქციებში იწვევს ნორმალური ფუნქციური პროცესების დარღვევას. თუ ასეთი დარღვევა შეუქცევადია, სხივური დაავადება ვითარდება.

თუ ორგანიზმი დასხივებისას არ ღებულობს სხივური ენერგიის დიდ დოზას (რომელიც მაშინვე სიკვდილს იწვევს), პროცესი მიმდინარეობს სამ სტადიად.

I სტადიის დროს ზემოთ აღნიშნული აქტიური ნაერთები წარმოიქმნება და ბიოლოგიურ პროცესებში მათი ჩართვის შედეგად ფიზიოლოგიური ფუნქციები ირღვევა.

II სტადიაში ყველა ის გადახრა ნორმალური მაჩვენებლიდან, რომლებიც I სტადიაში ვლინდება, უბრუნდება საწყის მნიშვნელობას.

II სტადიის ხანგრძლივობა საკმაოდ დიდია, იგი სხვადასხვა ორგანიზმში სხვადასხვაა. მაგალითად, ცხოველებისა და ადამიანის ორგანიზმში II სტადია გრძელდება 5-21 დღემდე.

III სტადია სხივური დაავადებაა. ამ დროს ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური ცვლილებები სწრაფად პროგრესირებს და პათოლოგია ჩამოყალიბებულ სახეს ღებულობს.

მაიონებელი გამოსხივების ზემოქმედების ბიოლოგიური ეფექტურობა დამოკიდებულია შთანთქმული ენერგიის დოზაზე. დოზის სიდიდე, რომლის დროსაც ორგანიზმი იღუპება, სხვადასხვა სახეობისათვის განსხვავებულია.

გამოსხივებისადმი ყველაზე მგრძობიარენი არიან ძუძუმწოვრები და ადამიანი, ყველაზე ნაკლებად მგრძობიარეა დაბალი განვითარების ცხოველები - ტრიტონი, გველი, მორიელი დასხვა.

ასევე განსხვავებული მგრძობიარობა ახასიათებს ორგანიზმის სხვადასხვა ქსოვილს. სხივური ზემოქმედებისადმი მაღალ მგრძობიარობას იჩენს ძვლის ტვინი, ლიმფური კვანძები, ნაწლავის ეპითელიუმი და სხვა.

როგორც ცნობილია, ავთვისებიანი სიმსივნის უჯრედები ინტენსიურად იყოფა, ისინი ნაკლებად დიფერენცირებულია, ამიტომ გაცილებით მეტ მგრძობიარობას იჩენს გამოსხივებისადმი, ვიდრე ნორმალური ქსოვილები. ამ ფაქტზეა დამოკიდებული ავთვისებიანი სიმსივნის რენტგენოთერაპია და რადიოთერაპია.

გამოკვლევებით დადგინდა, რომ თუ დასხივებულ ორგანიზმს მოვათავსებთ მაღალი ტემპერატურის პირობებში, სხივური დაავადება უფრო ეფექტურად მიმდინარეობს. დასხივებისადმი ქსოვილთა მგრძობიარობა დამოკიდებულია ასევე ჟანგბადის პარაციალურ წნევაზე. იგი კლებულობს ჟანგბადის პარაციალური წნევის შემცირებასთან ერთად.

ცოცხალ სისტემაზე მაიონებელი გამოსხივების მოქმედების მექანიზმის შესახებ რამდენიმე თეორიაა დამუშავებული. ერთ-ერთი პირველია გროვეტერის ე.წ. სამიზნის თეორია. ამ თეორიის თანახმად, ცოცხალ უჯრედში თითქოს და არის განსაკუთრებით მგრძობიარე უბანი - სამიზნე. სამიზნის მიერ კვანძის ან ნაწილაკის ენერჯის შთანთქმა იწვევს შეუქცევად ცვლილებებს, რაც განაპირობებს უჯრედის დაღუპვას. ამ თეორიის მომხრე მკვლევარების აზრით, ასეთი სამიზნის როლი შეიძლება შეასრულოს უჯრედის ბირთვმა, ბირთვაკვამა, გენმა და სხვა; ცდებით დადასტურდა, რომ ამ თეორიას ბევრი ნაკლი გააჩნია. მაგალითად, იგი ვერ ხსნის სხივური დაავადების ბევრ პროცესს: მეორე სტადიის მოჩვენებითი გაუმჯობესების ფაზის მექანიზმს, ტემპერატურის, ჟანგბადის, ქიმიური დამცველებისა და სხვა მოქმედების მექანიზმს და ა.შ.

ვეისმა და დელიმ შეიმუშავეს არაპირდაპირი მოქმედების თეორია, როლის თანახმად, მაიონებელი გამოსხივების ცოცხალ სისტემებზე მოქმედებაში მთავარი როლი ეკუთვნის წყლიან ფაზაში იონების, რადიკალებისა და ზეჟანგების წარმოქმნას წყლის რადიოლიზმის შედეგად. ეს პროდუქტები რეაქციაში შედის ორგანულ მოლეკულებთან და იწვევს მათი ფიზიკურ-ქიმიური და სტრუქტურული თვისებების შეცვლას. ამის შედეგად სხივური დაავადება ვითარდება.

აღნიშნული თეორია კარგად ხსნის ტემპერატურის, ჟანგბადისა და ქიმიური დამცველების ზეგავლენას სხივურ დაავადებაზე, ინკუბაციის პერიოდის არსებობას II სტადიაში. მაგრამ ცდებით დამტკიცდა, რომ ობიექტის რადიომგრძობიარობა არ არის პროპორციულ დამოკიდებულებაში მასში წყლის შემცველობასთან. ამავე დროს თეორია ცალმხრივია, ვინაიდან მოქმედების ბიოლოგიურ მექანიზმს იგი ხსნის მხოლოდ წყლიან ფაზაში მიმდინარე პროცესებით.

პირდაპირი მოქმედების თეორიის ავტორია ბარონი. ამ თეორიის თანახმად, მაიონებელი გამოსხივება უშუალოდ მოქმედებს ცოცხალი სისტემის ორგანულ მოლეკულაზე, იწვევს მათში ცვლილებებს, რაც საფუძვლად უნდა ედოს სხივური დაავადების განვითარებას. ბარონის აზრით, ამ პროცესში ყველაზე მთავარ როლს ასრულებს ფერმენტების დაზიანება, რაც ძირითადად მათი SH ჯგუფების დაჟანგვით უნდა იყოს გამოწვეული.

სხვა მეცნიერთა თვალსაზრისის მიხედვით გამოსხივების მოქმედებით ციტოპლაზმური მემბრანისა და უჯრედის განვლადობა იცვლება. ამის შედეგად დიდი რაოდენობით ფერმენტები გამოთავისუფლდება, რაც იწვევს ბიოქიმიური პროცესების

დეზინტეგრაციას და უჯრედების აუტოლიზს. თეორია ვერ სხნის განვლადობის ცვლილების მექანიზმს.

დღეისათვის ყველაზე უფრო სრულყოფილია ე.წ. ჯაჭვური პროცესების თეორია, რომლის ავტორია ტარუსოვი.

ამ თეორიის თანახმად, სხივური ზემოქმედების შედეგად იონები, რადიკალები, ზეჟანგები და სხვა აქტიური ნაერთები წარმოიქმნება როგორც წყლიან ფაზაში, ასევე ორგანულ სუბსტრატში. მასთან, პროცესის განვითარებისათვის არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს იმის, თუ სად წარმოიქმნება აქტიური ნაერთი - წყლიან ფაზაში, თუ ორგანულ სუბსტრატში. იონებს, რადიკალებს და ზეჟანგებს შეუძლიათ სხვადასხვა ქიმიური რეაქციის და მათ შორის, რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია, ჯაჭვური ჟანგვითი რეაქციის გამოწვევა. ჯაჭვური რეაქციების თანდათან განვითარება განაპირობებს ნორმალური ბიოფიზიკური პროცესების დარღვევას და სხივური დაავადების განვითარებას.

#### გამოყენებული ლიტერატურა

1. მ. კობაიძე, ა. ზაქარაია და სხვ. სამედიცინო ფიზიკა; თბილისი, 2009
2. ა. ასათიანი, ა. ზაქარაია. ბიოლოგიური ფიზიკა; თბილისი; 1991
3. ბ. გოგალაძე, ო. ზურაბიშვილი. სამედიცინო ფიზიკა; თბილისი; 1994
4. А. К. Ремизов, медицинская и биологическая физика , М , 2003.
5. Paul Davidovits. Physics in Biology and Medicine. Academic Press. London; 2008

