

MINISTERUL SĂNĂTĂȚII AL REPUBLICII MOLDOVA
UNIVERSITATEA DE STAT DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE
„NICOLAE TESTEMIȚANU”
Catedra fiziologia omului și biofizică

Dumitru CROITORU Victor VOVC Ion COJOCARU

BIOFIZICĂ MEDICALĂ

PRELEGERI • EXERCITII

Chișinău • 2013

*Aprobat pentru editare de către Consiliul Metodic Central
al USMF „Nicolae Testemițanu”, proces-verbal nr. 5 din 16 mai 2013*

Autori: Dumitru CROITORU, dr. în șt. pedagogice, prof. univ., Om Emerit
Victor VOVC, dr. hab. med., prof. univ., Om Emerit, șef Catedră
fiziologia omului și biofizică
Ion COJOCARU, lector superior

Recenzenți: Aurel SAULEA, dr. hab. med., prof. univ., Om Emerit
Alexandru CORLĂTEANU, dr. în șt. biologice, conf. univ.,
Catedra biologie umană și animală a USM

Redactor: Sofia FLEȘTOR

Coperta, design, machetare computerizată: Valeriu OPREA

Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții

Croitoru Dumitru.

Biofizică medicală : Prelegeri, exerciții / Dumitru Croitoru, Victor Vovc, Ion Cojocaru;
Univ. de Stat de Medicină și Farmacie “Nicolae Testemițanu”, Catedra fiziologia
omului și biofizică. – Chișinău : S. n., 2013. (Tipogr. “Bons Offices”). – 236 p.

ISBN 978-9975-80-746-3.

61:577.3(075.8)

C 90

PREFAȚĂ

Biofizica este știința care s-a dezvoltat prin întrepătrunderea a două științe, așa-zise „clasice” – fizica și biologia –, de la care îi provine denumirea.

Nici până în prezent nu s-a ajuns la un consens în ceea ce privește definirea completă a biofizicii. Din definițiile propuse am selectat doar câteva, care, în viziunea noastră, ar fi cele mai sugestive.

Profesorul W. Beier de la Universitatea de Medicină din Leipzig definește biofizica drept „știință care se ocupă de analiza fizică a structurilor funcționale și a comportării biologice”. Profesorul V. Vasilescu de la Universitatea de Medicină și Farmacie din București: „Biofizica este știința care studiază fenomenele fizice din sistemele biologice în lumina și cu ajutorul teoriilor și tehnicilor fizico-matematice”. Profesorul N. Tarusov de la Universitatea „M.V. Lomonosov” din Moscova: „Biofizica constă în studierea fenomenelor și structurilor moleculare fizico-chimice care stau la baza mecanismelor primare ale proceselor biologice”.

Analiza definițiilor propuse ne permite să conchidem: **„Biofizica este știința care se ocupă de analiza fizică a mecanismelor primare ce se referă la compoziția, structura, existența și dezvoltarea materiei vii”**. Însă biofizica nu reduce problemele de biologie și medicină la simple probleme fizico-chimice. Viața, deosebindu-se calitativ de fenomenele fizico-chimice, urmează legi specifice, care nu au niciun sens în domeniile inferioare de complexitate. În atenția biofizicii medicale, evident, se află interacțiunea factorilor fizici cu materia vie, precum și principiile constructive și de funcționare ale aparatelor utilizate în cercetările științifice și practica medicală.

Din varietatea largă de tematici acoperite de biofizică, pentru cursul de biofizică medicală se impune selectarea problemelor care se află în strânsă conexiune cu direcțiile majore de dezvoltare a medicinei.

Acest curs este destinat studenților din primul an de studii (facultățile: Medicină, Sănătate Publică, Stomatologie și Farmacie), fiind însă util și tuturor celor care doresc să-și facă o imagine mai clară asupra esenței proceselor vitale.

Temele incluse în curs au fost selectate în urma analizei programelor tradiționale ale cursurilor similare din diferite centre universitare, atât din Est cât și din Vest. Ne-am dorit ca structura și conținutul să fie, în măsura posibilității, cât mai aproape de cele ce se realizează în instituțiile medicale din Franța. Evident,

s-a ținut seama și de corelarea cu programele unor discipline pe care studenții în medicină le parcurg în anii de studii. Conținutul cursului a fost influențat și de faptul că, tradițional, unele metode de cercetare, cum ar fi analiza spectrală, polarimetria și altele, se studiază integral în cadrul lucrărilor de laborator. Pe de altă parte, având la dispoziție un termen scurt pentru predarea acestui obiect, am simplificat, pe cât e posibil, aparatul matematic utilizat.

Fiecare temă din curs este urmată de exerciții bine integrate cu conținutul ei și cu direcția vectorului de pregătire profesională.

Trebuie să recunoaștem că alegerea tematicii cursurilor de biofizică medicală, propusă de diferiți autori, precum și a prezentului curs, are și un caracter subiectiv, deoarece reflectă, într-o anumită măsură, înclinațiile și preocupările celor care au făcut această alegere.

Punând la dispoziția studenților acest manual, nutrim speranța că el va servi nu doar drept sursă de cunoștințe, ci va fi și un catalizator în altoirea interesului pentru științele fundamentale și al dorinței de muncă pentru o aplicare competentă a realizărilor fizicii și tehnicii moderne în practica și cercetările medicale.

Considerăm că un efect emoțional-pozitiv va produce și componenta ilustrativă, selectată minuțios din rețeaua Internet, cu anumite modificări pentru corelarea cu conținutul temei, servindu-le studenților drept stimulent pentru a se familiariza mai profund cu esența fenomenelor fizice implicate în mod armonios și econom în procesele vitale.

Mulțumim anticipat tuturor cititorilor și le așteptăm sugestiile și obiecțiile critice, în intenția de a rectifica și completa conținutul manualului, într-o ediție viitoare.

Autorii

1. STRUCTURA MATERIEI. ATOMUL LUI BOHR

1.1. NOȚIUNI GENERALE

Oricare ar fi starea de agregare – solidă, lichidă sau gazoasă –, materia reprezintă substanța ce rezultă din asocierea moleculelor identice, pentru corpuri pure sau diferite, pentru corpuri compuse. Moleculele se obțin prin unirea câtorva atomi, identici sau diferiți. Atomul este particula elementară a oricărui element chimic.

Toate elementele chimice, identificate până în prezent, sunt repartizate, în funcție de structura electronică a atomilor și de proprietățile lor chimice, în tabelul lui **Mendeleev**.

Atomul fiecărui element este perfect definit. Acesta este format dintr-un nucleu cu sarcină electrică pozitivă, în jurul căruia gravitează electronii cu sarcină electrică negativă.

Nucleul este compus din **nucleoni: protoni și neutroni**.

Orice atom **X** este caracterizat de două numere:

- **A**: reprezintă numărul total de nucleoni din nucleu; el se numește **număr de masă**, deoarece, practic, reflectă întreaga masă a atomului;

- **Z**: corespunde numărului de protoni din nucleu; el se numește **număr atomic**, deoarece este și numărul de ordine în clasificarea periodică.

Diferența $N = A - Z$ corespunde numărului de neutroni din nucleu.

Prin convenție, a fost adoptată următoarea inscripție:

${}^A_Z\text{X}$, unde **X** reprezintă simbolul atomului.

De exemplu: ${}^4_2\text{He}$; ${}^{12}_8\text{C}$; ${}^{235}_{92}\text{U}$ etc.

Deoarece din punct de vedere electric atomul este neutru, numărul electronilor ce se rotesc în jurul nucleului coincide cu numărul protonilor din nucleu.

În fizica atomică se folosesc unități de măsură specifice.

• **Unitatea de masă atomică (u.m.a.)**.

Ea reprezintă 1/12 din masa atomului de carbon 12. Cunoscând că masa unui mol de carbon ${}^{12}\text{C}$ este egală cu 12 g, u.m.a. poate fi exprimată în grame:

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12}{N_A} = \frac{1}{N_A} = \frac{1}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g},$$

unde: N_A – numărul lui **Avogadro**.

•Unitatea de energie electron-volt (eV)

Această unitate corespunde energiei cinetice a unui electron, accelerat de diferența de potențial egală cu 1 volt:

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1\text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}.$$

Echivalența dintre masă și energie, exprimată de relația lui **Einstein**: $E = mc^2$, permite conversia unităților de masă în unități de energie și invers. De exemplu:

1 u.m.a. corespunde energiei de 931,5 MeV.

Particule elementare în structura atomilor

Protonul

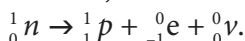
Conform notării generale A_ZX , protonul se prezintă 1_1p ; fiind nucleul atomului de hidrogen, el poate fi reprezentat și prin simbolul ${}^1_1H^+$. După valoare, sarcina lui pozitivă este cea a electronului: $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Masa lui are valoarea: $m_p = 1,007596 \text{ u.m.a}$. Este stabil și în afara nucleului.

Neutronul

Are simbolul 1_0n ; este lipsit de sarcină electrică, și are masa puțin mai mare decât cea a protonului: $m_n = 1,008986 \text{ u.m.a}$.

În afara nucleului, neutronul este radioactiv și se dezintegrează în proton, electron și antineutrino, conform ecuației:



Electronul

Are masa (m) egală cu $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ și sarcina (e) – cu $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Distribuția protonilor și neutronilor în nuclee permite definirea grupărilor particulare de elemente numite.

Izotopii

Sunt elemente ai căror atomi au același număr de ordine (Z) și aceleași proprietăți chimice, posedând un număr diferit de masă (A), datorită numărului diferit de neutroni în nucleu.

Ei au proprietăți fizice diferite; în particular, unii dintre ei pot fi radioactivi, numindu-se **radioizotopi**.

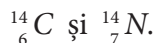
De exemplu, hidrogenul are 3 izotopi:



Izobarii

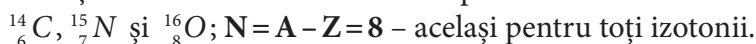
Sunt elemente ce reprezintă o curiozitate matematică. Atomii lor au același număr de masă, iar numărul atomic – diferit, cu proprietăți atât fizice, cât și chimice diferite.

De exemplu:



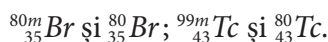
Izotonii

Sunt elemente ai căror atomi în nucleu au același număr de neutroni, iar proprietăți chimice și fizice – net diferite. De exemplu:



Izomerii

Sunt două elemente absolut identice. Doar o diferență de energie permite de a le distinge. Unul se află la un nivel energetic metastabil (**n**) superior celuilalt. De exemplu:



Sub aspectele menționate anterior, o caracteristică amplă a tuturor elementelor chimice este redată în tabelul periodic nuclear (*fig. 1.1*).

Prezintă interes faptul că din mulțimea elementelor chimice rolul esențial în realizarea structurilor vii îl au numai **carbonul, hidrogenul, oxigenul și azotul**, care, prin abundența lor, în biologie și medicină, se numesc **macroelemente**. O altă categorie de elemente o constituie **sulfur, fierul, calciul, magneziul, sodiul, potasiul, fosforul** și altele, care în materia vie se găsesc în cantități mici, dar îndeplinesc roluri extrem de importante. Datorită concentrației mult mai reduse, ele au fost denumite **microelemente**.

1.2. ATOMUL LUI BOHR

Modelul atomului lui Bohr este primul model de natură cuantică, introdus în anul 1913 de către fizicianul danez **Niels Bohr**. Acest model preia modelul planetar al lui **Ernest Rutherford** și îi aplică teoria cuantelor. Pentru a-și proteja modelul de contradicțiile cu teoriile fizicii clasice, autorul i-a pus la bază două postulate.

Primul postulat este legat de orbitele atomice și presupune că electronul se rotește în jurul nucleului numai pe orbite circulare bine determinate, fără să emită sau să absoarbă energie radiantă. Aceste stări se numesc **staționare**, au un timp de viață infinit și energie constantă. Electronul trece pe alte nivele energetice doar dacă este perturbat din exterior. Acest postulat explică stabilitatea atomului, însă este în contradicție cu fizica clasică, conform căreia, o sarcină electrică în mișcare accelerată, cum este mișcarea electronului, emite radiații electromagnetice. Aceasta ar

Tabelul Periodic Nuclear

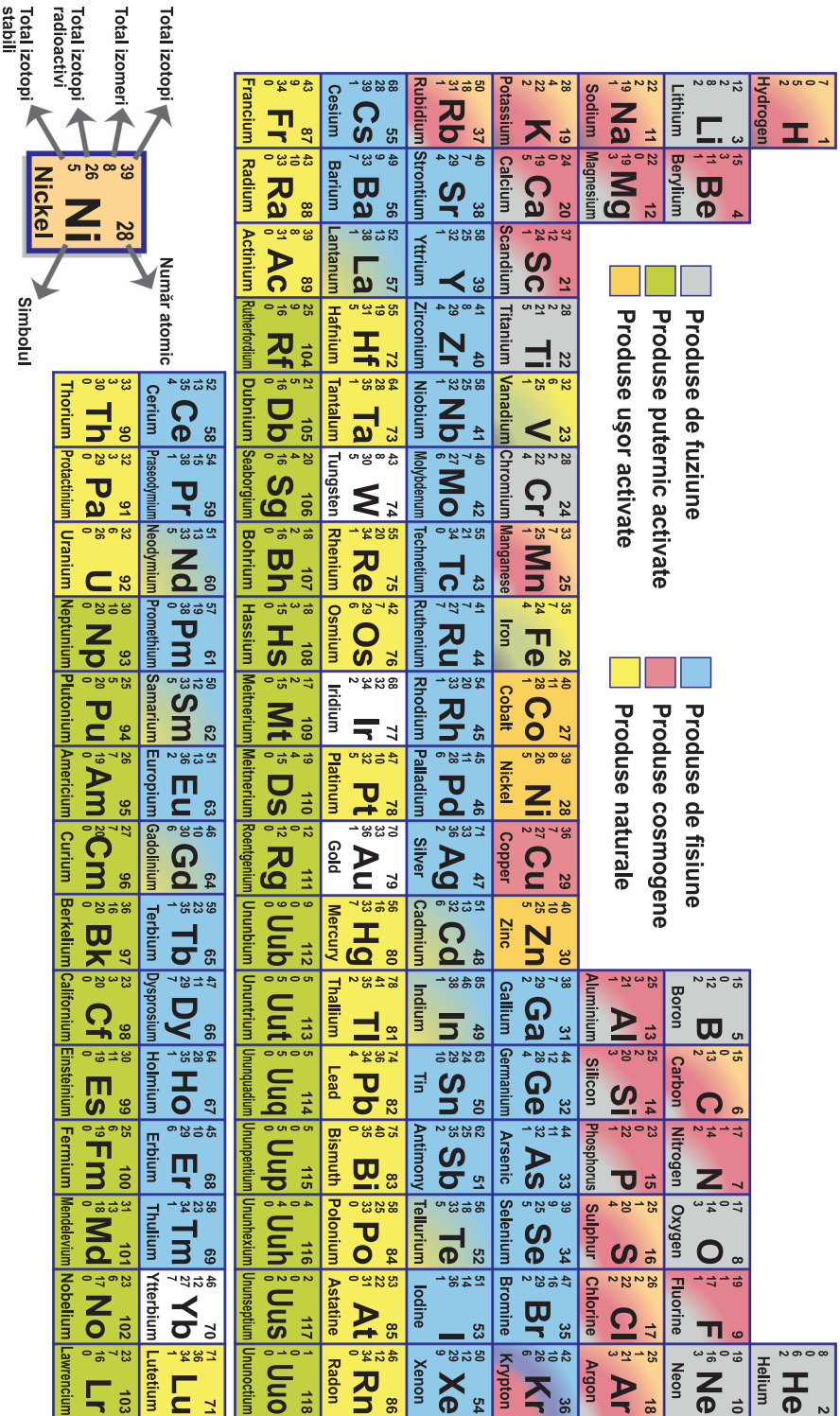


Fig. 1.1.

duce la scăderea energiei sistemului, iar traiectoria circulară a electronului ar avea raza din ce în ce mai mică, până când acesta ar „cădea” pe nucleu. Însă experimental se constată că atomul este stabil și are anumite stări în care energia sa se menține constantă.

Al doilea postulat afirmă faptul că un atom emite sau absoarbe radiație electromagnetică doar la trecerea dintr-o stare staționară în alta. Energia pe care o primește sau o cedează este egală cu diferența dintre energiile celor două nivele între care are loc tranziția.

Modelul atomic al lui Bohr este aplicabil atomilor de hidrogen, precum și ionilor hidrogenoizi He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} etc. (adică, ionilor care au un singur electron).

Alegerea orbitelor circulare admise pentru mișcarea electronului are la bază ipoteza lui **Louis Victor de Broglie**, conform căreia, orice particulă în mișcare posedă și proprietăți ondulatorii. Lungimea de undă λ , asociată unei particule cu masa m și viteza de mișcare v , se determină din relația:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1),$$

unde: $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ este constanta lui **Planck**.

Orbita este admisă dacă conține un număr întreg de lungimi de undă λ . Pentru o orbită circulară în cazul atomului lui Bohr obținem:

$$2\pi r = n\lambda \quad (2),$$

unde: n – număr întreg pozitiv; λ – lungimea de undă asociată; r – raza orbitei.

Substituind expresia pentru λ din (1) în (2), obținem:

$$2\pi r = n \frac{h}{mv} \Rightarrow mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (3).$$

Expresia $L = mvr$ este **momentul cinetic orbital al electronului**. Evident că (3) este relația de cuantificare a momentului cinetic.

Razele orbitelor admise sunt de asemenea cuantificate conform relației:

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m} \quad (4),$$

unde: e – sarcina electronului; ϵ_0 – permitivitatea electrică a vidului.

Cuantificate sunt și energiile pe diferite nivele.

$$W_n = -\frac{me^4}{8\epsilon^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (5).$$

Fiecare stare staționară corespunde cu o anumită stare energetică a atomului.

Atomul trece dintr-o stare staționară în alta, cu energie superioară, doar dacă i se transmite o cuantă de energie corespunzătoare cu diferența dintre cele două nivele. La revenirea pe nivelul inferior se emite o radiație de aceeași frecvență ca și la o absorbție. Acest fapt exprimă natura discontinuă a materiei și energiei la nivel microscopic.

Când atomii absorb energie, electronii efectuează tranziții de la nucleu, iar când emit energie sub formă de fotoni $h\nu$, tranzițiile electronilor au loc spre nucleu (fig. 1.2). Energia fotonilor emiși se determină din relația:

$$h\nu = W_{ni} - W_{nf} \quad (6),$$

unde:

ni – nivelul inițial; nf – nivelul final.

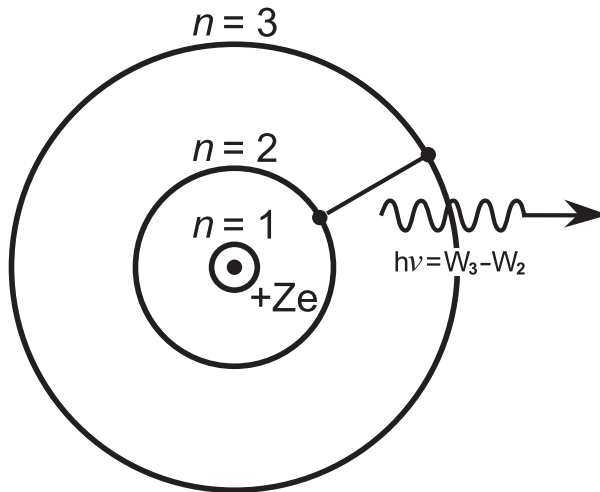


Fig. 1.2.

În spectrul hidrogenului au fost depistate mai multe serii de linii (fig. 1.3), care au servit drept confirmare a modelului Bohr.

Seria Lyman se formează în urma tranzițiilor dintre oricare nivel extern și primul ($n=1$).

Seria Balmer apare în urma tranzițiilor dintre oricare alt nivel extern și cel de al doilea ($n=2$), iar **seria Paschen** – în urma tranzițiilor dintre oricare alt nivel extern și nivelul trei ($n=3$).

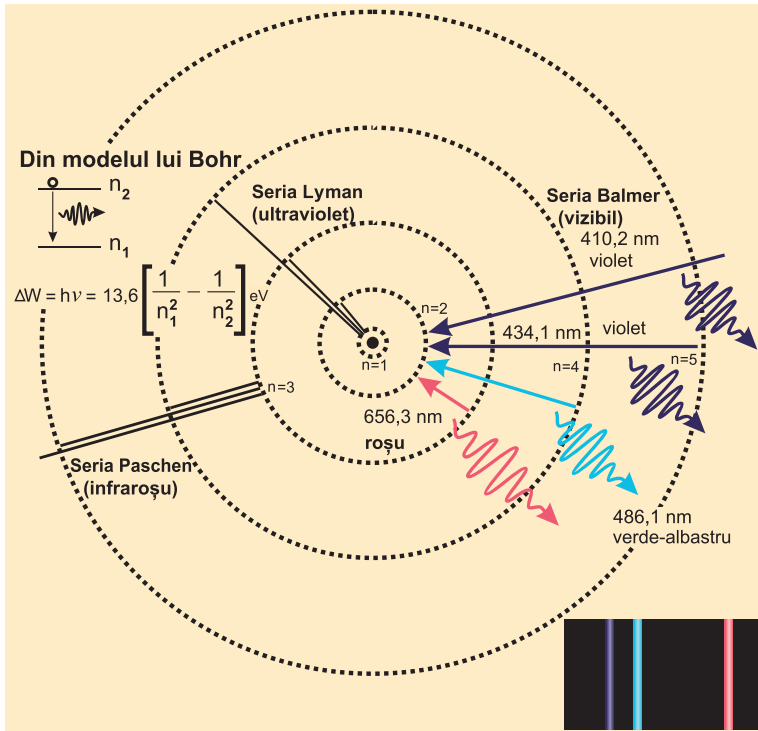


Fig. 1.3.

1.3. NUMERE CUANTICE

Modelul lui Bohr este un model simplu de atom cuantificat, considerat sistem format dintr-un nucleu și un electron, care se mișcă în jurul nucleului pe o **traiectorie circulară**. Acest model explică elocvent efectele de emisie și absorbție ale atomului de hidrogen.

În cazul atomilor cu mai mulți electroni, modelul lui Bohr nu mai poate explica spectrele mai complexe de emisie și absorbție ale acestora. În atomul cu mai mulți electroni, aceștia interacționează nu numai cu nucleul, ci și între ei. Din această cauză, expresia pentru energia nivelelor, dedusă pentru atomul de hidrogen și ionii hidrogenoizi, nu mai este corectă. Pentru atomii cu mai mulți electroni, cuantificarea energiei nivelelor se realizează conform relației (7), electronul periferic este atras de Z sarcini pozitive:

$$W_n = -\frac{mZ^2 e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (7).$$

Deoarece în expresia $\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$ toate mărimile sunt constante, o vom nota printr-o singură constantă (b_0) și energia nivelului n se va scrie: $W_n = -b_0 \cdot \frac{Z^2}{n^2}$; calculat $b_0 = 2,17 \cdot 10^{-18} J$.

Numărul cuantic principal (n)

S-a constatat că spectrele atomilor cu mai mulți electroni se pot explica dacă în expresia energiei, dată de modelul lui Bohr, se introduc o serie de corectări, care țin seama de interacțiunile dintre electroni. Deoarece aceste corectări nu modifică esențial energia nivelului Bohr, numărul cuantic n , care cuantifică valoarea energiei după o expresie analoagă relației (7), se numește **număr cuantic principal**. El ia valori întregi și pozitive: $n = 1, 2, 3, \dots$

Numărul cuantic secundar (l)

Pentru a explica **structura fină** a liniilor spectrale, **Arnold Sommerfeld** a considerat că orbitele **circulare** sunt doar o parte din totalitatea orbitelor electronice, care trebuie să conțină și orbite **eliptice**. Extinzând cuantificarea la acest mod de mișcare, s-a stabilit că fiecărei orbite circulare corespunzătoare numărului cuantic principal n îi revine o serie de orbite eliptice. Deci, a apărut necesitatea unui al doilea număr cuantic (l), numit **secundar** (sau **orbital**), care caracterizează momentul cinetic al electronului corespunzător diferitelor orbite eliptice de același nivel.

Pentru același n , l poate primi valorile $0, 1, 2, 3, \dots, n-1$; adică, unui nivel n de energie îi corespund n orbite eliptice.

Numărul cuantic magnetic

Pentru a explica fenomenele **giromagnetice** (raportul dintre momentul magnetic și cel cinetic) ale atomilor, a fost necesar să se țină seama și de faptul că orbitele electronice nu se află în același plan, ci au o repartizare spațială, ceea ce a dus la introducerea unui al treilea **număr cuantic** (m), numit **magnetic**.

Pentru o anumită valoare a lui l , numărul cuantic magnetic poate primi $2l+1$ valori, după cum urmează:

$$-l, \dots, (-1), 0, 1, \dots, l.$$

Numărul cuantic de spin (s)

Diferite particularități ale spectrelor **metalelor alcaline** au condus (1925) la ipoteza că electronul are și o rotație în jurul unei axe proprii, mișcare numită **spin**.

Numărul cuantic de spin (s), pentru electron ia valorile $\pm \frac{1}{2}$, în funcție de direcția de rotire în jurul axei proprii.

1.4. CONCLUZIE

Stările staționare ale electronului în atom sunt caracterizate prin **4 numere cuantice**. Orice combinație a acestor numere indică o anumită stare a electronului. Mulțimea stărilor posibile se ordonează prin gruparea lor în **nivele** și **subnivele**. Toți electronii care se află în stări cu același număr cuantic principal sunt considerați ca făcând parte dintr-un nivel electronic.

Pentru aceeași valoare a lui **n**, stările caracterizate prin diferite valori ale numărului cuantic secundar **l** formează subnivele electronice.

Pentru a da o denumire prescurtată a nivelelor, se utilizează următoarele simboluri: nivele principale se numesc: **K (n = 1); L (n = 2); M (n = 3)** etc.; subnivelele caracterizate prin numărul cuantic secundar **l** se numesc: **s (l = 0); p (l = 1); d (l = 2); f (l = 3)** etc.

Principiul excluziunii al lui Paul (1924) prevede că **într-un atom nu pot exista doi electroni care să aibă toate cele 4 numere cuantice identice**. Conform acestui principiu, numărul maxim de electroni pe fiecare nivel este limitat. De exemplu:

pe nivelul K(n = 1), l = 0, m = 0, s = ±1/2 ; în total 2 electroni;

pe nivelul L(n = 2), l = 0, m = 0, s = ±1/2;

l = 1, m = -1, 0, 1, s = ±1/2; în total 8 electroni;

pe nivelul M(n = 3), l = 0, m = 0, s = ±1/2;

l = 1, m = -1, 0, 1, s = ±1/2;

l = 2, m = -2, -1, 0, 1, 2, s = ±1/2; în total 18 electroni etc.

Din cele relatate mai sus, se reiese regula generală: pe nivelul **n** se pot afla maximum **2 · n²**.

EXERCITII

1. Determinați numărul de ordine (**Z**) al unui element în sistemul periodic, cunoscând că sarcina nucleului atomic este egală cu $8 \cdot 10^{-18} \text{ C}$.

Răspuns: Z = 5.

2. Calculați în Å lungimea de undă asociată unui electron, care are viteza de $3 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$).

Răspuns: $\lambda = 0,24 \text{ Å}$ (raze X).

3. Calculați în eV energia totală a electronului în atomul de hidrogen pe primul nivel energetic.

Răspuns: -13,6 eV.

4. Calculați energiile primelor două nivele energetice în keV și lungimea de undă în Å a radiației, care apare în urma tranziției unui electron de pe nivelul 2 pe nivelul 1 ($Z = 74$).

$$\text{Răspuns: } W_1 = -74,27 \text{ keV; } W_2 = -18,57 \text{ keV; } \lambda = 0,22 \text{ Å.}$$

5. Calculați frecvența ν în s^{-1} și lungimea de undă λ în Å a radiației emise de atomul de hidrogen, când electronul de pe nivelul M revine pe nivelul K.

$$\text{Răspuns: } \nu = 0,29 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}; \lambda = 1034 \text{ Å (ultraviolet).}$$

6. Un electron cu viteza inițială $v_0 = 0$ a fost accelerat de o diferență de potențial $5 \cdot 10^4$ V. Care este lungimea de undă a fotonului, energia căruia ar fi egală cu energia cinetică a acestui electron?

$$\text{Răspuns: } \lambda = 0,25 \text{ Å.}$$

7. În tubul unui osciloscop, tensiunea de accelerare este de 20 kV. Care este lungimea de undă asociată electronului la finisarea accelerării?

$$\text{Răspuns: } \lambda = 8,86 \text{ pm.}$$

8. Ce lungime de undă are radiația emisă de atomul de hidrogen la tranziția electronului pe o orbită interioară, eliberând energia de 1,892 eV?

$$\text{Răspuns: } \lambda = 656,3 \text{ nm.}$$

2. ELEMENTE DE BIOFIZICĂ MOLECULARĂ

2.1. FORȚE ȘI LEGĂTURI INTERATOMICE ȘI INTERMOLECULARE

Forțele interatomice și intermoleculare derivă din faptul că atomii tuturor elementelor chimice conțin sarcini electrice de semne opuse: nucleu cu sarcină pozitivă, datorită protonilor, și înveliș electronic cu sarcină negativă. Prin urmare, aceste forțe sunt de natură electrostatică, bazate pe **legea lui Coulomb**:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r^2} \quad (1),$$

unde: ϵ_0 – permitivitatea electrică a vidului; ϵ – permitivitatea relativă a unui mediu dielectric în raport cu mediul de referință (vidul).

Expresia $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, fiind o mărime constantă, s-a notat prin K . Legea, din punct de vedere matematic, se va scrie:

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon \cdot r^2} \quad (2); \quad \text{calculat } K = 9 \cdot 10^9.$$

Este evident că permitivitatea relativă a vidului este egală cu 1, celelalte medii dielectrice posedă o permitivitate relativă mai mare decât 1.

Intensitatea câmpului electric \vec{E} , creat de o sarcină punctiformă q la distanța r de la această sarcină, este definită prin relația $E = K \frac{q}{\epsilon r^2}$, având ca unitate de măsură newton · coulomb⁻¹ (N · C⁻¹) sau volt · metru⁻¹ (V · m⁻¹).

Potențialul electrostatic creat de o sarcină electrică punctiformă la distanța r se definește prin relația: $V = K \frac{q}{\epsilon r}$, unitatea de măsură fiind voltul (V), de la numele fizicianului italian A. Volta (1745–1827).

Când sarcinile au același semn, forțele de interacțiune sunt de respingere, iar când au semne opuse – de atracție.

Configurația stabilă, numită **moleculă**, se formează atunci când forțele de atracție dintre atomii constituenți sunt aproximativ egale cu forțele de respingere și energia potențială a sistemului devine minimă.

Pentru elucidarea mecanismului de formare a structurilor biologice din componenții moleculari este necesară cunoașterea diferitelor tipuri de legături dintre acestea, precum și forțele care asigură aceste legături.

Dintre interacțiunile la nivel atomo-molecular menționăm legăturile: **Van der Waals; prin punte de hidrogen; ionice și hidrofobe.**

Legătura Van der Waals

Această legătură este relativ slabă și poate fi realizată între atomi cu pături electronice exterioare complete sau între molecule cu legături chimice saturate.

Mărimea forțelor care asigură această legătură este caracterizată de termenul a/V_0^2 din ecuația gazelor reale pentru un mol de gaz:

$$(P + a/V_0^2)(V_0 - b) = RT \quad (3),$$

unde a și b sunt constante experimentale, care reflectă proprietățile gazelor reale în raport cu gazele perfecte.

Termenul a/V_0^2 reprezintă corectarea presiunii, luând în considerație atracția moleculelor datorită forțelor intermoleculare.

Constanta b este corectarea volumului, luând în considerație volumul propriu al moleculelor, care în cazul gazului perfect este neglijat.

Forțele Van der Waals nu modifică structura și proprietățile moleculelor, stând doar la baza formării complexelor moleculare, în special a macromoleculelor biologice.

Moleculele neutre pot avea o structură spațială simetrică din punct de vedere electric (molecula de metan – CH_4) sau o structură asimetrică, în care sarcinile de semn opus sunt separate spațial (molecula de apă – H_2O), ultimele reprezintă **dipoli electrici permanenți**.

Un dipol este o structură formată din două sarcini electrice punctiforme de aceeași mărime, dar de semne opuse, situate la o anumită distanță (l) (fig. 2.1).

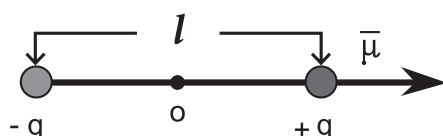


Fig. 2.1.

Gradul de polarizare a unei molecule se măsoară prin momentul ei electric (μ), numit și **dipolmoment**:

$$\vec{\mu} = ql \quad (4).$$

Convențional, direcția momentului este considerată de la sarcina negativă spre cea pozitivă, în prelungirea axei dipolului. Unitatea de măsură a momentului dipolar în S.I. este coulomb · metru ($\text{C} \cdot \text{m}$). Practic, se folosește o unitate mult mai mică, numită *debye* (D):

$$1D = 1/3 \cdot 10^{-29} \text{ C} \cdot \text{m}.$$

Între moleculele dipoli se și exercită forțele electrostatice, numite **Van der Waals**.

Sub acțiunea unei sarcini electrice din exterior, pot deveni dipoli și moleculele cu structură simetrică. Un astfel de dipol se numește **dipol indus** (fig. 2.2).

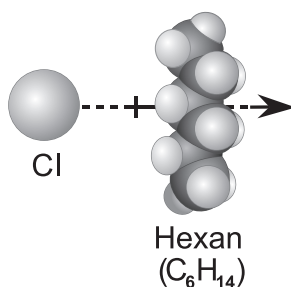


Fig. 2.2.

Există molecule neutre care pot deveni dipoli datorită mișcării electronilor. Astfel de dipoli au direcție determinată numai într-un interval de timp foarte

scurt, fiind numiți **dipoli electrici momentani**. Mecanismul de formare a dipolilor momentani poate fi demonstrat prin cercetarea interacțiunii dintre doi atomi de heliu. La o distanță mică între atomi, între mișcările electronilor se pot stabili corelații ce duc la apariția forțelor Van der Waals de atracție sau de respingere (fig. 2.3).

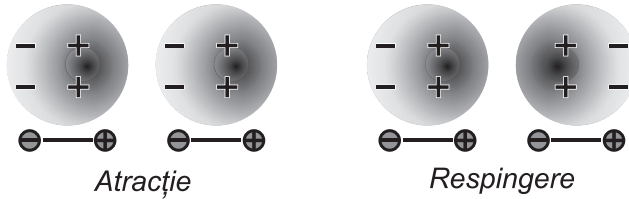


Fig. 2.3. Dipoli momentani.

Interacțiunea dipol-câmp

Fie un dipol electric rigid și fix plasat într-un câmp electric cu intensitatea \vec{E} (fig. 2.4).

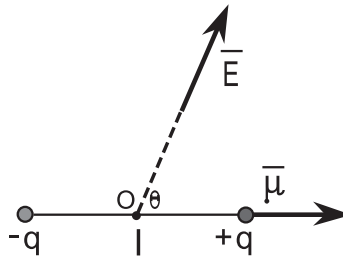


Fig. 2.4.

Energia potențială de interacțiune a dipolului cu câmpul electric exterior se determină din relația:

$$W_p = -\vec{\mu} \cdot \vec{E} \quad (5).$$

Produsul scalar al acestor doi vectori, prin definiție, depinde de cosinusul unghiului format între direcțiile lor:

$$W_p = -\mu \cdot E \cdot \cos \Theta \quad (6).$$

În consecință, energia potențială de interacțiune dipol-câmp este minimală (configurație stabilă), când vectorii momentului dipolar și al câmpului sunt paraleli și orientați în același sens. Configurația devine în echilibru instabil (energie potențială maximă), când acești vectori sunt paraleli și orientați în sensuri opuse.

Interacțiune dipol-dipol

Pentru a simplifica problema, vom considera doi dipoli rigizi plasați în același plan (fig. 2.5).

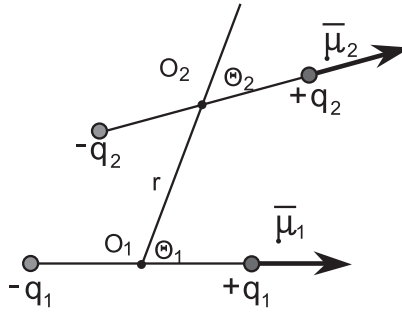


Fig. 2.5.

Poziția relativă a doi dipoli este determinată de r (distanța dintre centrele dipolilor) și unghiurile θ_1 și θ_2 (dintre vectorul $\vec{O_1O_2}$ și momentele dipolilor, respectiv $\vec{\mu}_1$ și $\vec{\mu}_2$). Energia potențială de interacțiune a acestor dipoli în vid se determină din relația:

$$W_p = -K \frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{r^3} \cdot (2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2).$$

Legături prin punte de hidrogen

Un caz particular al legăturilor Van der Waals de distanță medie (circa $3\text{Å} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$) îl reprezintă **legăturile prin punte de hidrogen**.

O moleculă formată dintr-un atom de hidrogen (H) și un atom electronegativ (X) prezintă o **legătură covalentă** (ex. OH , NH).

Electronul hidrogenului este atras spre atomul electronegativ, ceea ce duce la formarea **dipolului electric permanent**. Dacă în apropierea acestui dipol apare un alt atom electronegativ (Y), între XH și Y se realizează **legătura prin punte de hidrogen** (fig. 2.6).

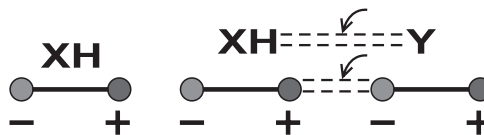


Fig. 2.6. Punte de hidrogen cu interacțiune dipol-dipol.

Drept pildă poate servi schema legăturii prin punte de hidrogen care apare între grupările carboxil (fig. 2.7).

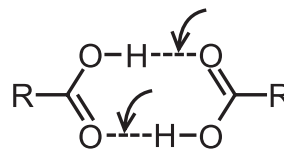


Fig. 2.7.

0,16 nm 0,1 nm

Legătura de hidrogen are următoarele caracteristici:

– deoarece nucleul atomului de hidrogen (protonul) este mai mic decât orice alt atom, atomii X și Y sunt atât de apropiați, încât un alt atom electronegativ nu se mai poate intercala. Din acest motiv, legătura prin punte de hidrogen **se poate realiza numai între doi atomi**;

– datorită repulsiei dintre X și Y, legătura prin punte de hidrogen **este totdeauna în linie dreaptă**.

Legăturile prin punte de hidrogen joacă un rol important în stabilitatea structurii spațiale a macromoleculelor biologice.

Deși forțele Van der Waals sunt relativ mici, efectul lor devine semnificativ datorită numărului mare de interacțiuni de acest fel. Legăturile bazate pe aceste forțe permit ruperea precum și formarea lor destul de ușor, ceea ce condiționează funcțiile biologice ale biopolimerilor.

Legături ionice

Formarea legăturii ionice are loc atunci când se apropie doi atomi, în structura cărora electronii ocupă poziții energetice diferite, încât un electron poate trece de la un atom la celălalt, pentru a ocupa o poziție energetică scăzută. Drept exemplu poate servi cazul când un atom de **Na** se apropie de un atom de **Cl**. Unicul electron de pe orbitalul extern din atomul de **Na** trece pe orbita externă a atomului de **Cl**. În consecință, atomii devin ioni (Na^+ și Cl^-), între care apare forța de atracție electrostatică ce menține legătura dintre ei. O astfel de legătură se numește **ionică**. Legătura ionică se desface ușor în soluție. De fapt, formarea ionilor în soluție este cea mai sigură dovadă că molecula, în stare nedizolvată, conține o legătură ionică.

Cristalele în care predomină acest tip de legătură se numesc **cristale ionice**. Legătura ionică este mult mai puternică decât legăturile Van der Waals. Tocmai prin aceasta se explică duritatea cristalelor ionice.

Legături hidrofobe

Interacțiuni slabe sunt și legăturile hidrofobe, existente între molecule sau grupări de molecule care nu au caracter polar. Cu toate că forțele hidrofobe sunt de respingere, în cazul când numărul moleculelor este mare, interacționând colectiv, ele duc la formarea unor structuri în stare de echilibru, numite **micle** (*fig. 2.8*).

Este important că legăturile hidrofobe dintre moleculele fosfolipide asigură organizarea structurală a membranelor celulare.

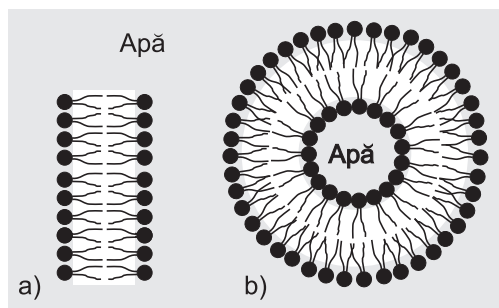


Fig. 2.8.

2.2. TRANSFORMĂRI DE FAZĂ. CRISTALE LICHIDE

Trecerea substanței dintr-o stare de agregare în alta se numește **transformare de fază**. Ea se realizează în anumite condiții de temperatură și presiune.

Punctul triplu (PT) este cel în care coexistă toate cele trei stări de agregare, în echilibru dinamic, și e caracterizat de o anumită temperatură și presiune specifice substanței respective. De exemplu, pentru apă, PT este caracterizat de presiunea (P) 609 Pa și temperatura (T) 273,16°K, iar pentru bioxid de carbon – respectiv $5,16 \cdot 10^5$ Pa și 216,6°K.

Punctul critic (PC) este cel peste a cărui temperatură gazul nu mai poate fi lichefiat, indiferent cât de mult ar crește presiunea.

Având unele trăsături comune, gazele și lichidele sunt denumite generic **fluide**. De exemplu, pentru apă, PC corespunde temperaturii de 647,16°K, pentru aer – 139,16°K, pentru azot – 126,16°K.

În figura 2.9 este prezentată forma generală a diagramei de faze.

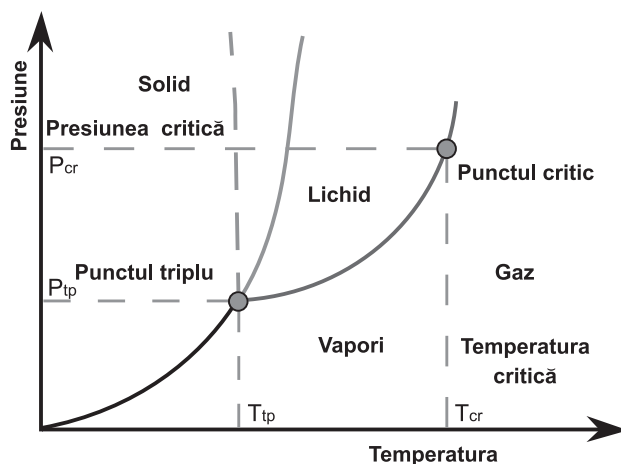


Fig. 2.9.

Este cunoscut faptul că substanțele cristaline, spre deosebire de substanțele izotrope, posedă o temperatură concretă a transferului de fază solid– lichid (punct de topire).

Cristalele lichide sunt substanțe organice la care tranziția solid–lichid nu se face direct, ci trecând prin faze intermediare stabile, stări în care substanța este anizotropă (similară cristalului solid), dar fluidă.

Fazele intermediare se numesc: **mezofaze**, **faze mezomorfe** sau **fluide condensate cu anizotropie spontană**.

Cristalele lichide au fost descoperite de botanistul austriac **F. Reinitzer** în anul 1888 și denumite „**cristale lichide**” de fizicianul german **O. Lehman**.

Mult timp însă, atât fizicienii, cât și chimiștii nu le-au considerat a fi o stare termodinamică stabilă a materiei, apreciind drept slabe posibilitățile de aplicare în practică. Abia în jurul anului 1930, bănuindu-se posibilitatea unor aplicații, a crescut preocuparea științifică a savanților pentru materialele mezomorfe. În această perioadă, prin cercetările efectuate, s-a evidențiat structura și unele proprietăți fizice ale cristalelor lichide.

Actualmente, aproape că nu există universitate sau institut de cercetări fundamentale și aplicative în domeniul fizicii, care să nu aibă preocupări privind cercetarea cristalelor lichide.

Există două clase mari de cristale lichide: **termotrope** și **liotrope**.

Termotrope se numesc substanțele care trec în faza de cristal lichid prin modificarea temperaturii, iar cele care trec în faza de cristal lichid prin modificarea concentrației lor în soluție se numesc **liotrope**.

Termotropele sunt importante din punctul de vedere al cercetărilor fundamentale, cât și al aplicațiilor tehnologice, iar liotropele sunt importante datorită rolului lor în sistemele biologice și țesutul viu.

Cristalele lichide termotrope se obțin prin încălzirea cristalelor solide și sunt formate din compuși organici cu molecule lungi sau, uneori, cu molecule în formă de disc. Unele materiale termotrope, supuse încălzirii, trec din faza solidă în cea lichidă prin mai multe mezofaze. Astfel de materiale se numesc **polimorfe**, iar fenomenul – **polimorfism**.

Clasificarea cristalelor lichide termotrope, făcută de **G. Friedel** în 1922, se bazează în esență pe simetria structurii lor.

În funcție de orientarea spațială a moleculelor, cristalele lichide termotrope, la rândul lor, se împart în trei grupe (*fig. 2.10*).

Nematice (gr. *nima* – fir) sunt substanțele în care axa lungă a moleculelor se aliniaza într-o direcție preferențială, fără să apară o structură stratificată (*fig. 2.10, a*).

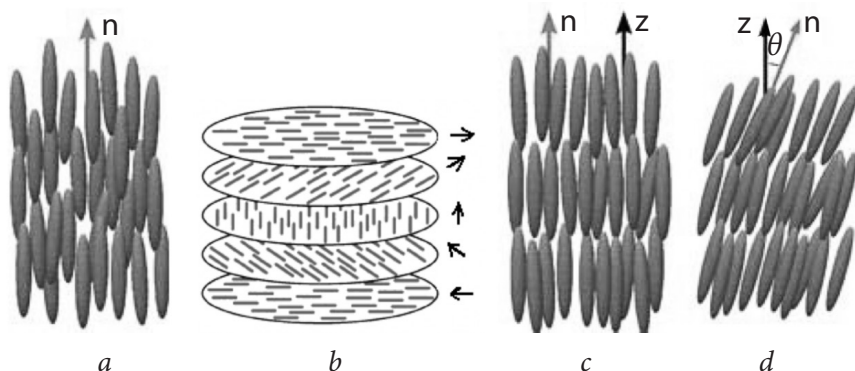


Fig. 2.10. Cristale lichide termotrope.

Observate la microscop, aceste substanțe apar sub forma unor șiruri asemănătoare cu firele de ață. Direcția de orientare a moleculelor, numită **axă optică a cristalului**, poate fi modificată în urma acțiunii unor factori externi, cum ar fi: temperatura, câmpurile electrice și magnetice, interacțiunile cu pereții incintei în care se află. Cristalele lichide nematice au o transparență de aproape 100%, sunt lipsite de activitate optică și păstrează orientarea moleculelor timp îndelungat.

Colesterice sunt substanțele în care axele lungi ale moleculelor sunt orientate paralel, însă direcția de orientare se rotește continuu sub un anumit unghi, de la un strat la altul, determinând o structură **stratificată și elicoidală** (fig. 2.10, b). Datorită acestei structuri, ele posedă un șir de proprietăți.

Cristalele lichide colesterice sunt optic active (rotesc planul de polarizare a luminii), au proprietatea de a-și schimba culoarea, în întregul domeniu vizibil, în funcție de temperatură, ceea ce face utilizarea lor drept **indicatori de temperatură în medicină**.

Variația temperaturii colestericului schimbă pasul spiralei, iar în consecință, și culoarea luminii reflectate de el, ceea ce este apreciat de observator ca schimbare a culorii cristalului.

Există colesterice cu sensibilitate ridicată la temperatură, cu ajutorul cărora se poate depista variația temperaturii cu o sutime de grad. În acest scop se folosesc colesterice încapsulate în pelicule subțiri polimerice. Aplicarea unei astfel de pelicule pe suprafața corpului redă tabloul în culori de distribuire a temperaturii pe sectorul cercetat. În unele cazuri, pentru aceleași scopuri se folosesc unguente speciale ce conțin colesteric dispersat mărunț, trasându-l pe suprafața pielii. Metoda de vizualizare a câmpurilor de temperaturi pe suprafața corpului se numește **termografie** (fig. 2.11). Prin această metodă se depistează centrele de inflamație ascunse sub piele și formațiunile canceroase.

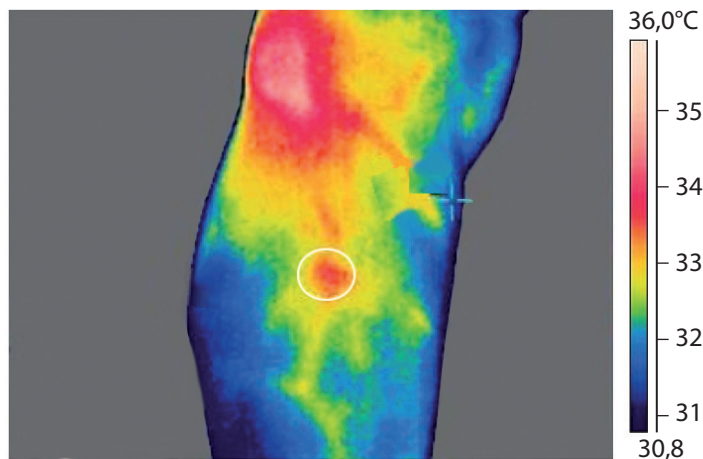


Fig. 2.11.

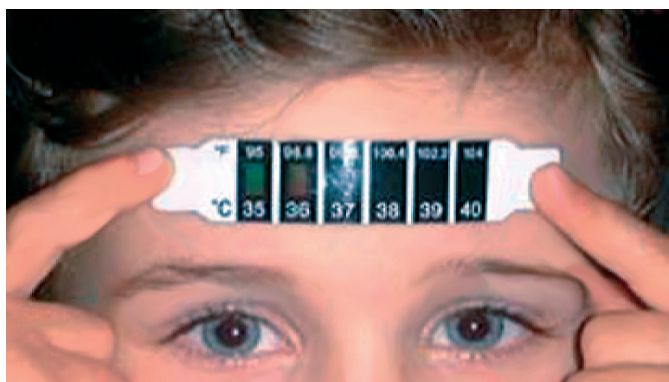


Fig. 2.12.

Peliculele cu colesterol, utilizate în calitate de termometre, sunt confortabile și lipsite de pericol (fig. 2.12).

Încălzirile locale ale ecranului „colesteric”, obținute prin transformarea impulsurilor electrice, favorizează folosirea lor la televizoarele color, precum și la sistemele de prelucrare și afișare a informației (tonometre, ceasornice, monitoare etc.).

Monitorul este un dispozitiv de ieșire care afișează imagini și text. Există câteva tipuri de monitoare: cu tub (CRT), cu cristale lichide (LCD), cu plasmă.

Monitoarele CRT sunt alcătuite dintr-un tub, care are la un capăt un tun cu electroni. La celălalt capăt el are un ecran cu un înveliș luminescent. El funcționează în baza bombardării ecranului cu electroni, astfel afișându-se punctele de diferite culori.

Monitoarele LCD au în general o rezoluție mai slabă decât cele CRT, dar nu emit radiații dăunătoare, ocupă mai puțin spațiu și consumă mult mai puțină energie (aproximativ 5 w față de 100 w la cele cu tub). Acestea au o tehnologie diferită de funcționare: un fascicul de lumină trece prin filtre speciale, care o transformă în culorile **roșu**, **verde** sau **albastru**, iar electricitatea le direcționează la fiecare celulă.

Pasul spiralei colestericului este sensibil nu doar la variația temperaturii, câmpurilor electric și magnetic, dar și la acțiunea altor factori, inclusiv a celor periculoși pentru om, cum ar fi **impuritățile din aer** sau **radiațiile ionizante**.

Smectice (gr. *smektos* – săpun) sunt substanțele care posedă o structură stratificată, axa lungă a moleculelor fiind orientată normal (fig. 2.10, c) sau înclinat față de planul stratului (fig. 2.10, d) (exemplu: mielina).

Cristalele lichide liotrope se aseamănă cu cele termotrope prin fluiditate și orientarea moleculelor, dar se deosebesc prin compoziție, având structuri formate dintr-un număr mare de molecule care conțin două părți cu caractere diferite: una **hidrofilă** și alta **hidrofobă**.

În funcție de concentrație și temperatură, cristalele lichide liotrope pot fi de diferite structuri (fig. 2.13): lamelară (2.13, a), cilindrică (2.13, b), sferică (2.13, c), hexagonală (2.13, d) și altele.

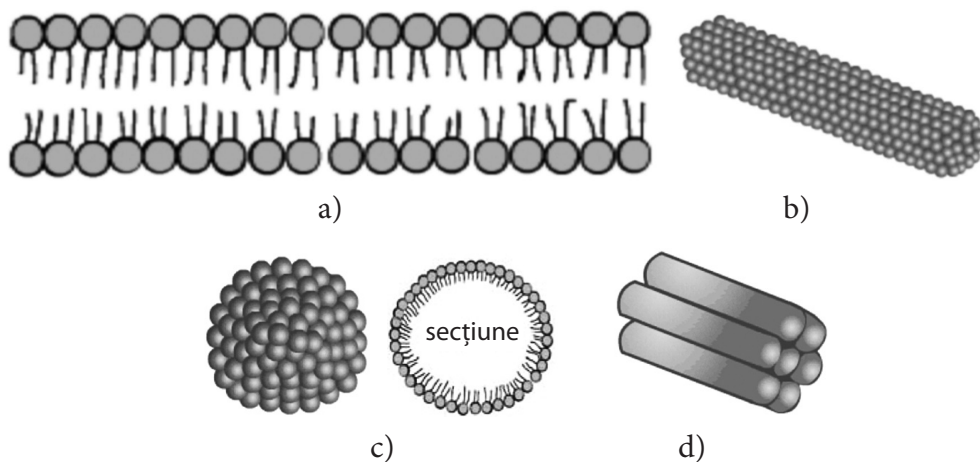


Fig. 2.13.

Proprietăți deosebite le revin celor cu structură lamelară. În ele, moleculele se aranjează în straturi duble, astfel încât capetele hidrofobe sunt orientate spre interior, fără a fi în contact cu apa, iar capetele hidrofile – spre exterior, fiind în contact cu apa (exemplu: membranele celulare).

2.3. MACROMOLECULELE

Definiția și clasificarea macromoleculilor

Drept criteriu în definirea unei macromolecule se acceptă masa moleculară, care, convențional, trebuie să depășească 5000 daltoni (D); $1D = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. În organismul viu, din moleculele anorganice se sintetizează mai întâi molecule organice simple, apoi macromolecule biologice specifice.

Diversitatea macromoleculilor din materia vie este extrem de mare, dar, cu toate acestea, interacțiunile atomo-moleculare, precum și tipurile de legături chimice din materia vie, nu au nimic diferit sub aspect calitativ față de cele din materia anorganică. Unul din argumentele principale în favoarea acestor constatări îl reprezintă realizarea sintezei artificiale a numeroaselor biomolecule.

Macromoleculele biologice (numite deseori *biopolimeri*) sintetizate artificial au aceleași proprietăți cinetice, electrice și optice ca și macromoleculele sintetizate în celule.

Tipurile fundamentale de biopolimeri:

1. **Proteinele** reprezintă macromolecule alcătuite din **aminoacizi**; ele sunt implicate în cele mai importante structuri și procese din organism.

2. **Acizii nucleici** (alcătuiți din **nucleotide**) sunt de două tipuri: ADN și ARN; ele alcătuiesc suportul informației genetice.

3. **Polizaharidele: amiloza**, component principal al celulelor vegetale, și **glicogenul**, care joacă un rol corespondent în celulele animale. Aceste macromolecule servesc la stocarea **glucozei** – „aliment” de bază al celulei. O altă macromoleculă de acest tip este **celuloza** – constituent al pereților celulelor vegetale.

4. **Lipidele** și în mod deosebit **fosfolipidele** sunt componente ale membranelor celulare.

Există mai multe criterii de clasificare a macromoleculilor biologice.

În funcție de alternanța monomerilor: orice biopolimer este alcătuit dintr-o serie de verigi-unități fundamentale, numite **monomeri**.

Se numesc **polimeri** compușii macromoleculari alcătuiți din grupe de atomi identice. Un polimer poate fi scris sub forma:



unde **n** – numărul de repetări al monomerului.

Se numesc **copolimeri** compușii macromoleculari ai căror **monomeri** nu au o compoziție identică. De exemplu:



unde **A, B, C** și **D** sunt monomeri diferiți. Cel mai important tip de **copolimeri** îl reprezintă **proteinele**, monomerii cărora sunt **aminoacizii**.

În funcție de forma geometrică, compușii macromoleculari pot fi:

- liniari;
- ramificați;
- spațiali.

În funcție de rolul biologic în organism, macromoleculele sunt:

a) **biocoloizi** – proteinele circulante din plasmă și unele proteine solubile din citoplasmă (globuline, fibrinogen);

b) **macromolecule de structură** – organizate într-o serie de structuri, cum ar fi: proteine musculare (actină, miozină), colagen, carotină etc., care au o extremă importanță pentru organism.

În funcție de nivelul informațional, macromoleculele se clasifică în înalt purtătoare de informație (**acizii nucleici, enzimele**) și macromolecule cu informație redusă sau lipsite de informație (**polizaharidele**).

Compoziția, funcția și proprietățile electrice ale proteinelor

Proteinele au ponderea cea mai mare în celule: 50% și mai mult din masa uscată. Diversitatea proteinelor din lumea vie e de 10^{10} – 10^{12} . Prin metode fizice și chimice s-a constatat că toate proteinele care au fost supuse examinării cuprind C, H, O, N; foarte multe – S; unele au și alte elemente – P, Fe, Zn, Cu.

De regulă, masa moleculară este cuprinsă între 5 000 și 22 000 D, dar poate ajunge și la 1 000 kD.

Prin hidroliză acidă, proteina se desface în compuși organici simpli: α -aminoacizi, care conțin o grupare amino– NH_2 . Aminoacizii diferă între ei prin natura radicalului și lanțurile laterale (fig. 2.14).

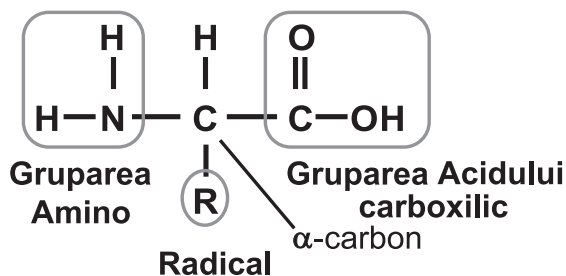


Fig. 2.14.

Proteinele se recunosc după structură: **primară, secundară, terțiară și cuaternară** (fig. 2.15).

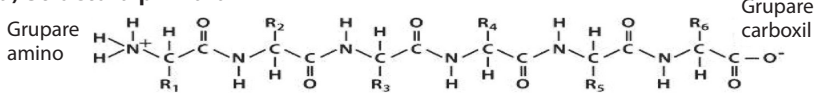
Structura primară reprezintă scheletul covalent al lanțului polipeptidic cu o secvențializare specifică a aminoacizilor componenți.

Structura secundară constă în aranjamentul lanțurilor polipeptidice pe o singură dimensiune spațială, formând structuri în α -helix, plicaturate. Spiralară se face în conformitate cu regulile stabilite de **Linus Pauling**; de exemplu: diametrul spirei (de 10,1 Å) se stabilește astfel, încât oxigenul din –CO al unei spire să se afle față în față cu hidrogenul din –NH al spirei următoare. Între O și H se formează o punte de hidrogen care stabilizează spirala. Pasul elicei, corespunzând distanței minime dintre două puncte echivalente, este de 5,21 Å.

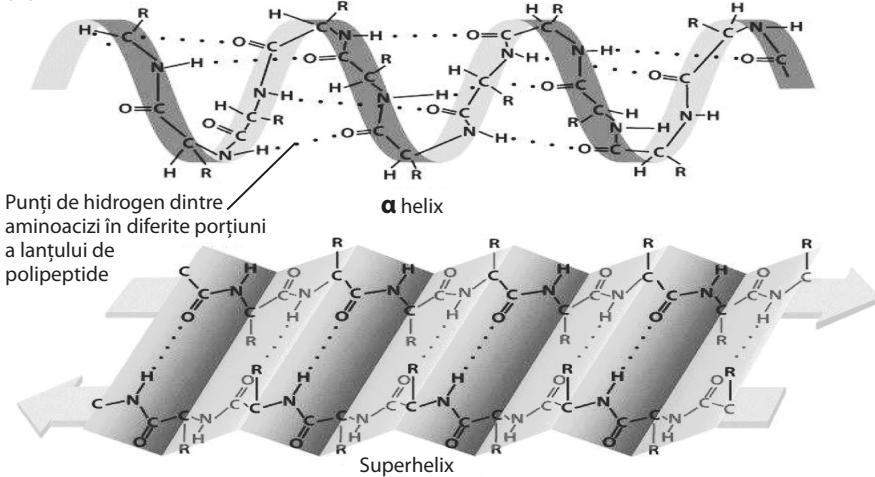
Structura terțiară reprezintă structura spațială tridimensională a unui lanț polipeptidic. Structurii terțiare îi sunt specifice punțile intercuaternare, numite *hem*, care asigură stabilitatea lanțului încolăcit.

Structura cuaternară implică asocieri de mai multe lanțuri polipeptidice distincte, formând proteine **oligomere**. Lanțurile componente se numesc *subunități* sau *protomeri*. Stabilitatea și caracteristicile funcționale sunt asigurate de **legăturile intercuaternară, ionică și hidrofobă**.

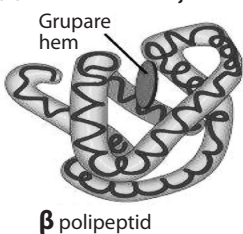
(a) Structura primară



(b) Structura secundară



(c) Structura terțiară



(d) Structura cuaternară

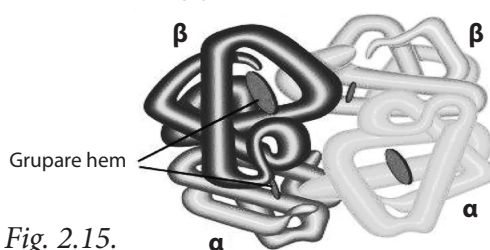


Fig. 2.15.

Structurile spațiale, terțiară și cuaternară, au un rol important în sinteza proteică, producerea anticorpilor, reacțiile enzimatică, canalele ionice, pompe etc. Prin termenul „conformație” se definește, de regulă, structurile secundară, terțiară și cuaternară ale proteinei.

În funcție de conformație, proteinele se clasifică în **fibrilare** și **globulare**.

Proteinele îndeplinesc funcții extrem de importante și diverse. Ele reprezintă:

- elemente structurale;
- componente ale sistemelor contractile;
- catalizatori (enzime);
- transportori ai unor substanțe (hormoni, toxine, anticorpi, ioni etc.);
- substanțe nutritive de rezervă.

Prin denaturare (desfacerea structurii normale sub influența unui pH extrem sau a temperaturii ridicate); proteinele își pierd capacitatea de realizare a funcției biologice.

Datorită grupurilor $-\text{COOH}$ și $-\text{NH}_2$, există două moduri de disociere a proteinelor, – acidă și bazică (fig. 2.16). Anionul din disocierea acidă și cationul din disocierea bazică reprezintă **ionii proteici** cu dimensiuni mult mai mari decât ionii anorganici.

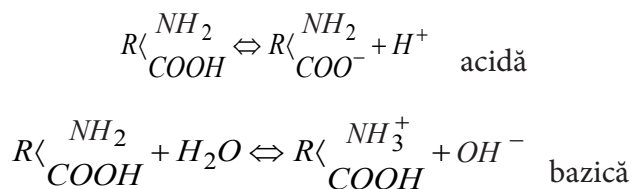


Fig. 2.16.

La un anumit pH_i , numit **izoelectric**, molecula proteică este neutră, la un pH mai mare devine anion, iar la un pH mai mic – cation (fig. 2.17). În organism, pH mediu este de 7,4, superior pH-ului izoelectric, caz în care proteinele se comportă ca anioni.

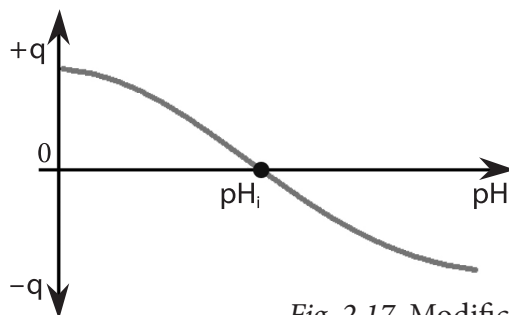


Fig. 2.17. Modificarea sarcinii proteinei în funcție de pH-ul mediului.

EXERCIȚII

1. Prima orbită a electronului în atomul de hidrogen este circulară cu raza de $5,3 \cdot 10^{-2}$ nm. Protonul cu sarcina de $+e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C este situat în centrul cercului. Determinați potențialul V creat de proton la nivelul primei orbite electronice.

Răspuns: $V = 27,17$ volți.

2. Două sarcini punctiforme $q_1 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C și $q_2 = -3,2 \cdot 10^{-19}$ C sunt plasate în vid la o distanță de 0,4 nm una de alta. Determinați forța F , exercitată de sarcina q_1 asupra sarcinii q_2 .

Răspuns: $F = 2,88$ nN.

3. Două sarcini punctiforme pozitive (q_1 și q_2) sunt plasate în vid la distanța (r) de 5 nm. Între aceste sarcini, pe linia ce le unește, s-a plasat o sarcină negativă (q_3). Determinați ce distanță (r_1) trebuie să fie între q_1 și q_3 , pentru ca ultima să rămână imobilă, cunoscând că $4q_1 = 9q_2$.

Răspuns: $r_1 = 3$ nm.

4. Un dipol electric este constituit din două sarcini punctiforme $+q$ și $-q$ ($|q| = 3,2 \cdot 10^{-19}$) situate la o distanță (l) de 30 nm, una de alta. Determinați momentul dipolului μ .

Răspuns: $\mu = 28,8$ deby (D).

5. Un dipol electric ($\mu = 7,8$ D) este introdus într-un câmp electric uniform cu intensitatea de 50 Vm^{-1} . Unghiul dintre sensul pozitiv al câmpului și momentul dipolului este de 120° . Determinați energia potențială de interacțiune dipol-câmp.

Răspuns: $w_p = 4,33 \cdot 10^{-30}$ j.

6. Doi dipoli electrici identici, $\mu = 4,8$ D, sunt aliniați și orientați în aceeași direcție. Distanța dintre centrele dipolilor este de 20 Å. Determinați energia potențială de interacțiune a acestor dipoli.

Răspuns: $W_p = -2,88 \cdot 10^{-22}$ j.

7. Care va fi energia potențială a dipolilor din exercițiul precedent, dacă orientarea momentelor ar fi contraopușă?

Răspuns: $W_p = 1,8 \cdot 10^{-3}$ eV.

3. APA. STRUCTURĂ ȘI PROPRIETĂȚI

3.1. STRUCTURA ȘI PROPRIETĂȚILE MOLECULEI DE APĂ

Molecula de apă (H_2O) este formată dintr-un atom de oxigen și doi atomi de hidrogen, uniți de atomul de oxigen prin legături covalente. Prin **metoda de difracție cu raze X** s-a constatat că molecula de apă posedă o formă triunghiulară. Ea este considerată o asociere a unui ion O^{2-} și a doi ioni H^+ (fig. 3.1). Fiecare legătură OH cu lungimea de $0,96 \text{ \AA}$ reprezintă un dipol electric. Legăturile OH formează între ele un unghi de $104^\circ 28'$. Momentul dipolar rezultat al moleculei de apă este de $1,84$ debye (D).

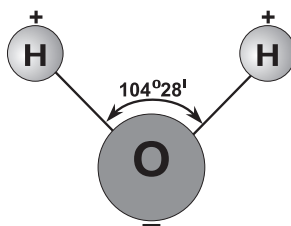
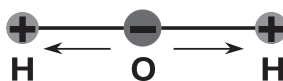


Fig. 3.1.

Pe lângă argumentele obținute experimental, însuși faptul că molecula de apă prezintă dipol electric permanent exclude posibilitatea de aranjare liniară a atomilor componenți (fig. 3.2).



Dipolmoment = zero

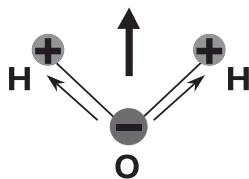


Fig. 3.2.

O altă caracteristică a moleculei de apă constă în faptul că aceasta poate contracta ușor cu moleculele vecine legături (punți) de hidrogen (fig. 3.3).

Legăturile de hidrogen reprezintă un tip de interacțiuni intermoleculare slabe, răspândite în structurile macromoleculare.

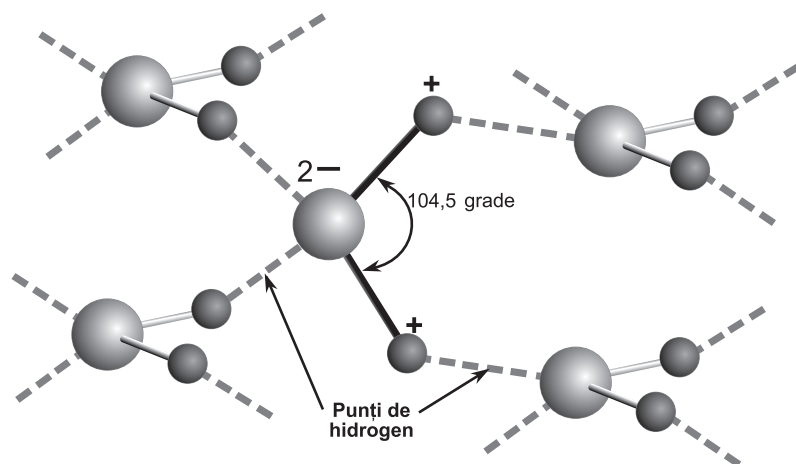


Fig. 3.3.

Apa lichidă obișnuită este formată dintr-un amestec de molecule libere: monomeri H_2O ; dimeri $(\text{H}_2\text{O})_2$; tetrameri $(\text{H}_2\text{O})_4$ și octameri $(\text{H}_2\text{O})_8$; procentul fiecărei dintre aceste fracțiuni depinde de temperatură.

În intervalul de temperaturi $35\text{--}41^\circ\text{C}$, în apă predomină dimerii și ea are o activitate chimică ridicată. În aceste condiții, celulele organismului pot construi cu ușurință structuri liniare și spațiale din moleculele de apă.

Astfel, devine explicabil faptul că, în decursul timpului, animalele **homeoterme** și-au fixat temperatura normală a organismului în limitele intervalului menționat.

3.2. UNELE PROPRIETĂȚI FIZICE ALE APEI ȘI ROLUL LOR BIOLOGIC

Caracterul dipolar electric al moleculei de apă și capacitatea de a se angaja în legături de hidrogen cu moleculele vecine explică proprietățile apei în cele trei stări de agregare, precum și comportarea ei în mediile biologice.

Proprietățile fizice ale apei de o importanță biologică remarcabilă:

– **Densitatea** (masa de substanță în unitate de volum) **maximă la 4°C** , ceea ce reprezintă o excepție în raport cu alte substanțe. Datorită acestei proprietăți, pe fundul lacurilor temperatura apei nu scade sub această valoare nici iarna (apa mai densă se duce în jos). Gheața, fiind mai puțin densă, se ridică la suprafață, astfel creându-se condiții favorabile pentru dezvoltarea în continuare a vieții în mediul subacvatic.

Graficul dependenței densității apei de temperatură este reprezentat în *fig. 3.4*.

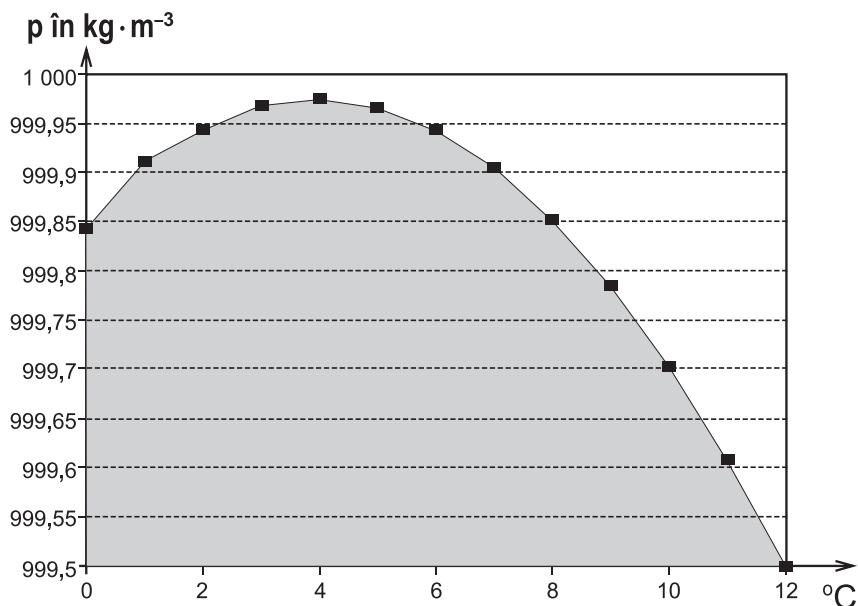


Fig. 3.4.

La temperaturi cuprinse între 0°C și 4°C , monomerii pătrund în spațiile libere ale rețelei cristaline ca molecule interstițiale. Acest fenomen explică creșterea densității până la valoarea maximă. La temperaturi mai înalte de 4°C , acești monomeri ies din ochiurile rețelei cristaline datorită agitației termice, micșorând astfel densitatea apei.

Aceste date atrag atenția asupra problemelor de criobiologie, înghețarea și dezghețarea biostructurilor, fiind în centrul unor cercetări privind conservarea non-distructivă și funcțională a acestora.

– **Capacitatea termică specifică** (căldura necesară unității de masă pentru a-și varia temperatura cu 1 grad) mult mai mare decât cea a oricărei substanțe solide sau lichide ($4,2 \cdot 10^3 \text{ JK}^{-1}$). Această proprietate poate fi explicată prin faptul că interacțiunea dintre dipolii apei înmagazinează o mare cantitate din energia internă. În termoreglarea organismului, căldura specifică mare favorizează menținerea temperaturii constante a corpului în timpul unor eforturi musculare intense, care ar putea duce la o supraîncălzire. Trebuie de menționat că și în prezent în practica și cercetările medico-biologice este utilizată unitatea asistemică de măsură a energiei termice, numită **calorie (1 calorie = 4,18 J)**.

– **Căldura latentă specifică de vaporizare** (căldura necesară unității de masă pentru a-și modifica starea de agregare) mult mai mare decât a altor lichide ($40,65 \text{ kJmol}^{-1}$), datorită tot capacității apei de a forma legături de hidrogen. Eva-

porarea apei este un proces consumator de căldură. Așadar, evaporarea pulmonară și transpirația consumă căldură de la organismul viu, asigurând homeotermla.

– **Permitivitatea electrică relativă** ϵ_r (o caracteristică a mediului, care indică de câte ori intensitatea câmpului electric în mediul dat este mai redusă în raport cu vidul), care pentru apă are valoarea 80, ceea ce înseamnă că în apă forțele electrostatice diminuează esențial (de 80 de ori), rezultatul fiind facilitarea disocierii electrolitice. Prin aceasta se explică de ce apa este un bun solvent pentru moleculele polare și cristalele formate prin legături ionice.

În soluțiile apoase, ionii formați atrag moleculele de apă (dipoli) cu polul de semn opus. Astfel se formează structuri supramoleculare cu o simetrie sferică (fig. 3.5). Apa astfel legată se numește **apă de hidratare** și are proprietăți net diferite de cele ale apei libere, iar procesul se numește **hidratarea** sau **solvatarea ionilor**.

Numărul moleculelor de apă care realizează hidratarea depinde de natura ionului (sarcina și dimensiunile lui).

Coefficientul de tensiune superficială (σ) (forța de tensiune superficială ce revine la o unitate de lungime a conturului suprafeței libere la interfața cu aerul), pentru apă la temperatura de 20°C, are o valoare mai mare decât al altor lichide ($72,6 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$). Acest lucru este important, deoarece forțele de tensiune superficială sunt implicate într-o serie de fenomene: **capilaritatea**, **embolia gazoasă**, **chemotaxis** și altele.

Exemplu din sistemul respirator: tendința alveolelor de a colapsa la sfârșitul expirației se datorează, în esență, tensiunii superficiale a stratului apos care căptușește epiteliul alveolar. Stabilitatea alveolară este asigurată de **surfactantul pulmonar** (amestec de fosfolipide și lioproteine) de la interfața aer-lichid (fig. 3.6), care reduce tensiunea superficială și menține diferența de presiune din interiorul alveolei

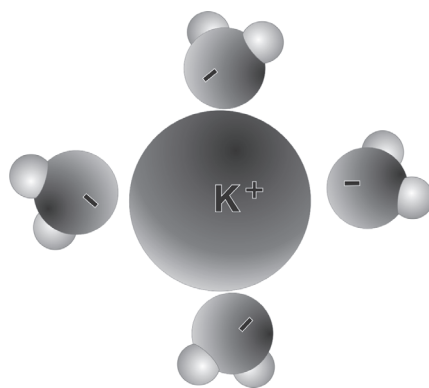


Fig. 3.5.

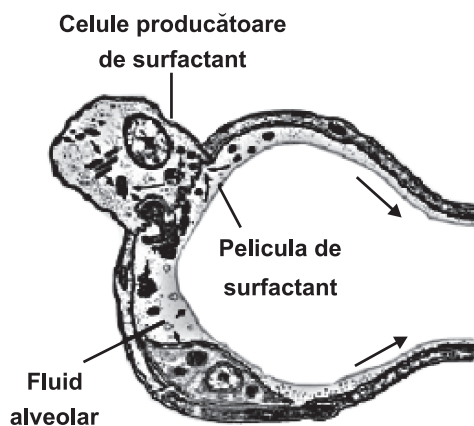


Fig. 3.6.

în cursul ciclului respirator la o valoare aproximativ constantă, prevenind astfel colapsarea. Alveolele funcționează normal în prezența stratului de surfactant sintetizat în decursul întregii vieți de celulele specializate situate în pereții alveolelor. Producerea insuficientă precum și reducerea proprietăților tensioactive ale surfactantului sunt cauza diverselor maladii ale sistemului respirator.

3.3. ROLUL BIOLOGIC ȘI REPARTIȚIA APEI ÎN ORGANISM

Apa – una din cele mai răspândite substanțe pe globul pământesc – este singurul lichid anorganic din organismul uman, fără de care nici un proces vital nu este posibil. În raport cu alte lichide, proprietățile fizice ale apei apar excepționale. Ele favorizează la maxim apariția fenomenelor de viață.

Toate ființele vii, animale sau vegetale, conțin o importantă porție de apă. Organismul unor nevertebrate marine (meduza) conține 96–97% de apă din întreaga greutate, iar sporii și bacteriile – mai puțin de 50%.

Mamiferele și omul se situează între aceste limite, conținutul de apă fiind de 65–70 % din greutatea lor.

Rolul apei în organism este determinat de faptul că ea reprezintă un constituent principal al materiei vii și participă la procesele fundamentale ale organismului.

Dintre rolurile importante pe care le îndeplinește apa în organism menționăm:

- este elementul esențial care reglează presiunea osmotică a celor trei sectoare hidrice;

- reprezintă mediul în care au loc multiple reacții chimice și biochimice din organism;

- participă la menținerea constantă a temperaturii organismului;

- fiind un bun solvent, apa formează o serie de soluții, pe care le vehiculează din mediul intern al organismului în celulă și în sens invers;

- participă la eliminarea deșeurilor din organism pe cale renală;

- are un rol important în protecția mecanică a fătului.

S-a constatat că 70% din apa conținută într-un organism viu reprezintă apa intracelulară, 23% – apa interstițială și numai 7% – apa circulantă.

Pentru a determina volumul apei (V) în diferite compartimente, se utilizează relația: $V = \frac{m}{c}$ (6),

unde: m – cantitatea de substanță injectată; c – concentrația diluată în volumul V .

Pentru determinarea volumului total (V_T) de apă din organism, se injectează o substanță care difuzează liber în tot corpul, cum ar fi **antipurinul, izotopii hidrogenului** și altele.

Pentru a cunoaște volumul plasmatic (intravascular) (V_p) se folosesc macromolecule care nu pot traversa endoteliul vascular, cum ar fi **serul de albumine marcat cu iod radioactiv**.

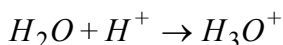
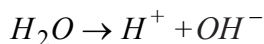
Pentru a determina volumul extracelular (V_{EC}) trebuie folosită o substanță care traversează endoteliul vascular, însă pentru care membranele celulare sunt impermeabile.

Volumul intracelular (V_{IC}) și interstițial (V_{IS}) se determină din relațiile:

$$V_{IC} = V_T - V_{EC} \text{ și } V_{IS} = V_{EC} - V_p \quad (7).$$

3.4. DISOCIEREA APEI

Apa se disociază în ioni H^+ și OH^- . Ionul H^+ , neavând înveliș electronic, posedă o mare capacitate de hidratare. El se poate lega de o moleculă de apă, formând ionul de **hidroniu** (H_3O^+).



Având și o mare mobilitate, protonul trece de la o moleculă la alta.

Gradul de disociere a apei este mic, în apa pură la 25°C:

$$[H^+] = [OH^-] = 10^{-7} \text{ moli/l} \quad (8);$$

prin [] se notează concentrația molară.

Logaritmul zecimal cu semn schimbat al concentrației ionilor de hidrogen se notează cu **pH**:

$$pH = -\lg [H^+].$$

Deci, pentru apa pură, la 25°C, $pH = 7$.

Un **pH = 7** reprezintă o soluție neutră. Un **pH > 7** corespunde unei soluții bazice, iar **pH < 7** – unei soluții acide.

Valoarea medie a pH-ului în organismul omului este de circa 7,4. Soluții-tampon se numesc lichidele biologice în care se pot adăuga cantități relativ mari de acizi sau baze, fără ca pH-ul să se schimbe simțitor. Ele sunt importante în menținerea valorii constante a pH-ului în organism.

Valorile pH-ului în unele lichide biologice sunt reprezentate în tabelul ce urmează.

| Lichidul | pH |
|----------------|-----|
| Sânge | 7,4 |
| Suc gastric | 1,8 |
| Suc pancreatic | 8,0 |
| Urină | 5,6 |

În sânge, principalele substanțe-tampon sunt seroproteinele.

De regulă, reacțiile biochimice au loc în soluții neutre, slab acide sau slab bazice și foarte sensibile la variațiile pH-ului.

3.5. APA-GREA ȘI APA TRITIATĂ

În anul 1932, Harold Urey a remarcat că **rezidiul bacurilor de electroliză** are o densitate mai mare decât apa obișnuită. Aceasta l-a ajutat să descopere **apa-grea**, care în apa obișnuită se găsește în cantități foarte mici. Electroliza apei obișnuite la tensiuni înalte mărește procentul fracțiunii de **apă-grea**.

Asocierea izotopilor oxigenului (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O) cu izotopii hidrogenului (^2H – deuteriul **D** și ^3H – tritiul **T**) explică faptul că în apa naturală există **18 specii** de molecule de apă, printre care și cele ce formează **apa-grea** și **apa tritiată**, aceasta din urmă fiind **radioactivă**:

$\text{H}-\text{O}-\text{H}$: H_2O apa obișnuită

$\text{H}-\text{O}-\text{D}$

$\text{D}-\text{O}-\text{D}$: D_2O apa-grea

$\text{D}-\text{O}-\text{T}$

$\text{H}-\text{O}-\text{T}$

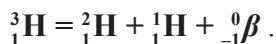
$\text{T}-\text{O}-\text{T}$: T_2O apa tritiată

Proprietățile fizice ale apei-grele diferă de cele ale apei obișnuite. Principalele constante fizice ale formei D_2O în raport cu apa obișnuită sunt date în tabelul ce urmează.

| Proprietatea fizică | H_2O | D_2O |
|---|------------------------|------------------------|
| Masa molară ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) | 18 | 20,0276 |
| Densitatea (grame pe cm^3) la 20°C | 0,9982 | 1,1056 |
| Temperatura maximului de densitate | $4,0^\circ\text{C}$ | $11,6^\circ\text{C}$ |
| Temperatura de congelare | $0,00^\circ\text{C}$ | $3,82^\circ\text{C}$ |
| Temperatura de fierbere | $100,00^\circ\text{C}$ | $101,72^\circ\text{C}$ |
| Tensiunea superficială (dine pe cm) | 72,75 | 67,8 |
| Vâscozitatea la 20°C (poise) | $10,09 \cdot 10^{-3}$ | $12,06 \cdot 10^{-3}$ |
| Constanta dielectrică la 0°C | 81,5 | 80,7 |
| Indicele de refracție | 1,333 | 1,328 |

În biologie, cu apă-grea se poate „marca” apa introdusă în organismele vii – una din metodele de studiere metabolismului apei. Dotajul apei-grele în apa obișnuită poate fi determinat prin măsurarea **indicelui de refracție**.

Apa tritiată (T_2O) poate fi detectată pe baza emisiei radiației β de către tritium, conform reacției:



În ce privește rolul biologic al apei grele, s-a observat că, începând de la o anumită concentrație, ea încetinește fenomenele metabolice. Se observă o inhibiție a diviziunii celulare, ea provoacă sterilitatea animalelor, duce la inhibarea transportului activ și a contracției musculare, generează modificări profunde în funcția miocardului, evidențiate clar de electrocardiogramă, ridică pragul de excitabilitate.

Toate aceste fenomene pot fi explicate dacă presupunem că în procesele energetice celulare, posibil în sinteza ATP, **protonul** joacă un rol deosebit, ce nu poate fi îndeplinit de **deuteriu**.

EXERCIIII

1. Care a fost temperatura inițială a 0,8 kg de gheață, dacă, pentru a-i ridica temperatura până la 0°C , energia ei internă a fost mărită cu $33,6 \cdot 10^3 \text{ J}$? ($c = 2,1 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Răspuns: $t_1 = -20^\circ\text{C}$.

2. Ce volum ocupă o cantitate de apă, dacă ea conține $6,02 \cdot 10^{28}$ molecule? ($M = 0,018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; $r = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Răspuns: $V = 1,8 \text{ m}^3$.

3. La temperatura de fierbere, timp de 25 minute s-au evaporat $27 \cdot 10^{-2} \text{ kg}$ de apă. Câte molecule au trecut într-o secundă din starea lichidă în starea gazoasă? ($M = 0,018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

Răspuns: $N = 6,02 \cdot 10^{22} \text{ molecule} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. De câte ori este mai mare energia necesară pentru a transforma în vapori 10 kg de apă decât energia necesară pentru a transforma în vapori 20 kg de fier, la temperaturile lor de fierbere? ($r_a = 22,64 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; $r_f = 58 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Răspuns: de 19,5 ori.

5. O cantitate de apă are temperatura de 80°C . Pentru aducerea ei la temperatura de fierbere, apoi transformarea în vapori la presiune normală, s-au consumat $12\,980\text{ kJ}$ de energie. Determinați masa apei. ($c = 4,2 \cdot 10^3\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; $r = 22,6 \cdot 10^5\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Răspuns: $m = 5,5\text{ kg}$.

6. Căldura latentă de vaporizare a apei la 37°C este de $581\text{ calorii} \cdot \text{g}^{-1}$. Determinați pierderea calorică la evaporarea pulmonară a $0,6$ litri de apă.

Răspuns: $Q = 346,51 \cdot 10^3\text{ calorii}$.

7. Determinați presiunea suplimentară produsă de tensiunea superficială într-o picătură de ceață (negură) cu diametrul de $3\text{ }\mu\text{m}$, la temperatura de 20°C . ($\sigma = 72,6 \cdot 10^{-3}\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$).

Răspuns: $\Delta P = 96,8\text{ kPa}$.

8. În momentul desprinderii de la gura tubului capilar, situat vertical, picătura de apă pură are masa de $40\text{ }\mu\text{g}$. Determinați diametrul tubului. Experiența a decurs la temperatura de 20°C .

Răspuns: $d \approx 1,76\text{ mm}$.

9. Într-un tub capilar, situat orizontal, au fost introdus $0,3\text{ ml}$ de sânge, care a format o coloană de 12 cm . Care va fi înălțimea coloanei ce se va reține în tub la trecerea lui în poziție verticală? ($\rho = 1\,060\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\sigma = 58\text{ mN/m}$).

Răspuns: $\Delta h \approx 3,88\text{ cm}$.

10. Uneori, dozarea medicamentului se realizează prin picături. Cu câte procente se va schimba doza medicamentului la variația temperaturii de la $t_1 = 25^{\circ}\text{C}$ până la $t_2 = 10^{\circ}\text{C}$? ($\sigma_1 = 71,78\text{ mN/m}$ și $\sigma_2 = 74,01\text{ mN/m}$).

Răspuns: se va mări cu $\approx 3\%$.

11. O cantitate de apă s-a scurs prin capilarul vâscozimetruului Ostwald timp de 60 s . Aceeași cantitate de soluție, cu densitatea de trei ori mai mare decât densitatea apei, s-a scurs timp de 180 s . Coeficientul de vâscozitate a apei: $\eta_a = 1\text{ mPa} \cdot \text{s}$. Determinați coeficientul de vâscozitate a soluției.

Răspuns: $\eta_s = 9 \cdot 10^{-3}\text{ Pa} \cdot \text{s}$.

4. BIOFIZICA SISTEMELOR DISPERSE

4.1. DEFINIȚIA ȘI CLASIFICAREA SISTEMELOR DISPERSE

Numim **sistem dispers** un amestec care rezultă din dispersarea unei sau câtorva specii moleculare, numite **solvit**; printre alte specii moleculare, numită **solvent**. În biologie, solventul de bază este apa.

Există câteva criterii de clasificare a sistemelor disperse.

1. După gradul de dispersare ($\Delta = 1/d$) (inversul diametrului particulei dispersate). Această clasificare presupune forma sferică a particulelor dispersate și nu poate fi aplicată în toate cazurile.

2. După numărul (n) atomilor cuprinși în particula dispersată.

3. După criteriul fazelor. Faza reprezintă o parte omogenă a unui sistem, mărginită de celelalte părți prin suprafețe, la nivelul cărora are loc o variație bruscă a proprietăților fizico-chimice. Zona de separație este numită de **interfață**. În funcție de tipul fazelor, sistemele disperse pot fi:

– **monofazice**: cuprind o singură fază, lipsite de discontinuități și sunt **omogene** (proprietăți identice în toate punctele sistemului);

– **polifazice-heterogene**: între părțile componente există suprafețe de separare (ceață, aerosoli, spumă, lichid și gaz).

Criteriile de clasificare și denumirea sistemelor disperse sunt reprezentate în tabelul ce urmează.

| Clasificarea | Soluții moleculare | Coloizi | Suspensii | Autor |
|--------------------------|--------------------|------------------------|-----------------|------------|
| După gradul de dispersie | $\Delta > 10^9$ | $10^7 < \Delta < 10^9$ | $\Delta < 10^7$ | Ostwald |
| După numărul atomilor | $n < 10^3$ | $10^3 < n < 10^9$ | $n > 10^9$ | Staudinger |
| După criteriul fazelor | monofazice | polifazice | | – |

Drept criteriu de clasificare poate servi și starea de agregare a solventului (solvitul poate fi gaz, lichid sau solid). Sistemele disperse pot fi:

– gazoase – substanța dispersantă este un gaz (amestecurile gazoase, vapori din aer, ceața);

– lichide – substanța dispersantă este un lichid (lichidele nemiscibile, gaze);

– solide – substanța dispersantă este un solid (unele aliaje).

Particulele din sistemele disperse pot fi vizualizate prin diferite metode de microscopie optică și electronică, în funcție de dimensiunile lor liniare (fig. 4.1).

Trebuie să menționăm că lichidele biologice au un comportament complex și proprietăți conjugate tuturor celor trei clase de dispersie. De exemplu, sângele este **soluție** pentru cristaloiți (Na, Cl, K), **coloid** (deoarece conține serumalbumine și globuline), **suspensie** (datorită elementelor figurate).

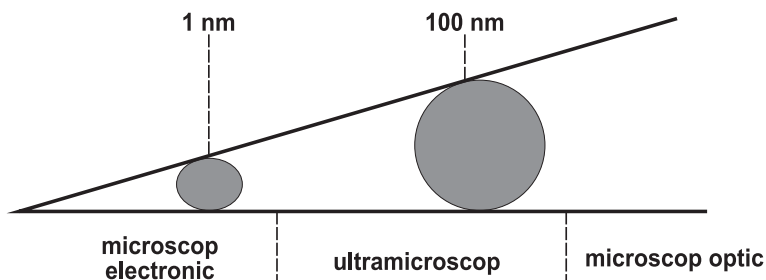


Fig. 4.1. Diametrul și vizibilitatea particulelor disperse.

4.2. CONCENTRAȚIA SOLUȚIILOR

Această caracteristică a soluțiilor poate fi exprimată în câteva moduri.

Concentrația ponderală reprezintă masa solvitului pe unitatea de volum de solvent. Se notează c^M și se exprimă în $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ sau în S.I. $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Deși este foarte comodă din punct de vedere practic, concentrația ponderală nu permite comparații utile între diferite tipuri de soluții, când numeroase proprietăți ale lor depind de numărul moleculelor existente în soluție.

Concentrația molară (molaritatea) reprezintă numărul de moli de solvit pe unitatea de volum de soluție, se notează C^M și se exprimă în $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ sau în S.I. $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$.

Remarcăm faptul că un mol se consideră cantitatea de substanță care conține un număr $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ de molecule. De exemplu, concentrația ponderală a glucozei $M = 180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ în sângele normal $c^M = 1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, ceea ce corespunde concentrației molare $C^M = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$, determinată din relația:

$$C^M = \frac{c^M}{M} = \frac{1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}}{180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}.$$

Concentrația molală reprezintă numărul molilor de solvit dizolvați într-o unitate de masă de solvent. Se notează C^m și se exprimă în $\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$. Deși oferă

multiple avantaje teoretice, această manieră de exprimare a concentrației în practică se utilizează foarte rar.

Concentrația osmotică reprezintă numărul osmolilor într-o unitate volumică de soluție, se notează C^0 și se exprimă în **osmoli** · l^{-1} . Un osmol conține N_A particule mobile din soluție, care pot fi: molecule, atomi, ioni sau agregatele lor.

În soluțiile neutre, numărul de osmoli coincide cu numărul de moli. Prin urmare:

$$C^0 = C^M \text{ osmoli} \cdot l^{-1}.$$

În cazul soluțiilor electrolitice, moleculele disociază în ioni și numărul osmolilor devine mai mare decât numărul moleculelor.

Mai frecvente sunt cazurile când disocierea moleculelor solvitului este parțială. **Gradul de disociere** α reprezintă raportul dintre numărul moleculelor disociate (n) și numărul total al moleculelor de solvit (n_0):

$$\alpha = \frac{n}{n_0} \leq 1.$$

Dacă este cunoscută concentrația molară a soluției electrolitice și $\alpha < 1$, numărul moleculelor disociate va fi αC^M , iar al celor rămase nedisociate va fi $(1 - \alpha) C^M$. Astfel, numărul total de particule libere în soluție va fi:

$$\nu \alpha C^M + (1 - \alpha) C^M.$$

Prin urmare:

$$C^0 = \nu \alpha C^M + (1 - \alpha) C^M = [\nu \alpha + (1 - \alpha)] C^M \Rightarrow [1 + \alpha(\nu - 1)] C^M,$$

unde: ν este numărul de ioni formați la disocierea unei molecule.

Expresia $1 + \alpha(\nu - 1)$ se notează prin **i** și se numește **coeficient de ionizare Van't Hoff**. În consecință:

$$C^0 = i C^M \text{ osmoli} \cdot l^{-1}.$$

Electroliții care în soluție apoasă disociază complet, cum ar fi CaCl_2 , se numesc **electroliți tari**, iar cei care disociază parțial, cum ar fi CH_3COOH , se numesc **electroliți slabi**.

Evident că în cazul când disociază toate moleculele de solvit ($\alpha = 1$) coeficientul de ionizare numeric este egal cu numărul de ioni formați la disocierea unei molecule ($i = \nu$). Relația dintre concentrația osmotică și cea molară revine:

$$C^0 = \nu C^M \text{ osmoli} \cdot l^{-1}.$$

Exemplu. Fie o soluție CaCl_2 (clorură de Ca) cu concentrația molară de $0,2 \text{ mol} \cdot l^{-1}$. Care va fi concentrația osmotică a acestei soluții, când $\alpha = 1$ și când $\alpha = 0,9$?

Molecula de CaCl_2 disociază în Ca^{++} și 2Cl^- ; $\nu = 3$

a) $\alpha = 1$

$$i = 1 + 1(3 - 1) = 3; \quad C^0 = iC^M = 3 \cdot 0,2 = 0,6 \text{ osmoli/l};$$

b) $\alpha = 0,9$

$$i = 1 + 0,9(3 - 1) = 2,8; \quad C^0 = 2,8 \cdot 0,2 = 0,56 \text{ osmoli/l}.$$

Concentrația ionică (ionaritatea) se notează prin C^I și se exprimă $\text{g} \cdot \text{ioni} \cdot l^{-1}$ sau $\text{moli} \cdot \text{ioni} \cdot l^{-1}$:

$$C^I = \nu C^M - \text{disociere } 100\%;$$

$$C^I = \alpha \nu C^M - \text{disociere } \alpha\%.$$

Concentrația echivalentă (normală). Un echivalent (E_q) reprezintă cantitatea de substanță care conține N_A sarcini electrice elementare. Concentrația echivalentă C^N reprezintă numărul de E_q de solvit la un litru de soluție.

Dacă un ion are o sarcină Z , $C^N = ZC^M$. De exemplu, concentrația echivalentă a cationilor dintr-o soluție de $10^{-3} \text{ mol} \cdot l^{-1}$ de CaCl_2 este:

$$C^N = 2 \cdot 10^{-3} E_q \cdot l^{-1} = 2 \text{ mE}_q \cdot l^{-1}.$$

Titrul – exprimă raportul dintre masa solvitului și masa soluției. Dacă unitățile sunt aceleași, titrul se exprimă în procente.

$$\tau = \frac{\text{masa de solvit}}{\text{masa de solvit} + \text{masa de solvent}} \cdot 100\%.$$

4.3. PROPRIETĂȚILE ELECTRICE ALE SOLUȚIILOR IONICE

Forțele de atracție care asigură coeziunea dintre atomi în cristale se supun **legii lui Coulomb**. În apă aceste forțe diminuează de 80 ori, ceea ce duce la disocierea moleculelor în ioni liberi.

În afara **gradului de disociere** α , definit anterior, pentru aprecierea proprietăților electrice ale soluțiilor au fost definite și următoarele mărimi:

• Tăria ionică a soluției (μ)

Această mărime reprezintă o valoare numerică care caracterizează gradul de proprietăți electrostatice ale soluției. Se definește prin relația:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum C_i^I z_i^2 \quad (1).$$

C_i^I – ionaritatea exprimată în **moli de ioni pe litru**;

Z_i – sarcina ionului i .

• **Activitatea de concentrație (A)**

În soluții reale, datorită interacțiunii dintre ioni, doar o fracțiune γ din concentrația totală de ioni poate participa liber la conducție. Activitatea de concentrație se exprimă prin relația:

$$A = \gamma C^M \quad (2),$$

unde: γ – coeficientul de activitate; C^M – concentrația molară.

Pentru tăria ionică foarte slabă $\mu < 0,001$; $\gamma = 1$.

Pentru $\mu > 0,1$; $\gamma < 1$.

• **Mobilitatea ionilor (U)**

În câmpul electric cu intensitatea E , asupra ionului cu sarcina q acționează forța $\vec{F} = q \vec{E}$ (3).

Mișcarea lui în soluție este frânată de vâscozitatea mediului. Forța de frânare, dată de legea lui Stokes, este valabilă pentru particule de formă sferică:

$$F = -6\pi\eta r v \quad (4),$$

unde: η – coeficientul de vâscozitate a soluției; r – raza ionului; v – viteza.

La egalarea acestor două forțe, după modul, mișcarea ionului devine uniformă, având viteza:

$$\vec{v} = \frac{q}{6\pi\eta r} \cdot \vec{E} \quad (5).$$

Prin definiție termenul $U = \frac{q}{6\pi\eta r}$ se consideră mobilitatea ionului. În consecință, $\vec{v} = U \cdot \vec{E}$ (6).

Din relația (6) rezultă că mobilitatea este viteza mișcării uniforme a ionului în soluție sub acțiunea unui câmp electric unitar ($E = 1 \text{ Vm}^{-1}$).

• **Numărul de transport (t)**

Determinând experimental mobilitatea ionilor pozitivi (U_+) și acelor negativi (U_-) pentru un electrolit, putem defini două raporturi:

$$1) t_+ = \frac{I_+}{I} = \frac{U_+}{U_+ + U_-}, \text{ numit numărul de transport al cationilor;}$$

$$2) t_- = \frac{I_-}{I} = \frac{U_-}{U_+ + U_-}, \text{ numit numărul de transport al anionilor,}$$

unde: I – intensitatea curentului total dintre electrozi; I_+ – fracțiunea de curent corespunzătoare cationilor; I_- – fracțiunea de curent corespunzătoare anionilor.

• **Conductivitatea unei soluții ionice apoase (χ)**

Soluțiile electrolitice sunt buni conductori de curent electric. Rezistența electrică a unei soluții electrolitice cu rezistivitatea ρ se determină din relația:

$$R = \rho \frac{l}{S} (\Omega); \quad \rho = \frac{RS}{l} \quad (7),$$

unde: S – suprafața electrozilor în m^2 ; l – distanța dintre electrozi în m ; ρ – rezistivitatea în $\Omega \cdot \text{m}$.

Conductivitatea electrică este mărimea inversă a rezistivității și se exprimă prin relația:

$$\chi = \frac{1}{\rho} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}; \quad \chi = \frac{l}{RS} \quad (8).$$

Se mai folosește și unitatea **Siemens** $\cdot \text{m}^{-1}$.

Conductivitatea soluției poate fi calculată din *relația lui Kohlrausch*, cunoscând U_+ și U_- (pentru un electrolit binar, două categorii de ioni) cu valența Z (numărul de legături dintre anioni și cationi). Ea are expresia:

$$\chi = FC^M Z\alpha(U_+ + U_-) \quad (9),$$

unde: F – numărul lui Faraday = 96 500 C/mol; C^M – concentrația molară a electrolitului în $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$.

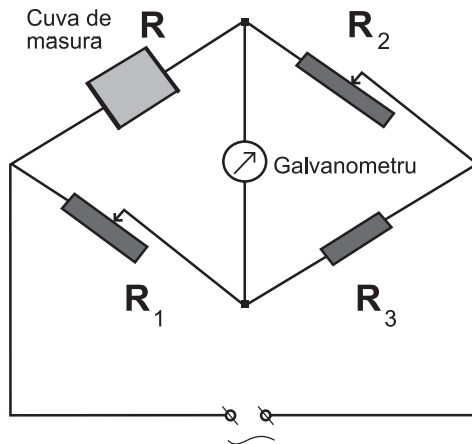


Fig. 4.2.

Conductivitatea soluțiilor poate fi determinată și experimental, utilizând schema electrică (fig. 4.2), numită *puntea lui Kohlrausch*, unde: R – rezistența soluției din cuva de măsurare; R_1 și R_2 – rezistențe variabile; R_3 – rezistență cunoscută.

Schema este alimentată cu curent electric alternativ de 1000 Hz, pentru a evita polarizarea electrozilor.

Variind mărimea rezistențelor R_1 și R_2 , puntea se echilibrează, galvanometrul semnalizează lipsa curentului.

În aceste condiții are loc relația: $\frac{R}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$, de unde $R = R_1 \frac{R_2}{R_3}$ (10).

Cunoscând rezistența R , se determină conductivitatea soluției:

$$\chi = \frac{l}{RS} \quad (11),$$

unde: l – distanța dintre electrozii din cuva de măsurare; S – suprafața electrozilor.

Raportul l/s este numit **constanta cuvei**.

EXERCITII

1. Un amestec s-a format din 10 cm³ soluție de glucoză 10% și 60 cm³ soluție de glucoză 25%. Care este concentrația ponderală în g/l a amestecului? (Soluțiile sunt apoase și se consideră diluate.)

Răspuns: $c^M = 228,6$ g/l.

2. La o soluție de glucoză 7g/l cu volumul de 500cm³ s-au adăugat 2 litri de apă. Determinați concentrația ponderală a soluției noi.

Răspuns: $c^M = 1,4$ g/l.

3. În 500 cm³ de apă au fost dizolvate 35,5 g de Na₂SO₄. Determinați C^M , C^I , C^N , fiind cunoscute masele molare: Na = 23 g/mol; S = 32 g/mol; O = 16 g/mol.

Răspuns: $C^M = 0,5$ mol/l; $C^I = 1,5$ moli de ioni/l; $C^N = 1$ mol \times E_q/l.

4. O soluție de clorură de sodiu a fost preparată prin dizolvarea 4,5 g de NaCl în 500 cm³ de apă pură. Aflați ionicitatea și osmolaritatea soluției.

Răspuns: $C^I = 0,308$ g · ioni/l; $C^\circ = 0,308$ osmoli/l.

5. 24 g de electrolit slab CH₃COOH ($M = 60$ g/mol) s-au dizolvat într-un litru de apă distilată. Determinați osmolaritatea soluției, dacă coeficientul de disociere (α) este egal cu 0,1.

Răspuns: $C^\circ = 0,44$ osmoli/l.

6. O soluție conține 20 $mEq\ g/l$ ioni de Fe^{+++} . Determinați în g/l concentrația ponderală a fierului în această soluție. Masa molară a fierului (M) este de 56 g/mol .

$$Răspuns: c^M = 37,4 \cdot 10^{-2} g/l.$$

7. O soluție de $CaCl_2$ are o normalitate de 250 $mEq\ g/l$ a ionilor Ca^{++} . Determinați în g/l concentrația ponderală a clorurii de calciu. ($Ca = 40\ g/mol$; $Cl = 35,5\ g/mol$).

$$Răspuns: c^M = 13,88\ g/l.$$

8. Un litru de soluție de glucoză cu concentrația $C^M = 2\ mol/l$ a fost preparat prin amestecarea a două soluții cu concentrațiile $C_1^M = 6\ mol/l$ și $C_2^M = 1\ mol/l$. Calculați volumul fiecărei soluții utilizate pentru realizarea preparatului.

$$Răspuns: V_1 = 0,2\ l; V_2 = 0,8\ l.$$

9. Calculați volumul (V) de apă care trebuie adăugat la 1 l de soluție de glucoză cu concentrația de 0,2 mol/l , pentru a obține o soluție cu concentrația de 0,03 mol/l .

$$Răspuns: V \approx 5,67\ l.$$

10. Care este tăria ionică a unei soluții apoase 0,025 M de Na_2SO_4 ?

$$Răspuns: \mu = 0,075.$$

11. Care este tăria ionică a unei soluții constituite dintr-un litru de $NaCl$ 0,1 M și 0,5 l de Na_2SO_4 0,01 M ?

$$Răspuns: \mu = 0,077.$$

12. Care este tăria ionică a unei soluții constituite din 0,02 moli de K_2SO_4 și 0,01 moli de Na_2SO_4 în 3 litri de apă?

$$Răspuns: \mu = 0,03.$$

13. Să admitem că un electrolit AH disociază sub forma $A^- + H^+$. Numărul de transport al H^+ este $t^+ = 0,812$, iar viteza ionilor H^+ într-un câmp electric unitar este de 32,5 $\mu m/s$. Determinați mobilitatea ionilor A^- .

$$Răspuns: U_A^- = 7,524\ \mu m/s.$$

14. Concentrația ponderală a unei soluții de uree este de 24 g l^{-1} . Calculați concentrația molară.

$$\text{Răspuns: } C^M = 0,40 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$$

15. Într-un litru de apă au disociat 10 g de iodură de potasiu (KI) ($M = 176 \text{ g mol}^{-1}$). Determinați succesiv: a) C^M , considerând soluția diluată; b) T (titrul) soluției, exprimat în procente.

$$\text{Răspuns: } C^M = 0,06024 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}; T \approx 1\%$$

16. În 990 g de apă au fost dizolvate 30 g de uree ($M = 60 \text{ g/mol}^{-1}$). Considerând că densitatea relativă a ureei în raport cu apa este 1,323, determinați concentrația osmotică a soluției.

$$\text{Răspuns: } C^\circ = 0,49 \text{ osmol} \cdot \text{l}^{-1}$$

17. Într-un vas umplut cu soluție de CaCl (disociere completă) au fost introduși doi electrozi cu suprafața (S) de 1 cm^2 la distanța (l) de 10 cm unul de altul. Rezistența soluției dintre electrozi (R) este de $4 \text{ k}\Omega$. Cunoscând mobilitatea Ca^{++} și Cl^- ($U_+ = 50$ și $U_- = 70$ în S.I.), determinați concentrația molară a soluției.

$$\text{Răspuns: } C^M = 11 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$$

5. NOȚIUNI DE BIOMECHANICĂ A FLUIDELOR

5.1. STATICA FLUIDELOR. UNITĂȚI DE PRESIUNE

Fluidelor le aparțin gazele și lichidele. Convențional, se diferențiază **fluide perfecte** (ideale) și **fluide reale**.

Este considerat perfect fluidul în care forțele de acțiune dintre molecule sunt nule, fiind lipsit de vâscozitate și, la un volum constant, toate modificările au loc fără consum de energie.

Spre deosebire de corpurile solide fluidele constau din molecule mobile și sunt lipsite de formă proprie.

În **stare gazoasă** moleculele fluidului sunt libere și ocupă tot spațiul incintei în care se află. Gazele sunt comprimabile și elastice.

Cele considerate perfecte se supun legii lui Mendeleev–Clapeyron.

$$P V = \nu R T \quad (1),$$

unde: P – presiunea în pascali (Pa); V – volumul în m³; T – temperatura absolută în °K; ν – numărul molilor de gaz; R – constanta universală a gazelor.

În **stare lichidă** fluidul capătă forma vasului în care se conține. Lichidul în vase are suprafața liberă de separație cu aerul: plană și orizontală. Practic, lichidele pot fi considerate incompressibile.

Presiunea statică a unui fluid, conform definiției generale a presiunii (fig. 5.1), reprezintă forța pe care el o exercită pe o unitate de suprafață:

$$P = \frac{F}{S} \quad (2),$$

unde: P – în pascali (Pa); F – în newtoni (N); S – în m².

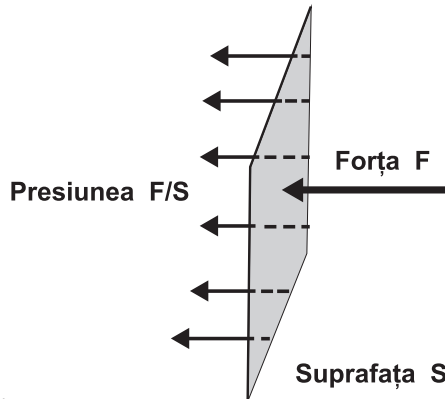


Fig. 5.1.

Conform **legii lui Pascal**, în fluide, pentru același nivel, presiunea se transmite în toate direcțiile la fel.

Aplicațiile legii lui Pascal sunt numeroase. Dintre ele amintim **presa hidraulică**, al cărei principiu de funcționare presupune utilizarea unui piston de suprafață mică (S_1), prin intermediul căruia se exercită o forță mică (F_1) direct asupra unui lichid (fig. 5.2).

Conform legii lui Pascal, presiunea $p = F_1/S_1$ este transmisă prin tubul de legătură unui cilindru mai larg, prevăzut cu un piston de suprafață mai mare (S_2). Rezultă:

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \Rightarrow F_2 = \frac{S_2}{S_1} \cdot F_1 \quad (3).$$

Așadar, presa hidraulică este un dispozitiv de amplificare a forței, cu un factor de multiplicare egal cu raportul dintre suprafețele pistoanelor. Presa hidraulică se folosește la scaunele din cabinetele stomatologice, precum și la frânele hidraulice, pistoanele pe care se apasă corespunzând ramurii de secțiune mică.

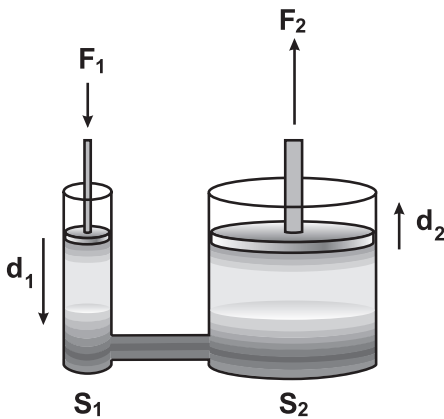


Fig 5.2. Schema unei prese hidraulice.

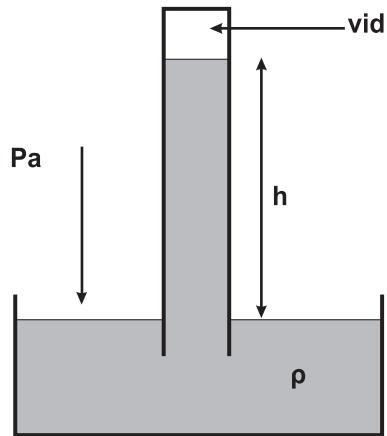


Fig. 5.3.

Presiunea atmosferică este produsă de coloana de aer de deasupra pământului. Pentru prima dată, presiunea atmosferică a fost determinată de fizicianul italian **Evangelista Torricelli** (1643). Dispozitivul utilizat în acest scop este reprezentat în figura 5.3.

Un tub de sticlă, astupat la un capăt, se umple cu mercur, apoi, ținând astupat celălalt capăt, se răstoarnă într-un vas cu mercur. Nivelul mercurului în tub coboară până la o anumită înălțime, în raport cu nivelul mercurului în vas.

Aceasta are loc când presiunea creată de coloana de mercur este echilibrată de presiunea atmosferică. La nivelul mării, coloana mercurului în tub este de 760 mm.

$P = 760 \text{ mm Hg} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ se consideră presiune atmosferică normală.

Unitățile de presiune utilizate în diverse domenii sunt diferite. Principalele dintre ele, împreună cu coeficienții lor de conversie, sunt clasificate în tabelul ce urmează:

| Unitățile de presiune | Pascal | Bar | $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ | atmosfera | mm Hg |
|--|--------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Pascal | 1 | 10^{-5} | $1,02 \cdot 10^{-5}$ | $0,987 \cdot 10^{-5}$ | $0,75 \cdot 10^{-2}$ |
| Bar | 10^5 | 1 | 1,02 | 0,987 | 750 |
| $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ | $0,980 \cdot 10^5$ | 0,980 | 1 | 0,968 | 735 |
| atmosfera | $1,013 \cdot 10^5$ | 1,013 | 1,033 | 1 | 760 |
| mm Hg | 133,3 | $0,133 \cdot 10^{-2}$ | $1,36 \cdot 10^{-3}$ | $1,315 \cdot 10^{-3}$ | 1 |

Trebuie de menționat că unitatea $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ reprezintă o abatere de la definiția presiunii (forța este înlocuită cu masa), însă este considerată foarte comodă, din punct de vedere practic, în unele domenii medicale (de exemplu, în traumatologie).

Presiunea într-un anumit punct dintr-un lichid în echilibru, cu suprafața deschisă, depinde numai de înălțimea coloanei de lichid deasupra punctului h și de densitatea lichidului (ρ):

$$P = \rho gh, \text{ unde: } g - \text{acelerația gravitațională.}$$

În două puncte dintr-un lichid, situate la aceeași înălțime, presiunile sunt egale.

Diferența de presiuni $P_2 - P_1$ dintre două puncte din același lichid este egală cu produsul dintre diferența înălțimilor la care se află punctele $h_2 - h_1$, densitatea lichidului (ρ) și accelerația căderii libere (g), luate cu semn opus (fig. 5.4):

$$P_2 - P_1 = -\rho g(h_2 - h_1) \quad (4).$$

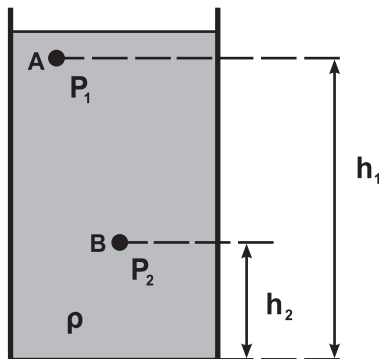


Fig. 5.4.

Principiul lui Arhimede

Enunțul acestui principiu: asupra oricărui corp, scufundat complet într-un fluid, acționează o forță orientată de jos în sus, egală cu greutatea fluidului dezlucuit de acest corp:

$$F = V_c \rho_f g \quad (5).$$

Teorema lui Arhimede se aplică și asupra corpurilor plutitoare, greutatea lichidului dezlucuit de partea scufundată, fiind egală cu greutatea corpului plutitor: V_c – volumul corpului (sau volumul părții scufundate); ρ_f – densitatea fluidului; g – accelerația gravitațională.

În figura 5.5 este ilustrat principiul lui Arhimede în cazul scufundării unui corp în apă.

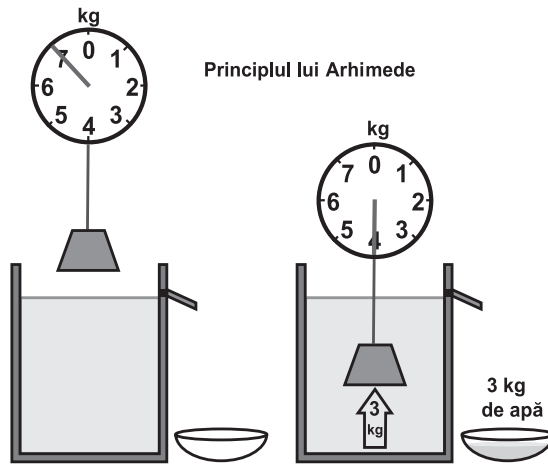


Fig. 5.5.

5.2. DINAMICA FLUIDELOR

Ecuția de continuitate

Pentru simplificare, vom considera fluidele ca fiind incompresibile (densitatea ρ este aceeași în orice punct), iar curgerea – în regim staționar (viteza de curgere într-un anumit punct nu variază în timp).

În aceste condiții, viteza de curgere a fluidului printr-un tub cu secțiune variată, situat orizontal (fig. 5.6), variază în așa mod, încât produsul dintre viteza (v) și aria secțiunii transversale (S) în orice loc al tubului este același:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_n v_n$$

$$S \cdot v = \text{const.} \quad (6).$$

Relația (6) reprezintă expresia matematică a **ecuației de continuitate**.

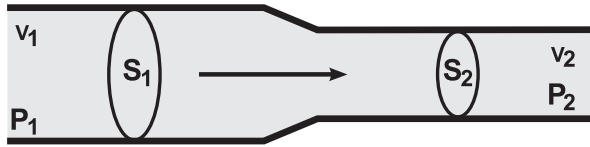


Fig. 5.6.

Ecuația lui Bernoulli

Vom cerceta curgerea staționară a unui lichid perfect printr-un tub cu secțiunea variată, reprezentat în figura 5.7.

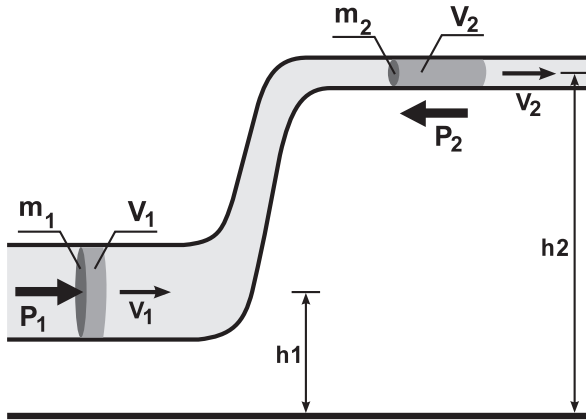


Fig. 5.7.

Conform legii conservării energiei în mecanică, energia totală a unei mase m de lichid în orice loc al tubului trebuie să fie aceeași:

$$P_1V + \frac{m v_1^2}{2} + mgh_1 = P_2V + \frac{m v_2^2}{2} + mgh_2 \quad (7).$$

unde: V – volumul masei de fluid; P – presiunea statică într-un anumit loc dat al tubului.

Împărțind relația (7) la volum, obținem:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 \quad (8).$$

Din relația (8) rezultă că în orice loc al tubului are loc relația:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const.} \quad (9),$$

unde: P – presiunea statică în punctul dat; ρ – densitatea fluidului; v – viteza de curgere; h – înălțimea punctului în curentul de fluid.

Această relație reprezintă presiunea totală a lichidului și se numește **ecuația lui Bernoulli**.

$\frac{1}{2} \rho v^2$ se numește **presiune dinamică**; ρgh – **presiune hidrostatică**.

În cazul în care tubul prin care curge lichidul este situat orizontal ($h = \text{const.}$), ecuația devine:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.} \quad (10).$$

Presiunile statică, dinamică și totală pot fi măsurate ușor cu un dispozitiv simplu, numit **cateterul dublu al lui Pitto**.

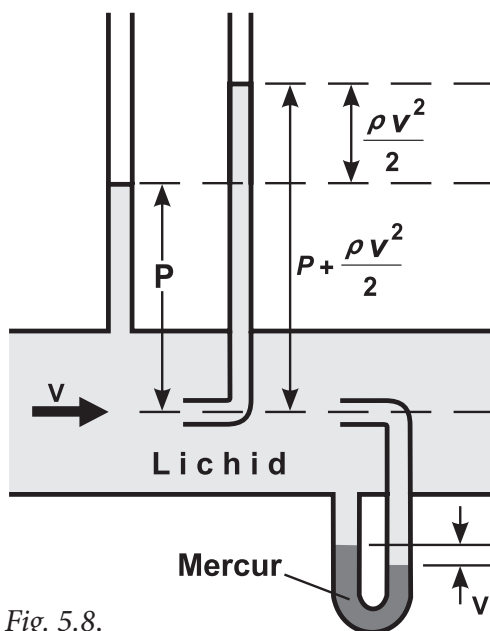


Fig. 5.8.

Tubul manometric cu secțiunea paralelă direcției de curgere măsoară presiunea statică, iar cel cu secțiunea perpendiculară pe direcția curgerii – presiunea totală. După cum se observă din figura 5.8, diferența dintre aceste presiuni este presiunea dinamică.

Acest dispozitiv, înzestrat cu un manometru de mercur, este utilizat deseori și pentru determinarea vitezei de curgere a fluidului, scara manometrului fiind gradată direct în unități de viteză.

Legea lui Bernoulli are drept consecință faptul că în porțiunile înguste ale arborelui circulator, unde viteza de circulație este mai mare, presiunea laterală este minimă (fig. 5.9). De aceea, în cazul de îngustare prin ateroscleroză, fenomenul duce la accentuarea închiderii lumenului vascular în locul obstrucției.

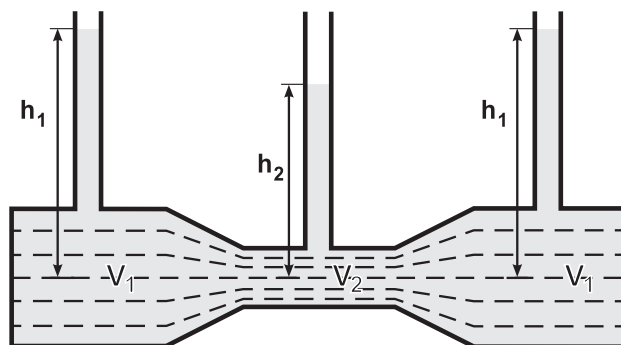


Fig. 5.9.

5.3. FLUIDE REALE. VÂSCOZITATEA

În fluidele reale, forțele de atracție intermoleculare se opun deplasării relative a moleculelor vecine, determinând apariția forței de frecare internă, numită **vâscozitate**.

Dacă în timpul curgerii, straturile de fluid rămân paralele, curgerea se numește **laminară**. Pentru regimul de curgere laminară, forța de vâscozitate este dată de **relația lui Newton**:

$$F = \eta S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta x} \quad (11),$$

unde: S – aria comună a celor două straturi vecine; ΔV – diferența de viteză a straturilor; Δx – distanța dintre straturi; $\frac{\Delta V}{\Delta x}$ – gradientul de viteză; η – coeficient de vâscozitate dinamică a fluidului.

Unitatea de vâscozitate în **S.I.** este **pascal·secundă (Pa·s)**, care este de 10 ori mai mare decât unitatea în sistemul tolerat C.G.S. numită **poise (P)**. În practica medicală, se folosește submultiplul poiseului, numit **centipoise (1 cP = 0,01 P)**.

Coeficientul de vâscozitate depinde de natura fluidului și de temperatură (scade odată cu creșterea temperaturii). Valorile coeficientului de vâscozitate a unor lichide de interes biologic sunt expuse în tabelul ce urmează.

| Lichidul | Temperatura (°C) | Vâscozitatea (poise) |
|-----------|------------------|----------------------|
| Apă | 20 | 0,01 |
| Glicerină | 20 | 8,3 |
| Mercur | 20 | 0,0155 |
| Aer | 20 | 0,00018 |
| Sânge | 37 | 0,04 |
| Urină | 20 | 0,0102–0,0114 |

Lichidele pentru care este valabilă relația (12) se numesc **lichide newtoniene**. Majoritatea lichidelor de interes medical (apa, serul sanguin, lichidul cefalorahidian, urina) sunt **lichide newtoniene**. Spre deosebire de acestea, alte lichide, cum ar fi soluțiile macromoleculare (sângele), nu se supun relației (12). Din acest motiv, ele se numesc **lichide nenewtoniene**.

Legea lui Poiseuille

În general, la curgerea unui lichid real printr-un tub cilindric situat orizontal, în regim laminar, se manifestă **legea lui Poiseuille**, matematic exprimată prin relația:

$$D = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (12),$$

unde: D – volumul de lichid transportat prin secțiunea tubului într-o unitate de timp (debitul); r – raza tubului; $\frac{\Delta P}{\Delta l}$ – gradientul de presiune pe segmentul Δl al tubului.

Între legea lui Poiseuille, exprimată prin varianta:

$$D = \frac{\Delta p}{\frac{8\eta\Delta l}{\pi r^4}} \quad (13),$$

și legea lui Ohm pentru o porțiune de circuit al curentului electric continuu:

$$I = \frac{U}{R} \quad (14)$$

există o evidentă analogie, din care rezultă că rezistența ce se opune curgerii fluidului prin tuburi cilindrice este determinată de relația:

$$R = \frac{8\eta\Delta l}{\pi r^4} \quad (15).$$

În cazul unui sistem de conducte unite în serie, rezistența totală a curgerii este:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (16).$$

În cazul unui sistem de conducte unite în paralel:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (17).$$

Legea lui Stokes

Vâscozitatea unui fluid se manifestă nu doar la curgerea lui prin țevi, ci și la mișcarea oricărui corp prin acest fluid. Numai pentru corpuri sau particule de formă sferică, care se mișcă uniform prin fluid ($v = \text{const.}$), este valabilă **legea lui**

Sokes, cu următorul enunț: forța de frânare (F), opusă corpului, este proporțională cu coeficientul de vâscozitate (η) al fluidului, raza corpului (r) și viteza corpului (v):

$$F = 6\pi\eta r v \quad (18).$$

Se știe că o sferă în cădere liberă într-un fluid vâscos atinge o viteză limită (v_{lim}), pentru care forța de frânare produsă de vâscozitate plus forța arhimedică egalează greutatea sferei. Dacă ρ este densitatea sferei, iar ρ' – densitatea fluidului, putem scrie:

$$\begin{aligned} 4\pi r^3 \rho' g / 3 + 6\pi \eta r v_{\text{lim}} &= 4\pi r^3 \rho g / 3 \\ v_{\text{lim}} &= 2r^2 g (\rho - \rho') / 9\eta \quad (19). \end{aligned}$$

Măsurând viteza limită, se poate calcula valoarea coeficientului de vâscozitate a fluidului.

O relație de acest tip, cu un coeficient numeric diferit, este valabilă și pentru corpurile nesferice. De exemplu, în biologie, pentru viteza limită se folosește termenul **viteza de sedimentare**. Experiențele care implică fenomenul de sedimentare pot da informații utile privind particulele foarte mici (de exemplu, hematiile).

Hematocritul

Volumul elementelor figurate ale sângelui, exprimat în procente se numește **hematocrit**. La omul sănătos, el are valoarea cuprinsă între 45 și 50%. În figura 5.10 este redată dependența coeficientului relativ de vâscozitate a sângelui de hematocrit (H).

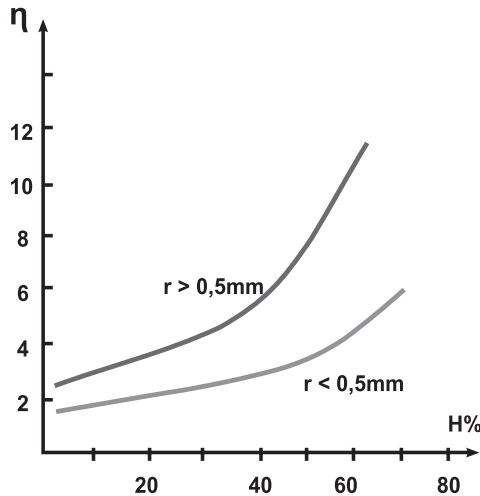


Fig. 5.10.

Din figura 5.10 rezultă și un fenomen interesant: valorile coeficientului relativ de vâscozitate depind de raza capilarului utilizat. Acest fenomen este cunoscut sub numele de **fenomenul Fahraeus–Lindqvist**, fiind descris de relația matematică:

$$\eta_r = \frac{\eta_\infty}{\left(1 + \frac{d}{r}\right)^2} \quad (20),$$

unde: η_∞ – coeficientul de vâscozitate măsurat cu un vâscozimetru, cu raza capilarului mare; d – diametrul eritrocitelor; r – raza capilarului.

Din această relație rezultă: **coeficientul de vâscozitate relativă a sângelui circulant în capilare** (care au raza de circa $2,5 \mu\text{m}$) **are valoare minimă, ceea ce minimalizează și lucrul mecanic efectuat de cord la pomparea sângelui prin arborele capilar al sistemului vascular.**

Două regimuri de curgere. Numărul lui Reynolds

În cazul unui fluid vâscos care curge printr-un tub, modul de curgere depinde de vâscozitatea și densitatea fluidului, de viteza de curgere și de diametrul vasului.

Curgere laminară (*lamina* – foaie subțire): diferite straturi moleculare curg în aceeași direcție (sunt paralele între ele), fără a se amesteca. Viteza de curgere scade din interior (viteza maximă) spre marginile peretelui (unde viteza este nulă).

Curgere turbulentă: traiectoriile particulelor sunt neregulate, se produc amestecuri de substanța între diferite zone; în interiorul fluidului se formează curenți circulari locali, distribuiți haotic, care se numesc *vârtejuri*. Acestea produc o creștere considerabilă a rezistenței la curgere. Particulele pot avea viteze mari și în apropierea marginilor peretelui.

Numărul lui Reynolds: $Re = \rho v \frac{d}{\eta} \quad (21),$

unde: ρ – densitatea fluidului; v – viteza medie de curgere; d – diametrul vasului; η – vâscozitatea fluidului.

Curgerea este **laminară** dacă $Re < 2000$ și devine **turbulentă** dacă $Re > 3000$. În intervalul $2000 < Re < 3000$ există un **regim de tranziție**, curgerea este **instabilă** și poate trece ușor de la un regim la altul (fig. 5.11).

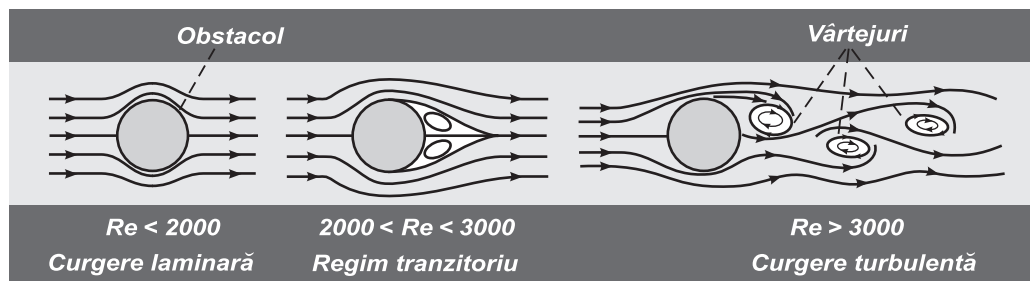


Fig. 5.11.

5.4. ELASTICITATEA PERETELUI VASCULAR

Structura și elasticitatea pereților vaselor sanguine

Prin elasticitate se înțelege proprietatea unui corp de a-și modifica dimensiunile în urma aplicării unei forțe și de a reveni la starea inițială după înlăturarea forței.

În cazul corpurilor elastice omogene are loc **legea lui Hooke**, conform căreia alungirea relativă $\frac{\Delta l}{l}$ este proporțională cu tensiunea $\frac{F}{S}$:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} \quad (22),$$

unde : Δl – alungirea; l – lungimea inițială a corpului; E – modulul lui Young și este o constantă de material; F – forța care produce alungirea, iar S – aria secțiunii transversale a corpului.

Modulul de elasticitate al lui Young reprezintă tensiunea care ar produce o alungire de 100% ($\Delta l = l$).

Legea lui Hooke este valabilă numai în zona deformării elastice (fig. 5.12).

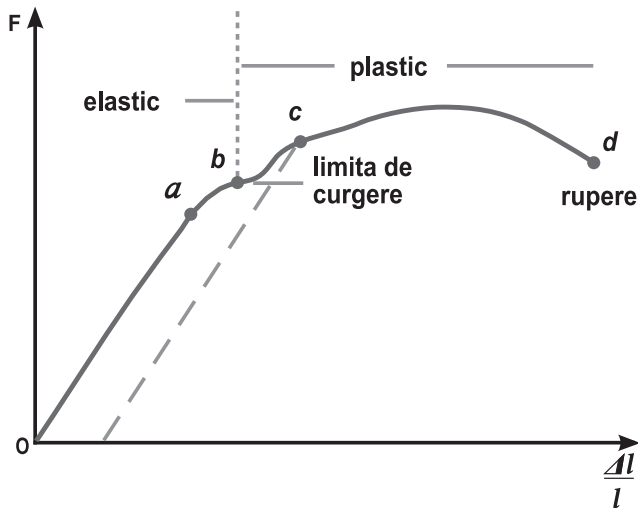


Fig. 5.12. Diagrama forță-alungire:
oa – deformarea elastică; **ab** – deformarea plastică;
b – limita de curgere; **d** – punctul de rupere.

Pentru forțe mai mari, deformarea devine plastică; corpul nu-și recapătă forma inițială la dispariția forței.

Din punct de vedere structural, pereții vaselor sanguine sunt constituiți din patru tipuri de țesuturi.

1. Endoteliu, format dintr-un strat de celule turtite, care căpтуșește interiorul peretelui, conferindu-i un caracter neted. Trebuie de menționat că endoteliul posedă o permeabilitate selectivă pentru diferite substanțe.

2. Fibre de elastină cu modulul de elasticitate $3 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Ele sunt foarte ușor extensibile și creează o tensiune elastică în peretele vasului, conferindu-i acestuia o rezistență minimă la distensia produsă de presiunea sanguină.

3. Fibre de colagen cu modulul de elasticitate $10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, care sunt mult mai rezistente la întinderi decât fibrele de elastină și conferă vasului sanguin rezistență la presiuni mari. În plus, fibrele de colagen au o structură pliată, astfel ele nu intervin decât după o anumită alungire (când buclele se desfac).

4. Fibre musculare netede, care predomină pe măsură ce diametrul arterial se micșorează, ajungând cea mai mare dezvoltare la nivelul arteriolelor. Fibrele musculare netede realizează o tensiune activă controlată fiziologic. Con tracția lor modifică raza vaselor și implicit debitul sângelui prin acestea.

Nefiind corp omogen, elasticitatea peretelui vascular nu se supune legii lui Hooke. Dependența tensiunii din peretele vasului de alungire, așa-numita *curbă tensiune–extensie*, nu este liniară (fig. 5.13).

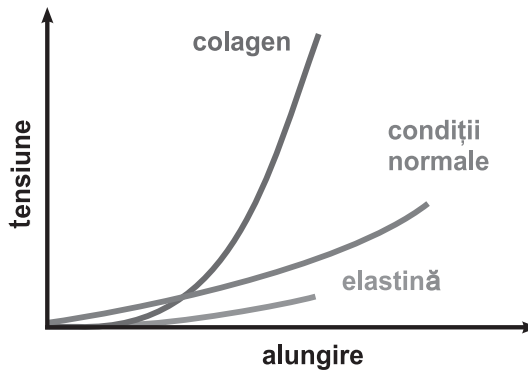


Fig. 5.13. Diagrama tensiune–alungire.

Modulul lui Young nu este constant, ci crește odată cu mărirea presiunii arteriale. Elasticitatea arterială joacă un rol deosebit de important în reologia sângelui, deoarece nu numai că transformă regimul intermitent de propulsare a masei sanguine în regim continuu de curgere, dar și concomitent, mărește debitul sângelui prin vase.

O experiență clasică, efectuată de Marey, a pus în evidență această diferență. A considerat un tub de sticlă care se bifurca, una dintre ramuri fiind din sticlă, iar cealaltă din cauciuc, ambele ramuri având același diametru (fig. 5.14). Prin capătul

tubului a trimis un curent de apă întrerupt ritmic. A observat că în timp ce curgerea era intermitentă în ramura de sticlă, deoarece la fiecare oprire de debit, presiunea atmosferică se opunea curgerii, în ramura de cauciuc, curgerea era continuă, însă cu o viteză mai mică. Masurând volumele de lichid scurse prin cele două ramuri în intervale egale de timp, a constatat că mai mult lichid s-a scurs prin tubul elastic, decât prin cel de sticlă, deși diametrele acestora erau egale.

Acest fenomen se explică prin elasticitatea tubului de cauciuc. Presiunea lichidului care vine dintr-un rezervor cu debit constant acționează nu numai asupra coloanei de lichid din tub, împingând-o înainte, dar și asupra pereților elastici ai tubului, cărora le imprimă o deformare elastică.

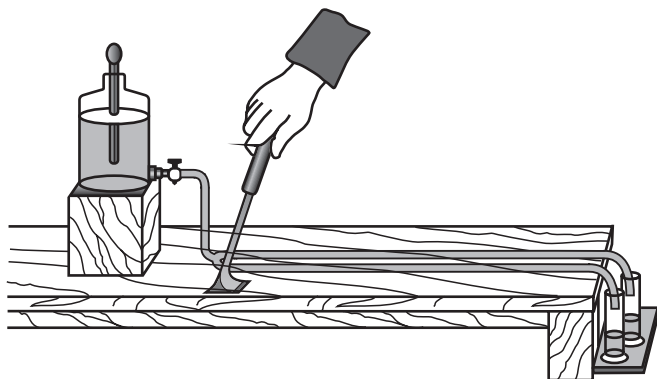


Fig. 5.14.

Tubul elastic deformat revine apoi la forma inițială, dezvoltând o forță elastică proporțională cu deformația, astfel lichidul continuând să curgă din spațiul suplimentar cu care tubul și-a mărit diametrul prin deformarea elastică. Așadar, în tubul elastic, lichidul curge continuu, cu o viteză mai mică, dar cu un volum mai mare decât în tubul de sticlă.

Acest lucru are o importanță deosebită în curgerea sângelui în regimul pulsatoriu impus de inimă prin vasele elastice care înmagazinează energie potențială în timpul sistolei, asigurând un flux mai mare de sânge decât dacă vasele ar avea pereți rigizi.

EXERCIȚII

1. Determinați presiunea pe care o exercită un om cu masa de 80 kg asupra podelei, dacă tălpile pantofilor au aria egală cu 400 cm².

Răspuns: 19,6 kPa.

2. Determinați presiunea exercitată de un cub de aluminiu cu latura de 0,2 m asupra unui suport orizontal (densitatea aluminiului – $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Răspuns: $5,4 \cdot 10^3 \text{ Pa}$.

3. De câte ori se va mări forța lui Arhimede asupra unui corp la transferarea lui din ulei cu densitatea $\rho_u = 900 \text{ kg/m}^3$, în acid sulfuric cu densitatea $\rho_a = 1800 \text{ kg/m}^3$?

Răspuns: de 2 ori.

4. Presiunea în anvelopa unui camion la temperatura de 7°C este de $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Cu cât va crește presiunea, dacă la mișcarea camionului temperatura aerului din anvelopă devine egală cu 27°C ?

Răspuns: cu $0,286 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

5. Viteza de curgere a apei în una din secțiunile unui tub situat orizontal este de 5 cm/s. Determinați viteza de curgere în acea parte a tubului, care are diametrul de trei ori mai mic.

Răspuns: $0,54 \text{ ms}^{-1}$.

6. În partea largă a unui tub orizontal viteza de curgere a apei este de 60 cm/s. Determinați viteza de curgere în partea îngustă, dacă diferența presiunilor statice, din segmentele menționate, este $\Delta P = 1,33 \text{ kPa}$.

Răspuns: $\sim 1,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

7. Cu ajutorul cateterului dublu al lui Pitto s-a constatat că într-un lichid curgător presiunea totală (P_t) este de 13,3 kPa, iar presiunea statică (P_s) – de 2,66 kPa. Cunoscând că densitatea lichidului (ρ) este de 820 kg/m^3 , determinați viteza de curgere a lui.

Răspuns: $\sim 5,1 \text{ ms}^{-1}$.

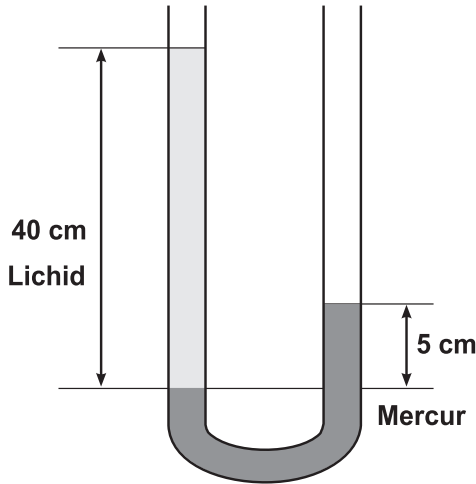
8. Lichidul dintr-un vas larg curge printr-o gaură mică în partea de jos. Determinați viteza de curgere în momentul când înălțimea (h) lichidului din vas este de 1m.

Răspuns: $\sim 4,43 \text{ ms}^{-1}$.

9. Prin capilarul unui vâscozimetrului, apa a curs în 60 s, iar soluția, cu densitatea de 3 ori mai mare decât a apei, a curs în 180 s. Vâscozitatea apei (η_0) este de $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Determinați vâscozitatea soluției.

Răspuns: $9 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

10. Un tub de forma U conține mercur ($\rho_m = 13,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) și un alt lichid. Suprafețele libere ale lichidelor s-au stabilit respectiv la 5 cm și 40 cm de la suprafața lor de separație. Calculați densitatea celui de al doilea lichid.



Răspuns: $1,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

11. Un corp format dintr-un aliaj de aur și cupru are masa de 1 kg. La introducerea lui în apă, greutatea aparentă este de 9,22 N. Sunt date: $\rho_{\text{Cu}} = 9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{Au}} = 2 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\rho_{\text{apă}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$. Determinați volumul aurului.

Răspuns: $V_{\text{Au}} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$.

12. Cunoscând densitatea apei ($\rho_a = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) și densitatea gheții ($\rho_g = 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), determinați raportul dintre volumul unui aisberg situat deasupra apei și volumul lui total (V_t).

Răspuns: 10^{-1} .

6. ELEMENTE DE HEMODINAMICĂ

Hemodinamica are ca obiect de studiu fenomenele fizice ale circulației sanguine (mecanica inimii și hidrodinamica curgerii sângelui prin vase elastice), aparatele, modelele, precum și dispozitivele experimentale folosite în acest scop. Studiul circulației sanguine folosește modele mecanice datorită numeroaselor analogii care există între funcționarea inimii și cea a unei pompe, între artere și tuburile elastice etc.

6.1. ROLUL DE POMPĂ AL INIMII

Inima este un organ cavitărilor muscular, care pompează sânge (lichid newtonian) în tot organismul prin contracții ritmice (datorită ciclului cardiac) în vasele de sânge de diametre diferite, având pereți nerigizi și parțial elastici. Inima efectuează aproximativ 60–100 bătăi/minut și 100 000 bătăi/zi. Bătăile inimii sunt accelerate de activitatea musculară și de temperatura mai ridicată a corpului.

În cord, proprietatea de automatism în apariția potențialului de acțiune este asigurată de structurile specifice ale miocardului, și anume de **celulele pacemaker**. În aceste celule, excitația apare spontan și ele formează nodulul sino-atrial al inimii, numit **conductorul ritmului cardiac**.

Aceste structuri au dimensiuni relativ mici și sunt strict localizate. În cordul animalelor homeoterme, celulele pacemaker sunt localizate în peretele atriului drept, iar în cordul de broască – în sinusul venos.

De la acest nodul, excitația se transmite spre miocardul lucrător al atriilor și apoi ventriculelor, prin noduli și fascicule, care formează împreună sistemul **excito-conductor** al inimii. Celulele pacemaker sunt unite între ele prin joncțiuni de tip „gap”, ceea ce asigură o viteză maximă de propagare a excitației. Celulele tipice ale miocardului lucrător de asemenea conduc impulsul nervos, dar cu o viteză mai mică. În condiții fiziologice, când sistemul conductor al inimii este integral, excitația începe de la conductorul ritmului cardiac, trece prin sistemul excito-conductor până la fibrele terminale, de la care – la miocardul lucrător al cordului.

Rolul principal al inimii constă în expulzarea sângelui în circulație, prin închiderea și deschiderea în mod **pasiv** a valvulelor care au rol de supapă. Inima este constituită din două pompe (*fig. 6.1*), conectate prin circulațiile pulmonară și sistemică.

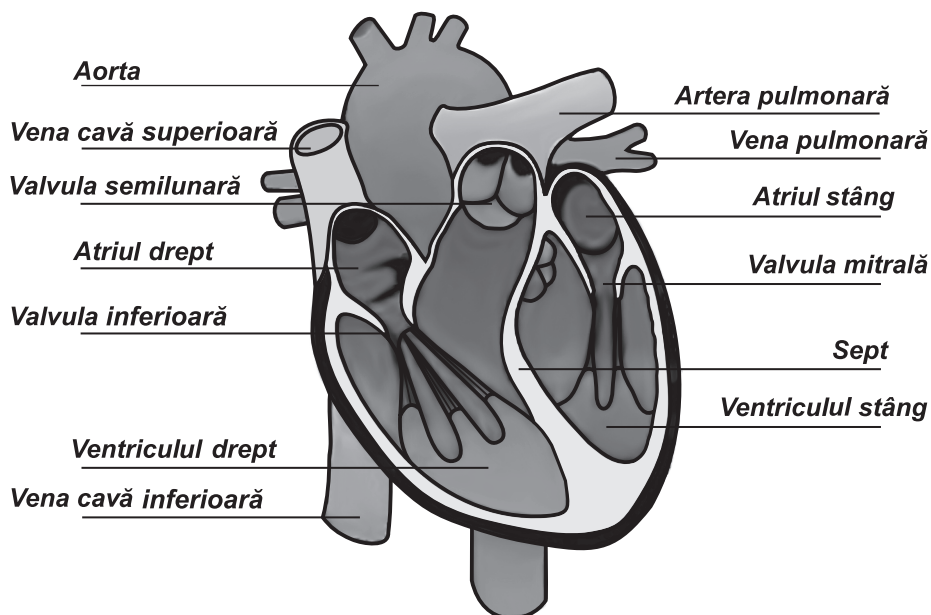


Fig. 6.1. Compartimentele inimii.

Pompa dreaptă are rolul de a pompa spre plămâni sângele dezoxigenat colectat din organism (circulația pulmonară).

Pompa stângă colectează sângele oxigenat din plămâni și îl pompează în corp (circulația sistemică).

Fiecare parte a inimii este echipată cu două seturi de valvule, care, în mod normal, impun deplasarea sângelui într-un singur sens, cele două pompe ale inimii având fiecare câte două camere: **atriul**, un rezervor ce colectează sângele adus de vene, și **ventriculul**, care pompează sângele în artere. **Septul** este peretele care desparte atât atriile, cât și ventriculele și care împiedică trecerea sângelui dintr-un atriu/ventricul în celălalt. Etanșeitarea pompelor este determinată de musculatura cardiacă.

Mișcarea valvulelor este reglată de diferența de presiune dintre atri, ventricule și vasele sanguine, ele împiedicând sângele să curgă în direcție greșită. Musculatura cardiacă asigură atât variația volumului inimii și presiunii sângelui, cât și energia necesară funcționării prin procesele biofizice și chimio-mecanice din miocard.

Fazele ciclului cardiac

Activitatea de pompă a inimii se poate aprecia cu ajutorul debitului cardiac, care reprezintă volumul de sânge expulzat de fiecare ventricul într-un minut. El

este egal cu volumul de sânge pompat de un ventricul la fiecare bătaie (volum-bătaie), înmulțit cu frecvența cardiacă. **Volumul-bătaie** al fiecărui ventricul este, în medie, de 70 ml, iar frecvența cardiacă normală este de 70–75 bătai/min.; astfel, debitul cardiac de repaus este de aproximativ 5 l /min. Inima trebuie să pună în mișcare în fiecare minut circa 4 l în repaus, iar în timpul exercițiilor fizice – până la 20 l. În somn, debitul cardiac scade, iar în stări febrile, sarcină și la altitudine, crește.

Fiecare bătaie a inimii constă într-o anumită succesiune de evenimente, care reprezintă **ciclu cardiac**. Acesta cuprinde 3 faze (*fig. 6.2*): sistola atrială, sistola ventriculară și diastola.

Sistola atrială constă în contracția celor două atri, urmată de influxul sanguin în ventricule. Când atriile sunt complet golite, valvele atrioventriculare se închid, împiedicând întoarcerea sângelui în atri.

Sistola ventriculară constă în contracția ventriculelor și ejecția din ventricule a sângelui, care intră astfel în sistemul circulator. Când ventriculele sunt complet golite, valva pulmonară și cea aortică se închid.

Diastola constă în relaxarea atriilor și ventriculelor, urmată de reumplerea atriilor.

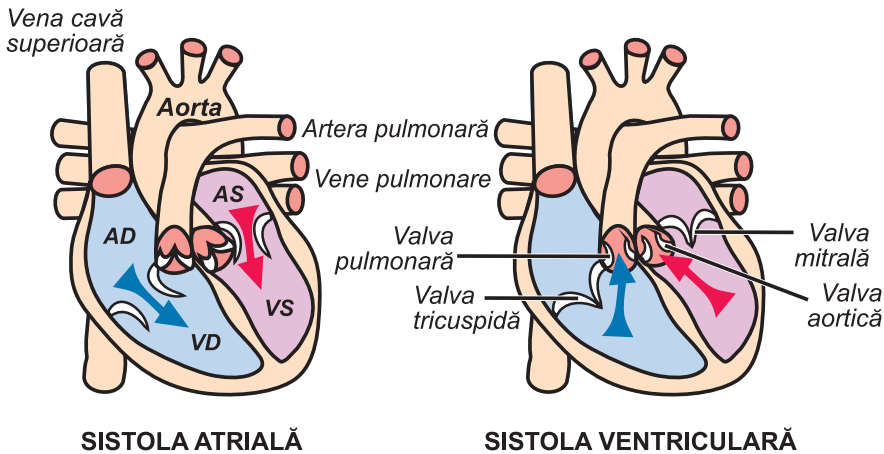


Fig. 6.2.

Sunetele specifice bătăilor inimii sunt produse de închiderea valvelor atrio-ventriculare și a celor aortice, putând fi ascultate prin sistemul de amplificare al stetoscopului. Conform legii de conservare a energiei, lucrul mecanic al inimii se va regăsi sub alte forme de energie:

- în energia potențială a sângelui (căreia îi corespunde o presiune efectivă asupra pereților vasului);

- în energia cinetică a sângelui, care măsoară mișcarea sângelui;
- în încălzirea sângelui ca urmare a frecărilor dintre straturile de sânge.

Lucrul mecanic generat de inimă în sistolă se acumulează parțial sub formă de energie potențială elastică a pereților arteriali și este cedat apoi coloanei de sânge în timpul diastolei. Deoarece arterele au pereți elastici, în condițiile regimului pulsatil în care lucrează inima, acestea permit curgerea sângelui și în perioada în care inima este în diastolă; astfel, debitul este cu mult mai mare decât debitul ce ar exista în vase cu pereți neelastici (vezi experimentul lui Marey).

6.2. SCHEMA GENERALĂ A PATULUI VASCULAR

În figura 6.3 este reprezentată schema generală a patului vascular. Dinspre **aortă**, unde presiunea este cea mai înaltă (presiunea medie este de 100 mm Hg), sângele curge spre locul cu presiunea cea mai joasă – **vena cavă** (presiunea medie este de 10 mm Hg). Se poate face o analogie cu sensul curentului electric de la un potențial mai mare la un potențial mai mic, **debitul sangvin** reprezentând **echivalentul intensității curentului electric**. Drumul se ramifică, ramificațiile fiind legate în paralel.

Presupunând că rezistența, în unități arbitrare, a fiecărei căi este 0,1 ($R_1 = R_2 = R_3 = 0,1$), se poate calcula rezistența echivalentă a grupării în serie (fig. 6.4) comparativ cu a grupării în paralel (fig. 6.5).

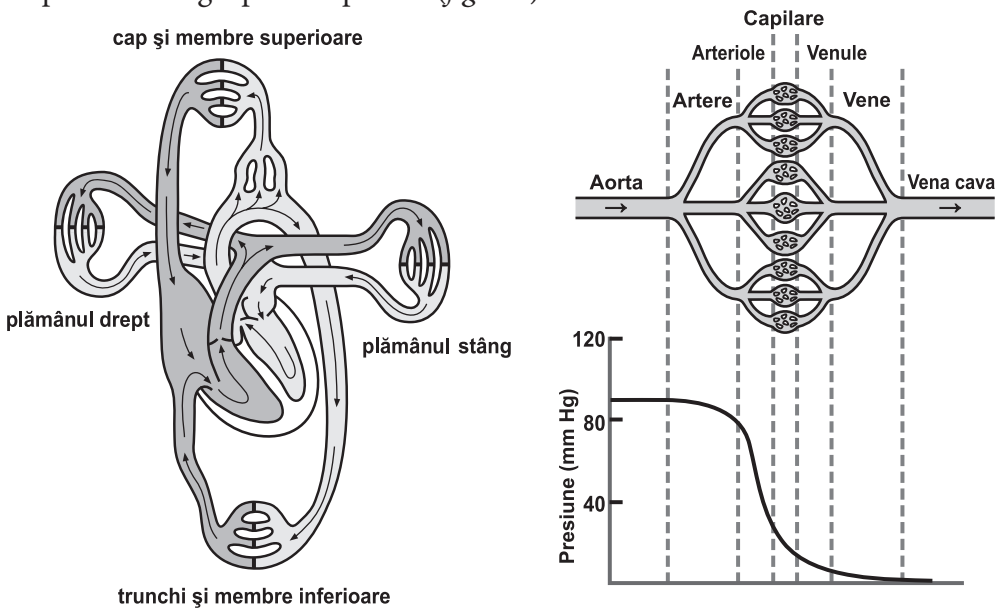


Fig. 6.3. Schema generală a patului vascular.

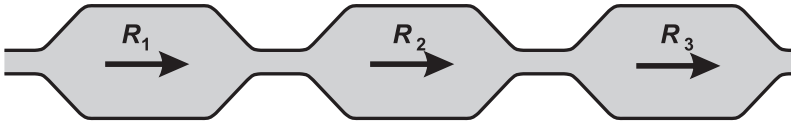


Fig. 6.4. Gruparea capilarelor în serie.

$$R_{\text{serie-echivalent}} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,3 \quad (1).$$

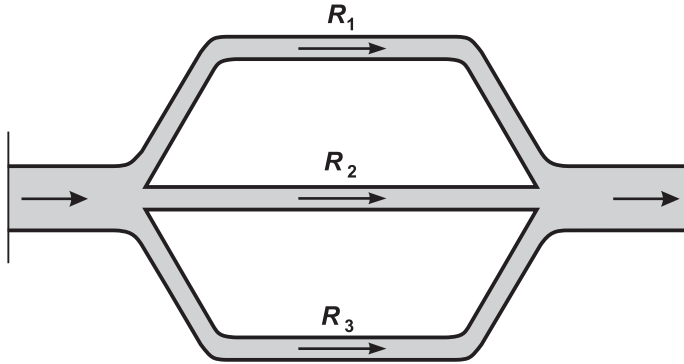


Fig. 6.5. Gruparea capilarelor în paralel.

$$\frac{1}{R_{\text{paralel-echivalent}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{3}{0,1} \Rightarrow R_{\text{paralel-echivalent}} = 0,033 \quad (2).$$

Se observă că rezistența echivalentă la curgerea în paralel este mult mai mică decât la cea în serie. Prin urmare, deși are loc o ramificare din ce în ce mai complexă a vaselor de sânge, odată cu creșterea secțiunii transversale a patului vascular (secțiunea totală a capilarelor fiind de cca 750 de ori mai mare decât aria secțiunii transversale a aortei), rezistența la înaintare a sângelui scade.

6.3. VITEZA DE CURGERE A SÂNGELUI

Datorită vâscozității, expulzării în pulsuri, precum și formei variabile a vaselor sangvine, curgerea sângelui în organism este neuniformă. Doar în vasele mici curgerea sângelui poate fi considerată laminară, în majoritatea vaselor mari, curgerea sângelui se face intermediară, între regimul laminar și cel turbulent, numărul lui Reynolds având valori mai mari de 2000 și mai mici de 3000.

Prin vasele capilare, care au diametre mai mici decât cele ale hematiilor, se produce o deformare elastică a acestora, ele deplasându-se una câte una, cu viteză foarte mică, antrenate de plasmă (fig. 6.6).

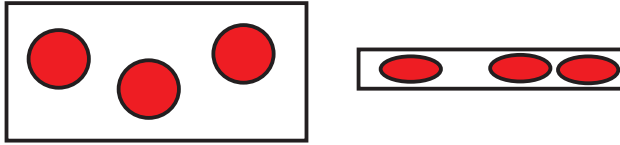


Fig. 6.6.

În restul vaselor de sânge, curgerea este preponderent nelaminară. Curgerea turbulentă a sângelui în vasele mari (mai accentuată în partea inițială a aortei și a arterei pulmonare, unde $N_R > 3000$) este deosebit de importantă, deoarece facilitează schimburile între fluid și pereții vasului, precum și omogenizarea substanțelor dizolvate. Viteza sângelui este determinată, în special, de ramificarea vaselor. Trecând de la vasele mari (viteza medie – 40 cm/s) (fig. 6.7) la cele mici, viteza scade (în capilare, viteza medie este de 1 mm/s). Viteza instantanee variază datorită regimului pulsatoriu și deformabilității pereților.

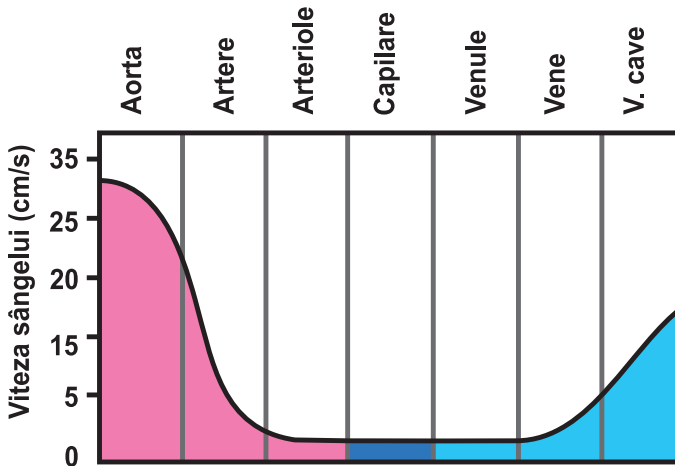


Fig. 6.7.

Aplicand ecuația de continuitate în curgerea sângelui, putem scrie:

$$S_{total-capilare} \cdot V_{capilare} = S_{aorta} \cdot V_{aorta}$$

6.4. PRESIUNEA ARTERIALĂ

Presiunea arterială (PA) este surplusul de presiune în vasul sanguin arterial în raport cu presiunea atmosferică, măsurat la nivelul cordului.

Cauzată de caracterul pulsatil al sistemului vascular, PA variază în timp între valoarea maximă în momentul **sistolei** (P_s) și valoarea minimă în momentul

diastolei (P_d). La un adult sănătos, presiunea sistolică este de circa 120 mm Hg (15 kPa), iar cea diastolică – de circa 80 mm Hg (10 kPa). Valoarea medie a PA se determină din relația:

$$P_m = \frac{P_s + 2P_d}{3} \quad (3).$$

Evident că PA variază și în spațiu. La un om cu înălțimea de 1,8 m, PA medie este de 13 kPa la nivelul cordului; la nivelul creierului – 8,1 kPa ($13 \text{ kPa} - \rho g h_1$); la nivelul picioarelor 25,74 kPa ($13 \text{ kPa} + \rho g h_2$), unde: h_1 – distanța dintre nivelul cordului și nivelul creierului ($\approx 0,5 \text{ m}$); h_2 – distanța dintre nivelul cordului și nivelul picioarelor ($\approx 1,3 \text{ m}$); ρ – densitatea sângelui.

Presiunea arterială a sângelui la un adult, în pozițiile orizontală și verticală, exprimă în cm a coloanei de sânge, este redată în figura 6.8.

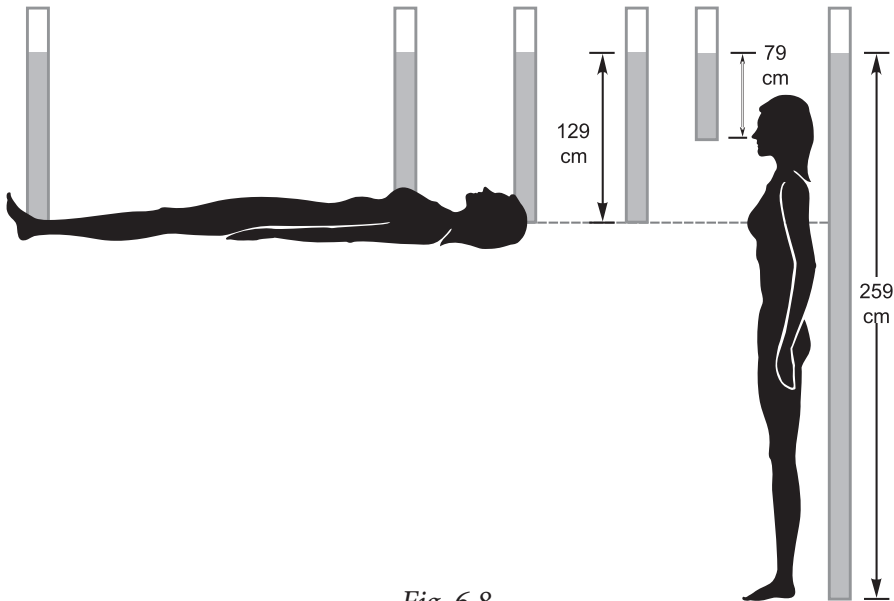


Fig. 6.8.

Metoda lui Korotkow de măsurare a presiunii arteriale

Parametrul fizic presiunea arterială joacă un rol important în diagnosticarea multor maladii. Determinările presiunilor **sistolică** și **diastolică** într-o arteră oarecare pot fi realizate direct cu ajutorul unui ac găunos unit cu un manometru. Însă, în practica medicală este folosită pe larg o altă metodă, care nu necesită pătrunderea în arteră, propusă de **N. Korotkow**. Există diferite modificări ale aparatului prevăzut pentru realizarea acestei metode, unul dintre care este reprezentat în figura 6.9, numit *sfigmomanometru*.



Fig. 6.9. Sfigmomanometru cu membrană metalică:

- 1 – manșetă din material elastic; 2 – pară de cauciuc pentru pomparea aerului în manșetă; 3 – manometru cu scară gradată în mm Hg; 4 – stetoscop.

Pentru efectuarea măsurărilor, manșeta se înfășoară în jurul brațului, între umăr și cot. La început, diferența dintre presiunea aerului din manșetă și cea atmosferică este egală cu zero; prin urmare, manșeta nu comprimă brațul și artera (fig. 6.10).

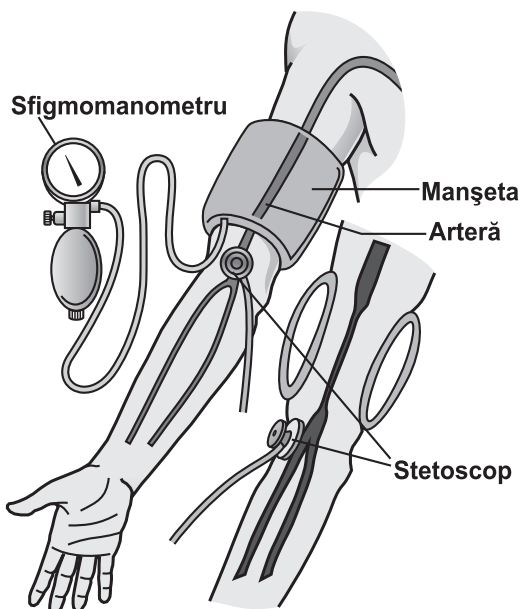


Fig. 6.10.

Pe măsura pompării aerului în manșetă, presiunea exercitată de aceasta asupra arterei humerale crește și, la un moment dat, oprește curgerea sângelui. Aceasta are loc atunci când presiunea aerului în manșetă, indicată de manometru, este mai mare decât presiunea arterială. Deschizând încet robinetul, situat în vecinătatea pereii de cauciuc, se ajunge la momentul când presiunea aerului din manșetă devine egală cu cea **sistolică** – sângele capătă posibilitatea să treacă prin lumenul îngust al arterei, curgerea fiind **turbulentă**.

În timpul măsurării presiunii, medicul, punând stetoscopul pe arteră, mai distal de manșetă, ascultă zgomotele caracteristice, de care este însoțit acest proces.

Prelungind treptat micșorarea presiunii în manșetă, se ajunge la momentul restabilirii curgerii în regim **laminar** (dispare zgomotul curgerii turbulente). Presiunea indicată de manometru în acest moment este considerată egală cu presiunea arterială **diastolică**. Așadar, momentul în care se aude în stetoscop primul zgomot marchează presiunea sistolică; momentul în care zgomotul dispare marchează presiunea diastolică.

6.5. UNDA PULSATILĂ

Modelul fizic al sistemului cardio-vascular reprezintă o serie de tuburi cu pereți elastici, ce se ramifică treptat, umplute cu un lichid real, curgerea căruia este susținută de lucrul unei pompe în regim ritmic. În figura 6.11 este reprezentat un tub cu pereți elastici, umplut cu lichid real, la capătul căruia este plasat un piston condus de acțiunea unei forțe periodice: $F = F_0 \cos \omega t$.

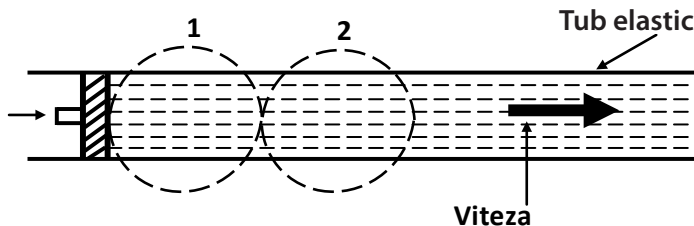


Fig. 6.11. Mecanismul formării undei pulsatile.

Datorită elasticității pereților, frontul de presiune creat în vecinătatea pistonului se va deplasa de-a lungul tubului sub formă de undă pulsatilă.

Viteza undei depinde de mai mulți factori, printre care densitatea lichidului (ρ) și modulul de elasticitate (E) a pereților. Un fenomen asemănător are loc în

arterele sanguine. În faza de ejecție a sângelui din ventricul, se produce o undă de presiune care se propagă în artere cu o viteză (numită *viteza pulsului*) mult mai mare decât viteza de curgere a sângelui. De exemplu, în condiții normale, viteza medie a sângelui în aortă este de 0,2–0,4 m/s, iar viteza pulsului în aortă este de circa 4–6 m/s. **Cu cât se propagă mai repede unda de presiune, cu atât este mai înaltă presiunea arterială.** Viteza pulsului este mai mare dacă pereții arteriali sunt mai rigizi, conform **ecuației Moens**:

$$V = F \sqrt{\frac{Ed}{2\rho r}} \quad (4),$$

unde: ρ – densitatea sângelui; E – modulul de elasticitate a peretelui arterial; d – grosimea peretelui; r – raza interioară a vasului sangvin; F – factorul constant.

La omul în vârstă, elasticitatea pereților arteriali scade. Prin urmare, atât E , cât și viteza pulsului și presiunea arterială cresc (un perete mai elastic amortizează mai ușor unda de presiune; deci, viteza pulsului în vase elastice este mai mică). În figura 6.12 este reprezentată variația presiunii arteriale și a vitezei pulsului în funcție de vârstă.

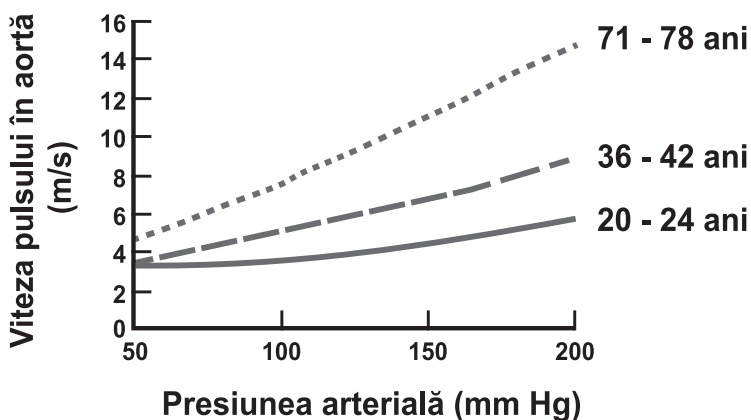


Fig. 6.12.

Determinarea vitezei de deplasare a unei pulsatile este utilă în deagnosticarea unor maladii cardiovasculare. Majoritatea medicamentelor antihipertensive reduc rigiditatea arterială, acționând ca antagoniști (sau factori de blocaj) la nivelul canalelor de calciu din membrana plasmatică a celulelor musculare aflate în pereții arteriali, ceea ce determină relaxarea fibrelor musculare din pereții vaselor sanguine. Astfel, este prevenită atât rigiditatea vaselor de sânge, cât și vasoconstricția.

EXERCIIII

1. Viteza medie de curgere a sângelui prin aortă (v_a) este de 30 cm/s, iar viteza hematiilor prin capilare (v_c) – de 0,5 mm/s. În baza acestor date, determinați de câte ori aria-sumă a secțiunilor tuturor capilarelor este mai mare decât aria secțiunii din aortă.

Răspuns: de 600 ori.

2. Determinați cantitatea maximă de sânge care poate trece prin aortă într-o secundă, pentru ca curgerea să rămână laminară. Diametrul aortei (d) este de 2cm, vâscozitatea sângelui (η) – 5 mPa·s.

Răspuns: 157g.

3. La un om matur, lumenul aortei este de 8 cm². Diametrul unui capilar este de 10⁻⁵ m. Viteza de curgere a sângelui se micșorează de la 0,5 m·s⁻¹ în aortă până la 0,5 mm×s⁻¹ în capilare. Aflați numărul total de capilare.

Răspuns: 10,2·10⁹.

7. ELEMENTE DE TERMODINAMICĂ BIOLOGICĂ

7.1. NOȚIUNI GENERALE

Termodinamica este știința care studiază legile de transformare a energiei dintr-o formă în alta. Existența organismelor vii și toate procesele activității vitale în ele sunt strâns legate de transformarea energiei, cu variația echilibrului energetic, în sistemul organism–mediul exterior. Termodinamica are la bază două principii. Însă, până a trece la studierea acestor principii sau legi, este necesar de a lua cunoștință de unii termeni utilizați în această știință.

Sistem – totalitatea obiectelor materiale, limitate într-un anumit fel de mediul exterior. În funcție de modul de interacțiune cu mediul înconjurător, sistemele termodinamice sunt divizate în trei tipuri. În lipsa schimbului cu mediul exterior, atât de energie, cât și de substanță, sistemul se consideră **izolat**.

Când sistemul cu mediul exterior face numai schimb de energie el se consideră **închis**.

Când interacțiunea cu exteriorul include atât schimb de energie cât și de substanță, sistemul se consideră **deschis**.

Sistemele biologice, inclusiv corpul omenesc sunt sisteme deschise.

Energie – măsura cantitativă a unui tip de mișcare a materiei la transformarea ei dintr-o formă în alta. Fiind caracteristica mișcării materiei, energia întotdeauna determină posibilitatea sistemului de a efectua lucru. Se diferențiază diferite forme de energii.

Energie mecanică – energie ce caracterizează mișcarea corpurilor și posibilitatea de a efectua lucru mecanic la deplasarea corpurilor. Energia mecanică se diferențiază în **energie cinetică** determinată de viteza de mișcare a corpurilor și **energie potențială** determinată de pozițiile reciproce ale corpurilor.

Energie termică – suma **energiei cinetice** a tuturor atomilor și moleculelor din substanță în rezultatul mișcării haotice. Indicile mișcării termice este temperatura. Valoarea medie a energiei cinetice E_c pentru particula uniatomară de substanță depinde de temperatura absolută T conform relației: $E_c = \frac{3}{2}KT$, unde: K - constanta Boltzmann.

Energie chimică – energia interacțiunilor dintre atomi în molecule. În esență orice energie chimică reprezintă energia electronilor în mișcarea lor pe orbitele externe ale atomilor și moleculelor.

Energie electrică – energia interacțiunii particulelor electrizate, care provoacă mișcarea acestor particule în câmpul electric.

Transformările energetice în materia vie, ca regulă, se realizează în limitele acestor patru tipuri de energie.

Lucru – măsura transformării energiei dintr-o formă în alta.

Starea sistemului termodinamic este reprezentată de totalitatea parametrilor săi de stare (marimi fizice măsurabile) la un moment dat.

Parametrii de stare sunt de doua feluri:

– **intensivi** – în orice punct al sistemului au valori definite, care nu depind de dimensiuni (presiune, concentrație, temperatură);

– **extensivi** – depind de dimensiunile sistemului și de cantitatea de substanță existentă în sistem (volum, masă, numărul de moli).

Starea de echilibru termodinamic este caracterizată de următoarele proprietăți:

– parametrii de stare sunt constanți în timp;

– dezordinea este maximă (entropia termodinamică este maximă);

– schimburile de energie și substanță, atât între componentele sistemului, cât și cu mediul înconjurător, încetează;

– producerea de entropie încetează.

Starea staționară se caracterizează prin următoarele:

- parametrii locali sunt constanți în timp;
- parametrii intensivi nu sunt constanți în spațiu;
- schimburile de substanță și energie între componentele sistemului și cu mediul extern nu încetează;
- producerea de entropie este minimă, fără a fi egală cu zero.

Procese termodinamice – treceri ale sistemului de la o stare la altă stare prin modificarea în timp a parametrilor termodinamici. Ele pot fi:

- **reversibile** – procese cvasistatice; în orice moment, sistemul este în echilibru termodinamic; dacă se schimbă semnul parametrilor termodinamici, sistemul evoluează de la starea finală spre starea inițială pe același drum;
- **ireversibile** – în general, procese necvasistatice; ele revin la starea inițială (dacă este posibilă) pe alt drum și pe seama unei intervenții active din exterior (nu pot decurge de la sine);
- **ciclice** – starea finală și starea inițială ale sistemului sunt identice; aceste procese pot fi ireversibile.

7.2. PRIMUL PRINCIPIU AL TERMODINAMICII

În urma eșecurilor de a construi o mașină care, odată pornită, să funcționeze la nesfârșit fără a consuma energie (perpetuum mobile de speța I-a), s-a ajuns la concluzia că nu se poate „crea” energie, ci pentru furnizarea unei energii este necesară consumarea alteia.

În 1840, Gh. Hess a formulat regula după care căldura eliberată sau absorbită într-o reacție chimică nu depinde de etapele intermediare prin care poate decurge această reacție, ci numai de stările inițială și finală ale reactanților. Între 1842 și 1850, o serie de cercetători (J.R. Mayer, J. Joule, H. Helmholtz) au descoperit echivalența dintre lucrul mecanic și energie și au determinat echivalentul mecanic al caloriei (**1 calorie = 4,18 jouli**).

Primul principiu al termodinamicii, sau **principiul conservării energiei** postulează existența unui parametru caracteristic oricărui sistem, numit **energie internă (U)**, parametru care exprimă capacitatea totală a sistemului de a efectua acțiuni de orice tip și are o valoare bine determinată în fiecare stare. Conform altei formulări a acestui principiu, variația energiei interne a unui sistem la trecerea dintr-o stare în alta (ΔU) este egală cu suma algebrică dintre cantitatea de căldură

(Q) și toate formele de lucru (mecanic, chimic, osmotic, electric etc.) schimbate de acest sistem cu exteriorul:

$$\Delta U = Q + L \quad (1)$$

sau conform convenției de semn în care se consideră **negativ lucrul mecanic primit și pozitivă căldura primită**:

$$\Delta U = Q - L \quad (2).$$

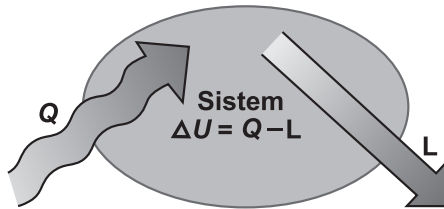


Fig. 7.1.

Vom cerceta evaluarea a două procese diferite de interacțiune – a unui sistem și a mediului înconjurător –, în baza principiului I, care duc la aceeași variație a energiei interne (fig. 7.2).

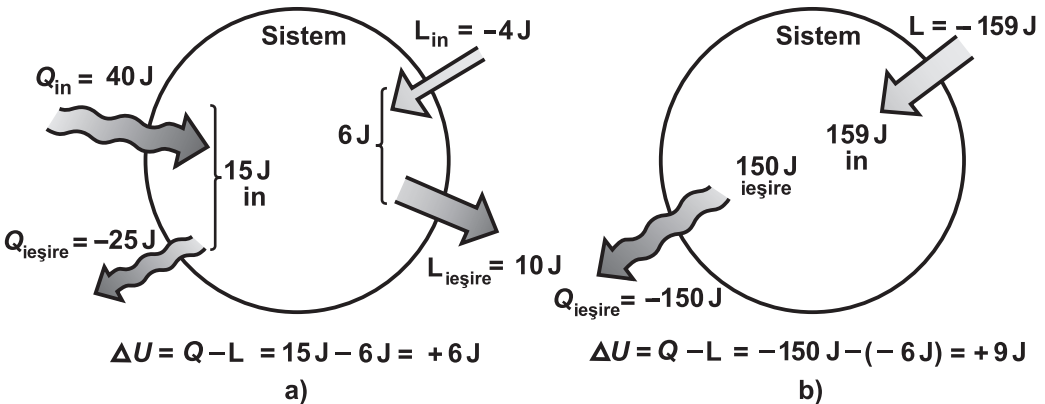


Fig. 7.2.

Energia internă a unui sistem reprezintă suma energiilor cinetice și potențiale ale particulelor ce alcatuiesc sistemul (în sumă nu este inclusă energia cinetică și potențială a sistemului, luat ca întreg, în raport cu exteriorul).

Cantitatea de căldură (Q) reprezintă variația energiei interne prin mișcări dezordonate ale moleculelor (agitație termică), iar **lucrul mecanic (L)** – variația energiei interne prin mișcări ordonate la scara microscopică (variații de volum contra unei presiuni exterioare, variații de suprafață contra unei tensiuni superficiale, transport de sarcină electrică într-o diferență de potențial etc.).

Din relațiile precedente rezultă și o a treia formulare a primului principiu: în orice proces care are loc într-un sistem izolat nu se pierde nici nu se creează energie, ea trece dintr-o formă în alta și de la o parte a sistemului la alta. Deci, în sistemul izolat $\Delta U = 0$.

În cursul transformărilor chimice, variația energiei interne poate fi măsurată în mod practic prin intermediul schimbului de căldură al sistemului considerat cu exteriorul, atunci când acesta nu efectuează nici un lucru mecanic, volumul său rămânând constant (într-un proces izocor). Pentru procesele care au loc în atmosfera liberă, așa cum sunt sistemele biologice, presiunea este constantă (condiții izobare). În acest caz, în locul energiei interne (U) se introduce mărimea numită **entalpie**, (H).

Dacă scriem expresia principiului I:

$$\Delta U = Q - L = Q - p\Delta V \quad (3),$$

cantitatea de căldură (Q) va fi:

$$Q = \Delta U + p\Delta V = \Delta(U + pV) = \Delta H \quad (4).$$

Deci: $\Delta H = Q_{\text{izobar}}$ (căldura schimbată de sistemul izobar).

Mărimea $H = U + pV$ se numește **entalpia** sistemului și este foarte utilă în studiul termodinamic al reacțiilor chimice. Când $\Delta H > 0$, sistemul primește căldură (**reacții endoterme**), iar când $\Delta H < 0$, sistemul cedează căldură (**reacții exoterme**).

Aplicarea primului principiu în biologie

Sistemele biologice sunt sisteme termodinamice deschise, iar procesele biologice sunt procese termodinamice ireversibile. Organismele vii sunt sisteme a căror energie internă poate crește sau scădea în funcție de diferite condiții (vârsta, starea fiziologică etc.). Pentru a aplica corect primul principiu în cazul organismelor, trebuie să se țină seama de un lucru fundamental – ele sunt sisteme deschise care iau și degajă în exterior energie, astfel încât problema conservării energiei se pune numai pentru sistemul închis, format din organismul respectiv împreună cu mediul său înconjurător.

7.3. CIRCUITUL ENERGIEI ÎN BIOSFERĂ

Principala sursă de energie pentru lumea vie în ansamblu este radiația solară (fig. 7.3).

Din fracțiunea de energie solară care cade pe suprafața Pământului, un procent redus este captat de plantele fotosintetice și folosit pentru sintetizarea din CO_2 , H_2O și săruri minerale a substanțelor organice bogate în energie.

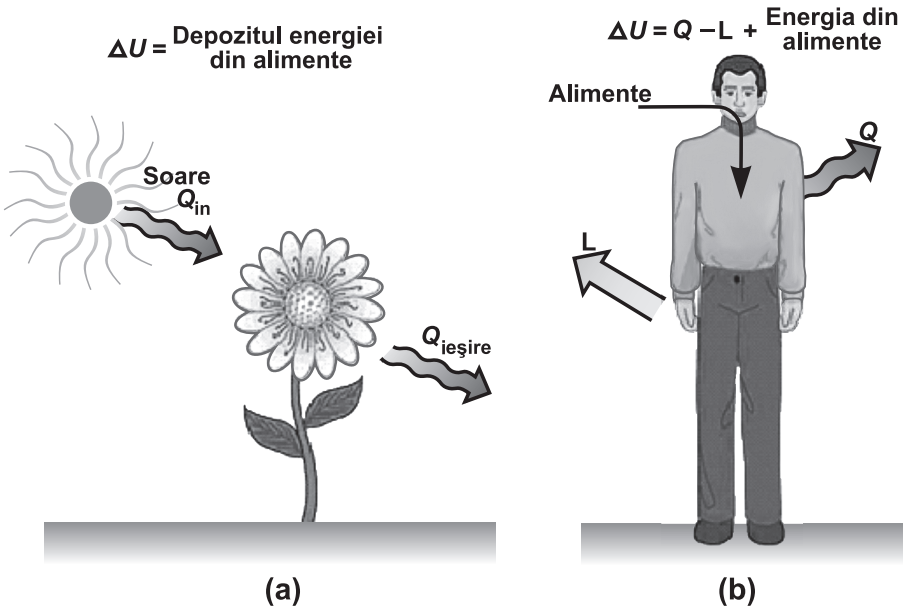


Fig. 7.3.

Cloroplastele, organite din celulele plantelor verzi, captează radiații din spectrul solar, construiesc din H_2O și CO_2 molecule complexe – polizaharide $(C_6H_{12}O_6)_n$ și degajă oxigen. În **mitocondrii**, alte organite din celulele organismelor heterotrofe, produșii rezultați din fotosinteză sunt utilizați ca sursă de energie pentru **sinteza ATP**. Heterotrofele trăiesc ca parazite sau în biosistem cu organisme vii. La rândul ei, molecula de ATP este scindată enzimatic, energia eliberată astfel fiind folosită pentru producerea de lucru mecanic, chimic, osmotic etc.

Bilanțul energetic al organismului

Aplicând principiul I în cazul unui organism, se poate formula următorul bilanț energetic: **energia preluată din mediu = traviul mecanic efectuat + căldura degajată + energia depozitată în rezervele organismului.**

Testul clinic al intensității metabolismului bazal, prin care se stabilește valoarea de referință la care să fie raportat efectul diferiților factori care influențează metabolismul energetic, este un exemplu de asemenea echilibru în condiții simplificate. Subiectul este în repaus (nu efectuează lucru mecanic) și nu a mâncat 12 ore (nu preia energie din mediu). În acest caz, bilanțul energetic se poate scrie: **caldura degajată = -energia depozitată = energia utilizată.**

7.4. AL DOILEA PRINCIPIU AL TERMODINAMICII

Primul principiu al termodinamicii demonstrează că diferite forme de energie se pot transforma una în alta și permit determinarea cantitativă al acestor transformări. Însă el nu reflectă nimic despre direcția acestor transformări; altfel spus, în ce direcție va evolua un proces sau altul. Răspunsul la această întrebare este elucidat de principiu al doilea al termodinamicii, întemeiat de către Carnot (1824) și dezvoltat de către Clausius (1850), Thomson (1851), Boltzmann (1880) etc. Acest principiu generalizează constatarea practică a imposibilității ca o mașină termică să transforme integral o cantitate de căldură în lucru mecanic (**perpetuum mobile de speța a II-a**), randamentul de transformare fiind întotdeauna subunitar.

Al doilea principiu postulează: existența unui parametru **S**, numit **entropie**, caracteristic pentru fiecare stare a sistemului. **Entropia** este un parametru de stare, care măsoară gradul de dezordine a unui sistem termodinamic.

Conform conceptului microscopic al lui Clausius, dacă o cantitate de căldură (**dQ**) este absorbită reversibil de către un sistem la temperatura **T** (**izoterm**), se definește o funcție de stare **S**, care crește cu **dS** în modul următor:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (5).$$

Din definiția **entropiei** rezultă că al doilea principiu al termodinamicii stabilește că un sistem izolat nu poate evolua spre o stare mai ordonată, matematic:

$$dS \geq 0.$$

Semnul egalității reflectă situația în care în sistemul izolat au loc transformări reversibile, iar semnul „>” – când în sistem au loc transformări ireversibile. Procesul al cărui rezultat este scăderea entropiei se numește **proces cuplat**, iar procesul în care are loc creșterea entropiei se numește **proces cuplant**. Rezultă că procesele cuplate nu pot avea loc decât pe seama proceselor cuplante. De exemplu, anabolismul nu poate avea loc decât împreună cu catabolismul, formând metabolismul (fig. 7.4).

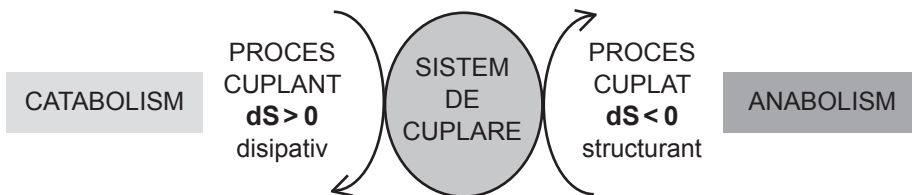


Fig. 7.4.

Starea de echilibru se caracterizează prin **entropie maximă**, iar **starea staționară** – prin **entropie constantă**. În starea staționară, entropia produsă de procesele ireversibile din sistem este eliminată în mediul exterior (o celulă în repaus este în stare staționară). Un enunț echivalent al celui de al doilea principiu al termodinamicii afirmă că într-o transformare ciclică căldura primită nu se poate transforma integral în lucru mecanic. În multe cazuri, energia în sistemele vii este generată în urma unor cicluri și utilizată în alte transformări ciclice. Cu toate că organismele vii sunt foarte eficiente din punct de vedere energetic, ele nu vor putea utiliza în totalitate energia obținută; de exemplu, prin scindarea compușilor macroergici (ATP, etc.).

7.5. FUNCȚII TERMODINAMICE

Teoretic, de la un sistem putem relua, sub formă de lucru util, toată energia sa internă. În realitate, în diverse transformări particulare, doar o parte din energia internă poate fi utilizată, din cauza pierderilor sub formă de căldură. Astfel, partea de energie internă ce poate fi utilizată sub formă de lucru mecanic într-o transformare izotermă ($T = \text{const.}$) se numește **energie liberă** și se notează **F**:

$$F = U - TS \quad (6).$$

Produsul **TS** reprezintă partea din energia internă a sistemului care se pierde sub formă de căldură într-o transformare izotermă. De regulă, în astfel de transformare se folosește doar o parte din **F**, ce poate fi calculată din relația:

$$dF = dU - TdS \quad (7).$$

După cum s-a menționat anterior, partea din energia internă a unui sistem, ce poate fi utilizată sub formă de lucru mecanic într-o transformare izobară ($p = \text{const.}$), se numește **entalpie (H)**, care este dată de relația:

$$H = U + pV \quad (8).$$

Într-o transformare izobară nu numai că putem utiliza întreaga energie internă a sistemului pentru obținerea de lucru mecanic, dar obținem și o cantitate suplimentară (pV), pe care o cheltuiește mediul în care se află sistemul pentru a-i menține acestuia presiunea constantă. În general, într-un proces izobar concret vom utiliza doar o parte din entalpia disponibilă, pe care o putem evalua cu relația:

$$dH = dU + pdV \quad (9).$$

Dacă un sistem suferă simultan o transformare **izoterm-izobară**, partea de energie internă, ce poate fi utilizată sub formă de lucru, se numește **entalpie liberă (Gibbs)**. Ea poate fi obținută prin combinarea relațiilor pentru energia liberă și entalpie:

$$G = U + pV - TS \quad (10).$$

Desigur, într-o transformare izoterm-izobară concretă vom utiliza doar o parte din entalpia liberă disponibilă, dată de relația:

$$dG = dU + pdV - Tds \quad (11).$$

Procesele care au loc în corpul uman sunt izoterm-izobare, astfel încât din energia internă (de exemplu, a unui compus macroergic) doar entalpia liberă poate fi utilizată. Și din energia internă a unor produse (alimente, produse energizante etc.) doar entalpia liberă poate fi utilizată eficient. Funcționarea sistemelor biologice presupune sinteza unor molecule complexe din componentele mai simple pentru asigurarea creșterii și înnoirii țesuturilor, precum și a substanțelor necesare reglării proceselor vitale (enzime, hormoni etc.). Asigurarea energiei necesare atât pentru funcționarea organismului în stare de repaus, cât și pentru alte activități este o funcție esențială a sistemelor biologice. Categoriile de substanțe care trebuie asigurate prin nutriție sunt: **glucidul, lipidele, proteinele, vitaminele, sărurile minerale și apa**. Energia primară este obținută prin catabolism, în care „arderea” izobară a glucidelor și proteinelor generează entalpie liberă. Același lucru se întâmplă și în cazul lipidelor. Variația de entalpie prin arderea izobară a diferitor substanțe biochimice (catabolism) este practic aceeași pentru aminoacizi și hidrați de carbon, dar aproximativ triplă – pentru lipide, ceea ce explică funcția de rezervă energetică pe care o au grăsimile în organism. Astfel, pentru **glicocol** $\Delta H = 3,12$ kcal/g, pentru glucoză $\Delta H = 3,74$ kcal/g, iar pentru **tripalmitină** $\Delta H = 9,3$ kcal/g. Această energie primară nu poate fi utilizată direct pentru susținerea tuturor funcțiilor vitale și de aceea este stocată în diverși compuși macroergici, de unde va fi eliberată atunci când va fi nevoie de ea prin procese de hidroliză (de exemplu: $ATP + H_2O \rightarrow ADP + P$). Metabolismul bazal reprezintă procesul realizat la nivel celular, pentru menținerea acestuia în stare de repaus. Evident că acest proces are loc cu consum de energie. O parte importantă din consumul energetic (cca 66%) în acest proces este necesară pentru funcționarea pompelor ionice. Randamentul mediu al proceselor metabolice este de cca 20%. Aceasta arată că o bună parte din energie se pierde sub formă de căldură. Aportul energetic al substanțelor metabolizate poate fi estimat prin **valoarea energetică** (exprimată în calorii), care reprezintă energia obținută prin metabolizarea unității de masă din această substanță.

EXERCIȚII

1. Puterea calorică a benzinei este de $1,3 \cdot 10^8$ J/gal. Toți ceilalți factori, cum ar fi temperatura autoturismului, sunt constanți. Care va fi variația energiei interne a unui autoturism, dacă rezervorul lui conține 12,0 gal de benzină?

Răspuns: $1,6 \cdot 10^9$ J.

2. Un sistem efectuează un lucru de $1,8 \cdot 10^8$ J, cedând concomitent mediului înconjurător $7,5 \cdot 10^8$ J de căldură. Aflați variația energiei interne a sistemului, în lipsa altor modificări (cum ar fi temperatura sau un adaus de combustibil).

Răspuns: $-9,3 \cdot 10^8$ J.

3. O persoană a efectuat un lucru de 500 J, cedând concomitent în mediul înconjurător 9 500 J de căldură. Determinați: a) variația energiei interne; b) randamentul acestor transformări.

Răspuns: (a) $-1,0 \cdot 10^4$ J; (b) 5%.

4. (A) Câtă energie din alimente va metaboliza un om în procesul executării a 35 kJ de lucru, cu un randament de 5,0%? (B) Câtă căldură a fost cedată izoterm mediului înconjurător?

Răspuns: (A) 700 kJ; (B) 665 kJ.

5. (A) Aflați rata medie metabolică, în wați, a unui om, care metabolizează 10 500 kJ de energie din alimente în 24 ore? (B) Care este valoarea maximă a lucrului, în jouli, pe care îl poate efectua un om fără întrerupere, la arderea grăsimilor, considerând un randament maxim de 20%?

Răspuns: (A) 121 W; (B) $2,1 \cdot 10^6$ J.

6. Un om, muncind intelectual, folosește pe zi 450 g hidrați de carbon, 120 g proteine, 100 g lipide. Determinați cantitatea de energie produsă la arderea acestor alimente în organism. De considerat că se asimilează numai 90% din substanțele alimentare.

Răspuns: 12,2 MJ.

7. Un om, muncind fizic, primește prin alimentare 17 MJ. În decursul zilei el efectuează lucru de 10 MJ. Ce parte din energia primită se transformă în lucru util?

Răspuns: 0,59.

8. Ce lucru util poate fi efectuat prin arderea unui mol de glucoză, considerând că organismul omului funcționează ca o mașină termică cu randamentul de 30%.

Răspuns: 854 kJ.

8. FENOMENE MOLECULARE DE TRANSPORT

8.1. DIFUZIA SIMPLĂ. LEGILE LUI FICK

Difuzia reprezintă un transport de substanță între zone de concentrație diferită sau potențial electric diferit, datorită agitației termice.

În scopul elucidării acestui fenomen, vom folosi o eprubetă gradată, care conține o soluție de **ezină** (substanță de culoare roșie) în partea de jos și apă pură în partea de sus (fig. 8.1). Se va observa că moleculele sau ionii de ezină migrează treptat din soluție în apa pură. Fenomenul reprezintă o **difuzie simplă (liberă)**, deoarece se realizează în lipsa intervenției forțelor fizice din exterior.

Sub aspect cantitativ, difuzia într-un mediu suport omogen este descrisă de legile lui **Fick**.

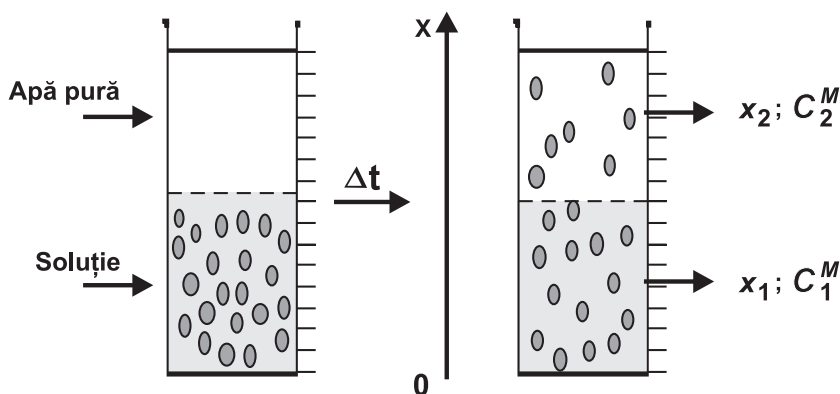


Fig. 8.1.

Înainte de a prezenta legile difuziei, considerăm util de a face unele precizări în legătură cu anumiți termeni folosiți: **flux și gradient**.

Fluxul reprezintă cantitatea de substanță, sarcină, energie etc. transportată printr-o suprafață oarecare într-o unitate de timp.

În cazul fenomenelor de difuzie se utilizează:

$$\text{fie fluxul masic, } \frac{\Delta m}{\Delta t}, \text{ fie fluxul molar, } \frac{\Delta v}{\Delta t};$$

unde: m – masa de substanță; v – numărul de moli.

Într-un limbaj simplificat (nematematic), **prin gradient se înțelege variația unei mărimi (concentrație, densitate, potențial electric etc.) între două puncte ale spațiului, raportată la distanța dintre cele două puncte.**

În cazul difuziei se folosesc fie gradientii de densitate ($\frac{\Delta\rho}{\Delta x}$), fie gradientii de concentrație ($\frac{\Delta c}{\Delta x}$).

Prima lege a lui Fick are următorul enunț: **masa de substanță ce se difuzează normal printr-o suprafață oarecare este proporțională cu aria suprafeței, gradientul de concentrație și durata timpului.**

Din exemplul cercetat (fig. 8.1) rezultă că gradientul de concentrație ponderală se determină din relația:

$$\frac{\Delta c^M}{\Delta x} = \frac{c_2^M - c_1^M}{x_2 - x_1} \quad (1).$$

Așadar, legea lui Fick are următoarea expresie matematică:

$$\Delta m = -DS \frac{\ddot{\Delta c}^M}{\ddot{\Delta x}} \dot{\Delta t} \quad (2),$$

unde: D – coeficientul de difuzie ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); S – aria suprafeței de difuzie (m^2 sau cm^2); c^M – concentrația ponderală (kg/m^3 sau g/cm^3).

O altă expresie echivalentă a primei legi a lui Fick se obține folosind noțiunile de concentrație molară (C^M) și cantitate de substanță (v):

$$\dot{\Delta v} = -DS \frac{\ddot{\Delta C}^M}{\ddot{\Delta x}} \dot{\Delta t} \quad (3).$$

Semnul minus apare deoarece fluxul de substanță are direcția de la concentrație mare la concentrație mică, adică în direcția gradientului de concentrație.

D este definit ca fiind cantitatea de substanță care difuzează într-o unitate de timp prin unitatea de suprafață, când gradientul de concentrație este unitar.

Într-un mediu fluid, coeficientul de difuzie se determină din relația lui **Einstein**:

$$D = \frac{KT}{f} \quad (4),$$

unde: T – temperatura absolută; K – constanta lui Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{°K}^{-1}$); f – un coeficient de frecare la mișcarea particulei (moleculi) într-un mediu fluid.

Pentru molecule (sau particule) sferice de rază r , care se deplasează într-un fluid cu coeficientul de vâscozitate η și viteză constantă, forța de frecare este dată de legea lui **Stokes**:

$$F = 6\pi\eta r v.$$

În acest caz, coeficientul de frecare este egal cu $6\pi\eta r$, iar coeficientul de difuzie:

$$D = \frac{KT}{6\pi\eta r} \quad (5).$$

Noțiune de potențial electrochimic

În funcție de concentrația la care se află, solvitul posedă o anumită energie potențială, numită **potențial chimic** – μ_K . El este atributul tuturor constituenților dintr-o soluție și se determină din relația:

$$\mu_{Ki} = \mu_{oi} + RT \ln C_i^M \quad (6),$$

unde: i – componenta solvitului; C_i^M – concentrația molară; R – constanta universală a gazelor; T – temperatura absolută; μ_{oi} – potențialul standard (potențialul chimic al solvitului de concentrație **unitară** la 25°C).

Într-o soluție electrolică există și energie potențială electrică (μ_e), care pentru un mol de ioni se determină din relația:

$$\mu_e = V n F \quad (7),$$

unde: V – potențialul electric în punctul dat; n – valența ionului; F – numărul lui Faraday.

Energia potențială totală se numește **potențial electrochimic** (μ_{e-K}) și se determină din relația:

$$\mu_{e-K} = \mu_0 + RT \ln C^M \pm VnF \quad (8).$$

Conform celor expuse mai sus, **difuzia liberă reprezintă transportul de substanță din zona cu potențial electrochimic mai mare spre zona cu potențial electrochimic mai mic.**

Trebuie menționat că prima lege a lui Fick este valabilă numai în cazul soluțiilor diluate.

În cazul în care concentrația variază și în timp, difuzia este non-staționară și guvernată de **legea a doua a lui Fick**, care are următorul enunț: **variația în timp a concentrației într-o regiune dată a soluției este proporțională cu variația în spațiu a gradientului de concentrație:**

$$\frac{dC}{dt} = -D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (9).$$

Coeficientul de difuzie (D) (aceiași din prima lege a lui Fick) este proporțional cu viteza de difuzie a particulelor, care depinde de temperatură, de vâscozitatea soluției și de mărimea particulelor.

8.2. DIFUZIA PRIN MEMBRANE ARTIFICIALE

Mulțimile membranelor, cunoscute în prezent și utilizate în diferite domenii, se împart în două grupe mari – **artificiale** și **naturale (biologice)**. Membranele artificiale pot fi **semipermeabile** sau **selectiv-permeabile**. Cele semipermeabile permit trecerea moleculelor solventului, însă nu și trecerea moleculelor solvitului.

Ca urmare, are loc difuzia solventului din compartimentul cu soluție hipotonică în compartimentul cu soluție hipertonică. Astfel de difuzie se numește **osmoză** (fig. 8.2).

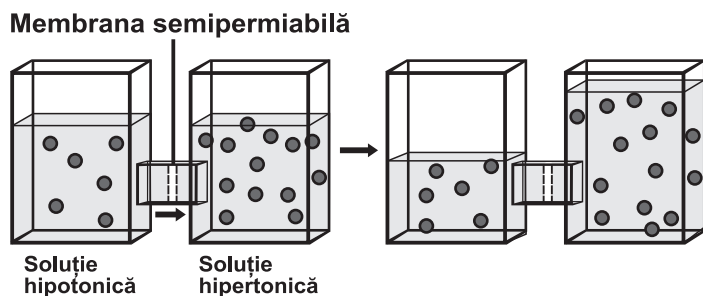


Fig. 8.2.

Membranele artificiale, cum sunt cele din celofană sau din diferite materiale plastice, își găsesc numeroase aplicații în cercetările științifice și în practica medicală.

Proprietatea comună a tuturor acestor materiale este că ele sunt substanțe poroase, ce permit trecerea micromoleculor și rețin macromoleculor. De exemplu, în practica medicală este folosită pe larg membrana artificială pentru **dializă**. Procedura dializei are principiul funcționării **rinichiului artificial** și permite de a purifica, o dată la 2–3 zile, sângele pacientului cu **insuficiență renală**.

Dispozitivul utilizat (fig. 8.3) reprezintă un sistem de tuburi capilare membranare, prin care, în timpul procedurii, în permanent circulă sângele. Pe lângă aceste tuburi, în direcție opusă circulă lichidul de dializă.

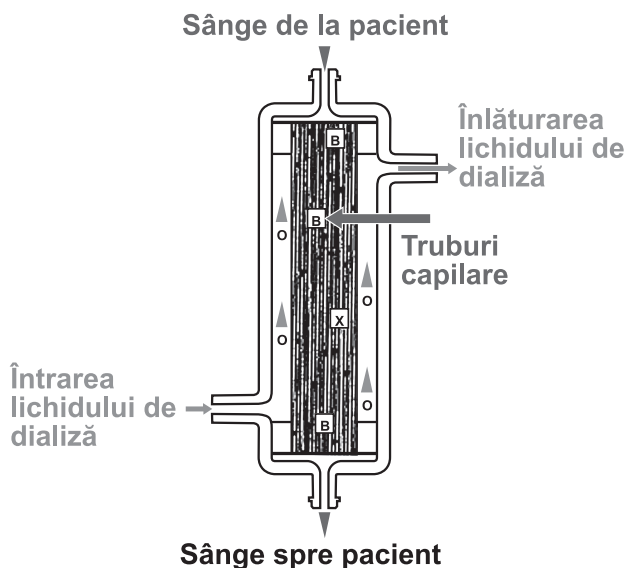
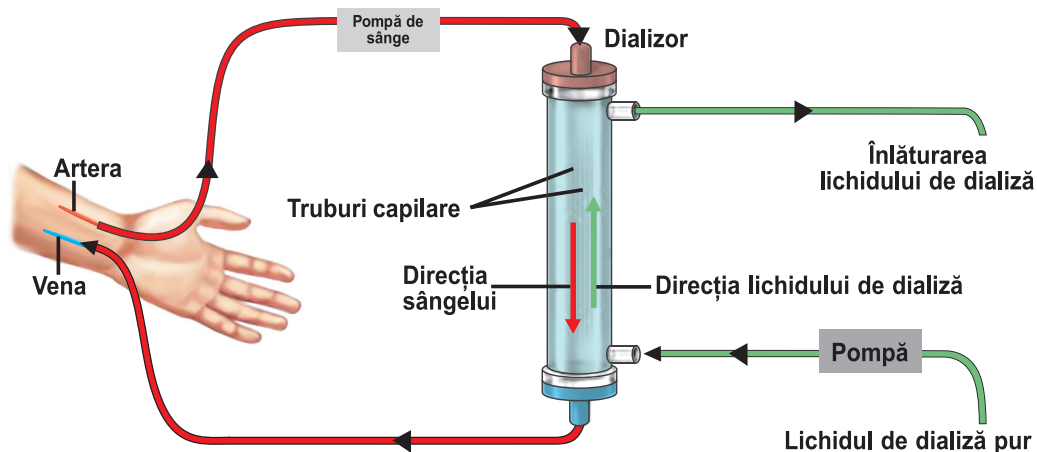


Fig. 8.3.

Schema de principiu a unei instalații pentru realizarea procedurii de dializă este redată în (fig. 8.4). Membranele echivalente cu membrana de dializă pot fi utilizate pentru purificarea soluțiilor ce conțin particule de diferite dimensiuni în cercetările fizico-chimice și farmaceutice.



8.3. DIFUZIA PRIN MEMBRANE CELULARE. TRANSPORTUL PASIV SIMPLU

Metode fizice în studierea compoziției și structurii membranelor celulare

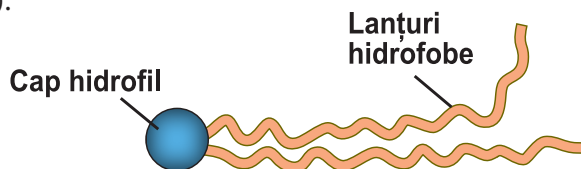
Membrana celulară reprezintă o structură hidrofobă, care separă soluțiile apoase intra- și extracelulare.

Prin diferite metode biochimice și biofizice de analiză s-a stabilit că în compoziția tuturor membranelor celulare intră: proteine, lipide, hidrați decarbon, glicoproteine, lipoproteine, ioni și apă.

Proteinele sunt principalele macromolecule responsabile de organizarea spațială a membranelor celulare, precum și de funcționalitatea acestora.

Sub aspect numeric, lipidele se găsesc în proporția cea mai înaltă în structura membranei. Cele mai importante lipide sunt fosfolipidele și colesterolul.

În moleculele lipidice se diferențiază o extremitate hidrofilă și două lanțuri hidrofobe (fig. 8.5).



De-a lungul timpului, modalitatea de asamblare spațială a componentelor membranei celulare a constituit o problemă extrem de dificilă.

Realizarea unei imagini despre structura și componența moleculară a membranelor celulare a fost posibilă cu mult înainte de apariția microscopiei electronice, prin utilizarea unor metode fizice relativ simple. Considerăm util să urmărim pe scurt efortul savanților și logica parcursului spre succes.

Primul model al membranei biologice a fost propus de către **Overton** în anul 1902. El a observat că prin biomembrane cel mai ușor pătrund substanțele care se dizolvă bine în lipide. Acest fapt i-a sugerat ipoteza că membranele biologice reprezintă un **monostrat de lipide**.

Modelul propus de **Overton** a fost confirmat prin faptul că la suprafața de separație a mediilor polare și nepolare (de exemplu, apă și aer) lipidele formează un **strat monomolecular** (fig. 8.6).

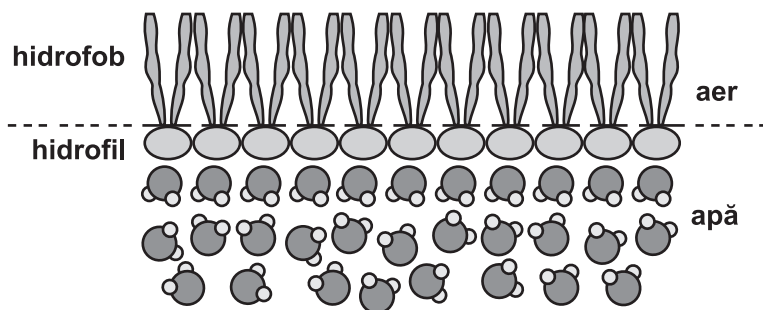


Fig. 8.6.

Astfel de aranjare a moleculelor de stearină poate fi confirmată printr-o experiență simplă, descrisă în volumul „Experiment demonstrativ de fizică”, semnat de D. Croitoru (Chișinău, Î.S. „Tipografia centrală”, 1997).

În anul 1925, **E. Gorter** și **F. Grendel**, folosind acetonă, au extras lipidele membranare dintr-un număr cunoscut de eritrocite. Lipidelor extrase li s-au creat condiții de etalonare în mono-strat.

S-a constatat că aria suprafeței monostratului obținut este de două ori mai mare decât aria suprafețelor sumă ale membranelor eritrocitare.

Bazându-se pe acest rezultat experimental, ei au propus un nou model, conform căruia în membrană lipidele se dispun sub formă de **strat dublu** (fig. 8.7).

Această presupunere a fost confirmată și prin cercetarea parametrilor electrice ai membranelor biologice de către **Coul** și **Cheortis** (1935). Rezistența electrică (R) și capacitatea electrică (C) ale unei unități de suprafață a membranei au valori relativ mari:

$$R \approx 10^7 \Omega/m^2; C = 0,5 \cdot 10^{-2} F/m^2.$$

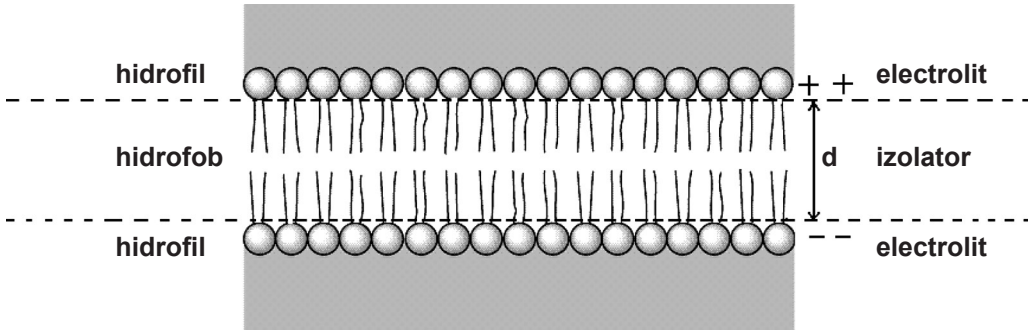


Fig. 8.7.

În baza acestor rezultate, membrana biologică a fost privită ca un condensator electric (fig. 8.7), mediile conductoare ale căruia sunt formate de soluțiile electrolitice (din interiorul și exteriorul celulei) separate de dublul strat lipidic. Lipidele sunt dielectrice cu permitivitatea $\varepsilon = 2$. Capacitatea unui condensator plan se determină din relația:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (10),$$

unde: ε_0 – permitivitatea electrică a vidului ($\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m); d – distanța dintre armăturile condensatorului.

Capacitatea ce revine la o unitate de suprafață:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{d} \quad (11).$$

Din relația (11) se poate determina distanța dintre armăturile condensatorului, care, în cazul cercetat, corespunde grosimii componente lipidice a membranei:

$$d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{C} \approx \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 3,6 \text{ nm}.$$

Ulterior, prin noi metode, s-a confirmat că valoarea obținută este întocmai de ordinul grosimii părții nepolare a stratului dublu lipidic.

Menționăm că ipoteza stratului dublu lipidic a fost menținută în toate modelele membranei propuse ulterior.

Coeficientul de tensiune superficială la interfața membrană-apă a fost măsurat de către **Danielli** și **Davson**, care au constatat valoarea de 0.2 dyne/cm, pe când același coeficient măsurat la interfața lipide-apă era cu mult mai mare – de 36 dyne/cm. Aceste rezultate, precum și faptul că proteinele sunt tensioactive, i-au condus pe Danielli și Davson la ideea că pe suprafața membranei sunt prezente proteinele.

Astfel a fost elaborat modelul „în sandvici”, conform căruia, stratul bilipidic este cuprins între două straturi de proteine (fig. 8.8). Unul din neajunsurile acestui model constă în faptul că structura compactă, alcătuită din straturi de lipide și proteine, nu era compatibilă cu difuzia rapidă a apei la nivel membranar, precum și a unor ioni.

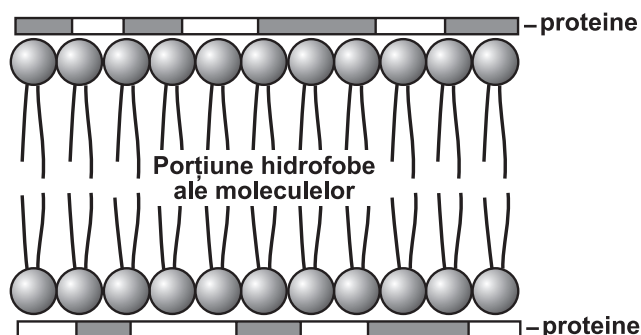


Fig. 8.8.

Pentru a înlătura acest neajuns, în anul 1956, autorii modelului admit existența unor pori membranari. Însă, pe măsura acumulării noilor date experimentale, apăsarea și necesitatea de a se dezice și de modelul „în sandvici”.

Ulterior, un rol important în studierea structurii biomembranelor aparține metodelor fizice de cercetare, efectuate cu mijloace tehnice de o înaltă precizie. Dintre ele fac parte: **difracția cu raze X**, **microscopia electronică** și **criodecapajul**.

Prin metoda cu raze X s-a confirmat aranjarea ordonată a moleculelor lipidice în stratul dublu și s-au determinat cu precizie diferite dimensiuni liniare din structura biomembranelor.

Pentru prima dată, microscopia electronică a fost aplicată de către **Robertson** (1957) în studiul biomembranelor. După o prelucrare preventivă a membranei, în electronogramă se diferențiază trei straturi (fig. 8.9). Grosimea sumă a stratului triplu pentru membranele diferitor celule variază de la 7 până la 15 nm.

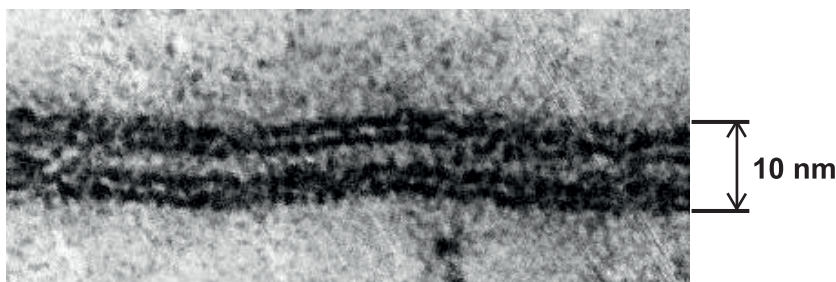


Fig. 8.9.

Datele experimentale acumulate prin metodele descrise mai sus, precum și prin alte metode fizice și chimice, au făcut posibil ca între anii 1960 și 1970 să se realizeze mai multe încercări de noi modele membranare. În anul 1972 s-a ajuns la un consens, care este rezumat de **modelul în mozaic fluid lipo-proteic**, elaborat de către **Singer** și **Nicolson**. Acest model menține ca structură de bază stratul dublu lipidic, „perturbat” de proteinele membranare integrale și periferice (fig. 8.10).

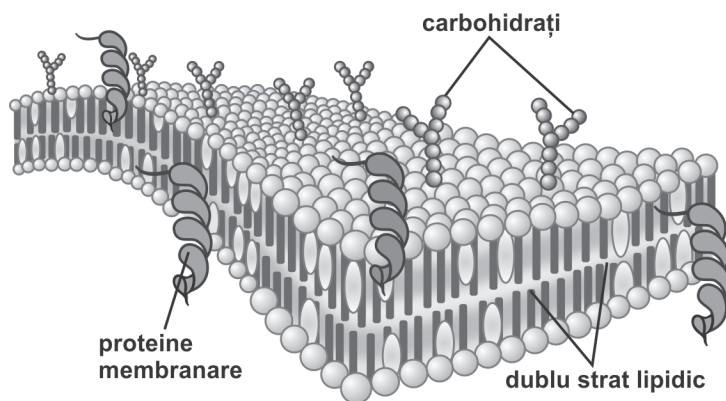


Fig. 8.10.

Modelul în mozaic fluid a fost confirmat de numeroase tehnici biofizice, dintre care cea mai productivă este **criofracturarea** (criodecapajul) membranei celulare și apoi examinarea la **microscopul electronic**.

Această metodă prevede câteva etape succesive:

- răcirea accelerată a celulei în azot lichid;
- separarea membranei celulare;
- introducerea într-o incintă vidată;
- fracturarea membranei în lungul interfeței straturilor lipidice cu un cuțit special;
- pulverizarea preparatului primit cu atomi de platină și carbon;
- examinarea la microscopul electronic.

Prin criofracturare, membrana se desface în două straturi, evidențiind structura internă (fig. 8.11). Astfel a fost stabilită prezența proteinelor integrale în structura membranelor biologice.

Trebuie de menționat că bistratul lipidic este o structură dinamică, prezentând fluiditate: moleculele lipidice prezintă mișcări de translație în stratul în care

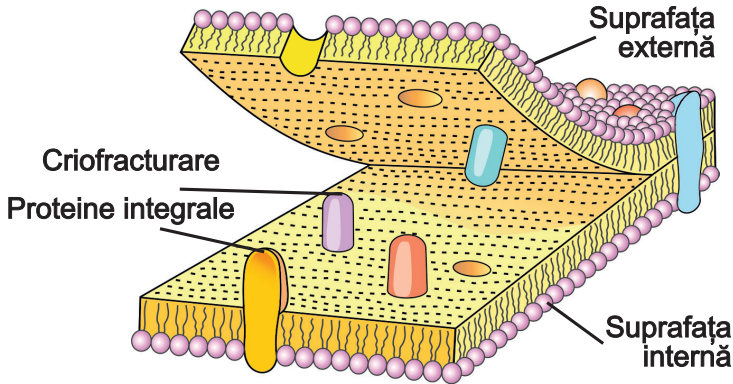
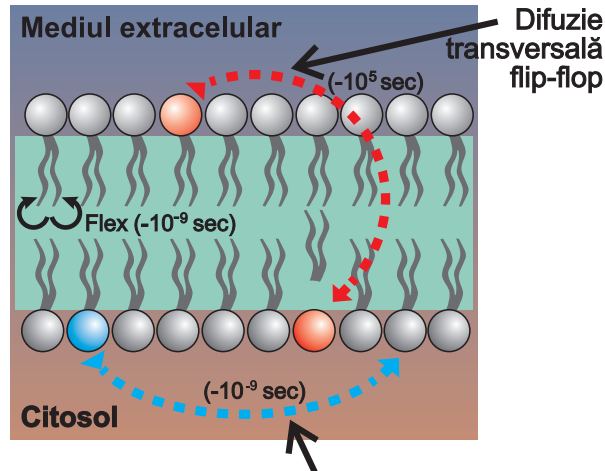


Fig. 8.11.

se află (**difuzie laterală**), rotație în jurul axei proprii, rotație descriind o suprafață conică, flexie, basculare dintr-un strat lipidic în celălalt (**difuzie transversală**) (fig. 8.12).



Difuzie laterală

Fig. 8.12.

Compozițiile lipidice și proteice ale diferitor membrane sunt foarte variate; raportul de mase **lipide/proteine** variază de la 4 pentru **mielină** până la 0,3 pentru membrana internă a **mitocondriilor**, cu toate valorile intermediare posibile. Acest raport depinde de funcțiile îndeplinite de celula respectivă.

Posibilitățile de traversare a membranelor biologice sunt de două tipuri:

1) **transport pasiv** – în direcția potențialului electrochimic, fără consum de energie metabolică;

2) **transport activ** – contra potențialului electrochimic, cu consum de energie metabolică.

Transport pasiv simplu

Pentru a defini noțiunea de permeabilitate a membranelor, vom considera o membrană biologică cu grosimea de circa 10 nm care separă două soluții apoase cu concentrațiile C_1 și C_2 ($C_1 > C_2$) (fig. 8.13).

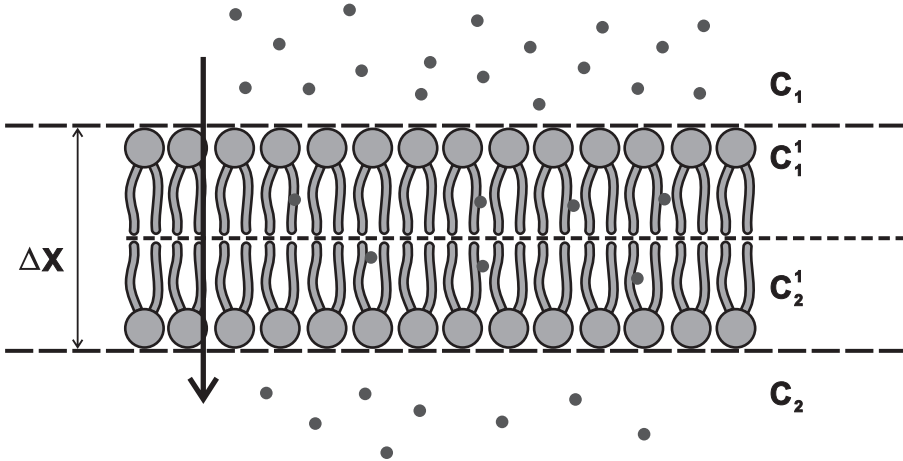


Fig. 8.13.

Pentru concentrațiile din interiorul și exteriorul membranei are loc relația:

$$\beta = \frac{C_1^1}{C_1} = \frac{C_2^1}{C_2} = \frac{C_2^1 - C_1^1}{C_2 - C_1} \quad (12),$$

unde: β este numit *coeficient de partiție*.

În aceste condiții, gradientul de concentrație în interiorul membranei este:

$$\frac{C_2^1 - C_1^1}{\Delta x}.$$

Fluxul unitar de substanță (Φ_u) prin membrană este egal cu raportul dintre masa de solvit (Δm) și produsul dintre timp (Δt) și suprafața membranei (s):

$$\Phi_u = \frac{\Delta m}{s \Delta t} \quad (13).$$

Substituind în relația (13) Δm cu expresia din relația (2), obținem:

$$\Phi_u = -\frac{DS\Delta C\Delta t}{S\Delta t\Delta x} \Rightarrow -\frac{D\Delta C}{\Delta x} \Rightarrow -D\frac{C_2^1 - C_1^1}{\Delta x} \quad (14).$$

Deoarece este greu de măsurat concentrațiile din interiorul membranei, în relația (14) ele pot fi substituite prin concentrațiile din exterior, utilizând coeficientul de partiție:

$$C_2^1 - C_1^1 = \beta(C_2 - C_1).$$

În consecință, relația pentru fluxul unitar se va scrie:

$$\Phi_u = -D \frac{\beta}{\Delta x} (C_2 - C_1) \quad (15).$$

Pentru un caz concret, expresia $P = -\frac{D\beta}{\Delta x}$ (m/s) este mărime constantă și se numește **coeficient de permeabilitate**, fiind determinat de proprietățile bistratului lipidic și de caracteristicile particulei.

În final

$$\Phi_u = P(C_2 - C_1) \quad (16).$$

8.4. METODE FIZICE ÎN STUDIAREA PERMEABILITĂȚII MEMBRANELOR

Există câteva metode de determinare a coeficientului de permeabilitate a membranelor.

- **Metoda osmotică** constă în evidențierea vitezei de variație a volumului celulelor introduse în soluțiile hipotonice sau hipertonic.

- **Metoda indicatorilor**, care se bazează pe nivelul de variație a **culorii** conținutului intracelular la pătrunderea în celulă a anumitor substanțe.

- **Metoda conductibilității electrice** a membranei. În anumite condiții, când măsurările se efectuează la frecvențe joase ale curentului electric alternativ, conductibilitatea electrică este măsura permeabilității membranei. Această metodă este utilă numai în studiul permeabilității membranei pentru ioni.

- **Metoda atomilor marcați** se bazează pe folosirea izotopilor radioactivi. Pătrunderea substanței în celulă sau ieșirea din celulă poate fi înregistrată cu ajutorul contorului de radiații ionizante.

Studiul permeabilității membranelor celulare are o mare importanță pentru medicină, îndeosebi pentru farmacologie și toxicologie. Efectivitatea preparatelor farmaceutice depinde în mare măsură de permeabilitatea membranelor celulare pentru ele.

8.5. IMPORTANȚA DIFUZIEI GAZELOR ÎN BIOLOGIE ȘI MEDICINĂ

Difuzia gazelor (îndeosebi O_2 , CO_2 și N_2) are loc în procesele de respirație a plantelor și animalelor, precum și în procesul de fotosinteză.

Deoarece fluxul de substanță difuzată este direct proporțional cu aria suprafeței prin care are loc difuzia, organismele aerobe au nevoie de suprafață de contact cât mai mare cu mediul extern gazos.

La microorganismele, precum și la organismele macroscopice de talie mică, aria suprafeței lor în raport cu volumul corporal este mare, astfel încât schimbările gazoase cu mediul, necesare proceselor vitale, se realizează prin difuzie pasivă.

La plantele superioare, schimbul de gaze cu mediul se face prin frunze, care oferă o suprafață de contact cu atmosfera foarte întinsă (cazul plantelor terestre) sau cu apa (cazul plantelor acvatice).

La multe specii de animale superioare, inclusiv la om, schimburile de gaze (O_2 și CO_2) se realizează la nivelul alveolelor pulmonare, aria cărora este de 60–120 m², precum și la nivelul țesuturilor.

Schimbul de gaze dintre aerul din alveole și sânge are loc prin membranele alveolare umectate. În lichidul de umectare sunt dizolvate gazele din atmosferă, conform următoarelor legi:

– coeficientul de solubilitate (S) depinde de natura gazului, de natura solventului și de temperatură:

$$S = \frac{\text{Volum maxim de gaz solvit}}{\text{Volum de solvent}};$$

– pentru cuplul gaz-solvent dat, la temperatura constantă, cantitatea de gaz dizolvată este proporțională cu presiunea exercitată de gaz la suprafața lichidului;

– în cazul unui amestec de gaze, fiecare gaz se dizolvă în solvent independent de prezența celorlalte gaze. Cantitatea fiecărui gaz solvit este proporțională cu presiunea lui parțială în amestec.

În alveolele pulmonare, gazele componente sunt solvite în lichidul de umectare, iar de aici se difuzează prin membranele alveolare spre vasele sanguine. Aceste gaze fie rămân solvite în sânge (cazul azotului), fie pot realiza, parțial, combinații chimice labile (**oxihemoglobina** și **carbohemoglobina**) sau stabile (**carboxihemoglobina**).

Este important faptul că combinațiile labile ale O_2 și CO_2 cu hemoglobina se formează și se distrug în funcție de presiunile parțiale ale acestor gaze.

În alveole, presiunea parțială a oxigenului este relativ mare (100 mmHg), ceea ce favorizează trecerea lui în sângele venos (prin dizolvare urmată de difuzie). Aici O_2 formează cu hemoglobina din hematii oxihemoglobina.

La nivelul țesuturilor, presiunea parțială a oxigenului este mai mică (20–40 mm Hg), ceea ce implică eliberarea sa din complexul oxihemoglobinic. În schimb, aici presiunea parțială a CO_2 este mai mare (53–76 mm Hg), favorabilă formării carbohemoglobinei.

La nivelul alveolelor, presiunea parțială a CO_2 este mai scăzută (40 mm Hg), ceea ce conduce la eliberarea CO_2 din complexul carbohemoglobinic.

În condițiile menționate mai sus coeficientul de difuzie pentru CO_2 este mai mare decât coeficientul de difuzie pentru O_2 :

$$\frac{D_{\text{CO}_2}}{D_{\text{O}_2}} = 25,$$

ceea ce prezintă o mare importanță pentru biosisteme.

Constituind produsul principal de catabolism al animalelor, bioxidul de carbon se elimină ușor din organisme, pe de altă parte el fiind folosit ca materie primă în procesul de fotosinteză, preluat ușor (prin difuzie) din aerul atmosferic.

8.6. DIFUZIA FACILITATĂ

Mulți factori nutritivi necesari celulei, fiind molecule hidrofile relativ mari, nu pot traversa membrana prin difuzie simplă. În acest caz se apelează la un transport mediat de molecule transportoare, mecanism numit **difuzie facilitată**.

Molecula transportoare recunoaște molecula (sau uneori ionul) pentru care este specifică și o introduce în celulă sub acțiunea gradientului electrochimic.

Există mai multe modele de transport facilitat, unul dintre care, numit **modificare conformațională**, este reprezentat în figura 8.14.

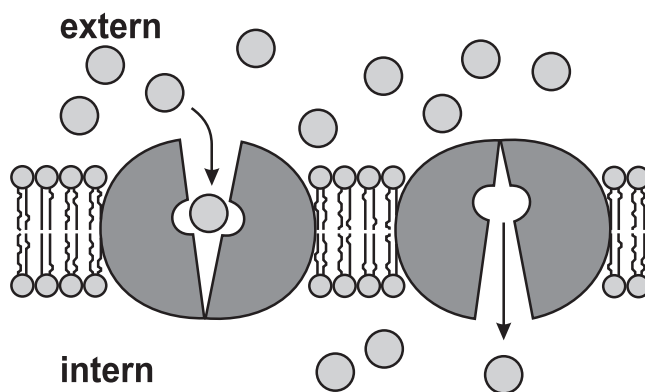


Fig. 8.14.

În raport cu difuzia simplă, difuzia facilitată are următoarele particularități:

- are o eficiență mai mică decât a celei prin canale, însă cu mult mai rapidă;
- are proprietatea de saturare: odată cu creșterea concentrației, fluxul de substanță crește numai până la o anumită limită, când toate moleculele transportoare sunt deja ocupate (fig. 8.15);

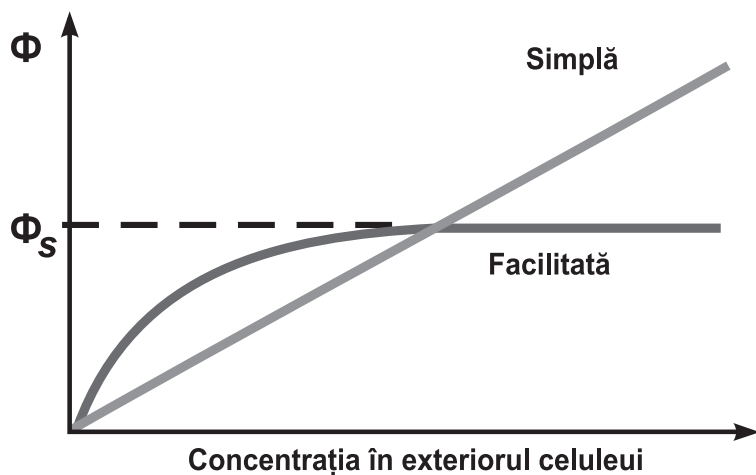


Fig. 8.15.

– când transportorii deservesc diferite substanțe, se observă o anumită concurență: substanța cu coeficient de permeabilitate mai mare împiedică transportul substanței cu coeficientul de permeabilitate mai mic;

– există substanțe care formează compuși stabili cu moleculele transportoare, blocând în acest fel difuzia facilitată. De exemplu, **floridzinul** exclude transportul zaharidelor prin membrana biologică. Dacă transportul unei substanțe poate fi blocat în modul menționat, se poate conchide că ea se transportă prin difuzie facilitată.

8.7. SISTEME DE TRANSPORT ACTIV

Transportul pasiv are totdeauna tendința de a nivela repartiția neuniformă a substanțelor în mediile intracelular și extracelular. Cu toate acestea, componența celulară diferă esențial de componența mediului extracelular. În celulă se găsesc în cantități mai mari ionii de potasiu, ionii nedifuzabili proteici, fosfolipidele, anionii de aminoacizi și alți ioni ai substanțelor organice, care în lichidul extracelular se găsesc în cantități neesențiale. Alte substanțe, din contra, se conțin în cantități mult mai mari în mediul exterior decât în celulă (de exemplu, ionii de sodiu). Cele expuse, precum și un șir de alte date experimentale, permit a conchide că, odată cu transportul pasiv, în celule are loc și transportul activ de substanțe.

Transportul moleculelor și al ionilor contra gradientului electrochimic, realizat de celulă din contul energiei proceselor metabolice, se numește *transport*

activ. De exemplu, la omul în repaus, circa 30–40% din energia proceselor metabolice se cheltuiesc pentru asigurarea transportului activ.

Complexele enzimatic care efectuează transportul activ se numesc *pompe de transport activ*.

Noțiunea de „pomă” a fost introdusă de către **Hans Ussing**, pentru a sugera faptul că fenomenul de transport activ se produce cu consum de energie.

Există diverse sisteme de transport activ, însă cel mai răspândit, prezent la toate celulele vertebratelor, este pompa de $\text{Na}^+ - \text{K}^+$. Pompa de sodiu-potasiu este de o mare importanță fiziologică. Gradientul $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ controlează volumul celulelor, determină excitabilitatea nervilor și mușchilor. Mecanismul funcționării unei pompe ionice de $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ este reprezentat în figura 8.16.

În membrana celulară există o substanță specială, liposolubilă (numită „X”), care ia naștere pe fața interioară a membranei și are o deosebită afinitate pentru ionul de Na^+ . Ca atare, se unește cu un ion de Na^+ din mediul intracelular, formând compusul XNa^+ .

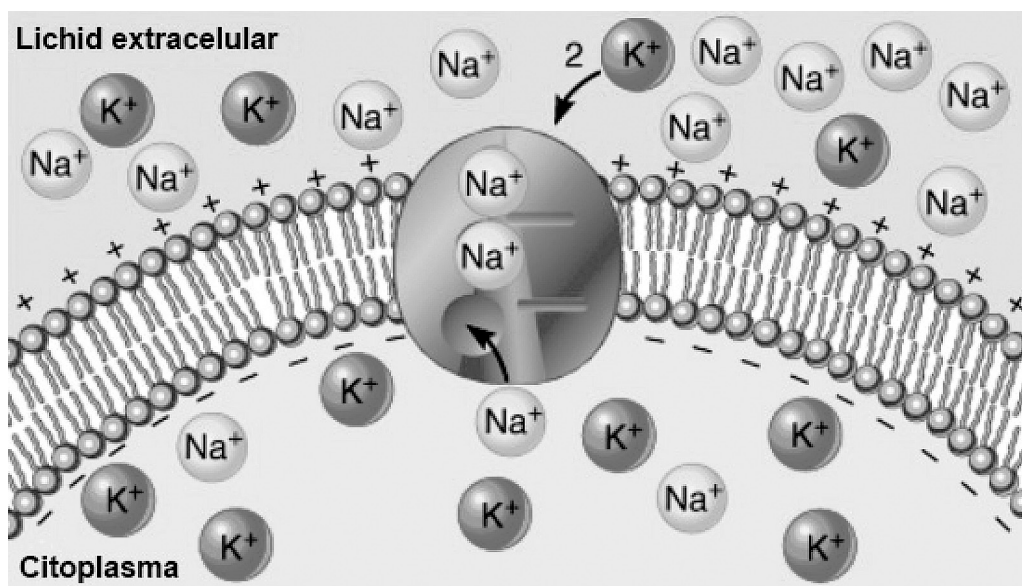


Fig. 8.16.

În urma formării acestui complex, se produce un gradient de concentrație între cele două fețe ale membranei, care determină deplasarea compusului XNa^+ spre fața exterioară a membranei, unde acționează o enzimă ce transformă substanța X într-o altă substanță – Y. Ultima nu mai are afinitate pentru ionul de Na^+ și din această cauză el este „expulzat” în mediul extracelular. Substanța Y are însă afinitate pentru ionul de K^+ din mediul extracelular, formând compusul care se

deplasează spre fața interioară a membranei. Folosind energie metabolică, substanța Y redevine X și ionul de K^+ este eliberat în mediul intracelular. Energia necesară acestei reacții este asigurată de ATP prin ruperea legăturilor macroergice și scindarea ATP în ADP și P.

Date recente confirmă că pompa de $Na^+ - K^+$ poate funcționa în câteva regiuri. Ea poate transporta ionii de potasiu și sodiu în raporturi 1:1, 1:2, 1:3, 2:3 și, în sfârșit, pot fi transportați ionii de Na^+ , în lipsa transportului ionilor de K^+ .

Este necesar să menționăm că sistemele de transport activ reprezintă cel mai eficient mecanism care determină permeabilitatea selectivă a membranelor celulare, comunicându-le totodată și anumite proprietăți.

Denumirea și caracteristicile fiecărui tip de transport prin membranele celulare sunt reprezentate schematic în figura 8.17.

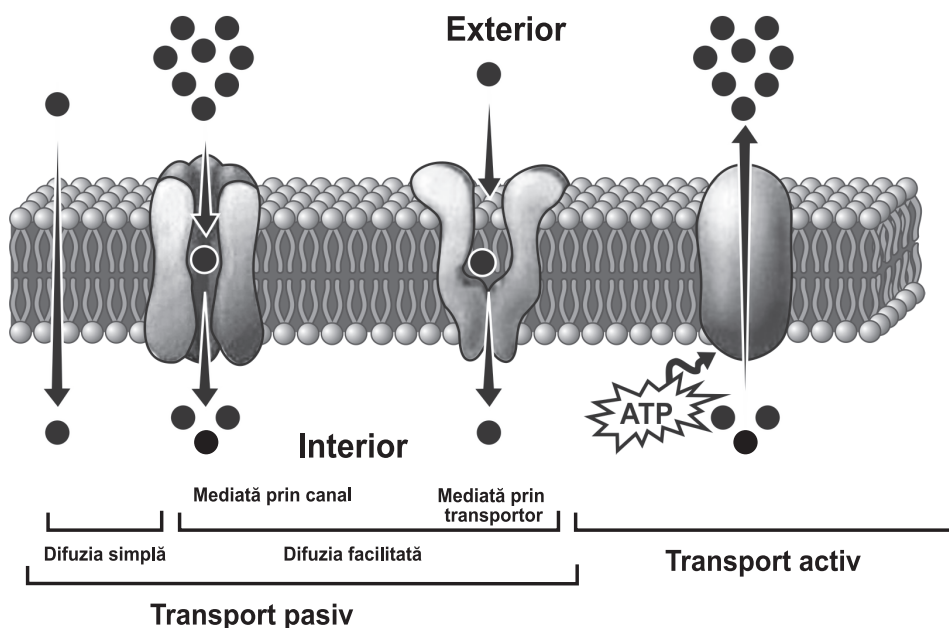


Fig. 8.17.

EXERCIȚII

1. O soluție de hemoglobină cu concentrația 10^{-4} mol/l difuzează, traversând o membrană cu suprafața de 20 cm^2 , spre o soluție cu concentrația de $1,4 \cdot 10^{-5}$ mol/l. Coeficientul de difuzie a hemoglobinei $D = 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $M = 68000 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Determinați masa hemoglobinei care s-a deplasat la 5 cm în timp de 1 minut.

Răspuns: $\Delta m = 9,6 \cdot 10^{-7} \text{ g}$.

2. Determinați în Å, cu aproximație, raza moleculei unui gaz, considerată de formă sferică, la temperatura de 41°C.

Se dă: – coeficientul de vâscozitate $\eta = 10^{-5} \text{ Nm}^{-2} \text{ s}$;
 – constanta lui Boltzmann $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$;
 – coeficientul de difuzie $D = 0,069 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Răspuns: $r \approx 3,3 \text{ Å}$.

3. Un recipient este divizat în două compartimente, printr-o membrană cu suprafața de 10 cm^2 , permeabilă atât pentru moleculele de **uree**, cât și pentru cele de **manito**. Concentrația de uree în ambele compartimente este de 24 g/l , iar concentrația de manito în compartimentul 1 este de $0,5 \text{ mol/l}$, iar în compartimentul 2 este nulă. Cunoscând că masa de manito, care traversează membrana timp de o oră, este de $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ g}$, calculați în cm grosimea membranei Δx .

Se dă: $D_{\text{manito}} = 0,40 \text{ cm}^2/\text{zi}$; $M_{\text{manito}} = 162 \text{ g/mol}$.

Răspuns: $\Delta x = 1 \text{ cm}$.

4. Un recipient eate separat în două de o membrană circulară cu raza de 3 mm, care permite trecerea moleculelor de uree. Grosimea membranei este de 0,5 cm. Compartimentul 1 conține o soluție apoasă de uree (0,2 M), iar compartimentul 2 – apă distilată. Calculați masa de uree (în μg), care va trece din 1 în 2 timp de 1 secundă.

Se dă: $M_{\text{uree}} = 60 \text{ g/mol}$; $D_{\text{uree}} = 0,81 \text{ cm}^2/\text{zi}$.

Răspuns: $\Delta m = 6,36 \cdot 10^{-2} \mu\text{g}$.

5. La un pacient, membrana alveolei pulmonare, care separă aerul de sânge, este de 1,25 ori mai mare decât grosimea normală. Aplicând legea lui Fick, calculați fluxul de difuzie a unui gaz care traversează această membrană în raport cu fluxul normal, considerat unitar.

Răspuns: 0,8.

6. Determinați fluxul de formaldehidă prin membrana plasmatică cu grosimea de 8 nm, dacă este cunoscut coeficientul de difuzie $D = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ și concentrația de formaldehidă din exterior, în momentul inițial $C_0^M = 20 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$, iar în interiorul celulei – de 10 ori mai mică.

Răspuns: $\Phi \approx 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{cm} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

7. O membrană formată din strat dublu lipidic, cu grosimea de 10 nm, divizează un recipient în două compartimente. În unul din compartimente soluția de **metil albastru** are concentrația de 10^{-2} mol/l , iar în celălalt – de $2 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$. Considerând că fluxul de metil albastru prin membrană este constant și egal cu $3 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{cm} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, determinați coeficientul de difuzie al acestei substanțe prin membrană.

Răspuns: $D = 2,4 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

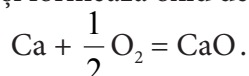
9. POTENȚIALE DE ELECTROD

Potențialul de electrod este o concepție fundamentală a teoriei electrochimice și a coroziunii, care ajută la precizarea direcției și intensității unui proces electrochimic (de ex., coroziunea) și permite de a fi controlat.

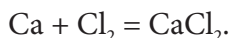
9.1. OXIDARE ȘI REDUCERE

Există două sensuri ale termenului *oxidare*: **Oxidarea este procesul prin care un atom sau un ion își mărește valența pozitivă sau își micșorează valența negativă, ca urmare a pierderii unui anumit număr (1, 2, 3) de electroni.**

Sensul comun (îngust) de oxidare sunt reacțiile chimice (de combinare) dintre oxigen și orice alt element care este rezultat în formarea de oxid. De exemplu, calciul și oxigenul se combină și formează oxid de calciu:

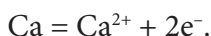


În chimie termenul **oxidare** are un sens mai larg: **oxidarea este un proces chimic în care un element pierde unul sau mai mulți din electronii săi, oferindu-le (-i) altui element.** Elementul care primește electronii nu trebuie să fie neapărat oxigenul. De exemplu, reacția dintre calciu și clor este considerată **reacție de oxidare**:

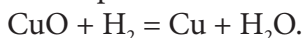


În această reacție, un atom de calciu se oxidează atunci când renunță la doi electroni ai săi pentru doi atomi de clor.

Ambele reacții pot fi prezentate sub formă de ioni, după cum urmează:



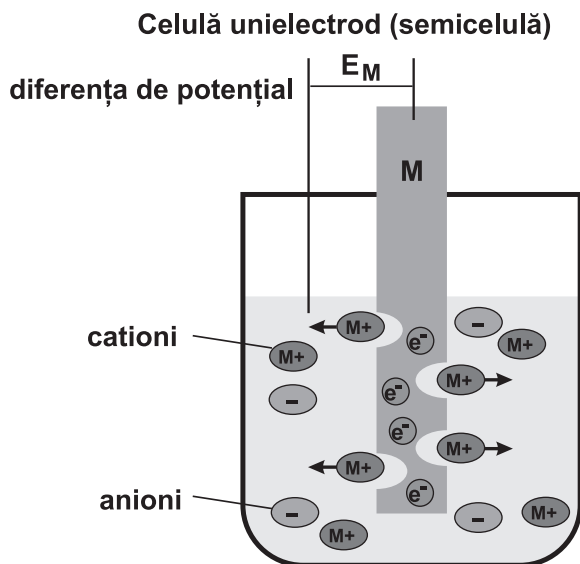
Reducerea este un proces chimic opus **oxidării**, în care atomii unui element capătă unul sau mai mulți electroni acordați de atomii altui element. De exemplu, reducerea cuprului din oxidul de cupru:



În această reacție, ionul pozitiv de cupru primește doi electroni de la doi atomi de hidrogen. Reducerea cuprului în formă de ioni poate fi prezentată după cum urmează:



Oxidarea unui element este întotdeauna însoțită de reducerea unui alt element. Prin urmare, reacția este adesea numită de **oxidare-reducere** sau de **oxido-reducere** (redox).



Când o bară de metal M (fig. 9.1) este plasată într-o soluție capabilă să dizolve acest metal, începe procesul de oxidare, cedând electronii e^- probei de metal și formând ionii pozitivi M^+ , care, ulterior, se deplasează în soluția electrolică. Ca rezultat, se formează o diferență de potențial E_M între bara de metal M și formele electrolice, care reprezintă potențialul de electrod, valoarea căruia rezultă din **relația lui Nernst**:

$$E_M = V_{\text{metal}} - V_{\text{soluție}} = E_{M_0} + \frac{RT}{zF} \ln [M^{z+}],$$

unde E_0 este o constantă, numită **potențial normal de electrod** (este valoarea E_M când $(M^{z+}) = 1$). Valoarea absolută a diferenței de potențial nu poate fi măsurată, deoarece ar însemna introducerea unui alt electrod în electrolit și formarea altei diferențe de potențial între ele. Pentru măsurările relative ale potențialului diverselor metale în soluții diferite este folosită **pila galvanică**.

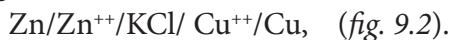
Pila galvanică tipică constă din doi electrozi metalici (de ex., Zn și Cu) cu-fundați în soluții de $ZnSO_4$ și respectiv $CuSO_4$. Pentru a măsura potențialul de electrod cu un voltmetru, este necesar de utilizat o semipilă de referință și o semipilă de măsură, conectate electric printr-o punte de KCl sau de NH_4NO_3 . Cunoașterea potențialelor normale ale electrozilor permite de a prezice polaritatea și forța electromotoare a sursei obținute prin realizarea pilei galvanice.

Dacă sunt cunoscute două potențiale normale, respectiv:

$$Zn/Zn^{++} - 0,76 \text{ V}$$

$$Cu^{++}/Cu + 0,34 \text{ V},$$

se poate realiza o pilă galvanică:



Soluțiile sunt conectate electric printr-o punte, care reprezintă o bandă de hârtie de filtru umectată într-o soluție de KCl, iar electrozii metalici sunt conectați la bornele unui voltmetru de înaltă rezistență.

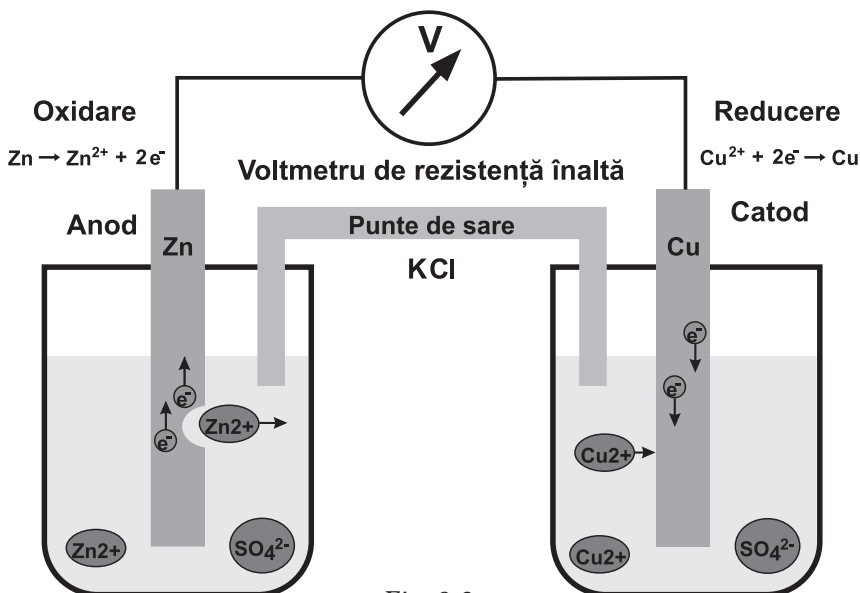
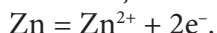


Fig. 9.2.

În această pilă galvanică electrodul de zinc este anodul. Acesta se oxidează și se dezice de electronii atomilor dizolvați în electrolit în formă de ioni pozitivi:



Electrodul de cupru este catodul. Ionii de cupru dizolvați obțin electroni din electrodul metalic se transformă în metalul solid care se depune pe suprafața catodului:



În cazul în care valoarea curentului electric este neglijată (este utilizat voltmetrul de rezistență înaltă), se măsoară diferența de potențial dintre electrozi, care este egală cu forța electromotoare (FEM) a pilei galvanice.

Forța electromotoare se măsoară, de obicei, în condiții standard:

- temperatura: 25°C (298°K);
- presiunea gazelor: 1 bar;
- concentrația soluției electrolitice: 1 mol/dm³.

Forța electromotoare măsurată în condiții standard are notația E^0 ; ea reprezintă suma care rezultă din diferențele de potențial ale anodului și catodului:

$$E^0 = E_{\text{catod}} - E_{\text{anod}}.$$

Pentru pila galvanică prezentată anterior:

$$E^0 = V_{Cu} - V_{Zn} = 0,34 - (-0,76) = 1,10 \text{ V.}$$

9.2. POTENȚIALUL DE ELECTROD STANDARD

Potențialul de electrod standard este o forță electromotoare măsurată în pila galvanică, formată din semicelula cu electrodul în condițiile standard și semicelula cu electrodul de hidrogen standard (fig. 9.3).

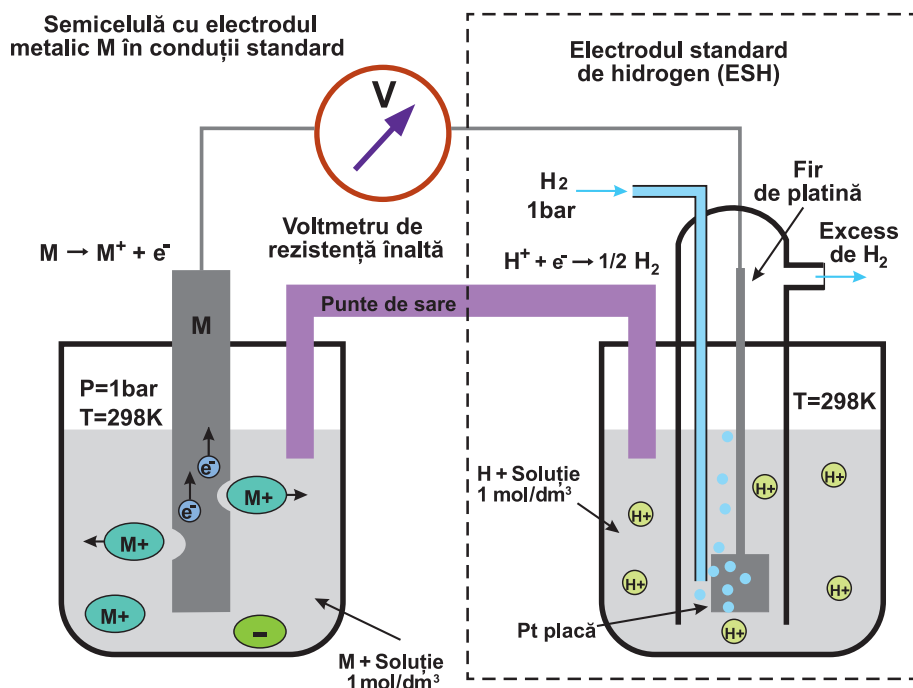


Fig. 9.3.

Electrodul standard de hidrogen (ESH) este format dintr-o placă de platină acoperită cu platină neagră (platină pulbere), care este cufundată într-o soluție acidă cu o concentrație a ionilor de hidrogen (H^+) 1 mol/dm^3 și care este în contact cu bulele de hidrogen gazos din jurul electrodului.

Platina nu ia parte la reacție, dar servește drept catalizator pentru reacția de oxidoreducere a hidrogenului.

Potențialul de electrod standard este măsurat relativ față de electrodul de hidrogen standard, potențialul căruia este definit ca 0 volți:

$$E^0 = E_R^0 - E^0(H^+/H_2) = E_R^0.$$

Electrodul metalic este conectat la borna pozitivă a voltmetrului iar electrodul de hidrogen standard este conectat la borna negativă a voltmetrului. Când un potențial de electrod standard este măsurat, atunci electrodul este conectat la borna pozitivă a voltmetrului, iar electrodul de hidrogen standard este conectat la borna negativă a voltmetrului.

Seria electrochimică

Potențialele de electrod standard ale metalelor sunt aranjate în serie electrochimică (galvanică). În cazul când negativitatea unui potențial de electrod standard este mai mare, atunci elementele (electrozii: K, Ca, Mg, Zn, Na etc.) se oxidează (dizolvă).

Metalele nobile, nereactive, posedă valoare pozitivă a potențialului de electrod standard (Ag, Au, Hg etc.).

| Electrozii | E⁰ negativă | Electrozii | E⁰ pozitivă |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| K ⁺ /K | -2,925 | H ⁺ /H ₂ | 0,000 |
| Ca ²⁺ /Ca | -2,866 | Cu ²⁺ /Cu | +0,337 |
| Na ⁺ /Na | -2,714 | Cu ⁺ /Cu | +0,521 |
| Mg ⁺ /Mg | -2,37 | Ag ⁺ /Ag | +0,799 |
| Zn ²⁺ /Zn | -0,763 | Hg ²⁺ /Hg | +0,851 |
| Fe ²⁺ /Fe | -0,44 | Pd ²⁺ /Pd | +0,987 |
| Fe ³⁺ /Fe | -0,037 | Pt ²⁺ /Pt | +1,188 |
| | | Au ³⁺ /Au | +1,50 |
| | | Au ⁺ /Au | +1,692 |

9.3. PILA DE CONCENTRAȚIE

Aceasta este o pilă galvanică constituită din doi electrozi ai aceluiași metal, plasați în două soluții cu concentrații diferite ale aceluiași solvit. La 27°C pentru $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ și substituind logaritmul natural prin logaritmul zecimal, din relația lui Nernst, obținem:

$$E = \frac{0,06}{z} \lg \frac{[M^{z+}]_2}{[M^{z+}]_1}$$

Electrodul pozitiv este în contact cu soluția de concentrație mai mare.

Aplicații la măsurarea pH-ului

Se realizează o pilă galvanică de hidrogen. Electrodul de hidrogen, plasat în soluția cu pH necunoscut, prin puntea de KCl se unește cu electrodul de hidrogen

de referință plasat în soluția cu $pH = 0$. În aceste condiții, diferența de potențial măsurată este strict proporțională cu pH necunoscut.

$$E = 0,06 \text{ } pH, \text{ de unde } pH = \frac{E}{0,06}.$$

Practic este mai comod de a înlocui electrodul de hidrogen de referință printr-un electrod **calomel** de referință cu KCl de saturație. În acest caz are loc relația:

$$E_{\text{relativ}} = E_{\text{măsurat}} - 0,246 = 0,06 \text{ } pH,$$

$$pH = \frac{E_{\text{măsurat}} - 0,246}{0,06}.$$

EXERCIȚII

1. Potențialul normal al unui electrod de argint situat într-o soluție de clorură de argint este +0,80 V. Determinați potențialul electrodului metalic la 27°C, dacă concentrația soluției ar fi 10^{-4} mol/dm^3 .

Răspuns: 0,56 V.

2. Potențialul normal al unui electrod de cupru situat într-o soluție de CuSO_4 este +0,34 V. Fie că electrodul de Cu s-a plasat în 500 cm^3 soluție preparată prin amestecul a 250 cm^3 de soluție $\text{CuSO}_4 \text{ } 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ și 250 cm^3 de apă la temperatura 27°C. Determinați potențialul electrodului de cupru în soluția primită.

Răspuns: +0,27V.

3. Prin punte de KCl s-a confecționat o pilă între soluția apoasă A de $\text{CuSO}_4 \text{ } 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ și soluția apoasă B de $\text{CuSO}_4 \text{ } 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ la temperatura de 27°C. Determinați F.E.M. a pilei astfel constituite.

Răspuns: 0,03V.

4. S-a măsurat pH -ul unei soluții de HCl 10^{-2} M cu un voltmetru conectat la bornele unui circuit constituit dintr-un electrod de hidrogen de referință și un electrod identic de măsură. Determinați valoarea F.E.M. aplicată la voltmetru.

Răspuns: 0,12V.

5. Utilizând rezultatul exercițiului precedent, determinați F.E.M. măsurată în montajul potențiomtric, unde electrodul de referință este un electrod de calomel

cu KCl saturat, iar electrodul de măsură – un electrod de hidrogen într-o soluție HCl 10^{-2} mol/dm³.

Răspuns: 0,366 V.

6. F.E.M. măsurată la un electrod de hidrogen în raport cu un electrod calomel de referință cu soluție saturată KCl, introdus într-o soluție necunoscută, este $E_m = 0,546$ V. Care este pH-ul acestei soluții?

Răspuns: 5.

7. Cunoscând potențialele normale $Zn/Z^{++} = -0,76$ V și $Ag/Ag^+ = +0,80$ V, determinați F.E.M. a pilei constituite din $Zn/Z^{++} | KCl | Ag/Ag^+$.

Răspuns: +1,56 V.

10. FENOMENE BIOELECTRICE

10.1. ELEMENTUL DE CONCENTRAȚIE AL LUI NERNST

O caracteristică de bază a celulei vii este existența unei diferențe de potențial electric între fața externă și cea internă a membranei celulare, generată de o repartiție inegală a sarcinilor electrice în cele două compartimente.

În stare staționară, în aceste compartimente se stabilește o relație bine determinată între toți parametrii: potențial electric, potențial chimic, presiune etc., ceea ce definește **echilibrul de membrană**.

În stabilirea echilibrului de membrană intervin mai mulți factori, legați de caracteristicile membranei și de particularitățile mediilor disperse pe care le desparte.

Cel mai simplu **model al sursei de biopotențial membranar** este **elementul de concentrație al lui Nernst** (fig. 10.1). În el, soluțiile ionice de diferită concentrație ale unei sări sunt separate de o membrană care posedă **permeabilitate diferită pentru cationi și anioni**. Ca urmare, membrana devine polarizată. Stratul sarcinilor de partea soluției mai diluate are semnul ionului cu permeabilitatea mai mare. În figură este prezentat cazul când $C_1 < C_2$ și coeficientul de permeabilitate pentru cationi (P_c) este mai mare decât cel pentru anioni (P_a).

Organismele vii conțin o mare cantitate de apă (organismul omului – 60-70% din greutatea corporală), care este solventul de bază al sistemelor disperse polifazice: **crystaloizi** în stare ionizată (Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{++} , Mg^{++}); **micromolecule** și **macromolecule** (în general, anioni la pH fiziologic).

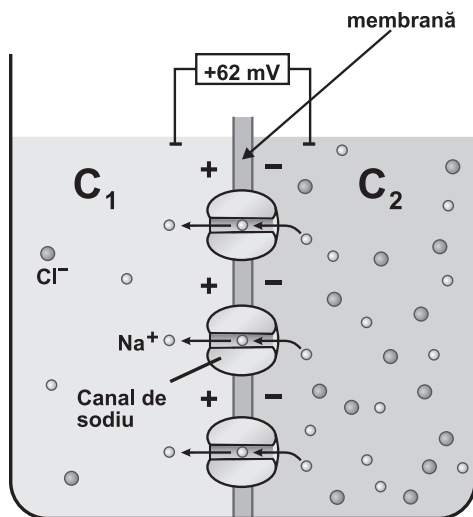


Fig. 10.1. Elementul de concentrație al lui Nernst.

Pentru fiecare categorie de ioni difuzibili, **potențialul electric de echilibru** se definește ca diferență de potențial între partea interioară (V_i) și partea exterioară (V_e) ale membranei celulare.

Valoarea potențialului de echilibru (V_{eq}) se determină din **ecuația lui Nernst**:

$$V_{eq} = V_i - V_e = -\frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_i}{C_e},$$

unde: Z – sarcina ionului; F – numărul lui Faraday; R – constanta universală a gazelor; T – temperatura absolută; C_i și C_e – concentrațiile categoriei de ioni pe părțile respective ale membranei.

Principalii ioni care intervin în echilibrul membranelor sunt: Na^+ , K^+ și Cl^- .

În tabelul de mai jos sunt date concentrațiile acestor ioni în mediile intra- și extracelulare, precum și potențialele lor de echilibru, calculate conform relației lui Nernst, pentru **axonul gigant de calmar (Loligo Paelei)**.

| Ionii | C_i în meq/l | C_e în meq/l | V_{eq} în mV |
|---------------|----------------|----------------|----------------|
| K^+ | 400 | 20 | -75 |
| Na^+ | 50 | 440 | +55 |
| Cl^- | 52 | 560 | -61 |

10.2. ECHILIBRUL DONNAN

Majoritatea membranelor celulare sunt permeabile pentru microioni, cum ar fi Na^+ , K^+ , Cl^- etc., dar impermeabile pentru macroionii proteici. Prezența unor macroioni nepermeanți în sistem duce la redistribuirea microionilor permeanți, determinând apariția unei diferențe de potențial electric între fețele membranei.

Adesea este vorba de anioni nedifuzibili, care aparțin doar unuia dintre cele două compartimente ale mediului bicompartimental cu membrane selectiv permeabile (fig.10.2).

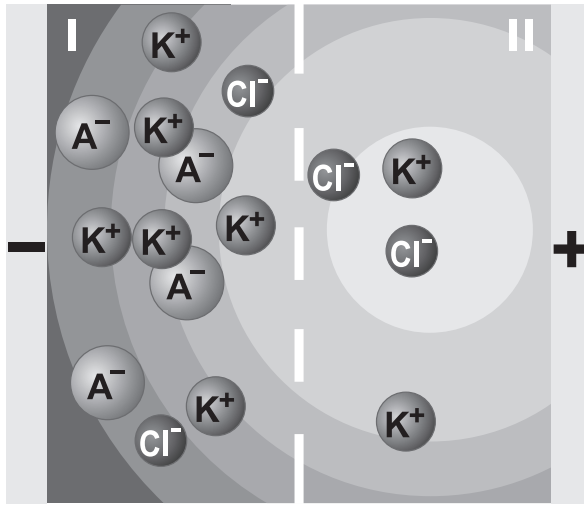


Fig. 10.2.

Dacă numai în primul compartiment există anioni nedifuzibili, cu Z sarcini elementare fiecare în concentrație de $[A^-]$, iar concentrațiile de anioni și cationi mici monovalenți din cele două compartimente sunt $[a^-]_1$, $[C^+]_1$, $[a^-]_2$, $[C^+]_2$, atunci neutralitatea electrică a fiecărui compartiment se transpune cantitativ astfel:

$$[C^+]_1 = [a^-]_1 + Z[A^-]$$

$$[C^+]_2 = [a^-]_2.$$

Condițiile ca în echilibru să se anuleze fluxurile de cationi și anioni difuzibili conduc la expresiile potențialului de membrană:

$$\Delta V = \frac{RT}{F} \ln \frac{[C^+]_1}{[C^+]_2}; \quad \Delta V = \frac{RT}{F} \ln \frac{[a^-]_2}{[a^-]_1}.$$

Din aceste două relații rezultă:

$$\frac{[C^+]_1}{[C^+]_2} = \frac{[a^-]_2}{[a^-]_1} \text{ sau echivalent: } [C^+]_1 \cdot [a^-]_1 = [C^+]_2 \cdot [a^-]_2.$$

Această relație se numește **ecuația de echilibru Donnan**.

Fenomenul respectiv aduce o contribuție (mică) la potențialul transmembranar observat în cazul celulelor vii, însumându-se cu potențialele de difuzie.

10.3. POTENȚIALUL MEMBRANAR DE REPAUS

Teoretic, potențialul de repaus al celulei se calculează cu **relația Goldman-Hodgkin-Katz**:

$$PR = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_e + P_{Na} [Na^+]_e + P_{Cl} [Cl^-]_i}{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_e},$$

unde: [] – concentrația; P – coeficientul de permeabilitate pentru categoria de ioni.

Contribuția celorlalți ioni, cum ar fi Ca^{++} , Mg^{++} , este mult mai mică și poate fi neglijată.

Potențialul membranar de repaus poate fi măsurat foarte simplu, cu ajutorul unui milivoltmetru și a doi electrozi, a căror dispunere este prezentată în figura 10.2.

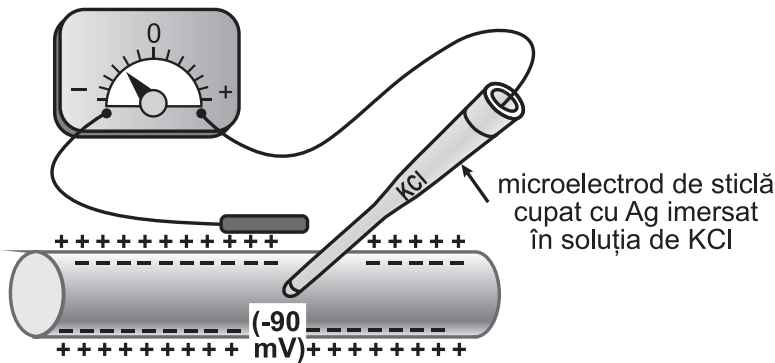


Fig. 10.2. Măsurarea potențialului membranar al fibrei nervoase cu ajutorul unui microelectrod.

Microelectrodul de sticlă este o pipetă obținută prin tragere la cald, având vârful mai mic de $0,5 \mu\text{m}$. Străpungerea membranei cu acest microelectrod nu o lezează considerabil, ceea ce exclude contactul de scurtcircuitare între citoplasmă și fluidul extracelular, deoarece membrana se strânge în jurul vârfului de sticlă (din cauza tensiunii superficiale). Astfel, la introducerea unui microelectrod în celulă, celălalt fiind menținut în mediul extracelular, milivoltmetrul va indica valoarea potențialului membranar de repaus (fig. 10.3).

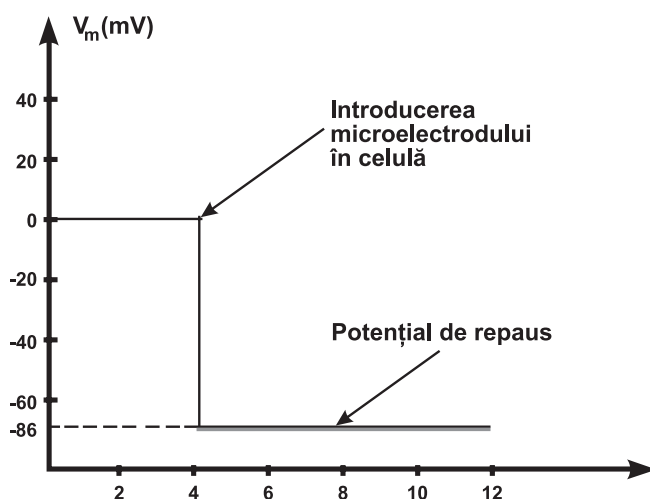


Fig. 10.3. Modificarea valorii indicate de milivoltmetru la introducerea microelectrodului în celulă.

Acest lucru se întâmplă în ciuda faptului că mediul intracelular și, respectiv, cel extracelular sunt, individual, neutre din punct de vedere electric. S-a descoperit că această diferență de potențial este cauzată de o distribuție asimetrică a unor ioni pe cele două fețe ale membranei și de permeabilitatea acesteia pentru ei. Cei mai importanți ioni în stabilirea acestei diferențe de potențial sunt Na^+ și K^+ . În condiții normale, concentrația ionilor de K^+ în interiorul celulei este cu mult mai ridicată decât cea din exterior (de 35 ori). În același timp, concentrația ionilor de Na^+ este mult mai înaltă pe fața externă comparativ cu cea de pe fața citoplasmatică (de 10 ori). În pofida acestor gradiente, celula își păstrează polarizarea sarcinilor prin schimbul constant de ioni între cele două medii, intracelular și extracelular.

În primul rând, există canale ionice care permit doar trecerea K^+ în stare de repaus. Acestea păstrează potențialul membranelor în limite constante, lăsând o parte din K^+ din interior să „scape” în exterior, însă doar atât cât să compenseze lipsa de Na^+ . În repaus, permeabilitatea pentru K^+ este de 100 de ori mai ridicată decât permeabilitatea pentru Na^+ . Membrana ajunge la un echilibru dinamic prin intermediul acestor fluxuri de ioni, moment în care diferența de potențial atinge o valoare fixă (fluxurile dau o diferență de potențial de aproximativ 86 mV);

În al doilea rând, există o contribuție din partea pompei de $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ care, prin consum de energie, menține gradientele de concentrație (fig. 10.4).

În concluzie, prin membrana celulară au loc în permanență fluxuri ionice pasive, în sensul reducerii gradientului electrochimic, dar acestea sunt compensate de fluxurile active ce se desfășoară în sens contrar, cu consum de energie metabolică.

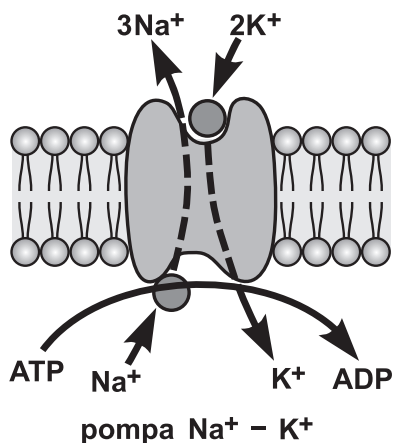


Fig. 10.4.

Celulele excitabile pentru menținerea potențialului membranelor folosesc 60% din energia lor metabolică, pe când celelalte celule – doar 30%.

Pentru celulele nervoase $PR = -90 \text{ mV}$;

pentru fibrele nervoase – $-75 \text{ mV} \geq PR \geq -60 \text{ mV}$;

pentru axonul de calmar $PR = -60 \text{ mV}$.

Potențialul membranelor de repaus reprezintă acea diferență de potențial electric dintre cele două fețe ale membranei, pentru care curentul electric total prin membrană, datorat tuturor tipurilor de ioni, se anulează.

10.4. POTENȚIALUL DE ACȚIUNE CELULAR

Potențialele de acțiune sunt unde de depolarizare care se deplasează de-a lungul membranei unei celule. Acestea sunt o trăsătură esențială a vieții în regnul animal (uneori, și în cel vegetal), prin prisma faptului că transmit informații în mod rapid între țesuturi. În cea mai mare parte, potențialele de acțiune sunt utilizate în sistemul nervos, însă ele pot apărea în majoritatea celulelor. Investigarea acestora este legată de acordarea în anul 1963 a premiului Nobel pentru fiziologie și medicină cercetătorilor britanici A. Hodgkin, J. Eccles și A. Huxley datorită studiilor întreprinse asupra electrofiziologiei potențialelor de acțiune, folosind axoni giganți de *Loligo Paelei*.

La toate metazoarele sistemul nervos periferic și central constituie o vastă rețea de comunicație în cadrul organismului, rețea în care pentru transmiterea semnalelor este utilizat un fenomen de natură bioelectrică, influxul sau impulsul nervos. Impulsul nervos reprezintă variația tranzitorie și propagabilă a potenția-

lului de membrană al fibrelor nervoase, numită **potențial de acțiune (PA)**, produsă de un stimul (uneori, există și o activitate celulară spontană).

Potențialul de acțiune este o depolarizare trecătoare a membranei celulare, prin care interiorul celulei devine mai puțin negativ decât în stare de repaus și diferența de potențial de-o parte și de alta a membranei celulare scade. Există și potențiale de acțiune hiperpolarizante, de exemplu în celulele receptoare retiniene.

Declanșarea potențialului de acțiune se realizează prin deschiderea porților unor canale cationice sau anionice (uneori, prin închiderea porților cationice, în cazul PA hiperpolarizante). Apar fluxuri de ioni care determină producerea unui semnal electric. Ionii implicați sunt în special Na^+ (în faza ascendentă a PA) și K^+ (în faza descendentă). În celula musculară, în faza ascendentă sunt implicați Ca^{++} .

Potențialele de acțiune sunt de două feluri:

- 1) **locale** (de exemplu, în dendrite sau în soma neuronală);
- 2) **potențiale de acțiune de tip tot sau nimic** (de exemplu, în axon).

Aceste potențiale se pot măsura de asemenea pe baza experiențelor cu microelectrozi.

Potențialele de acțiune locale (PA-l) se obțin la stimuli depolarizanți de intensitate mică, având valoarea sub cea a unei valori, numită **valoare prag**. Acești stimuli sunt numiți **stimuli subliminari** (sub prag). Ei produc o depolarizare redusă a membranei, care se propagă **decremental** (cu pierderi) sau **electrotonic**. De exemplu, la axonul gigant o depolarizare de 15 mV determină un potențial local. Amplitudinea unui asemenea potențial scade exponențial cu distanța. Deci, potențialele locale se caracterizează printr-o amplitudine proporțională cu intensitatea stimulului și printr-o propagare decrementală.

Potențialele de acțiune tot sau nimic (PA-tn) se declanșează atunci când intensitatea stimulului atinge o valoare critică „de prag” sau „prag de detonare”, adică atunci când aceasta are valori liminare sau supraliminare. Se produce **potențialul de vârf** (spike) al fibrei nervoase – variație amplă a potențialului celular, în urma căreia interiorul celulei devine pozitiv (+30 mV). Amplitudinea acestuia este de 120 mV. Odată declanșat, indiferent de amplitudinea stimulului, amplitudinea PA-tn rămâne constantă.

Deci, PA-tn se caracterizează prin:

- amplitudine constantă (nu depinde de intensitatea excitantului atunci când stimulii sunt liminari sau supraliminari);
- se propagă pe distanțe mari și fără pierderi de viteză (nedcremental);
- amplitudinea potențialului de vârf, pragul și viteza de propagare sunt caracteristici ale fibrei (sau celulei).

Toate celulele vii posedă **reactivitate**, răspunzând la acțiunea unui stimul. Capacitatea de a răspunde prin potențiale de acțiune locale, pe care o au toate celulele vii, se numește **iritabilitate**. Proprietatea de a răspunde prin potențiale de acțiune tot sau nimic se numește **excitabilitate** și se întâlnește la trei tipuri de celule: **nervoase, musculare și glandulare**.

Fazele potențialului de acțiune

Mecanismul generării PA-tn și, în consecință, forma lui sunt deosebit de complexe, având mai multe faze (fig. 10.5).

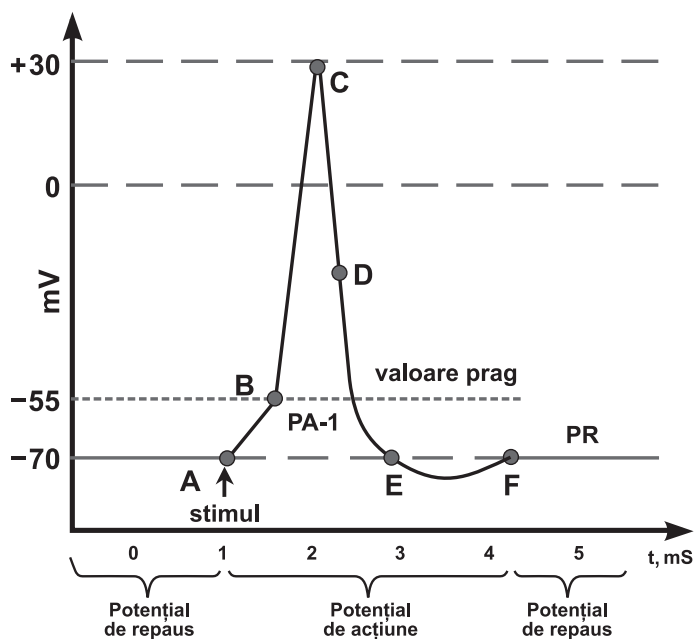


Fig. 10.5. Formarea potențialului de acțiune în fibra nervoasă nemielinizată.

AB este faza de **prepotențial** – variația potențialului de repaus, care precede apariția potențialului de vârf (spike).

BCD – **spike-ul** apare numai atunci când stimulul depășește nivelul pragului de excitație. El reprezintă variația rapidă de potențial de membrană. Amplitudinea acestei variații nu depinde de intensitatea stimulului, dacă acesta a depășit pragul de excitație; deci, se supune legii „**tot sau nimic**”.

DE – **potențial negativ**;

EF – **potențial pozitiv** (denumire tradițională).

Atunci când asupra fibrelor nervoase acționează un stimul de durată are loc o acomodare manifestată prin creșterea pragului de excitabilitate. Acomodarea

poate fi rapidă (fibrele din nervii motori) sau lentă (unele fibre senzitive). Dacă depolarizarea locală este superioară pragului de excitabilitate, după perioada refractară absolută a unui spike se produce un al doilea ș.a.m.d., fibra prezentând un răspuns repetitiv (oscilatoriu). Prin aceasta se realizează **codificarea în frecvență** a amplitudinii stimulilor.

Propagarea PA

La producerea PA are loc o modificare locală a distribuției sarcinilor electrice – această modificare de polaritate duce la apariția unor curenți electrici locali între zona activă și zonele învecinate: **curenții locali Hermann**. Pentru apariția unui nou PA trebuie ca intensitatea acestor curenți în zonele mărginașe să depășească pragul de detonare.

Propagarea se face în mod diferit, în funcție de tipul fibrelor:

– **fibre nemielinizate: propagare recurentă** (din aproape în aproape) prin curenți locali (Hermann), ce traversează întreaga suprafață a membranei axonale și se închid prin axoplasmă și lichid interstițial (spre centru – în exterior, invers – în interior) (fig. 10.6);

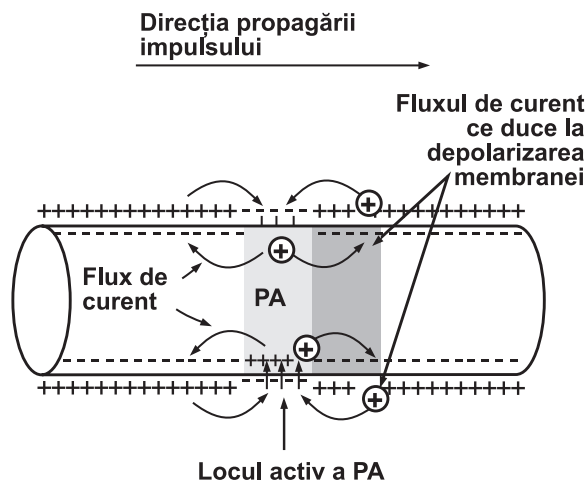


Fig. 10.6.

– **fibre mielinizate: propagare prin conducere saltatorie**. Teaca de mielină (izolator) este întreruptă la nodurile Ranvier, unde se poate face contactul electric intra-extracelular. Curenții locali nu traversează toată suprafața membranei, ci sar de la un nod la celălalt, închizându-se prin axoplasmă și lichidul extracelular (fig. 10.7). Acești curenți se propagă cu viteză mult mai mare și se numesc **curenți Stämpfli**.

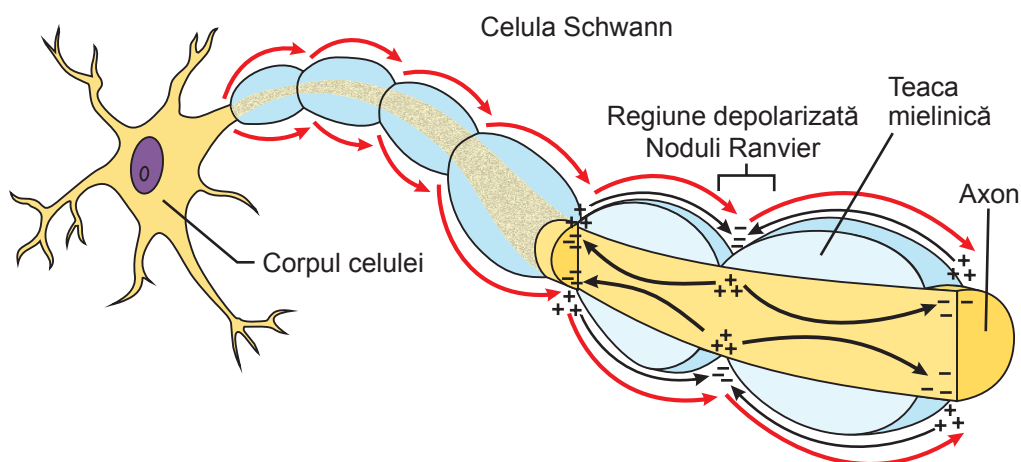


Fig. 10.7. Propagarea potențialului de acțiune.

Pe de altă parte, viteza de propagare a PA depinde și de diametrul axonului. Pentru comparație, în axonul de calmar nemielinizat viteza PA poate fi de 20-30 m/s, când diametrul lui este de 0,5–1 mm, pe când la om, prin axonul mielinizat, pentru aceeași viteză a PA, diametrul este doar de aproximativ 5 μm .

10.5. DETERMINAREA CANTITATIVĂ A EXCITABILITĂȚII

Factori fizico-chimici din mediile externe sau interne ale sistemelor excitabile, care induc modificări tranzitorii localizate sau propagabile ale parametrilor acestor sisteme, poartă numele de **excitanți** sau **stimuli**.

Pentru fibrele nervoase sau musculare drept stimul excitant servește curentul electric. În experiențele fiziologice se utilizează curenți de diferită intensitate, formă și durată:

- curent aperiodic (galvanic);
- curent faradeic;
- curent periodic (alternativ).

În cazul stimulilor electrici dreptunghiulari, pentru declanșarea potențialului de acțiune, trebuie să existe o anumită relație între intensitatea liminară a stimulului (I_e) și durata lui (t). O astfel de relație a fost stabilită empiric de către **Weiss**, fiind valabilă cu o aproximație destul de bună.

$$I_e = \frac{a}{t} + b \quad (17),$$

unde: **a** și **b** caracterizează sistemul excitabil.

Din această relație se pot defini doi parametri caracteristici sistemului excitabil: **reobaza** și **cronaxia**.

Reobaza, I_r , reprezintă intensitatea minimă a unui stimul, cu durata infinită, care provoacă un răspuns din partea sistemului excitabil.

Pentru o durată infinită de acțiune a stimulului ($t \rightarrow \infty$) din relația (17) se obține valoarea reobazei $I_r = b$ (reobaza).

Prin urmare, relația lui Weiss se va scrie:

$$I_e = I_r + \frac{a}{t_u} \quad (18).$$

Deoarece durata utilă, t_u , nu poate fi determinată cu precizie, **Lapicque** a introdus al doilea parametru practic, **cronaxia**. Prin definiție, cronaxia reprezintă durata de timp, t_c , a unui stimul dreptunghiular, cu intensitatea egală cu dublul reobazei ($2I_r$), care induce răspuns minimal din partea sistemului excitabil. Înlocuind în (18) pe I_e cu $2I_r$ și t_u cu t_c , se obține: $a = t_c \cdot I_r$ și reprezintă cantitatea de sarcină electrică liminară.

Relația (18) va primi forma finală:

$$I_e = I_r \cdot \left(1 + \frac{t_c}{t_u} \right) \quad (19).$$

Această relație reprezintă expresia matematică a **legii Weiss-Lapicque**.

Din cele expuse rezultă că acești doi parametri – reobaza (I_r) și cronaxia (t_c) – caracterizează fiecare sistem excitabil în parte (neuron, nerv, mușchi etc.).

În figura 10.8 este prezentată curba de excitabilitate liminară Weiss-Lapicque.

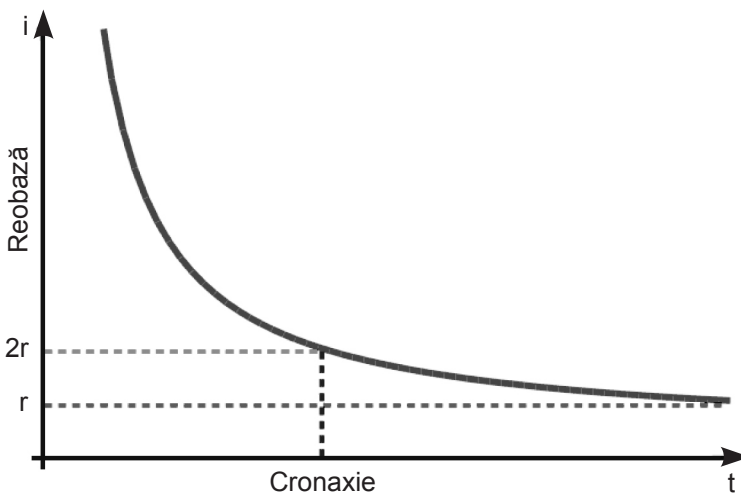


Fig. 10.8.

Trebuie de menționat că pentru definirea parametrului timp (cronaxie) s-a luat ca referință dublul reobazei, și nu reobaza, deoarece, așa cum se observă din figură, în această zonă panta curbei este foarte mică. Deci, unei variații mici de intensitate îi corespunde o mare variație a duratei, ceea ce micșorează precizia măsurărilor.

EXERCIȚII

1. Determinați în mV potențialul de echilibru pentru K^+ al unei fibre musculare la temperatura de 37°C , dacă se știe că:

$$C_e = 4 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1} \text{ și } C_i = 155 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}.$$

$$\text{Răspuns: } V_{\text{eq}} = -98 \text{ mV}.$$

2. Potențialul de echilibru pentru Cl^- al membranei axonului de calmar, la temperatura de 25°C , este de -58 mV . Cunoscând că concentrația Cl^- în mediul extracelular este de $540 \text{ mEq} \cdot \text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, determinați concentrația Cl^- în mediul intracelular.

$$\text{Răspuns: } C_i = 56 \text{ mEq} \cdot \text{g} \cdot \text{l}^{-1}.$$

3. Potențialul membranar de repaus este -80 mV . Considerând câmpul electric din interiorul membranei omogen și grosimea membranei 8 nm , determinați intensitatea acestui câmp.

$$\text{Răspuns: } E = 10^7 \text{ V/m}.$$

4. Calculați potențialul de echilibru al axonului gigant de calmar pentru Na^+ , dacă este cunoscut că concentrația lor în exterior este de 440 mmol/l , iar în interior – de $49 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$.

$$\text{Răspuns: } +55,3 \text{ mV}.$$

5. Cunoscând cronaxia unei fibre nervoase care este de $0,4 \text{ ms}$ și că reobaza ei este de 35 mA , calculați în μC cantitatea de electricitate liminară pentru provocarea unui impuls.

$$\text{Răspuns: } q = 14 \mu\text{C}.$$

6. Potențialul membranar de echilibru pentru ionii de caliu este de $134,7 \text{ mV}$. Capacitatea electrică a membranei este de $1 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$. Determinați sarcina electrică a membranei, ce revine suprafeței de 1 cm^2 .

$$\text{Răspuns: } 1,347 \cdot 10^{-7} \text{ C}.$$

7. În glanda tiroidă, concentrația intracelulară a I^- este de 30 ori mai mare decât concentrația extracelulară. Exprimați în mV potențialul de echilibru al ionilor de iod.

Răspuns: $V_{eq} = -60$.

8. În aceleași condiții există două fibre nervoase caracterizate prin aceeași cantitate de electricitate liminară (q_0), știind că una dintre fibre are o cronaxie de două ori mai mare decât a celeilalte, determinați raportul dintre reobazele lor.

Răspuns: 1/2.

11. RADIAȚII ELECTROMAGNETICE. INTERACȚIUNEA FOTONILOR CU MATERIA

11.1. UNDE ELECTROMAGNETICE

O undă electromagnetică rezultă din asocierea a două componente: un câmp electric oscilator, caracterizat de vectorul \vec{E} , și un câmp magnetic oscilator, caracterizat de vectorul \vec{H} . Oscilațiile acestor vectori sunt tot timpul în fază, vectorii fiind situați în planuri perpendiculare. Propagarea unei în spațiu are loc în direcție perpendiculară pe acești vectori (fig. 11.1).

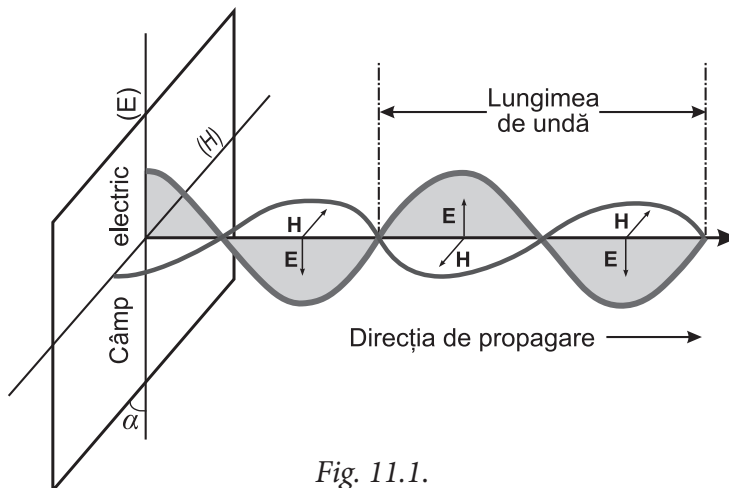


Fig. 11.1.

Radiațiile electromagnetice sunt totdeauna emise de particulele materiei, fie la nivelul electronilor, fie la nivelul nucleelor atomice și reprezintă un mod de transport al energiei în spațiu.

Relația de propagare a unei electromagnetice reiese din relația generală a undelor de orice natură:

$$A = A_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1),$$

unde: t – timpul; x – distanța măsurată în direcția propagării unde; A – amplitudinea vectorului câmpului electric sau magnetic în momentul t ; A_0 – amplitudinea maximă; T – perioada oscilațiilor; λ – lungimea de undă.

Indiferent de origine și energie, radiația electromagnetică se propagă în vid cu viteză constantă și are valoarea: $c = 2,98 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Unda electromagnetică transmite energie în spațiu nu în mod continuu, ci prin porțiuni elementare bine determinate, numite **fotoni (cuante)**.

Energia fotonului se determină din relația: $\epsilon = h\nu$,

unde: $\nu = \frac{1}{T}$ – frecvența în s^{-1} .

În raport cu perioada (sau cu frecvența), lungimea de undă se determină din relațiile:

$$\lambda = cT \quad \text{și} \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2).$$

În calitate de particulă, fotonului îi sunt asociate masa în mișcare și impulsul, expresiile cărora reies din aplicarea relației lui **Einstein**, care stabilește legătura dintre masă și energie:

$$E = mc^2 \quad (3).$$

În cazul fotonului:

$h\nu = mc^2$, de unde rezultă că masa în mișcare asociată fotonului este:

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (4),$$

$$\text{iar impulsul: } p = m \cdot c = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} \quad (5).$$

Aceste caracteristici ale fotonului pot fi exprimate și prin lungimea de undă:

$$m = \frac{h}{\lambda c}; \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (6).$$

Ochiul nostru este capabil să perceapă numai radiațiile electromagnetice cu lungimi de undă cuprinse între 400 și 750 nm.

În diagrama de mai jos sunt reprezentate caracteristicile, lungimile de undă și domeniul respectiv de aplicație ale undelor electromagnetice (fig. 11.2).

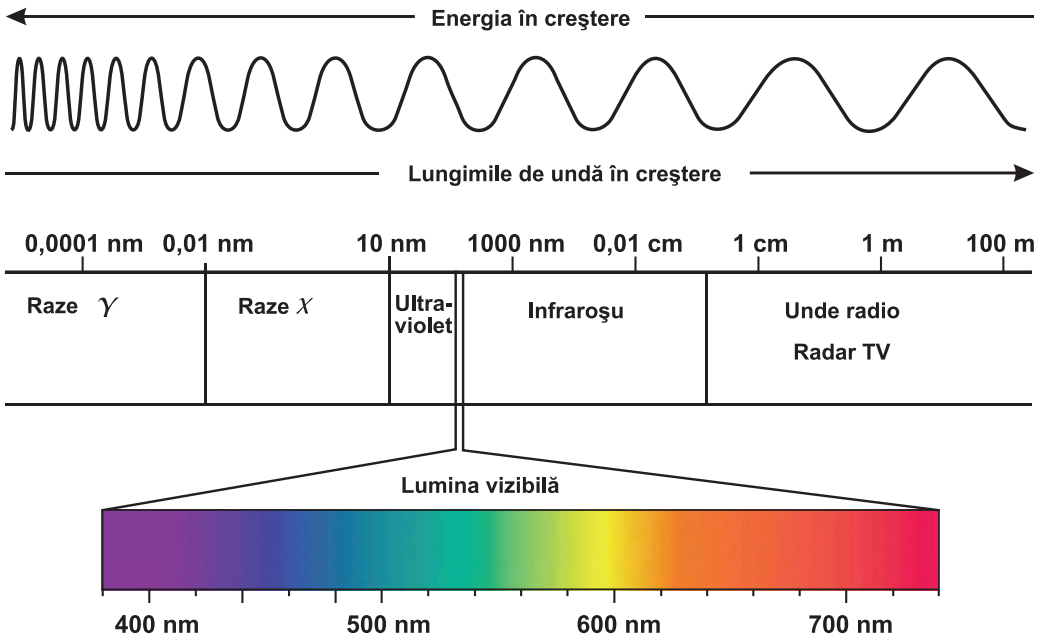


Fig. 11.2.

1.2. EFECTELE INTERACȚIUNII FOTONILOR CU MATERIA

Interacțiunea fotonilor cu materia constă în transmiterea energiei lor substanței pe care o traversează. Studiul acestei interacțiuni este important din două motive:

- fiindcă este un fenomen fizic care permite detectarea diferitelor radiații electromagnetice;
- fiindcă reprezintă etapa primară a acțiunilor chimică și biologică ale acestor radiații.

Pentru lungimi de undă relativ mari ($\lambda > 1 \mu\text{m}$) energia fotonilor nu o depășește pe cea a energiei termice la temperatura camerei. De aceea nu ne putem aștepta ca aceste radiații să producă un efect chimic sau biologic specific.

Efecte specifice ale radiațiilor electromagnetice se produc numai la lungimi de undă mai scurte decât limita inferioară a domeniului vizibil, începând cu radiația ultravioletă.

Valorile concrete ale energiei fotonilor pentru câteva radiații din spectrul undelor electromagnetice sunt reprezentate în tabelul ce urmează.

| Domeniu radiației | Lungimea de undă λ | Energia fotonului $h\nu$ |
|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Infraroșu | 100 – 1 μm | 0,01 – 1,2 eV |
| Vizibil | 435 nm | 2,8 eV |
| Ultraviolet | 235 nm | 4,8 eV |
| Raze X | 0,006 nm | $2 \cdot 10^5$ eV |
| Raze γ | 0,0015 nm | 10^6 eV |

Există câteva efecte prin care are loc interacțiunea fotonului incident cu substanța.

• **Simpla excitare** a atomului are loc atunci când energia fotonului incident este cedată unui electron, care realizează tranziția pe o orbită mai îndepărtată de nucleu decât nivelul fundamental; atomul trece în stare excitată (fig. 11.3).

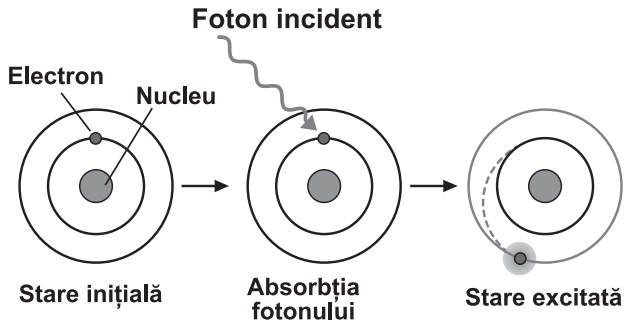


Fig. 11.3.

• **Efectul fotoelectric** (fig. 11.4) este un fenomen de absorbție totală. Fotonul incident dispare, cedând toată energia unui electron din atomul substanței.

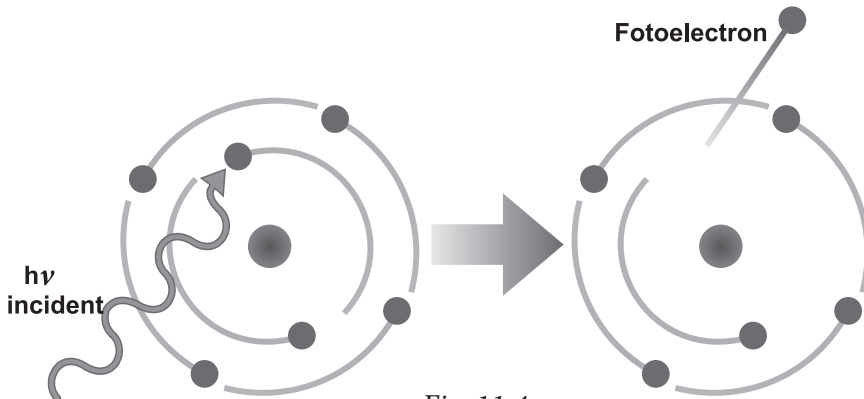


Fig. 11.4.

Din contul acestei energii electronul părăsește atomul, având energie cinetică (E_c) egală cu diferența dintre energia fotonului incident ($h\nu$) și lucrul de ieșire (W_i).

$$E_c = h\nu - W_i;$$

$$h\nu = W_i + E_c \quad (7).$$

• **Efectul Compton** (fig. 11.5) are loc atunci când energia fotonului incident este cu mult mai mare decât lucrul de ieșire. Concomitent cu emiterea electronului, are loc și apariția unui foton de difuzie ($h\nu'$):

$$E_c = h\nu - W_i - h\nu' \quad (8).$$

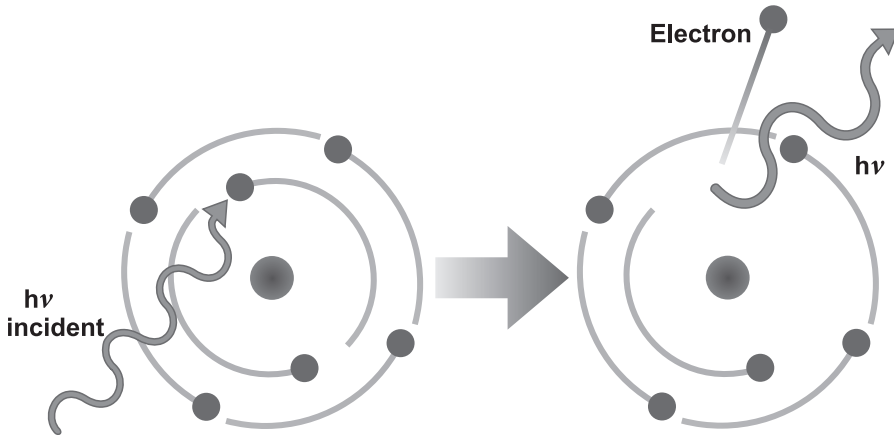


Fig. 11.5.

• **Efectul creării perechilor** (fig. 11.6) – poate avea loc atunci când energia fotonului incident este $h\nu > 1,022 \text{ MeV}$.

Ajunzând în câmpul nucleului atomic, fotonul este captat de nucleu, dând naștere unei perechi de ioni, formată de un pozitron și un electron.

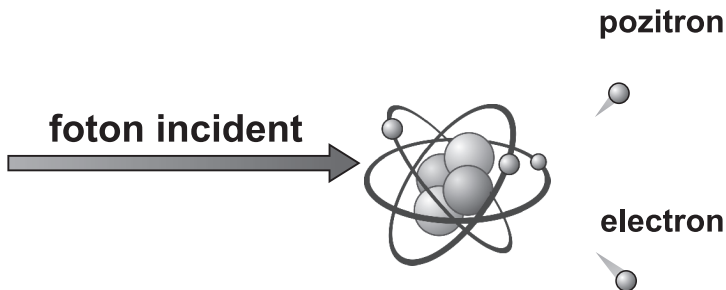


Fig. 11.6.

Particulele formate posedă energie cinetică $E_c = h\nu - 2m_e$ (9).

Pozitronul este particula care diferă de electron numai prin semnul sarcinii electrice, simbolic reprezentat prin e^+ . Altfel spus, pozitronul este **antiparticula** electronului e^- . Când un pozitron și un electron intră în coliziune, are loc fenomenul numit **anihilare** – ambele particule dispar, dând naștere la doi γ fotoni cu energie de 0,511 MeV. Reprezentarea simbolică a acestei anihilări este: $e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu$. Anihilarea explică durata foarte scurtă de existență a pozitronului. Remarcăm că termenul **anihilare** provine de la latinescul **nihil** (nimic). Prin traducere literală, este procesul în care un obiect a fost nimicit. În cazul cercetat, particulele nu sunt de fapt „nimicite”, ci transformate în altă formă de energie. Important este faptul că atât efectul producerii de perechi, cât și fenomenul de anihilare servesc drept confirmare a legilor de conservare din fizica atomică:

- conservarea sarcinilor electrice;
- conservarea energiei (în sens larg masă + energie);
- conservarea impulsului (cantității de mișcare).

Frecvența relativă a apariției fiecărui tip de interacțiune depinde de energia fotonilor și de numărul atomic al materialului în care are loc fenomenul.

În funcție de numărul atomilor dintr-un mediu și de energia radiației electromagnetice incidente, pot fi definite trei zone preponderente pentru fiecare din cele trei interacțiuni fundamentale (fig. 11.7).

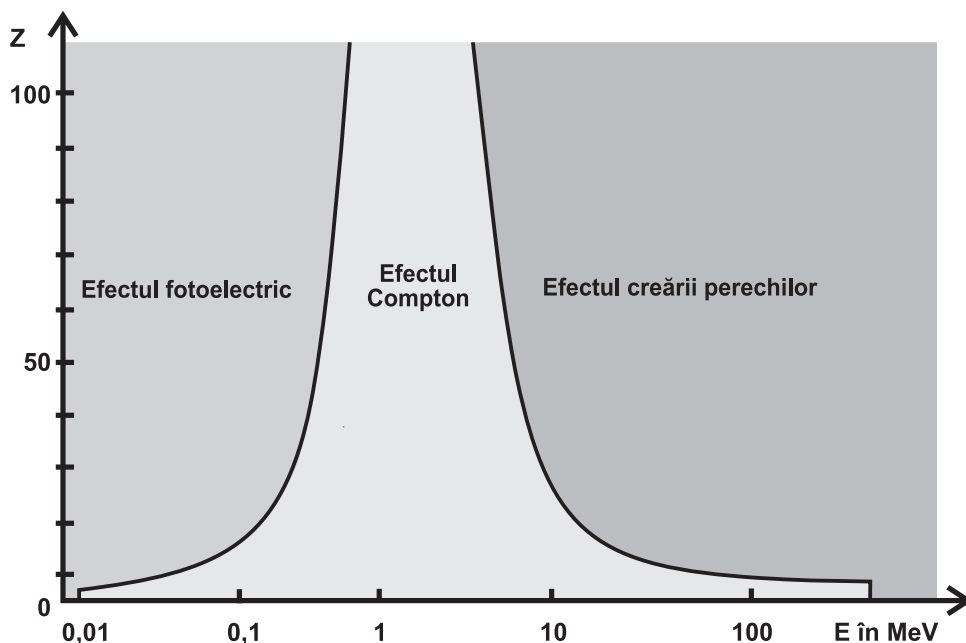


Fig. 11.7.

11.3. LEGEA DE ATENUARE

Din cele menționate anterior rezultă că absorbția energiei radiației electromagnetice de către substanță este un fenomen cuantic. O parte din energia totală a unui flux de fotoni traversează un strat de substanță cu grosimea x , cealaltă parte fiind absorbită sau difuzată (fig. 11.8).

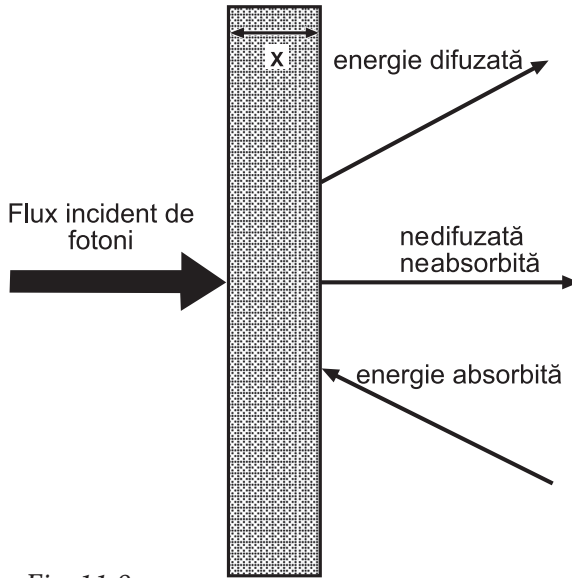


Fig. 11.8.

În cazul unui flux de fotoni monoenergetici, între numărul de fotoni incidenti (N_0) și numărul care a traversat stratul de substanță x , nefiind absorbiți sau difuzați (N_x), există relația:

$$N_x = N_0 e^{-\mu x} \quad (10) - \text{expresia matematică a legii de atenuare,}$$

unde: μ - coeficientul liniar de atenuare a substanței pentru categoria dată de fotoni. Dacă x este exprimat în **cm**, coeficientul liniar de atenuare se exprimă în **cm⁻¹**. Între coeficientul μ și grosimea stratului de semiatenuare $x_{1/2}$ pentru substanța dată există relația dedusă prin simple transformări matematice:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu x_{1/2}}; \quad \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}}; \quad x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (11).$$

EXERCIȚII

1. Limitele frecvențelor de radiație laser, utilizate în medicină, sunt $30 \cdot 10^9$ kHz – $15 \cdot 10^{11}$ kHz. Determinați limitele respective ale lungimilor de undă.

Răspuns: $1 \mu - 50 \mu$.

2. În oftalmologie (pentru „sudarea” retinei) se folosește radiația laser cu lungimea de undă $\lambda_1 = 0,514 \mu\text{m}$, iar în terapie – cu lungimea de undă $\lambda_2 = 0,63 \mu\text{m}$. Determinați cu cât diferă energiile fotonilor respectivi.

Răspuns: $h\nu_1 - h\nu_2 = 12,9 \cdot 10^{-20}$ J.

3. Calculați grosimea stratului de semiatenuare a unui flux paralel de radiație γ pentru apă, dacă coeficientul de atenuare liniară $\mu = 0,053 \text{ cm}^{-1}$.

Răspuns: 13,1 cm.

4. Pentru a reduce cu 95% intensitatea unui flux de fotoni γ cu energia de 0,25 MeV s-a utilizat o placă de plumb cu grosimea de 1 cm. Determinați coeficientul liniar de atenuare a plumbului.

Răspuns: $\mu = 3,00 \text{ cm}^{-1}$.

5. Este cunoscut că un ecran de plumb ($Z = 82$) cu masa de 120 g și suprafața de 100 cm^2 atenuază 90% dintr-un flux monocromatic de raze X cu lungimea de undă $0,69 \text{ \AA}$. Calculați coeficientul masic de atenuare în acest ecran.

Răspuns: $\mu/\rho = 1,92 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

6. Un flux de raze X este filtrat printr-un ecran cu grosimea de 0,4 cm, fabricat dintr-un aliaj compus din 70% cupru și 30% aluminiu. Calculați raportul ϕ/ϕ_0 , dacă $\mu_{\text{Cu}} = 4,5 \text{ cm}^{-1}$ și $\mu_{\text{Al}} = 0,5 \text{ cm}^{-1}$.

Răspuns: $\phi/\phi_0 \approx 0,27$.

7. Un ecran de protecție a fost fabricat dintr-o placă de plumb cu grosimea de 1 mm, situată între două plăci de aluminiu cu grosimea de 2 mm fiecare. Pentru fotonii incidenti, grosimea stratului de semiatenuare pentru plumb este de 0,25 mm, iar pentru aluminiu – de 14,8 mm. Determinați raportul ϕ/ϕ_0 .

Răspuns: $\phi/\phi_0 = 5,19 \cdot 10^{-2}$.

8. Determinați energia unei cuante de radiație ultravioletă, sub acțiunea căreia are loc bronzarea pielii, dacă lungimea de undă a radiației este de 331 nm.

Răspuns: $6 \cdot 10^{-19}$ J.

9. Pentru smulgerea electronilor de pe suprafața unui metal trebuie efectuat un lucru de 1,97 eV. Determinați energia cinetică a electronului smuls sub acțiunea radiației cu lungimea de undă $\lambda = 331$ nm.

Răspuns: $2,85 \cdot 10^{-19}$ J.

10. Constanta solară este egală cu 1370 W/m². Considerând că lungimea de undă medie a fotonilor din radiația solară este $\lambda = 555$ nm, determinați câți fotoni cad în fiecare secundă pe 1 m² la hotarul atmosferei pământului.

Răspuns: $\approx 37,5 \cdot 10^{20}$.

11. Un flux paralel de raze X monocromatice cade pe un ecran de aluminiu cu grosimea de 5 mm. Cunoscând coeficientul liniar de atenuare $\mu = 0,35$ cm⁻¹, calculați grosimea stratului de semiatenuare pentru Al.

Răspuns: $x_{1/2} = 1,98$ cm.

12. Producerea perechii electron-pozitron s-a realizat în urma interacțiunii unui foton cu nucleul atomic. Cunoscând că energia fotonului este de 6,02 MeV, determinați energia cinetică a electronului.

Răspuns: 2,5 MeV.

13. Vom considera o interacțiune prin efectul fotoelectric al unui foton de raze X de 100 keV cu un atom de zinc ($Z = 30$). Determinați energia cinetică a electronului emis de pe nivelul K.

Răspuns: 87,76 keV.

12. RADIAȚIA X

12.1. PRODUCERE ȘI EMISIE. TUBUL LUI COOLIDGE

Radiațiile X au fost descoperite experimental în anul 1895 de fizicianul german **Wilhelm Conrad Röntgen**. Pentru a sublinia natura necunoscută a acestor radiații extrem de penetrante, la momentul descoperirii savantul le-a numit **raze X**.

Printr-o serie de alte experiențe originale s-a constatat că această radiație este de natură electromagnetică, având lungimea de undă de ordinul 10^{-10} m. În prezent sunt bine cunoscute nu numai natura, ci și modul de producere, proprietățile, interacțiunea cu materia, domeniile de utilizare, însă denumirea a rămas aceeași – **raze X (R·X)**.

Pentru a produce raze X este necesar ca electronii puternic accelerați să bombardeze un corp metalic. Dispozitivul de bază utilizat în acest scop poartă numele de **tubul lui Coolidge**, schema de principiu a căruia este reprezentată în figura 12.1.

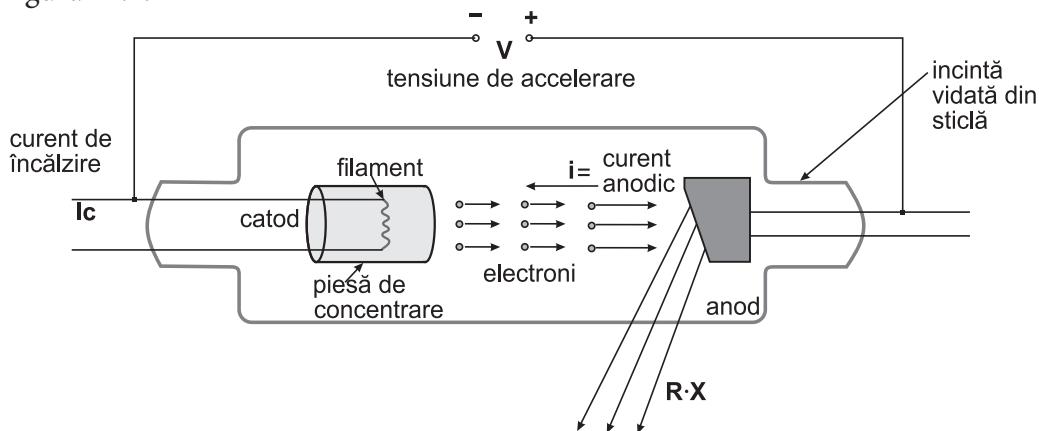


Fig. 12.1. Schema de principiu a unui tub de raze X.

Electronii sunt emiși de filamentul catodului încălzit de curentul I_c cu intensitatea de câțiva amperi și accelerați spre anod de o diferență de potențial V de zeci de **kV**.

Deplasarea electronilor de la catod spre anod corespunde unui curent de direcție inversă cu intensitatea (i) de câțiva miliamperi, numit **curent anodic**. Intensitatea acestui curent pentru tubul dat depinde de temperatura filamentului și de diferența de potențial.

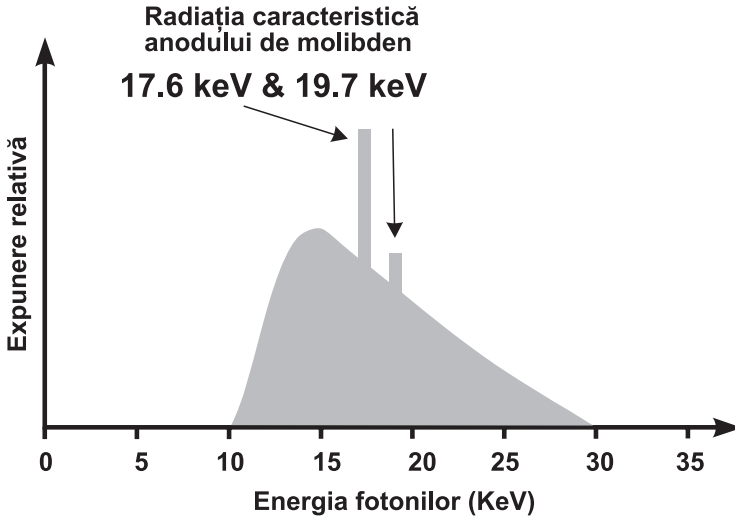


Fig. 12.2. Spectrul de emisie al unui tub de raze X cu anodul din molibden.

Dacă vom cerceta spectrul de emisie al unui tub de raze X (fig. 12.2), vom constata că el are forma unui fond continuu, pe care sunt suprapuse câteva maxime. Această compoziție dublă corespunde unui dublu mecanism de producere: **ionizant** pe de o parte și **de frânare** pe de altă parte.

Radiațiile X de frânare

Când un electron cu energie cinetică (E_{in}) trece prin apropierea unui nucleu, sub acțiunea forței de atracție electrostatică, el își schimbă direcția și este frânat, dând naștere unui foton de raze X. Energia acestui foton este $h\nu = E_{in} - E_{ext}$.

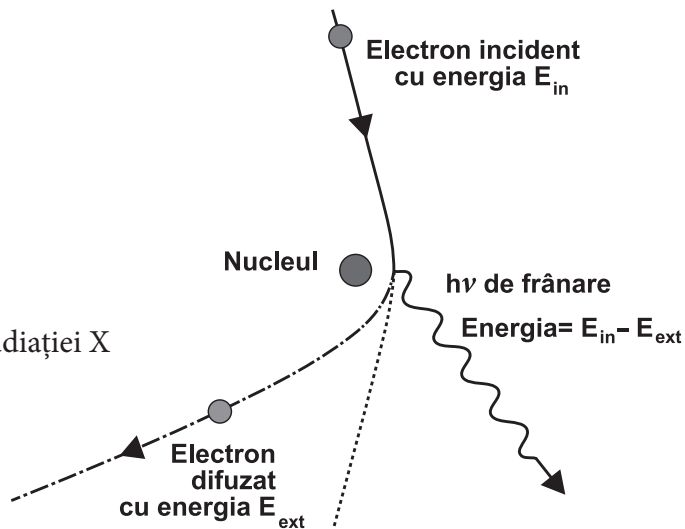


Fig. 12.3. Formarea radiației X de frânare.



În funcție de distanța traiectoriei electronilor de la nucleu (care poate fi oricare), energia fotonilor de frânare variază de la 0 până la E_{\max} , când toată energia cinetică a electronului incident este comunicată fotonului X. Prin aceasta se explică că spectrul radiației de frânare este continuu.

Acest spectru continuu de frânare al razelor X este utilizat în **radiografie** și **radioscopie**. Prima radiografie medicală (fig. 12.4) îi aparține lui Röntgen (în imagine – mâna soției sale Anna Berthe).

Fig. 12.4.

Radiațiile X caracteristice

Când electronii accelerați puternic (de o tensiune $V \geq 31\,800$ volți) pătrund în atomii anodului, ei pot smulge electroni de pe nivelele profunde (K,L sau M) (fig. 12.5).

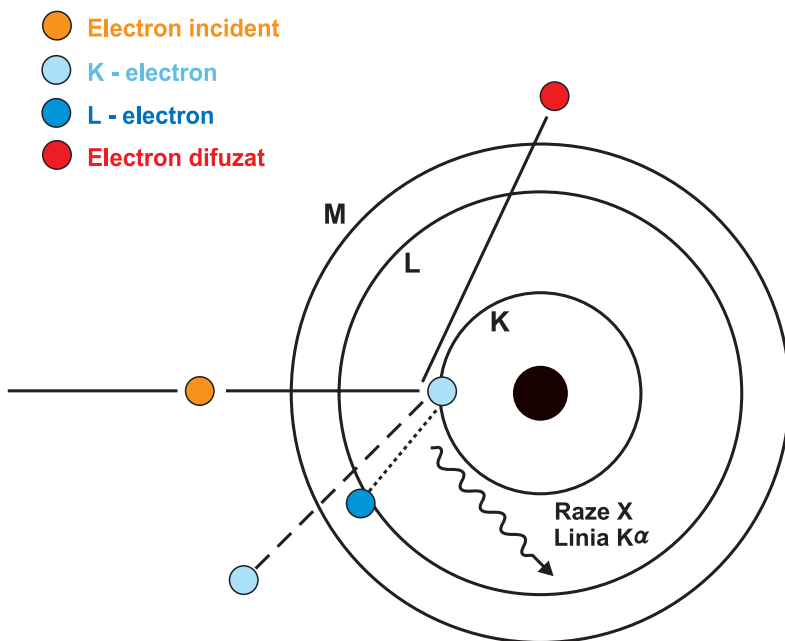


Fig. 12.5. Formarea radiației X prin tranziții electronice.

Locurile rămase libere sunt completate de electronii de pe straturile exterioare, tranzițiile fiind însoțite de radiații X cu lungimi de undă grupate în serii caracteristice atomilor excitați în anod (fig. 12.6).

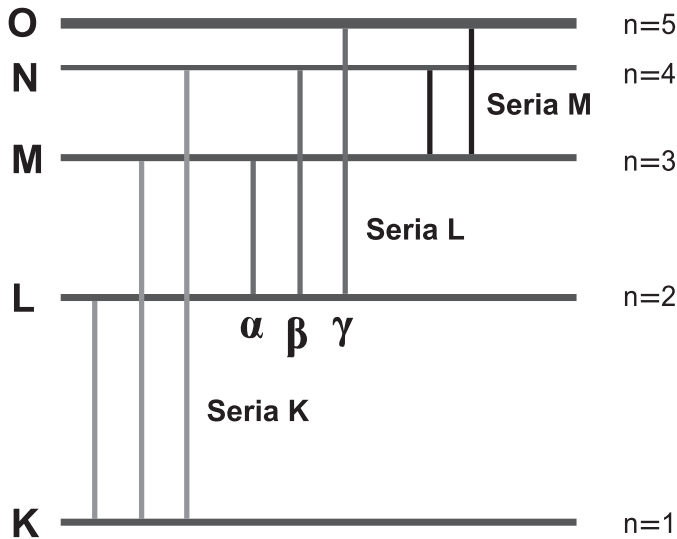


Fig. 12.6.

– Seria **K** are liniile K_α , K_β și K_γ corespunzătoare tranzițiilor de pe straturile L, M, N pe stratul K.

– Seria **L** are liniile L_α , L_β și L_γ corespunzătoare tranzițiilor de pe straturile M, N și O pe stratul L.

– Seria **M** are liniile M_α și M_β corespunzătoare tranzițiilor de pe straturile N și O pe stratul M.

Radiația X formată prin acest mecanism are **spectru de linii**, caracteristic atomilor anodului, de unde și denumirea – **raze X caracteristice**, preponderent utilizate în domeniul științific, numit **crystalografie**.

12.2. RELAȚII FUNDAMENTALE

Fluxul (Φ) de raze X, emis de un tub și exprimat în vați, se determină din relația:

$$\Phi = k i Z V^2 \quad (1),$$

unde: k – constanta, caracteristică tubului; i – intensitatea curentului anodic, în amperi; Z – numărul atomic al materialului din care este confecționat anodul; V – tensiunea de accelerare, în volți.

Randamentul unui tub de raze X

Cunoscând fluxul radiației (Φ) și puterea curentului, consumată de un tub în funcțiune ($P = i \cdot V$), se poate determina randamentul (R):

$$R = \frac{\Phi}{P} = \frac{k i z V^2}{i V} = k Z V \quad (2).$$

Acest randament este relativ mic, de ordinul 1–2%. Cealaltă parte a puterii curentului se transformă în căldură.

Legea lui Duane și Hunt

În cazul când toată energia cinetică a electronului, frânat în anod, se transformă în radiație, fotonul format posedă frecvență maximă și, respectiv, o lungime de undă minimă:

$$h\nu_{\max} = eV = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} \quad (3).$$

Înlocuind în ultima relație valorile concrete:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

obținem expresia matematică a legii lui Duane și Hunt:

$$\lambda_{\min} = \frac{1,24}{V}; \quad \lambda_{\min} - \text{în nm}; \quad V - \text{în kV} \quad (4).$$

Coefficientul masiv de atenuare a radiației X:

$$\mu_m = k \lambda^3 Z^3 \quad (5).$$

Coefficientul liniar de atenuare a radiației X:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho \quad (6),$$

unde: ρ – densitatea substanței-absorbant.

12.3. METODE DE DIFRAȚIE CU RAZE X

În primii ani ai secolului trecut, s-au întreprins multe încercări de a determina lungimea de undă a RX, însă rezultatele au fost nesatisfăcătoare, până când fizicianului german **Max Laue** nu i-a venit ideea de a folosi în calitate de rețea de difracție aranjarea periodică a straturilor de atomi în cristale, distanța dintre care este de câțiva ongstremi. În 1912, Laue a reușit să obțină tabloul de difracție a razelor X pe cristalul de **calcit** și să determine lungimea de undă a radiației.

Schema difracției razelor X este reprezentată în figura 12.7; prin puncte este indicată distribuția ordonată a atomilor într-o rețea cristalină simplă.

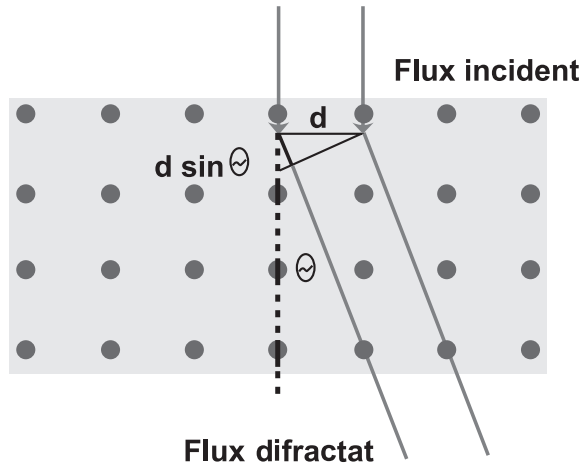


Fig. 12.7.

Straturile de atomi sunt situate la distanța d unul de altul și formează rețeaua de difracție, prin care poate trece radiația X. Se cercetează două raze difractate sub unghiul θ în raport cu direcția fluxului incident, diferența de drum a căroră este $d \cdot \sin \theta$. Din acest motiv, pe placa fotografică, stabilită la o anumită distanță de la cristal, se va înregistra tabloul de interferență al acestor două raze. Interferența va fi constructivă, când diferența de drum conține un număr întreg de lungimi de undă ale radiației monocromatice:

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (7).$$

Și distructivă, dacă:

$$d \sin \theta = (2n - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (8),$$

unde: n – număr întreg pozitiv.

Deoarece, spre deosebire de rețeaua de difracție bidimensională, cristalul este un sistem atomic tridimensional, numărul direcțiilor în spațiu, care corespunde interferenței constructive, este limitat. În consecință, difracția pe cristal formează pe placa fotografică un ansamblu de pete luminoase pe un fond întunecat.

Acest tablou de difracție se numește **lauegramă**. Dacă distanța (d) dintre planele atomare în cristal este cunoscută, măsurând distanțele dintre petele lauegramei, se poate determina lungimea de undă a radiației incidente. Practic, mai frecvent este folosită metoda inversă: cu ajutorul difracției razelor X cu lungimea de undă cunoscută se determină dimensiunile și structura rețelei spațiale a cristalului.

Din evaluarea exactă a unui număr suficient de valori d pot fi descifrate și structurile spațiale ale diferitor macromolecule biologice, cum ar fi acizii nucleici,

proteinele etc. Tot prin această metodă s-a stabilit structura triunghiulară a moleculelor de apă și structura bistratului lipidic din membranele celulare.

Difracția razelor X pe o structură ordonată (cristal, bio-polimer) este un fenomen de difuzie. Pentru simplificare, **savantul W. H. Bragg** a considerat difracția razelor X ca un fenomen de reflexie. Undele reflectate de fiecare dintre planurile paralele pot să se intensifice sau să se atenueze. Aceste fenomene depind de unghiul de alunecare a razei, numit și **unghiul bragg**. Condiția maximului de interferență se realizează în cazul când diferența de drum a celor două raze (*fig. 12.8*) este un multiplu întreg al lungimii de undă, adică $BC + CD = n\lambda$; $BC = CD = d \cdot \sin \theta$. Interferența razelor reflectate va fi constructivă când diferența de drum:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (9).$$

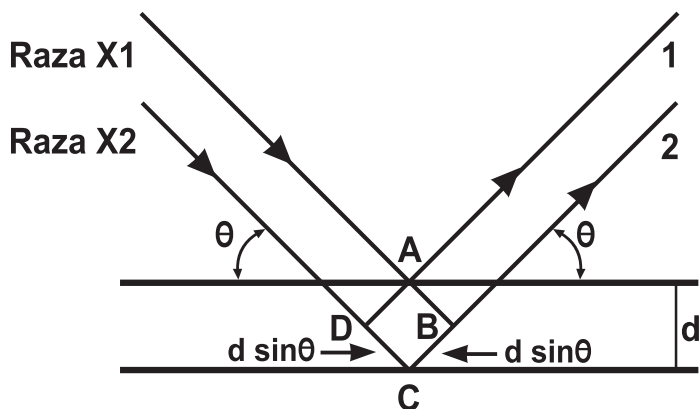


Fig. 12.8.

Există mai multe metode experimentale de difracție cu raze X, grupate în două categorii de tehnici:

- metode cu cristal turnat;
- metode cu pulberi.

În cazul metodelor cu cristal turnat (cu diametrul de circa 1 mm), cristalul se plasează astfel, încât una din axele lui principale să fie perpendiculară pe direcția fluxului incident de raze X monocromatice. Prin rotirea cristalului în jurul acestei axe, razele care cad succesiv pe toate fețele sale vor determina apariția unor maxime de difracție (*fig. 12.9*).

Deoarece rotația se execută pe o anumită axă, suprafețele cristalului au o orientare fixă și maximele de difracție apar pe placa fotografică sub formă de puncte (difractogramă sau lauegramă).

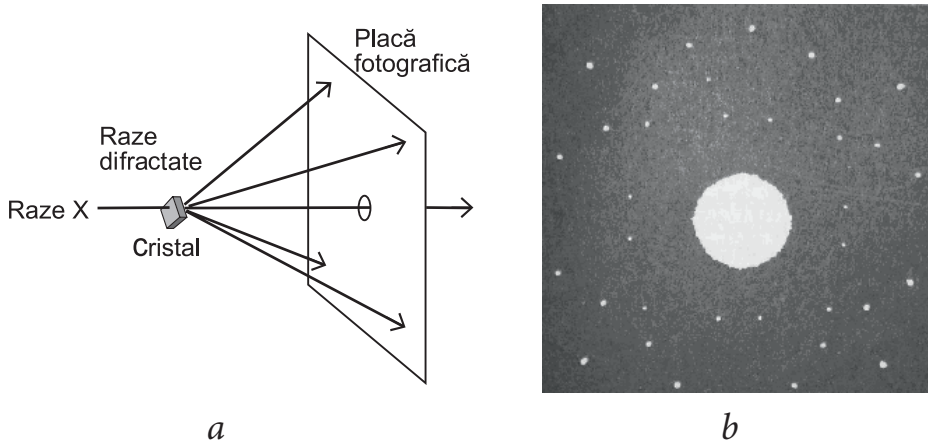


Fig. 12.9: *a* - schema metodei cu cristal turnat;
b - lauegrama cristalului de NaCl.

La aplicarea metodei pulberilor (fig. 12.10), substanța cristalizată se plasează sub formă de pulveri în calea razelor X. Întreaga probă se rotește în așa fel, încât microcristalele conținute în pulveri să ia toate orientările posibile față de fasciculul incident, inclusiv poziția pentru care apar maximele de difracție. Fasciculul dispersat va forma diferite conuri cu axele plasate în direcția fluxului incident. Pe placa fotografică, poziționată perpendicular pe direcția fluxului incident, maximele de difracție vor avea aspectul unor cercuri concentrice.

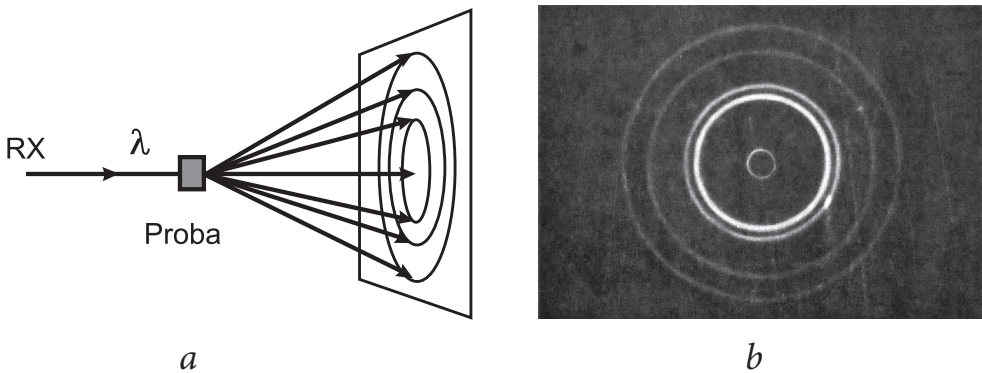


Fig. 12.10: *a* - schema metodei cu pulveri; *b* - refractograma policristalelor de Al.

12.4. RADIOGRAFIA ȘI RADIOSCOPIA CU RAZE X

Prin radiografie și radioscopie, imaginile se obțin pe film fotografic sau pe un ecran ce conține o substanță fluorescentă (fig. 12.11).

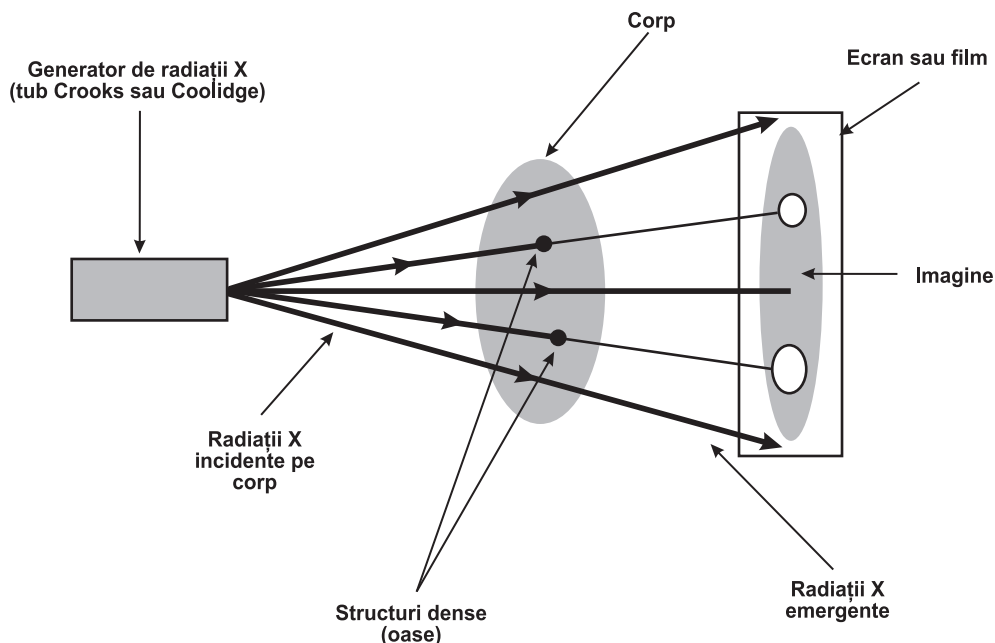


Fig. 12.11. Schema obținerii unei radiografii (radioscopii).

Dezavantajul metodei constă în faptul că imaginea tuturor țesuturilor întâlnite de o rază X se suprapun în imagine, ceea ce duce la micșorarea rezoluției. Pe de altă parte, țesuturile cu densități apropiate sunt insuficient diferențiate pe imagine. Diferența minimă în densitate, pentru care diferența în absorbție poate fi redată în regim „fotografic”, este de 10-20%. Aceasta este suficient pentru a vizualiza oase, vase umplute cu substanță de contrast, însă absolut insuficient pentru a reda imaginea țesuturilor moi, la care diferența în densitate este mai mică de 5%. Acest parametru pentru materia albă și materia cenușie din creier este mai mic de 0,5%, ceea ce exclude posibilitatea de a vedea aceste structuri în imaginea radiografică.

12.5. TOMOGRAFIA COPMPUTERIZATĂ

Termenul „tomografie” provine de la cuvintele grecești **tomos** – secțiune, **graphiein** – a scrie. La baza principiului de funcționare a oricărui tomograf computerizat stă cunoscuta teoremă a lui A. Einstein, conform căreia imaginea completă

și adevărată a unui obiect, restabilită după proiecțiile lui, este cu atât mai amplă, cu cât mai multe proiecții sunt folosite pentru reconstrucția lui. Ca și radiografia de ansamblu, tomografia computerizată utilizează un fascicul de raze X. Sursa și colectorul de radiații sunt dispuse pe circumferință în poziții diametral opuse. Imaginea unei secțiuni se obține după o rotație completă a sursei și detectorului în jurul pacientului (fig. 12.12). După aceasta, informația obținută se prelucrează la calculator și este transformată în imagine bidimensională.

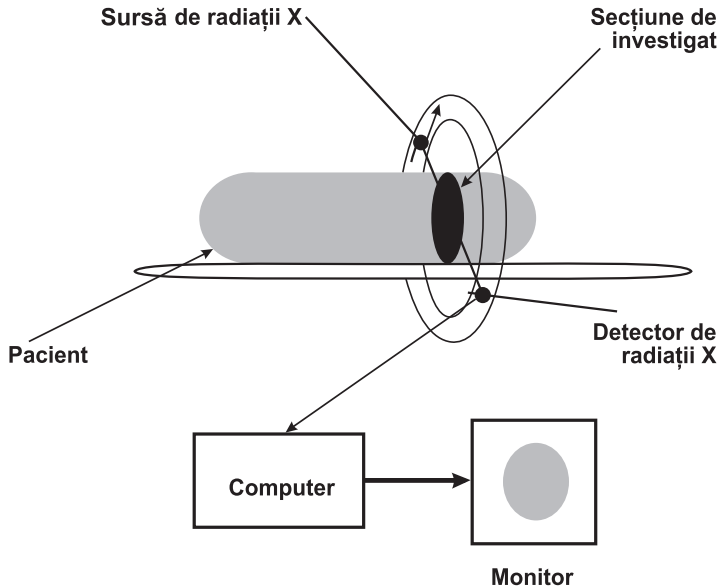


Fig. 12.12. Schema de principiu a tomografului.

Pentru realizarea unei noi secțiuni, masa pe care se află pacientul este propulsată înainte cu câțiva milimetri și secvența se repetă. Aparatele mai moderne sunt capabile să înregistreze modificările fasciculului de raze X la propulsarea continuă a pacientului, această metodă fiind numită **tomografie computerizată spiralată**. Performanța aparatelor de tomografie computerizată se măsoară prin numărul de detectori folosiți; cu cât este mai mare acest număr, cu atât mai performant este aparatul. Pentru mărirea contrastului pe țesuturi mai puțin dense se folosesc substanțe de contrast ce conțin iod (absorbant al radiației X), administrate intravenos sau pe cale orală.

EXERCIȚII

1. De câte ori lungimea de undă a radiației X, la care energia fotonilor este de 59 keV, este mai mică decât a radiației violete cu lungimea de undă de 400 nm?

Răspuns: de 16 000 ori.

2. Care este energia unui foton de radiație monocromatică cu lungimea de undă de 0,005 nm?

Răspuns: $4 \cdot 10^{-14}$ J.

3. De câte ori se va mări viteza electronilor în tubul de raze X la creșterea tensiunii de accelerare de la 80 kV la 120 kV ?

Răspuns: de 1,2 ori.

4. Spre ecranul televizorului, electronii sunt accelerați cu tensiunea de 20 kV. Determinați lungimea de undă minimă din spectrul radiației X, care apare la frânarea electronilor de către ecran.

Răspuns: 0,062 nm.

5. Determinați de câte ori se va micșora fluxul de raze X, dacă anodul tubului de wolfram va fi înlocuit cu unul din molibden, considerând tensiunea de accelerare și curentul catodic constante.

Răspuns: de 1,76 ori.

6. Tubul de raze X este alimentat de la o sursă cu tensiunea de 250 kV. Determinați lungimea de undă minimă din spectrul radiației de frânare.

Răspuns: $5 \cdot 10^{-3}$ nm.

7. Calculați în Å lungimea de undă minimă a radiației X produsă de electroni cu viteza de $1,5 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$).

Răspuns: $\lambda = 0,19 \text{ Å}$.

8. Nivelul energetic (K) din atomii anodului este de -69 keV. Calculați energia razei (L_a), corespunzătoare tranziției electronului de pe nivelul M pe nivelul L.

Răspuns: 9,58 keV.

9. Randamentul tubului de raze X este de 2%. Calculați fluxul (Φ) de raze X furnizate, dacă tubul funcționează la tensiunea de 50 kV și curent anodic de 3 mA.

Răspuns: $\Phi = 3\text{W}$.

10. La trecerea printr-un țesut osos cu grosimea de 20 mm, fluxul de raze X s-a atenuat de două ori. Determinați coeficientul liniar de atenuare.

Răspuns: $\mu \approx 0,035 \text{ mm}^{-1}$.

11. O sursă punctiformă de raze X emite N fotoni pe secundă. La îndepărtare de sursă, fluxul descrie un con. Cunoscând fluxul unitar la distanța de 1 cm de la sursă (Φ_0), determinați fluxul unitar (Φ) la distanța d cm de la sursă.

Răspuns: $\Phi = \Phi_0/d^2$.

13. RADIAȚIA TERMICĂ

13.1. CARACTERISTICILE RADIAȚIEI TERMICE. LEGEA LUI KIRCHHOFF

În urma proceselor interatomice și intermoleculare, corpurile radiază unde electromagnetice. Din toată diversitatea radiațiilor electromagnetice, vizibile sau invizibile pentru ochiul omului, se poate evidenția doar una, proprie tuturor corpurilor. Aceasta este **radiația termică**, emisă de toate corpurile care au temperatura mai înaltă decât 0°K . La variația temperaturii corpului variază atât intensitatea, cât și structura spectrală a radiației termice (*fig. 13.1*).

Numim **flux de radiație** (Φ) puterea medie a radiației. În sistemul internațional el se măsoară în wați (W). Fluxul de radiație emis de 1 m^2 de suprafață a corpului se numește **radianță energetică** (R_e), exprimată în W/m^2 .

Capacitatea unui corp de a absorbi energia radiațiilor electromagnetice se caracterizează prin **coeficientul de absorbție** (α) egal cu raportul dintre fluxul de radiație absorbit și fluxul de radiație incident:

$$\alpha = \frac{\Phi_{abs}}{\Phi_{inc}} \leq 1 \quad (1).$$

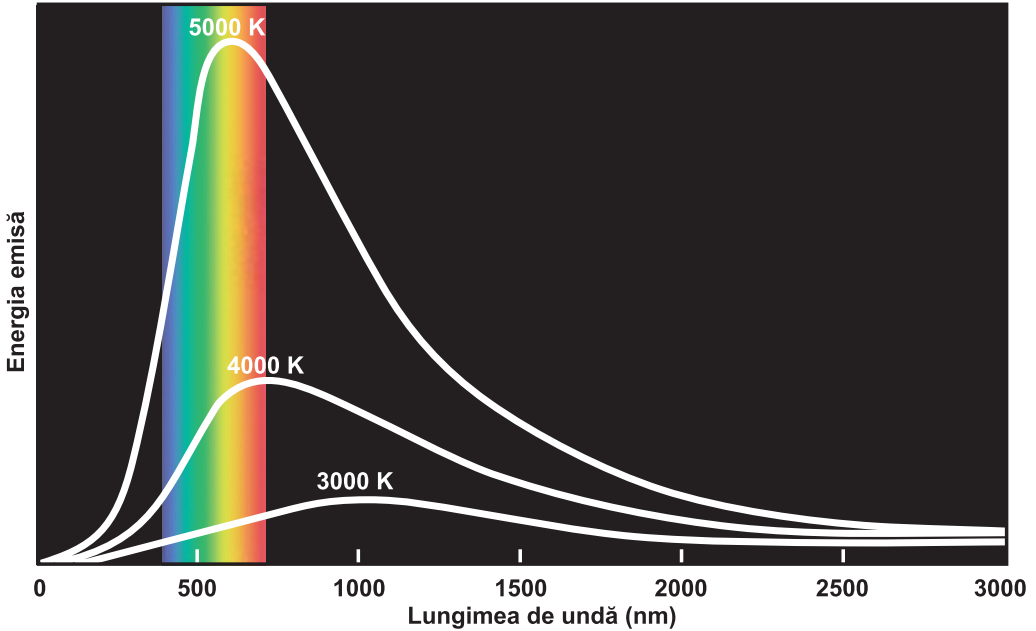


Fig. 13.1.

Radianța energetică a unui corp într-un interval mic de lungimi de undă ($\Delta\lambda$) se exprimă prin relația:

$$\Delta R_e = r_\lambda \Delta\lambda \quad (2),$$

unde: r_λ se numește **densitate spectrală a radianței energetice** pentru corpul dat.

Corpurile ale căror coeficienți de absorbție sunt egali cu o unitate, pentru radiațiile de orice lungime de undă, se numesc **corpuri absolut negre** (fig. 13.2). Corpurile ale căror coeficienți de absorbție sunt mai mici decât o unitate, însă nu depind de lungimea de undă a radiației incidente, se numesc **corpuri cenușii**.

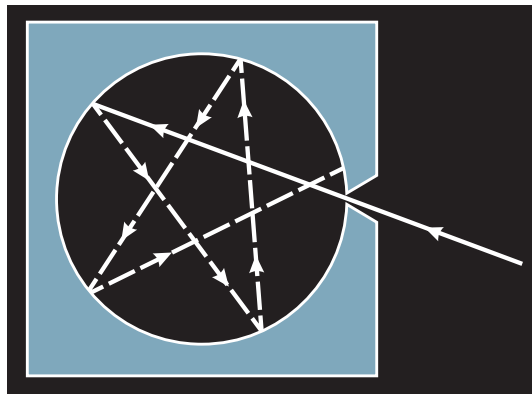


Fig. 13.2. Modelul corpului absolut negru.

În natură, nu există nici corpuri absolut negre, nici corpuri cenușii. Aceste noțiuni sunt abstracții fizice, necesare pentru a exprima din punct de vedere matematic unele legități, care, cu o anumită aproximație, în cazuri concrete pot fi folosite și pentru corpurile reale. De exemplu, în anumite cercetări se consideră cenușii corpurile care în domeniul infraroșu au un coeficient de absorbție de circa 0,9.

Corelația cantitativă dintre emisia și absorbția energiei electromagnetice a fost stabilită de **Gustav Kirchhoff** în anul 1859.

La temperatura constantă, raportul dintre densitatea spectrală a radianței energetice și coeficientul monocromatic de absorbție este același pentru toate corpurile, inclusiv pentru cele absolut negre:

$$\left(\frac{r_\lambda}{\alpha_\lambda} \right)_1 = \left(\frac{r_\lambda}{\alpha_\lambda} \right)_2 = \dots = \frac{\varepsilon_\lambda}{1} \quad (3),$$

unde: ε_λ este densitatea spectrală a radianței energetice a corpului negru. Matematic, această lege poate fi exprimată și prin relația:

$$\frac{r_\lambda}{\alpha_\lambda} = \hat{\varepsilon}_\lambda \quad \text{sau} \quad r_\lambda = \alpha_\lambda \cdot \hat{\varepsilon}_\lambda \quad (4).$$

13.2. LEGILE RADIAȚIEI TERMICE A CORPULUI ABSOLUT NEGRU

Legea Stefan–Boltzmann are următorul enunț: **radianța energetică a unui corp absolut negru este direct proporțională cu puterea a patra a temperaturii absolute a corpului respectiv:**

$$R_e = \sigma T^4 \quad (5),$$

unde: σ este constanta Stefan–Boltzmann:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4.$$

Pentru corpurile cenușii:

$$R_e = \alpha \sigma T^4 \quad (6).$$

Legea lui Wien: lungimea de undă λ_{\max} , căreia îi revine valoarea maximă a densității spectrale a radianței energetice a unui corp absolut negru, variază invers proporțional cu temperatura absolută a corpului respectiv.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (7),$$

unde: $b \approx 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ este constanta lui Wien.

Legea lui Wien se mai numește și **legea deplasării**, deoarece din ea rezultă că la creșterea temperaturii corpului absolut negru valoarea maximă a densității spectrale a radianței energetice se deplasează spre lungimile de undă scurte.

Folosind analiza spectrală cantitativă, în baza acestei legi se poate determina temperatura corpurilor la distanță, metoda fiind numită **pirometrie optică**.

Pe de altă parte, dacă este cunoscută temperatura corpului, se poate determina lungimea de undă careia îi aparține densitatea spectrală maximă a radiației energetice. În baza acestei legi se determină lungimea de undă λ_{\max} a radiației electromagnetice emisă de corpul uman, considerând temperatura pielii de 32°C.

$$\lambda_{\max} \approx \frac{29 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{3,05} = 9,5 \mu\text{m} - \text{radiație în domeniul infraroșu.}$$

Menționăm că, pentru a-și menține temperatura constantă, organismul omului cedează energie termică mediului înconjurător pe patru căi:

- conductibilitate termică;
- convecție;
- evaporare;
- radiație electromagnetică.

S-a constatat că, în stare de relaxare, la temperatura mediului înconjurător de 20°C, prin radiație corpul uman cedează 66% din energia totală, iar în aceleași condiții, efectuând efort fizic intens, numai 15%.

13.3. RADIAȚIA SOARELUI

Cea mai puternică sursă de radiație termică, care condiționează viața pe Pământ, este Soarele.

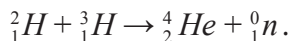
Unele caracteristici ale Soarelui:

- apariția – circa 4,59 miliarde de ani în urmă;
- diametrul $\approx 1,4 \cdot 10^6 \text{ km}$;
- masa soarelui $\approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$;
- densitatea medie $1,408 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- accelerația gravitațională 274 m/s^2 ;
- componența chimică a fotosferei (în %):

| | |
|------------------|------------------------|
| hidrogen – 73,46 | fier – 0,16 |
| helium – 24,85 | sulf – 0,12 |
| oxigen – 0,77 | neon – 0,12 |
| carbon – 0,29 | azot și altele – 0,21; |

- temperatura la suprafață – 5800°K;
- temperatura în centru $\approx 15 \cdot 10^6 \text{ °K}$;
- radianța totală – $3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Sursa energiei solare este reacția termonucleară de transformare a hidrogenului în heliu:



Pământul, care se află la o distanță de $1,496 \cdot 10^{11}$ m, primește $2 \cdot 10^{17}$ W de energie solară.

Sistemele fizice realizează un schimb de energie cu mediul sau cu alte sisteme. Un sistem care primește mai multă energie decât cedează se încălzește. Un sistem care cedează mai multă energie decât primește se răcește. Pământul primește de la Soare energie sub formă de radiație și în același timp cedează energie în univers (fig. 13.3).

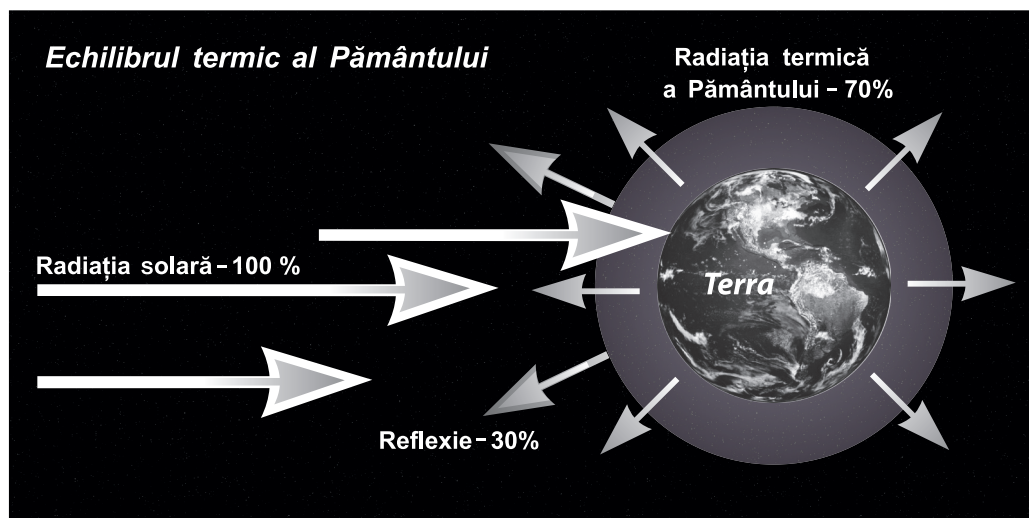


Fig. 13.3.

Echilibrul energetic al Pământului este dat de egalitatea dintre energia primită de la Soare și energia cedată în spațiu.

Pământul absoarbe 70% din energia primită de la Soare, iar 30% reflectă în spațiu.

Fiind un corp cald, Pământul radiază în spațiu energie termică echivalentă cu cele 70% absorbite. Astfel, echilibrul termic menține temperatura medie a Pământului constantă în timp.

Fluxul de radiație solară, ce revine la 1 m^2 de arie a frontierei atmosferei Pământului, este de **1370 W**, mărime numită **constantă solară**, iar până la suprafața Pământului ajung doar **1000 W/m²**.

Atenuarea radiației solare în atmosferă provoacă și schimbarea structurii spectrale a ei. În figura 13.4 este reprezentat spectrul radiației solare la frontiera atmosferei și la suprafața Pământului în cazul când Soarele se află în apogeu.

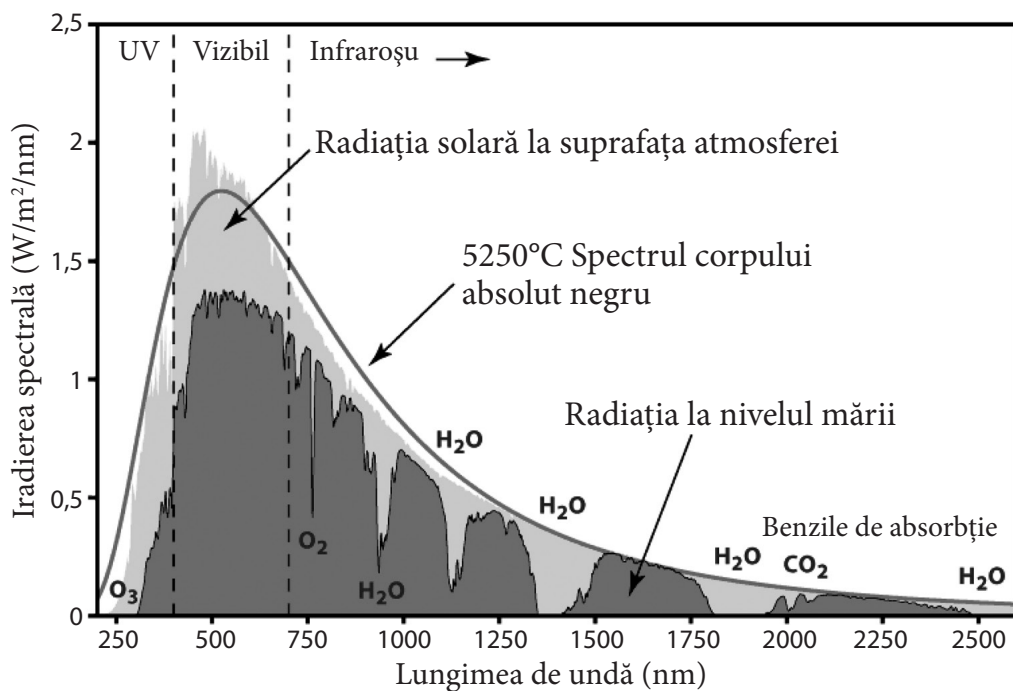


Fig. 13.4.

Spectrul radiației solare la suprafața atmosferei corespunde în mare măsură cu spectrul radiației corpului absolut negru, având $\lambda_{\max} = 470 \text{ nm}$.

La nivelul mării, spectrul are $\lambda_{\max} \approx 555 \text{ nm}$ și conține mai multe benzi de absorbție, în funcție de lungimile de undă. În domeniul ultraviolet principala substanță absorbantă este ozonul; în domeniul infraroșu – apa; în domeniul microundelor – apa și bioxidul de carbon.

Radiația solară dozată se aplică în medicină ca factor terapeutic (**helioterapie**), precum și ca factor de călire a organismului.

13.4. RADIĂȚIILE INFRAROȘII (IR). PROPRIETĂȚI ȘI EFECTE ASUPRA ORGANISMELOR VII

În anul 1800, astrologul englez **Sir William Herschel** a studiat efectele de încălzire ale razelor produse de soare. Pentru aceasta el a utilizat o prismă din sticlă. Prin mișcarea unui termometru de-a lungul spectrului format, a reușit să măsoare efectul de încălzire al diferitor culori, începând cu regiunea violetă, până la capătul roșu al spectrului. Mișcând termometrul dincolo de capătul roșu al spectrului, unde nu exista lumină vizibilă, efectul de încălzire a continuat să crea-

scă. Astfel, el a descoperit o nouă regiune a spectrului electromagnetic – **radiația infraroșie**.

Radiațiile IR, ca și toate radiațiile electromagnetice, au proprietățile de a se reflecta, refracta; suferă fenomene de difracție, interferență și polarizare. În raport cu radiațiile vizibile și ultraviolete, cele IR au **o viteză de propagare mai mare în diferite medii și un efect termic mai pronunțat**.

Domeniul IR, convențional, începe la 760 nm și se întinde ca limită de lungimi de undă până la 343μm, de unde încep microundele (fig. 13.5). În funcție de lungimea de undă și de aplicațiile practice, se acceptă divizarea întregului domeniu în trei tipuri: IR-A; IR-B și IR-C.

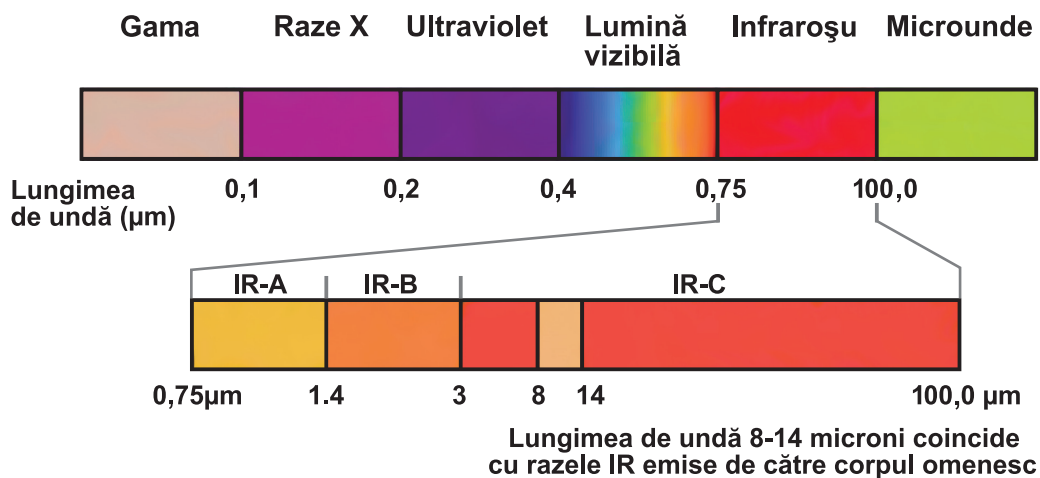


Fig. 13.5.

Din spectrul larg al radiațiilor IR au fost studiate grupele de la 0,75 la 400 μm, care, din punctul de vedere al utilizării medicale, se pot clasifica astfel:

- IR de la limita spectrului vizibil până la 6 μm sunt utilizate în scop terapeutic, din care numai cele cu $\lambda < 1,5 \mu\text{m}$ sunt radiații penetrante (artificiale sau solare);
- IR cu $\lambda > 6 \mu\text{m}$ cuprind radiațiile emise de corpul omenesc, de sol și de tot ce ne înconjoară.

Efectul radiației IR de la soare asupra organismului uman se manifestă indirect prin modificarea gradientului termic al pielii.

În terapie, în funcție de permeabilitatea pielii, se folosește următoarea clasificare a radiațiilor IR:

- cu $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$ sunt absorbite la suprafață;
- cu $\lambda > 1,5$ și $\lambda < 5 \mu\text{m}$ sunt absorbite de epiderm și derm;
- cu $\lambda > 0,75 \mu\text{m}$ și $\lambda < 1,5 \mu\text{m}$ sunt penetrante în funcție de pigmentație și de temperatură etc.

Radiațiile IR stimulează activitatea pielii, făcând-o mai sensibilă la excitarea externă, dar pot calma și durerile, fie prin acțiunea inhibitoare directă asupra nervilor afectați, fie prin acțiunea asupra sistemului circulator.

Radiațiile IR au efect asupra circulației:

- prin vasodilatație, intensificarea schimburilor dintre celule prin amplificarea fenomenelor osmotice și creșterea debitului sanguin;
- prin intermediul reacțiilor sanguine și al sistemului nervos, acționează asupra secrețiilor glandulare și asupra metabolismului general.

Pe de altă parte, iradierea puternică a celulelor cu radiație IR $\lambda < 1,5 \mu\text{m}$ are loc distrugerea acestora.

Expunerea la radiații IR $\lambda > 0,75 \mu\text{m}$ și $\lambda < 1,5 \mu\text{m}$ produce leziuni oculare: fotofobii, paralizia irisului, cataracte, desprinderea retinei.

13.5. RADIAȚIILE ULTRAVIOLETE (UV). PROPRIETĂȚI ȘI EFECTE ASUPRA ORGANISMELOR VII

În spectrul radiațiilor electromagnetice, domeniul UV, convențional, începe la 400 nm și se întinde ca limită de lungimi de undă până la 100 nm, de unde încep razele X. La interacțiunea cu materia, radiațiilor UV le revin următoarele proprietăți:

- la incidența pe un corp absorbant numai o mică parte a energiei este transformată în căldură;
- provoacă fluorescența diferitor substanțe;
- produc efect fotoelectric;
- pot produce reacții de oxidare, de reducere, de polimerizare, de fotoliză și biochimice.

Radiațiile UV au efecte biologice deosebite, justificând utilizarea lor în scop terapeutic prin iradierea directă sau după o prealabilă administrare a suprafeței iradiată cu substanțe fotosensibilizante.

Iradierea cu UV a organismelor vii modifică nivelul calciului și fosforului în sânge. În plasmă se constată creșterea concentrației de calciu și fosfor și o scădere a glicemiei. Aceste radiații activează circulația și măresc capacitatea hematiilor de a fixa oxigenul. Presiunea arterială scade mai ales la hipertensivi.

Există trei tipuri de radiație ultravioletă, care diferă ca lungime de undă și au efecte diferite asupra organismelor vii: UV tip A – de la 400 nm la 315 nm; UV tip B – de la 315 nm la 280 nm; UV tip C – de la 280 nm la 100 nm (*fig. 13.6*).

Aceste trei tipuri de radiație ultravioletă au efecte diferite asupra organismelor. Radiația UV-A are efecte eritematoase (de tip inflamator), radiația UV-B are **efect**

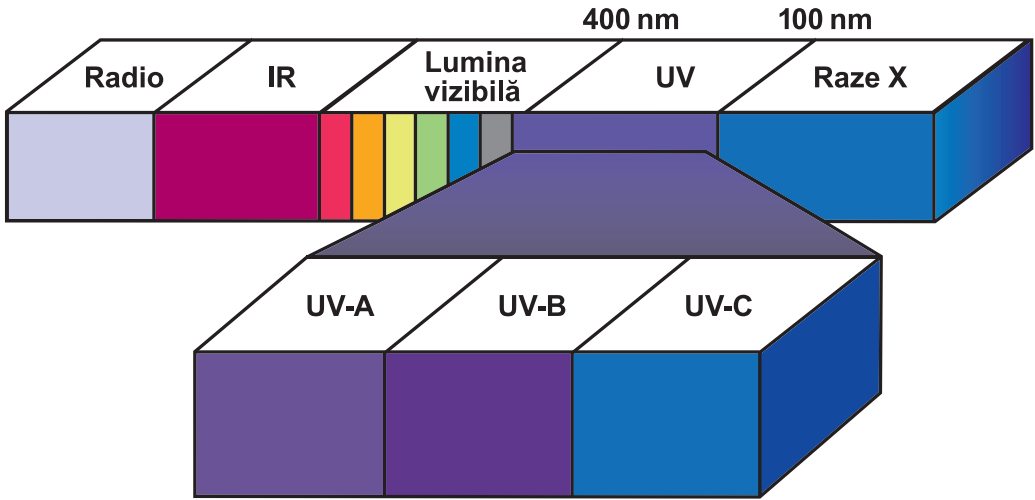


Fig. 13.6.

bronzant (prin stimularea celulelor ce determină colorarea normală a pielii – melanocite), iar UV-C are efect distructiv asupra celulelor, determinând grave leziuni celulare.

Efectul benefic al luminii a fost observat din cele mai vechi timpuri. Odată cu studiul organismelor microscopice și al bolilor induse de acestea, s-a observat efectul distructiv al luminii asupra agenților patogeni. Acest efect al radiației ultraviolete este datorat tocmai radiațiilor de tip C și are aplicații deosebit de importante în **dezinfecție** și **sterilizare**.

Pentru a ucide microorganismele, radiațiile UV-C penetrează membrana celulelor, străbate conținutul celulei și distruge ADN-ul celular (fig. 13.7), determinând leziuni ce împiedică activitatea bacteriei și capacitatea acesteia de a se reproduce.

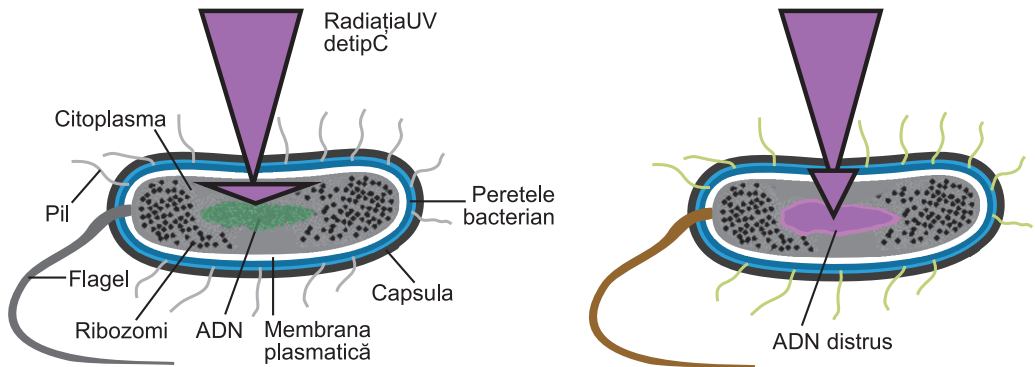


Fig. 13.7.

Așadar, razele UV afectează materialul biologic, fără a produce reacții chimice, doar prin intermediul energiei de putere mare, livrată celulelor. Microorganismele inactivate nu sunt îndepărtate din mediul în care se găsesc. De asemenea, UV nu modifică particulele sau substanțele chimice din mediu, fie ele organice sau anorganice. Efectul este dezinfectant, iar la o doză mare – chiar sterilizant. Efectul distructiv al radiației ultraviolete stă la baza utilizării lămpilor bactericide cu UV în domeniul dezinfecției și sterilizării.

EXERCIȚII

1. Determinați care trebuie să fie temperatura corpului absolut negru, pentru ca radianța energetică a lui să devină egală cu 500 W/m^2 .

Răspuns: 306°K .

2. Coeficientul de absorbție (α) al unui corp cenușiu este de 0,5. La ce temperatură radianța energetică a acestui corp va fi egală cu 500 W/m^2 ?

Răspuns: la 364°K .

3. Suprafața corpului absolut negru are $T = 1000^\circ\text{K}$. De câte ori se va mări puterea de radiație a acestui corp, dacă o jumătate din suprafața lui se va încălzi, iar cealaltă jumătate se va răci cu $\Delta T = 100^\circ\text{K}$?

Răspuns: de 1,06 ori.

4. Determinați radianța energetică a corpului uman la temperatura de 36°C , considerându-l corp cenușiu cu coeficientul de absorbție (α) egal cu 0,9.

Răspuns: $465 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

5. Metoda de diagnosticare, numită *termografie*, are la bază înregistrarea radiației termice a țesuturilor (sau organelor) sănătoase și patologice, temperatura cărora diferă neesențial. Determinați de câte ori diferă radianțele energetice a două sectoare de pe suprafața corpului, care au temperaturile $30,5$ și $30,0^\circ\text{C}$.

Răspuns: de 1,0068 ori.

6. În momentul exploziei unei bombe atomice s-a înregistrat o temperatură de $\approx 10^7^\circ\text{K}$. Determinați care a fost lungimea de undă careia i-a revenit densitatea spectrală maximă a radiației energetice.

Răspuns: $0,29 \text{ nm}$.

7. Fluxul de radiații emis de pe fiecare m^2 al suprafeței pământului în fiecare secundă este de 90 J. Determinați temperatura corpului absolut negru, care ar emite aceeași energie.

Răspuns: 200°K.

14. LUMINESCENȚA

14.1. TIPURI DE LUMINESCENȚĂ

Luminescența reprezintă radiația suplimentară a corpului în raport cu **radiația** lui **termică** la temperatura dată, care durează un timp mult mai mare decât perioada undelor de lumină.

Radiația termică în domeniul vizibil are loc când temperatura corpului radiant este de câteva sute sau mii de grade, pe când luminescent el poate fi la orice temperatură. Din acest motiv, luminescența deseori este numită **radiație rece**.

Pentru apariția luminescenței este necesară o sursă de energie, care diferă de energia termică de echilibru, corespunzătoare temperaturii date. Se deosebesc:

- **fotoluminescența** – apare în urma absorbției luminii;
- **electroluminescența** – este condiționată de câmpul electric în care este plasată substanța;
- **catodoluminescența** – este provocată de iradierea substanței cu electroni rapizi;
- **triboluminescența** – este determinată de acțiuni mecanice;
- **chimiluminescența** – apare în unele procese chimice;
- **bioluminescența** – se observă la unele bacterii, ciuperci, insecte etc.

14.2. FOTOLUMINESCENȚA. LEGEA LUI STOKES

De cele mai multe ori, în cercetările biofizice și practica medicală se studiază fotoluminescența corpurilor sub acțiunea radiației luminoase, vizibile sau invizibile.

Fotoluminescența, la rândul ei, se clasifică în **fluorescență** (de scurtă durată) și **fosforescență** (de lungă durată).

După mecanismul proceselor elementare sunt atestate fotoluminescențe: **de rezonanță, spontană, stimulată și de recombinare.**

Actul inițial al fotoluminescenței este excitarea atomului sau moleculei cu un foton din exterior.

În cel mai simplu caz, care se realizează de obicei în vapori și gaze monoatomice, atomul, revenind în starea inițială, radiază un foton de luminescență identic cu cel incident (fig. 14.1).

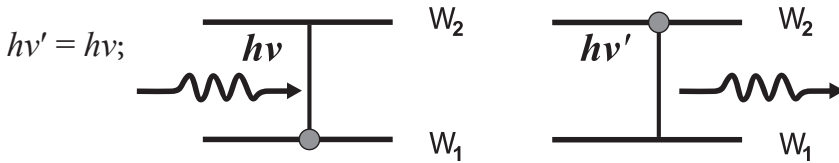


Fig. 14.1.

Acest fenomen se numește **fluorescență de rezonanță.**

Adesea, fără să radieze, atomii din stările de excitație 4-3 trec pe nivelul 2, apoi, spontan, pe nivelul 1, radiind un foton de frecvență mai mică în raport cu frecvența fotonului incident (fig. 14.2).

Nivelul 2 poate aparține atomului excitat, precum și unui alt atom. În primul caz, luminescența se numește **spontană.**

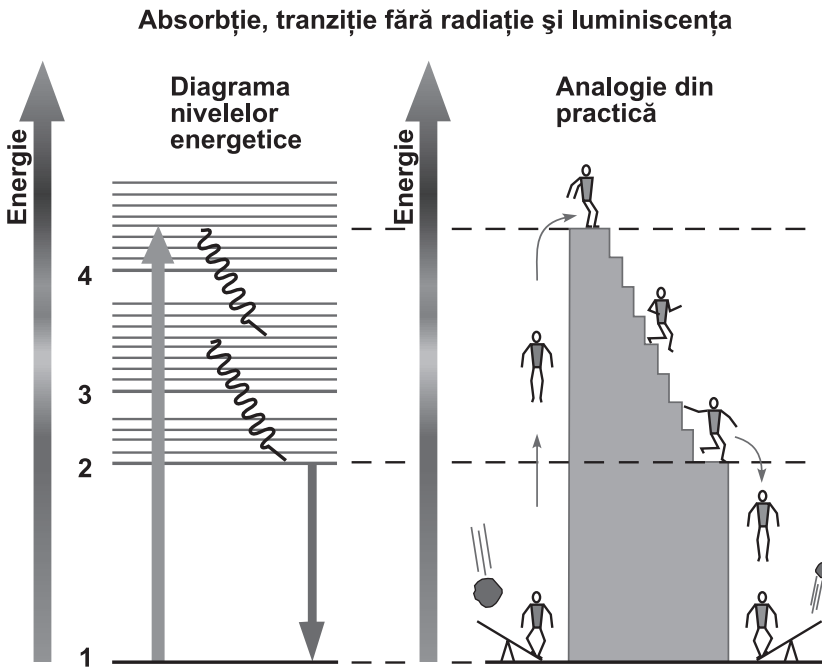


Fig. 14.2.

Cel de al doilea caz are loc într-un amestec de gaze, atomii cărora posedă nivele energetice identice.

Drept exemplu poate servi mediul activ al laserului cu **helium** și **neon**, unde atomii excitați ai heliului transmit prin ciocnire energia atomilor de neon, luminescența cărora reprezintă **radiația laser**.

În spectrometrie, **triplet** se consideră trei linii spectrale apropiate, determinate de divizarea unui nivel energetic al sistemului în trei subnivele. Acest fenomen este caracteristic pentru atomii sau moleculele care dispun de doi electroni externi. Formarea directă a unui **triplet** prin absorbția unui foton de lumină vizibilă sau ultravioletă este puțin probabilă, deoarece electronul ar trebui să-și schimbe simultan și orbita, și spinul. Din acest motiv, apare starea intermediară – **singlet**, care, de regulă, are o durată de viață destul de lungă pentru a permite ca spinul unuia dintre cei doi electroni să se inverseze, astfel producând un **triplet**. În aceasta și constă unul din mecanismele apariției fenomenului **fosforescență** (fig. 14.3).

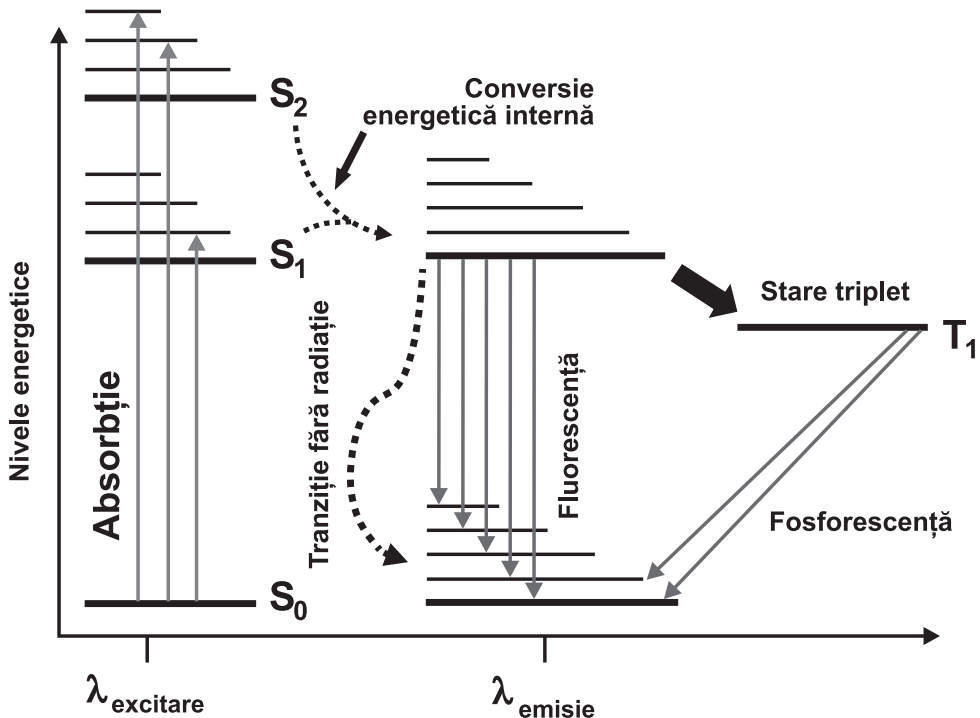


Fig. 14.3.

De regulă, fenomenul fotoluminescenței se supune **legii lui Stokes (1852)**, care stipulează: **spectrul de luminescență în raport cu spectrul de excitare este deplasat în domeniul cu lungimi de undă mai mari** (fig. 14.4).

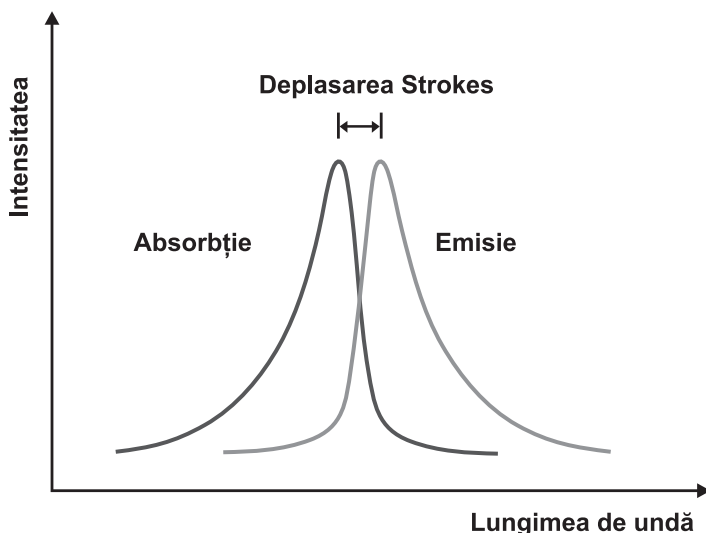


Fig. 14.4.

În cristale, transmiterea energiei pentru producerea luminescenței poate avea loc prin recombinarea particulelor; de exemplu, a electronilor și golurilor în semiconductori. Luminescența care apare prin acest procedeu se numește **luminescență de recombinaere** (laserul cu semiconductori).

14.3. ANALIZA LUMINESCENTĂ (AL)

Metoda de cercetare a diferitor obiecte, bazată pe luminescența lor, se numește **analiză luminescentă**.

Se cercetează luminescența proprie a obiectului, iar în cazul când obiectul nu este luminescent, se cercetează luminescența **luminoforului**, cu care se prelucrează în prealabil.

Luminoforii pot fi substanțe solide și lichide cu proprietăți esențiale de luminescență sub acțiunea diferitor excitanți, cu condiția ca spectrul lor energetic să fie discret.

De cele mai multe ori, în calitate de sursă pentru excitarea fotoluminescenței este utilizată **lampa de cuarț cu vapori de mercur, radiația laser sau lampa cu xenon**.

În unele cazuri, analiza luminescenței se bazează și pe alte forme de luminescență, cum ar fi catodoluminescența, radioluminescența, chimiluminescența. Prin această metodă, după intensitatea liniilor spectrale în radiația luminescentă, se determină cu o precizie de 10^{-4} – 10^{-5} g/cm³ conținutul cantitativ al diferitor substanțe în **preparatele farmaceutice**.

În condiții favorabile, AL permite a se depista substanțe luminescente cu masa de până la 10^{-10} g.

Prin AL se diferențiază ușor obiectele care pot fi identice la înfățișare (valuta falsă).

În cercetările medico-biologice este folosit pe larg microscopul luminescent, în care, spre deosebire de microscopul optic, se folosește radiația ultravioletă și două filtre: unul este situat în fața condensorului, fiind transparent numai pentru radiația ultravioletă, iar celolalt – între obiectiv și ocular, fiind transparent numai pentru spectrul de luminescență.

Unul dintre dispozitivele relativ simple, utilizate pentru depistarea și determinarea intensității radiației luminescente, este **fluorimetrul**, schema de principiu a căruia este reprezentată în figura 14.5.

AL este folosită pe larg în diagnosticarea diferitor maladii de piele, în criminalistică și în multe alte domenii.

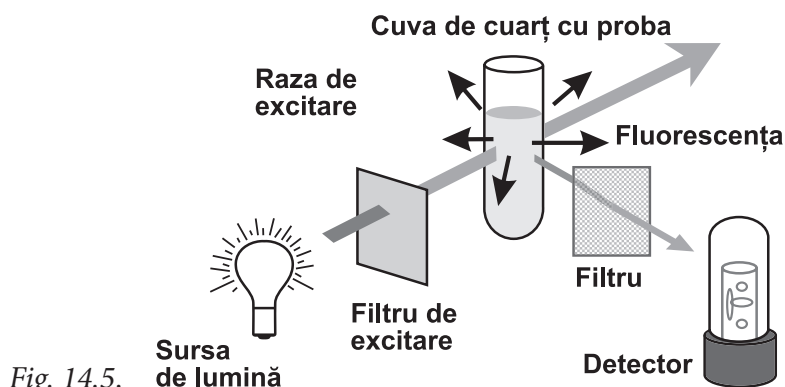


Fig. 14.5.

14.4. PLASMA ȘI FOTOLUMINISCENȚA. UTILIZĂRI TEHNICE

Într-o aproximație relativă, **plasma** este un sistem fizic format dintr-un număr mare de particule neutre (atomi în stare fundamentală sau în stări excitate, fotoni) și particule încărcate electric (ioni pozitivi și negativi, electroni), ale căror proprietăți sunt determinate de interacțiunile colective și care, macroscopic, apar neutre din punct de vedere electric.

Pe baza fotoluminescenței sunt produse **lămpile cu descărcare în gaz**, spectrul cărora este apropiat de cel al luminii de zi și au un randament mare față de becurile cu incandescență. Cele mai răspândite reprezintă niște tuburi ce conțin un gaz inert (argon sau neon) și vapori de mercur. La descărcarea electrică în acest mediu se formează **plasma care emite în ultraviolet**. Suprafața interioară a tubului este acoperită cu o substanță fluorescentă, care emite un spectru continuu

în domeniu vizibil. În funcție de gazul utilizat, se pot obține diferite culori ale radiației emise (roșu pentru neon, albastru pentru argon, galben pentru vaporii de sodiu).

În construcția televizoarelor, monitoarelor și tablelor de afișaj este utilizat **ecranul cu plasmă**. În figura 14.6 sunt reprezentate elementele constructive ale unei secțiuni într-un ecran cu plasmă.

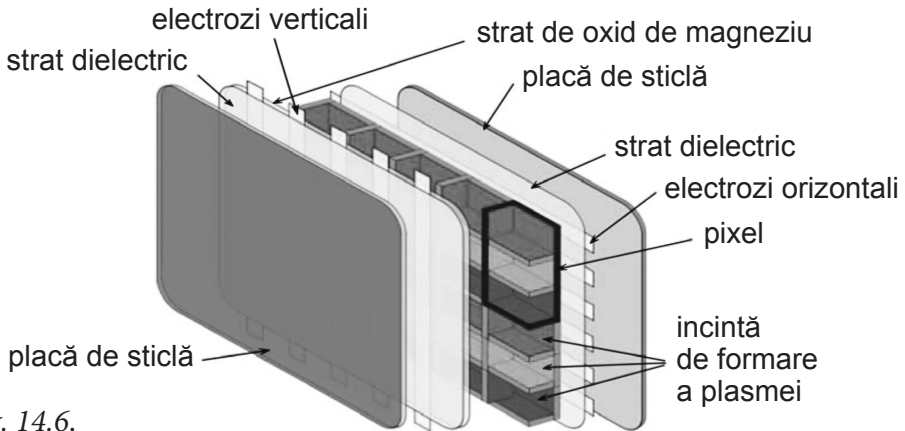


Fig. 14.6.

Ecranul cu plasmă reprezintă o matrice de incinte umplute cu gaz, situate între două plăci de sticlă, în interiorul cărora sunt plasați electrozi transparenti. Pixelii cu plasmă au dimensiunile de $200 \times 200 \times 100 \mu\text{m}$. Pentru producerea plasmei, incintele, de obicei, sunt umplute cu gaz – Ne sau Xe (mai rar He și Ar). Pixelii sunt redați cu ajutorul unei rețele de incinte mici în care se formează plasma. Pentru fiecare pixel există câte trei astfel de incinte. Pereții lor sunt acoperiți cu substanțe fluorescente (fig. 14.7), care, sub acțiunea radiației ultraviolete, emit cele trei **culori principale: roșu, verde și albastru**. Intensitatea lor este controlată prin intermediul curentului electric aplicat fiecărei celule în parte.

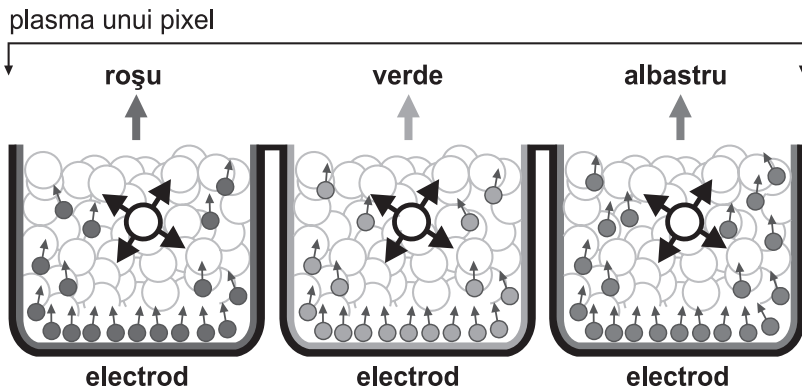


Fig. 14.7. Structura incintelor unui pixel.

15. LASERELE ȘI APLICAREA LOR ÎN MEDICINĂ

15.1. NOȚIUNI TEORETICE ȘI FENOMENE CE STAU LA BAZA FUNCȚIONĂRII LASERELOR

Cuvântul „laser” provine de la inițialele englezești ale principiului acestui fenomen: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, adică, în traducere, **amplificarea luminii prin emisia stimulată a radiației**.

Vom analiza pe scurt principalele fenomene ce stau la baza funcționării laserelor.

Emisia stimulată. Conform legilor mecanicii cuantice, energia electronului și, prin urmare, a atomului de care este legat, poate lua doar anumite valori discrete: $W_1; W_2; W_3 \dots$ numite **nivele energetice**.

În anumite condiții, un atom sau o moleculă poate să absoarbă (sau să emită) o anumită cantitate de energie. Ca urmare a absorbției de energie, un electron (sau mai mulți) poate să efectueze o tranziție cuantică de pe un nivel de energie inferior (W_i) pe un nivel de energie superior (W_s). Acest proces de excitare a atomului (*fig. 15. 1a*) se desfășoară doar în cazul când energia fotonului absorbit este egală cu diferența de energie a nivelelor între care are loc tranziția. Frecvența radiației absorbite de electron (atom) este dată de relația:

$$\nu = \frac{W_s - W_i}{h} \quad (1),$$

unde: h este constanta lui Planck.

Atomul (sau molecula) rămâne în stare excitată un timp limitat (aproximativ 10^{-7} s).

În cazul atomilor cu mai mulți electroni au fost identificate stări excitate în care electronul poate rămâne un timp mai îndelungat (aproximativ 10^{-3} s). Acestea se numesc **stări metastabile** și joacă un rol important în producerea **fenomenului laser**.

Din anumite cauze, interne sau externe, atomul se dezexcită, iar electronul, revenind pe nivelul energetic inițial, emite un foton a cărui energie este egală cu cea a fotonului absorbit. Dezexcitarea (ca și excitarea) este un proces aleator, se desfășoară la întâmplare și are caracter statistic. Acest fenomen se produce în mai multe moduri. Dacă electronul revine de la sine, spontan, pe nivelul energetic inițial, fenomenul se numește **emisie spontană** (*fig. 15.1*).

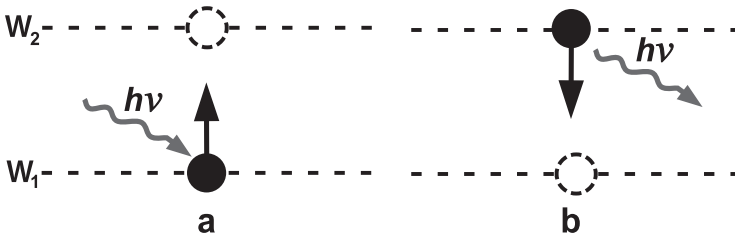


Fig. 15.1.

Un alt electron, aflat pe un nivel **metastabil**, va reveni pe nivelul W_1 , după un timp mai îndelungat. Dacă, după un timp mai scurt, sub acțiunea unei cauze externe (de exemplu, o radiație electromagnetică), un astfel de electron este impus să revină pe nivelul W_1 , fenomenul se numește **emisie stimulată** (fig. 15.2). Cu alte cuvinte, atomul este „stimulat” să emită un foton după un timp mult mai scurt decât ar fi timpul de „viață” al nivelului excitat respectiv. Dacă stimularea se face cu un foton a cărui frecvență este egală cu cea a radiației care a excitat atomul, se observă că, pe lângă acesta (care nu este absorbit de atom), mai apare încă un foton (datorită dezexcitării atomului) de aceeași energie, direcție și fază. Dacă fiecare din acești doi fotoni va întâlni câte un alt atom excitat, cu aceleași nivele metastabile, se vor produce alte două emisii stimulate cu producerea a încă doi fotoni (deci, 4 în total) în fază (coerenți) cu primii. Dacă, mai departe, fenomenul se poate repeta, atunci se obține o multiplicare în avalanșă a numărului fotonilor care au aceeași energie, direcție și fază. Acest proces de amplificare a radiației prin emisie stimulată se numește **fenomen (efect) laser**, iar substanța al cărei atomi permit producerea acestui fenomen se numește **mediu activ laser**, care poate fi solid, lichid sau gazos.

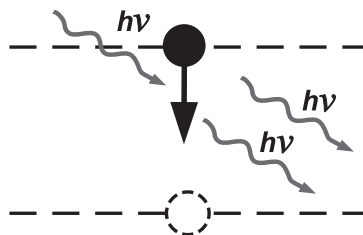


Fig. 15.2.

Inversiunea populațiilor. În mod obișnuit, într-un sistem atomic (cuantic), numărul atomilor situați pe nivelul fundamental (în stare energetică inferioară de echilibru termodinamic) este cu mult mai mare decât al atomilor aflați în stare excitată. În această situație nu este posibilă amplificarea luminii, deoarece fotonii emiși de atomii excitați sunt absorbiți de atomii neexcitați. Pentru a se produce fenomenul laser, este necesar să existe un număr cât mai mare de atomi în stare

excitată: adică, este necesar să se inverseze raportul numărului de atomi din sistem în favoarea celor excitați. Fenomenul prin care marea majoritate a atomilor mediului activ laser se află în stare excitată metastabilă se numește **inversiunea populațiilor** (fig. 15.3). Această inversiune presupune depopularea de electroni a nivelelor energetice inferioare ale atomilor mediului activ laser și creșterea numărului de electroni pe nivelele energetice superioare, metastabile.

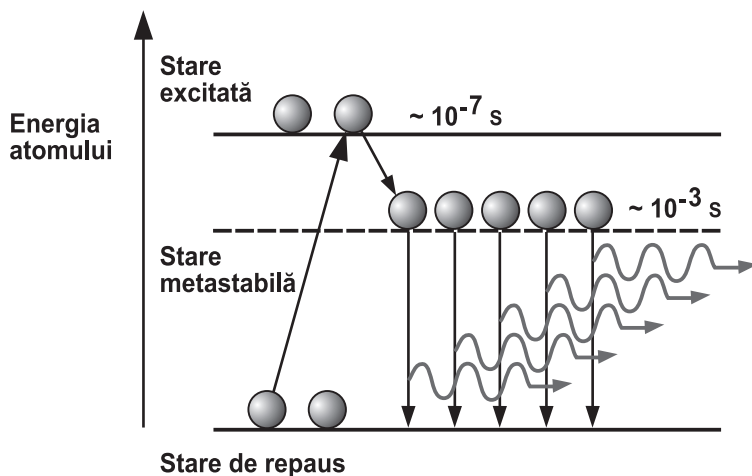


Fig. 15.3. Inversiunea populațiilor.

Pompajul fonic (optic). Inversiunea populațiilor este o situație anormală pentru atom, deoarece tendința naturală a atomilor este de a se situa în stări energetice minime. Totodată, această stare de neechilibru termodinamic nu se poate realiza decât dacă se consumă o anumită energie pentru menținerea ei.

Procesul prin care are loc transmiterea de energie necesară pentru realizarea inversiunii populațiilor se numește **pompaj fonic** sau **optic**. Pompajul fonic se poate face pe diferite căi: *fonică*, *electrică* sau *chimică*. Inversiunea populațiilor nu se poate obține prin simpla încălzire a mediului activ laser, deoarece, la orice temperatură, nivelele energetice superioare sunt mai puțin „populate” decât cele inferioare. Sursa de energie care permite excitarea atomilor se numește **sursă de pompaj**.

Cavitatea rezonantă (rezonator laser). După obținerea inversiunii populației, drept inițiator al procesului de emisie stimulată poate servi chiar unul din fotonii emiși de un atom excitat al mediului activ laser, care, la rândul său, stimulează producerea altor fotoni. Pentru a evita pierderea spre exteriorul mediului activ a primilor fotoni stimulați și pentru a lungi concomitent traiectoria acestora prin mediul activ, în vederea dezexcitării stimulate a unui număr cât mai mare de atomi, se impune existența unei **cavități rezonante**.

Cavitatea rezonantă impune fotonii să rămână un timp mai îndelungat în mulțimea de atomi excitați, asigurând astfel o amplificare a radiației. O astfel de cavitate rezonantă poate fi constituită dintr-un sistem de două oglinzi (fig. 15.4) riguros paralele, cu rol de a reflecta cea mai mare parte a fotonilor mediului activ laser. Una dintre oglinzi, numită *oglină de extracție*, are centru transparent, permițând „ieșirea” fascicului laser din cavitatea rezonantă.

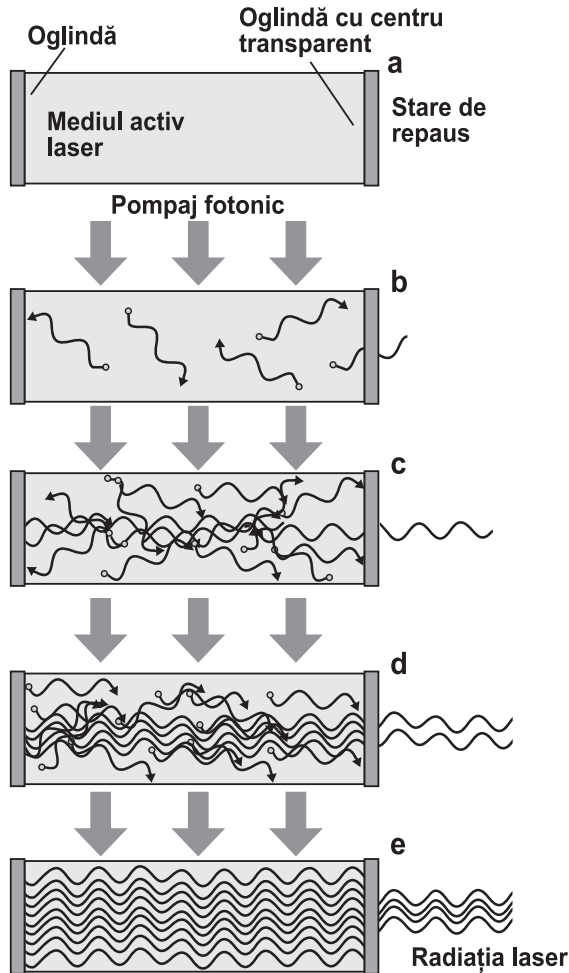


Fig. 15.4.

Indiferent de natura mediului activ și de sistemul de pompaj, radiația laser are câteva caracteristici generale care o deosebesc de sursele clasice (lămpi):

– **coerența** – proprietatea colectivă a radiației; această proprietate permite interacțiunea între pachetele de unde și conduce la apariția fenomenelor de interferență și difracție;

- **monocromaticitatea** – proprietatea radiației laser de a avea o singură lungime de undă pentru toți fotonii constituenți;
- **direcționalitatea** – proprietatea radiației laser de a avea o direcție bine stabilită pentru fiecare fascicul laser după o anumită distanță;
- **strălucirea** – proprietatea radiației laser de a avea o densitate energetică mult superioară unei surse clasice de lumină.

Alte caracteristici concrete, cum ar fi: lungimea de undă, puterea, durata și frecvența pulsurilor, intensitatea radiației, care pot varia fie la o anumită sursă, fie la schimbarea sursei laser, făcând acest tip de radiație potrivit pentru o multitudine de aplicații medicale.

După modul de funcționare, laserele pot fi:

- **cu emisie continuă** – lasere care emit o undă continuă: se folosește abreviația **cw** (de la „continous wave” din engleză); de obicei, pentru aceste lasere se menționează puterea (în W);
- **în pulsuri** – lasere a căror emisie este caracterizată de o anumită durată de emisie, numită *durată a pulsului*, dar și de o anumită rată de repetiție a pulsurilor; pentru aceste lasere se menționează energia (în J), puterea unui puls (în W), durata unui puls (de la sute de microsecunde la zeci de femtosecunde), frecvența sau rata de repetiție (de la câțiva Hz la kHz).

15.2. ELEMENTELE CONSTRUCTIVE ALE DIFERITOR TIPURI DE LASERE

Laserul cu He-Ne

Pentru a obține inversiunea populațiilor, deseori în calitate de mediu activ laser este folosit un amestec din două gaze. În selectarea gazelor, unul dintre criteriile necesare este ca ambele să posede nivele energetice egale sau cel puțin foarte apropiate. Pompajul fonic se realizează prin descărcarea electrică în amestec.

În **laserul cu heliu-neon**, rolul gazului de bază le revine atomilor de neon, iar rolul gazului adăugat – atomilor de heliu. Diagrama energetică a amestecului de He-Ne este reprezentată în figura 15.5.

Prin ciocnire are loc transferul de energie de la atomii de heliu la atomii de neon, obținându-se popularea nivelului metastabil. Tranzițiile stimulate în cavitatea rezonantă produc fasciculul laser. Menționăm că pentru fiecare amestec de gaze, care poate servi ca mediu activ laser, există o anumită valoare a intensității curentului de descărcare electrică, la care se asigură cea mai înaltă inversiune a populațiilor.

Schema de principiu a unui laser cu He-Ne este reprezentată în figura 15.6.

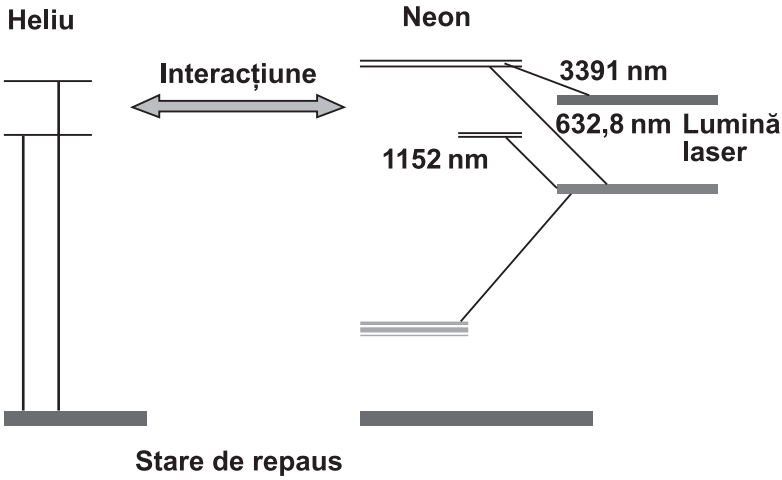


Fig. 15.5.

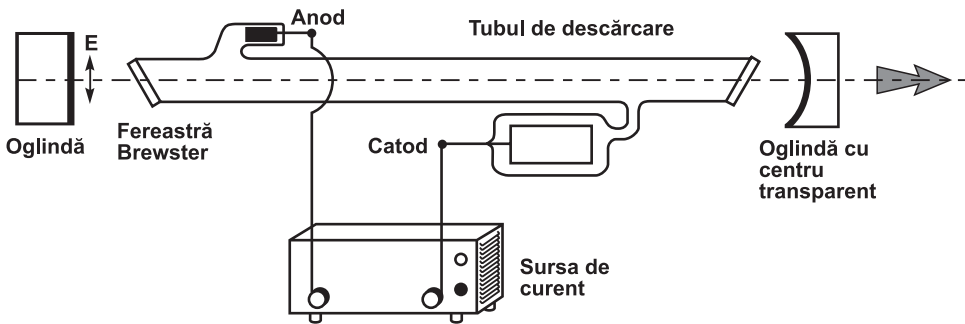


Fig. 15.6.

Ferestrele Brewster joacă un rol deosebit în construcția laserelor cu gaz, asigurând:

- evitarea pierderilor energetice ale radiației la ieșirea și intrarea în tubul de descărcare electrică;
- polarizarea fascicului laser într-un anumit plan;
- schimbarea tubului de descărcare electrică, în caz de defectare, cu păstrarea oglinzilor rezonatorului laser, care sunt cu mult mai costisitoare.

Laserul cu CO₂

Mediul activ este o plasmă de CO₂ la care se adăugă azot și heliu pentru sporirea eficienței. Lungimile de undă, folosite cel mai des, sunt în domeniul infraroșu – 10,6 μm și 9,6 μm. Acest laser poate funcționa atât în regim continuu, cât și în pulsuri. Este unul dintre cele mai folosite lasere medicale – atât în excizia

unor țesuturi, cât și pentru vaporizarea unor leziuni. Lungimea de undă la care funcționează este puternic absorbită de apă; acest fapt traducându-se într-o putere de penetrare mică. Acest tip de laser are numeroase aplicații în oftalmologie și chirurgie.

Laserul cu Ar

Are ca mediu activ Ar aflat la o presiune de 1 torr. Furnizează radiații cu mai multe lungimi de undă, dintre care cele mai importante sunt 488 nm și 514,5 nm. Funcționează în regim continuu și are aplicații deosebite în oftalmologie.

Laserul cu rubin

Laserul cu rubin este alcătuit, în principiu, dintr-un cristal cilindric de rubin, două oglinzi paralele, argintate sau aurite, și un tub de descărcare în formă de spirală, umplut cu un gaz nobil și conectat la un condensator de mare capacitate. **Rubinel reprezintă oxid de aluminiu, care conține mici cantități de ioni de crom (Cr^{3+} în Al_2O_3).** Cilindrul de rubin utilizat are lungimea de câțiva centimetri și diametrul de câțiva milimetri. Cele două oglinzi sunt argintate sau aurite în așa fel, încât una dintre ele este complet opacă, iar cealaltă – cu centrul transparent. Ele sunt așezate la capetele cilindrului de rubin, uneori se metalizează chiar capetele cilindrului (fig. 15.7). Tubul de descărcare, în formă de spirală, umplut cu neon, xenon sau amestecuri de neon și cripton, este conectat la un condensator și funcționează asemenea blitz-urilor aparatelor fotografice. Acest laser funcționează în regim de pulsuri, având unda de emisie cu lungimea de 694,3 nm.

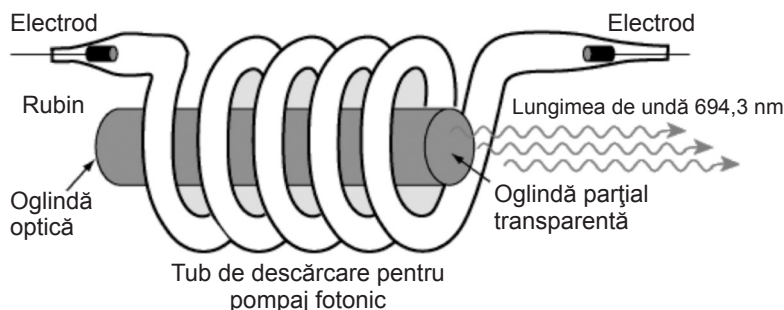


Fig. 15.7.

Laserul cu semiconductori

Laserul cu semiconductori este constituit ca și celelalte tipuri de laser, după același șablon: mediu activ, sistem de excitare, rezonator optic. Constructiv este, de fapt, un sandwich format din 3 straturi de semiconductori, la care se adaugă

elementele sistemului de excitare. La acest tip de laser, energia necesară excitării sistemului de atomi din mediul activ, cât și factorul declanșator sunt date de curentul electric care se aplică (fig. 15.8). Datorită faptului că acest sandwich corespunde modelului clasic de diodă, de aici încolo se va folosi termenul **diodă**.

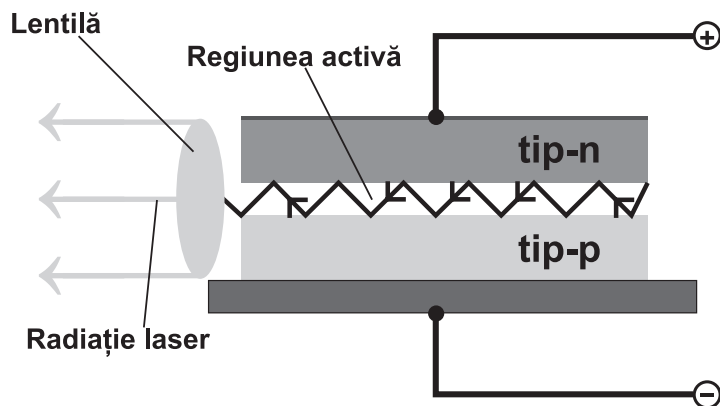


Fig. 15.8.

Faptul că diodele laser sunt ieftine și utilizabile duce la producerea lor în masă și includerea în cele mai multe aparate electronice.

Pe de altă parte, ele sunt, poate, cele mai fragile dispozitive de emisie laser. Faptul că stratul activ are mărimea unei bacterii, el poate fi ușor distrus prin supunerea la curenți neadecvați, prin influențe electrostatice, prin încălzire excesivă. Stratul activ se poate autodistrage chiar și fără prezența vreunui din factorii enumerați mai sus. Simpla emisie a luminii poate vaporiza acest strat minuscul, dacă lumina emisă este prea puternică. Cu toate acestea, laserele cu semiconductori sunt mai ieftine decât laserele cu gaz.

Mărimile reduse, costurile mici de fabricație și utilizare, precum și longevitatea diodelor, le conferă atuuri importante în „lupta” cu celelalte dispozitive de emisie laser. Dioda laser este un domeniu cu orizonturi ce abia se deschid, cu un viitor sigur și cu aplicare largă în viața de zi cu zi.

15.3. UTILIZAREA RADIAȚIEI LASER ÎN CERCETĂRILE BIOFIZICE ȘI ÎN PRACTICA MEDICALĂ

Efectele radiației laser asupra organismelor vii sunt variate. De aceea, în domeniile biologic și medical laserul este folosit cu prudență și cu multă atenție.

După cum relevă cercetările de specialitate, la interacțiunea cu materia vie, radiația laser poate produce, în principiu, următoarele efecte: termic, foto-bio-stimulent și fotochimic. În funcție de temperatura atinsă de contactul cu țesăturile,

se pot produce două tipuri de efecte termice: **coagularea** (pentru temperaturi cuprinse între 60 și 100°C) și **volatilizarea** (pentru temperaturi mai înalte de 100°C).

Încă de la începutul apariției sale, laserul și-a găsit numeroase aplicații, care, an de an, cuprind noi domenii de activitate (meteorologie, prelucrarea și transmiterea informației, holografie, cibernetică etc.). Totodată, se observă o creștere tot mai însemnată a aplicațiilor laserului în **domeniul medico-biologic**.

În **medicină**, introducerea laserului permite dezvoltarea unor tehnici medicale care să înlocuiască mai eficient tehnicile convenționale sau să creeze noi modalități de investigație și tratament. Astfel, cu ajutorul unui dispozitiv laser care emite în infraroșu se pot face determinări ale diferitor substanțe din sânge fără să se apeleze la obișnuita metodă a recoltării unor probe. Dispozitivul permite măsurarea precisă și rapidă a concentrației de glucoză, grăsimi (colesterol), acid uric și alcool (etanol) din sânge, ceea ce oferă posibilitatea depistării precoce a unor boli (**tuberculoză, diabet** etc.).

În **chirurgie și microchirurgie**, laserul este folosit în tratarea gliomelor, la desprinderea unor tumori de pe principalele vase de sânge, la vaporizarea unor tumori din ventricule, la extirparea unor tumori cerebrale vascularizate intens, la excizia nevromelor, la repararea, anastomozarea (sudura) unor vase de sânge, la detașarea mușchilor de os, la endoscopia clinică pentru controlarea hemoragiilor gastrointestinale, pentru cicatrizarea ulcerului stomacal etc.

În aplicarea acestei noi tehnici chirurgicale, în care raza laser are rolul bisturiului clasic, se evită unele influențe negative asupra țesuturilor adiacente. Intervențiile operatorii sunt nesângeroase, nu apar complicații postoperatorii, plus alte avantaje.

În **oftalmologie**, laserul este folosit în: retinopatia diabetică, ocluziile vaselor retiniene, prevenirea și extinderea hemoragiilor, decoltarea sau ruperea retinei, chirurgia tumorilor pleoapei, unele forme de cataractă și glaucom.

În **otorinolaringologie** laserul permite tratarea unor afecțiuni patologice prin fotocoagulare sau vaporizare – în cazul papilomatozei laringiene, nodulilor vocali, polipilor corzilor vocale, la înlăturarea unor formațiuni tumorale benigne.

Un alt domeniu de aplicabilitate a laserului este **dermatologia**, în care se utilizează atât efectul termic, cât și cel foto-biostimulent și fotochimic, unele dintre indicații fiind încă în stadiu de cercetare. Se folosește fotocoagularea și vaporizarea cuperozei, la înlăturarea tumorilor cutanate benigne și maligne, precum și în tratarea altor afecțiuni dermatologice.

Cercetările privind utilizarea laserului în **ortopedie și traumatologie** au scos în evidență un efect de stimulare a troficității țesuturilor, cicatrizant și anti-inflamator. Prin urmare, radiația laser este indicată în tratarea unei serii întregi de

afecțiuni: artroze posttraumatice și reumatismale, periartrite calcare, osteoporoze, consolidări întârziate, discartroze și spondiloze etc.

Terapia cu ajutorul radiației laser presupune o gamă variată de dispozitive laser cu caracteristici funcționale optime pentru un tip de afecțiune. Dintre dispozitivele laser utilizate în domeniul medical se remarcă laserul cu CO_2 , laserul cu He-Ne, laserul cu Ar și altele. Desigur, în unele cazuri, utilizarea laserului nu poate înlocui tehnicile terapeutice considerate clasice, dar le completează și le amplifică posibilitățile prin finețe, precizie, rapiditate și eficacitate.

EXERCIȚII

1. Care este lungimea spațială a unui impuls de radiație laser cu durată de 10^{-12} s?

Răspuns: 0,3 mm.

2. Folosind laserul cu rubin $\lambda = 694,3$ nm și o rețea de difracție, maximul de ordinul I pe ecranul situat la distanța de 0,5 m este deplasat în raport cu maximul central cu 3 cm. Determinați constanta rețelei de difracție.

Răspuns: $\approx 0,012$ mm.

3. Lungimea de undă a radiației unui laser este de 570 nm. Raza de la acest laser luminează o suprafață de 1mm^2 . Cunoscând că puterea laserului este de 200 mW, determinați numărul de fotoni care bombardează această suprafață în 10 secunde.

Răspuns: $57 \cdot 10^{16}$ fotoni.

4. Două lasere emit radiație cu $\lambda_1 = 632,8$ nm și respectiv $\lambda_2 = 514,5$ nm. Determinați cu cât diferă energia fotonilor acestor radiații.

Răspuns: cu 0,44 eV.

5. Un laser cu puterea de 200 mW emite radiație cu lungimea de undă egală cu 570 nm. Determinați numărul fotonilor emiși de acest laser timp de 10 s.

Răspuns: $57 \cdot 10^{17}$.

16. PROPRIETĂȚILE MAGNETICE ALE SUBSTANȚELOR. REZONANȚA MAGNETICĂ

16.1. CÂMPUL MAGNETIC. NOȚIUNI GENERALE

Câmpul magnetic reprezintă o formă a materiei prin intermediul căreia are loc acțiunea de forță asupra sarcinilor electrice în mișcare.

Caracteristica cantitativă a câmpului magnetic în vid este **intensitatea \vec{H}** , iar într-un mediu material omogen nelimitat – **inducția magnetică \vec{B}** . Între aceste mărimi are loc relația:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (1),$$

unde: μ_0 – constanta magnetică ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$); μ – permeabilitatea magnetică relativă a mediului; $\mu_a = \mu_0 \mu$ – permeabilitatea magnetică absolută a mediului.

Câmpul magnetic, precum și câmpul electrostatic, sunt reprezentate grafic cu ajutorul liniilor de forță, numite *linii de inducție magnetică* (Fig. 16.1). Liniile sunt trasate astfel, încât tangenta la ele în orice punct să coincidă cu direcția vectorului \vec{B} . Spre deosebire de liniile câmpului electrostatic, liniile de inducție magnetică sunt închise.

Numărul liniilor de inducție magnetică, care străbat o unitate de suprafață situată perpendicular pe direcția câmpului, coincide cu modulul vectorului \vec{B} .

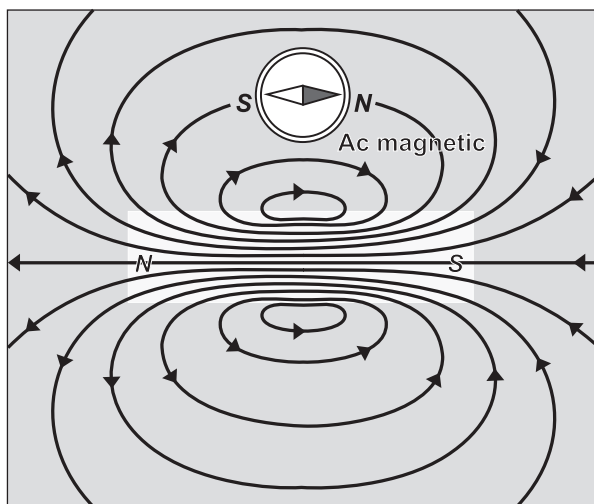
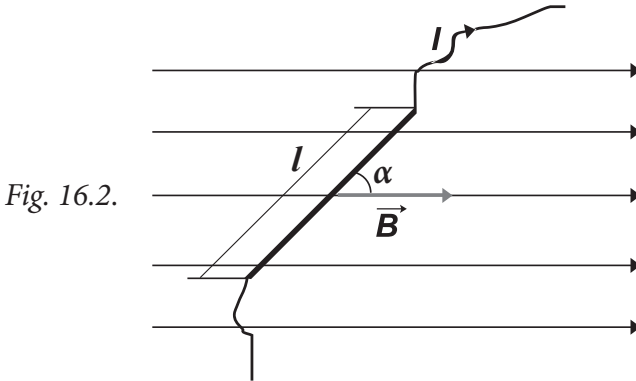


Fig. 16.1.

Forța cu care un câmp magnetic omogen (\vec{B} – constantă, liniile de inducție – paralele și echidistante) acționează asupra unui conductor liniar parcurs de curent electric (fig. 16.2) se determină după **legea lui Ampere**:

$$\vec{F} = I\vec{B}l \sin \alpha \quad (2),$$

unde: I – intensitatea curentului; α – unghiul dintre direcția vectorului \vec{B} și conductor; l – lungimea conductorului.



Când $\alpha = 90^\circ$, forța (F) are valoare maximă:

$$\vec{F} = I\vec{B}l \quad (3);$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_{\max}}{I l} \quad (4).$$

Ultima relație permite de a formula sensul fizic al inducției magnetice:

inducția unui câmp magnetic omogen numeric este egală cu forța pe care acest câmp o exercită asupra unui conductor liniar, parcurs de curent și situat perpendicular pe direcția câmpului, când lungimea lui și intensitatea curentului sunt unitare.

În SI unitatea de măsură a inducției magnetice este **tesla (T)**:

$$1T = 1 \frac{N}{Am}.$$

Numărul total al liniilor de inducție magnetică care străbat o suprafață (S) se numește *flux magnetic* (Φ) și se determină din relația:

$$\Phi = \vec{B}S \cos \alpha \quad (5),$$

unde: α – unghiul format între normala (\vec{n}) la suprafața S și direcția vectorului \vec{B} (fig. 16.3).

În cazul când vectorul inducției magnetice este perpendicular pe suprafața S ($\alpha = 0$), relația pentru fluxul magnetic devine:

$$\Phi = \vec{B}S \quad (6).$$

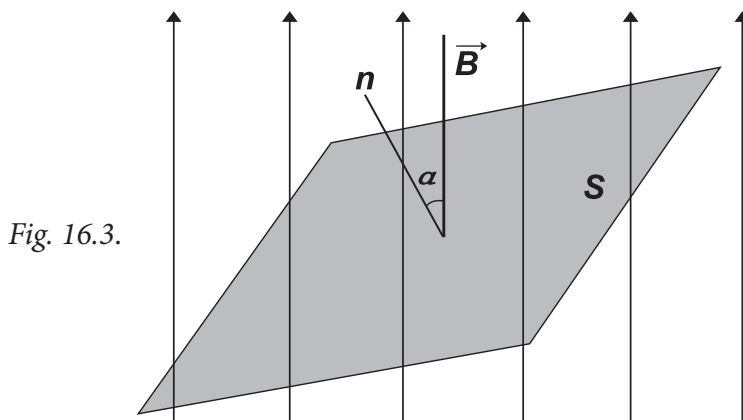


Fig. 16.3.

Unitatea de măsură a fluxului magnetic în SI se numește **Weber (Wb)**:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2.$$

La variația fluxului magnetic care străbate un circuit închis totdeauna apare o tensiune electromotoare de inducție electromagnetică, proporțională cu viteza de variație a fluxului magnetic.

În aceasta și constă **legea fundamentală a inducției electromagnetice descoperită de M. Faraday în anul 1831**. Expresia matematică a acestei legi este dată de relația:

$$E_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (7).$$

Apariția t.e.m. de inducție în circuit la variația intensității curentului prin același circuit se numește **autoinducție** – un caz particular al inducției electromagnetice:

$$E_{a.i.} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (8),$$

unde: L – inductanța circuitului.

Energia câmpului magnetic, creat de curentul electric printr-un circuit cu inductanța L , se determină din relația: $W = L \frac{I^2}{2}$.

În particular inductanța unui solinoid se determină din relația:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r n^2 s}{l},$$

unde n – numărul total de spire; l – lungimea solinoidului; s – aria secțiunii.

Forța Lorentz

Forța cu care câmpul magnetic acționează asupra unei sarcini electrice în mișcare se numește **forța Lorentz** (F_L).

Mărimea acestei forțe se determină din relația:

$$F_L = qvB \sin \alpha \quad (9),$$

unde: q – sarcina particulei; v – viteza particulei; B – inducția câmpului magnetic (fig. 16.4); α – unghiul format între direcția câmpului și direcția mișcării particulei.

Când $\alpha = 90^\circ$,

$$F_L = qvB \quad (10).$$

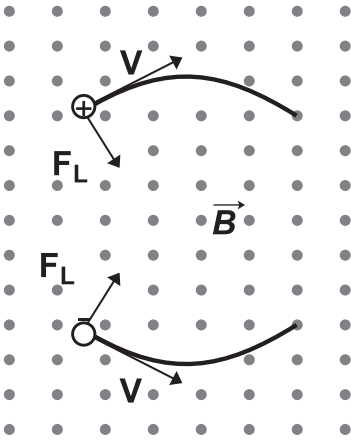


Fig. 16.4.

Această forță este în permanență perpendiculară pe viteza particulei. Direcția ei se determină după regula mâinii stângi. Ea nu efectuează lucru, ci, treptat, schimbă direcția de mișcare a particulei. Raza de curbură a traiectoriei poate fi determinată ușor. Concomitent, particula este supusă acțiunii a două forțe de sens opus:

– forța magnetică centripetă:

$$F_L = qvB;$$

– forța mecanică centrifugă:

$$F' = \frac{mv^2}{r},$$

unde: r – raza de curbură a traiectoriei; m – masa particulei.

Deoarece aceste forțe sunt egale după modul, primim:

$$qvB = \frac{mv^2}{r}; \quad r = \frac{mv}{qB} \quad (11).$$

16.2. MOMENTELE MAGNETICE ALE ELECTRONULUI

Este cunoscut că sarcinile electrice în mișcare (curent electric) creează câmp magnetic.

Prin definiție, moment magnetic (μ) al unui curent electric circular se consideră produsul dintre intensitatea curentului (I) și suprafața (S) limitată de circuit (fig. 16.5):

$$\vec{\mu} = IS = I\pi r^2 \quad (12).$$

Direcția acestui moment se determină conform regulii burghiului.

Un moment magnetic este creat și de microcurentul (i), care rezultă din mișcarea electronului în jurul nucleului, fiind numit **moment magnetic orbital** (fig. 16.6):

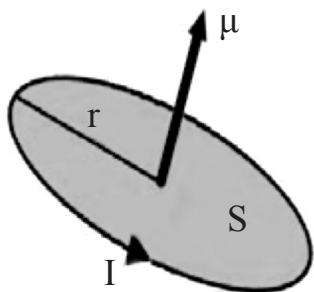


Fig. 16.5.

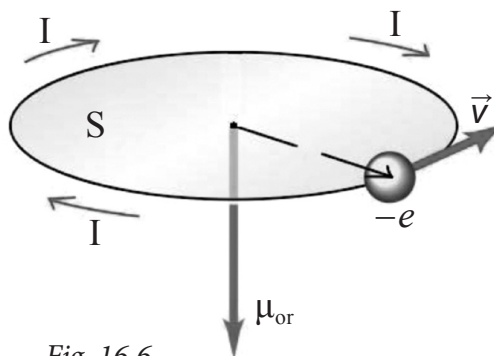


Fig. 16.6.

$$\mu \rightarrow = i \pi r^2 = \frac{eV}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{eVr}{2} \quad (13),$$

unde: V – viteza electronului; r – raza orbitei.

S-a constatat că electronul efectuează o mișcare de rotație și în jurul propriei axe, numită **mișcare de spin** (din engleză: *spin – fus*). Această mișcare reprezintă o sarcină electrică în deplasare și, deci, un microcurent care îi asociază electronului un al doilea moment magnetic, numit **moment magnetic de spin** (μ_s).

16.3. SUBSTANȚE PARAMAGNETICE ȘI DIAMAGNETICE

După proprietățile magnetice, toate substanțele din natură se divizează în două clase: **substanțe paramagnetice** și **substanțe diamagnetice**.

Rolul principal în această divizare revine momentelor magnetice de spin ale electronilor.

Paramagnetice sunt substanțele ai căror atomi posedă moment magnetic resultant permanent, deoarece o parte din momentele magnetice de spin ale electronilor din atom rămân necompensate (nu toate momentele magnetice de spin sunt cuplate) (fig. 16.7).

Aceste substanțe amplifică inducția câmpului magnetic exterior. De exemplu, din rândul lor fac parte: **Pb; O₂; Al** etc.

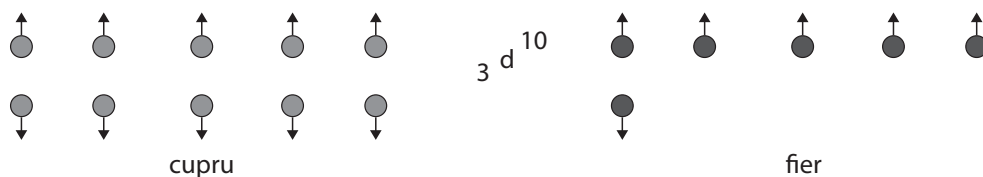


Fig. 16.7.

Diamagnetice se numesc substanțele atomii cărora sunt lipsiți de moment magnetic permanent (toate momentele magnetice de spin sunt cuplate). Aceste substanțe atenuează inducția câmpului magnetic exterior. Lor le aparțin: **Cu**; **N**; **H₂O** etc.

Atât paramagnetismul, cât și diamagnetismul sunt manifestări slabe. Numai un grup mic de substanțe din clasa celor paramagnetice posedă proprietăți magnetice pronunțate: **fierul**, **cobaltul** și **nichelul**. Aceste substanțe se numesc **feromagnetice** și sunt utilizate pe larg în practică.

Pentru fiecare substanță feromagnetică există o anumită temperatură, numită **punctul Curie**, la care proprietățile feromagnetice dispar complet.

Punctul Curie pentru fier este de 768°C; pentru nichel – 358°C și pentru cobalt – 1000°C.

În mare măsură, țesuturile biologice, ca și apa, sunt diamagnetice. În organismul omului doar unele molecule și agregate moleculare posedă proprietăți paramagnetice. Unul dintre **microorganisme**, numit **spirella**, sintetizează **feritin**, acumulându-l în organe speciale, numite **magnetosomi**.

Magnetosomii pot fi considerați ace magnetice, care servesc pentru orientare în spațiu după câmpul magnetic al pământului. Se presupune că astfel de „ghizi” magnetici au albinele, fluturii, păsările, delfinii.

Și omul are o concentrație feromagnetică în **glanda suprarenală**, funcția căreia nu este determinată nici până în prezent.

16.4. REZONANȚA MAGNETICĂ NUCLEARĂ (RMN)

Momente magnetice de spin au și particulele componente ale nucleelor atomice – protonii și neutronii. Rezultanta acestor momente reprezintă momentul magnetic de spin al nucleului respectiv. Acest moment este diferit de zero, când nucleul conține un număr impar de protoni și neutroni. În această privință prezintă un interes deosebit atomii hidrogenului, care, având în nucleu un singur proton, posedă moment magnetic de spin permanent și este cel mai sensibil la acțiunea câmpului magnetic exterior.

Pe de altă parte, atomii de hidrogen se întâlnesc cel mai frecvent în organismul omului (63%).

Într-un corp care conține atomi de hidrogen (fie țesut biologic), momentele magnetice $\vec{\mu}$ caracteristice protonilor sunt orientate în toate direcțiile posibile.

În absența câmpului magnetic exterior (*fig. 16.8*), vectorul rezultat \vec{M} , care se mai numește *caracteristică macroscopică*, este nul: $\vec{M} = \Sigma \vec{\mu} = \vec{0}$. La plasarea corpului într-un câmp magnetic omogen cu inducția \vec{B}_0 , momentele magnetice

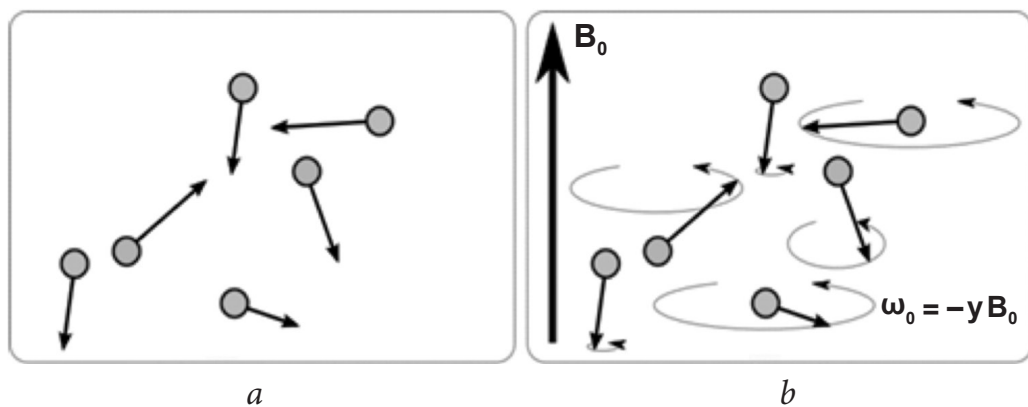


Fig. 16.8.

de spin ale tuturor nucleelor de hidrogen se orientează în acest câmp și încep să se rotească sub un anumit unghi în jurul axei care coincide cu direcția inducției câmpului \vec{B}_0 . Această rotație se numește *mişcare de precesie* – axa protonului descrie un con. Mișcarea de precesie a axei protonilor, sub acțiunea câmpului magnetic, separă protonii în două categorii:

- 1) un număr mai mare cu spin $+\frac{1}{2}$ aliniați în direcția câmpului \vec{B}_0 (fig. 16.9 a);
- 2) un număr mai mic cu spin $-\frac{1}{2}$ aliniați în sens opus direcției câmpului \vec{B}_0 (fig. 16.9 b).

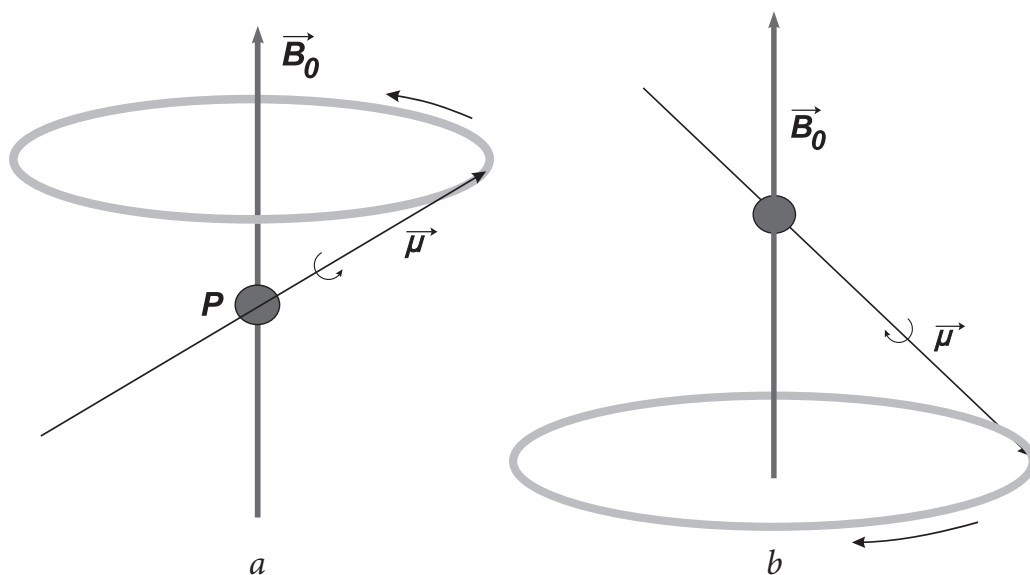


Fig. 16.8.

Viteza unghiulară a mișcării de precesie:

$$\vec{\omega}_0 = \gamma B_0 = 2\pi\nu_0 \quad (14),$$

unde γ – **coeficient giromagnetic**, care reprezintă raportul dintre momentul magnetic al protonului și momentul lui cinetic.

$L = m\omega r^2$ – moment cinetic;

$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ – frecvența Larmor.

$$\frac{N_p}{N_a} = \exp\left(\frac{\gamma \frac{h}{2\pi} B_0}{KT}\right) \quad (15),$$

unde: N_p – numărul de protoni cu spin „paralel”; N_a – numărul de protoni cu spin „antiparalel”; K – constanta Boltzmann; T – temperatura absolută.

Câmpul magnetic exterior \vec{B}_0 repartizează protonii pe două subnivele energetice (fig. 16.10).

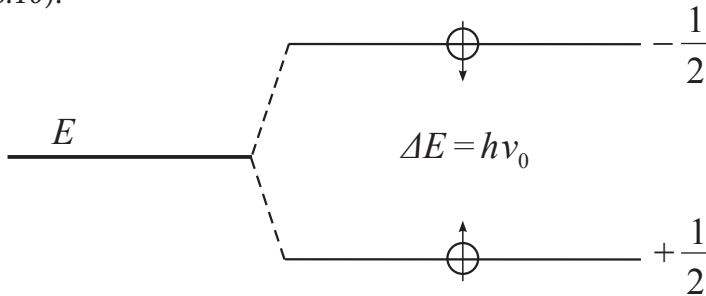


Fig. 16.10.

Momentul magnetic al protonilor de orientare paralelă $\vec{M}_p = \Sigma\vec{\mu}_p$, iar al celor de orientare antiparalelă $\vec{M}_a = \Sigma\vec{\mu}_a$.

Momentul magnetic rezultat al numărului total de protoni:

$$\vec{M} = \vec{M}_a + \vec{M}_p.$$

Sub acțiunea radiației electromagnetice de radio, fotonii căreia posedă energia $E = h\nu_0$, unde ν_0 corespunde frecvenței Larmor, au loc două fenomene:

- 1) un număr considerabil de protoni cu spin paralel, absorbind energia fotonilor incidenți, suferă o inversiune de spin și trec în orientare antiparalelă;
- 2) mișcarea de precesie a momentelor tuturor protonilor se efectuează în aceeași fază – acesta și este **fenomenul de rezonanță**.

La încetarea acțiunii câmpului electromagnetic exterior are loc revenirea momentelor magnetice de spin ale hidrogenului la poziția inițială, cu emisia fotonilor de frecvență Larmor (ν_0).

Drept consecință a acestor două fenomene, vectorul momentului magnetic \vec{M} se va înclina sub un unghi θ în raport cu axa definită de \vec{B}_0 și poate fi reprezentat de două componente: una longitudinală (\vec{M}_z) și alta transversală (\vec{M}_{xy}) (fig. 16.11). Schema de principiu a unei instalații RMN este redată în figura 16.12.

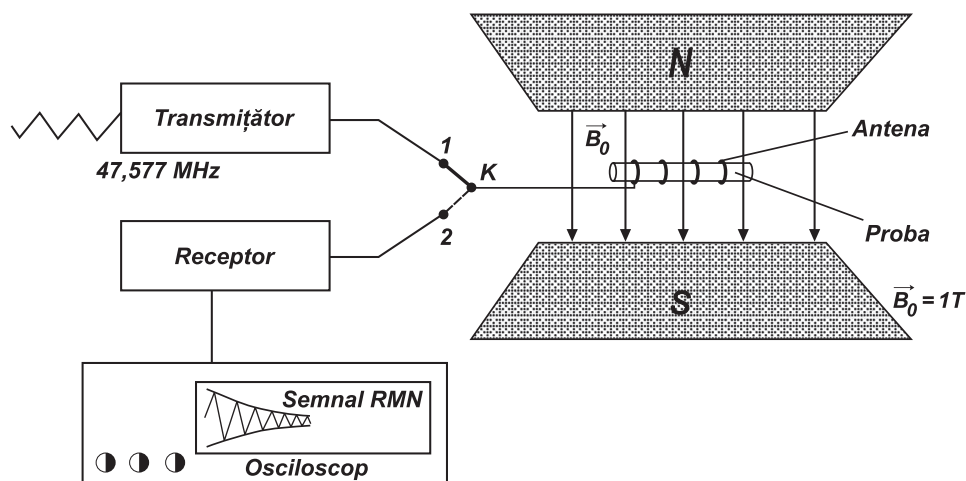
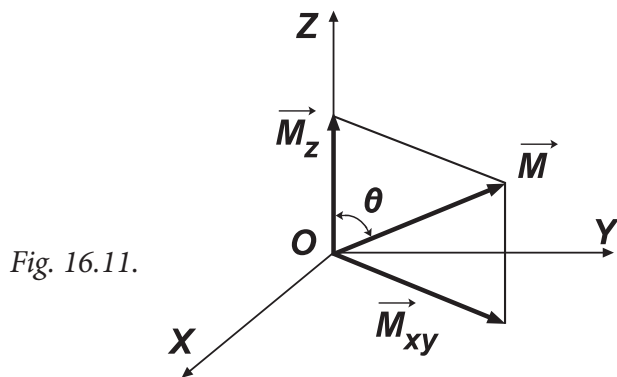


Fig. 16.12.

Când comutatorul K se află în poziția 1, radiația electromagnetică prin antenă acționează asupra protonilor, transferând un număr de protoni din orientare paralelă în orientare antiparalelă. În poziția 2, momentele magnetice revin la starea inițială cu emisia fotonilor, care, prin aceeași antenă, sunt primiți de receptor, iar semnalul RMN apare pe ecranul osciloscopului.

Semnalul RMN reprezintă un semnal electric exponențial amortizat în timp, care conține o anumită informație neprelucrată, ceea ce nu-i permite medicului să-și imagineze informația morfologică sau funcțională despre un anumit țesut

sau organ. Pentru a primi informația vizuală dorită, în schema instalației sunt incluse dispozitive speciale, printre care și un computer de viteză mare.

Prin relaxarea spinilor nucleari se subînțelege procesul dinamic (desfășurat în timp) de revenire a sistemului și a componentelor lui în starea inițială de echilibru.

Fiecare substanță sau țesut are timpuri concrete de relaxare longitudinală (T_1) și transversală (T_2) (tab.1) și o anumită densitate de protoni, care se reflectă în semnalul RMN.

Tabelul 1

| Substanța biologică | Constantele de relaxare | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|------|------|------------|------|-----|
| | T_1 (ms) | | | T_2 (ms) | | |
| | Inducția (B_0) (tesla) | | | | | |
| | 0,2 | 1,0 | 1,5 | 0,2 | 1,0 | 1,5 |
| Mușchi | 370 | 730 | 860 | | 45 | |
| Țesut nervos gri | 390 | 680 | 780 | | 90 | |
| Țesut nervos substanță albă | 490 | 810 | 920 | | 100 | |
| Lichid cefalo-rahidian | 1400 | 2500 | 3000 | | 1400 | |

O prelucrare fizico-matematică a semnalului RMN permite constituirea imaginii cu luminozitate diferită a fiecărui punct din obiectul cercetat (fig. 16.13).

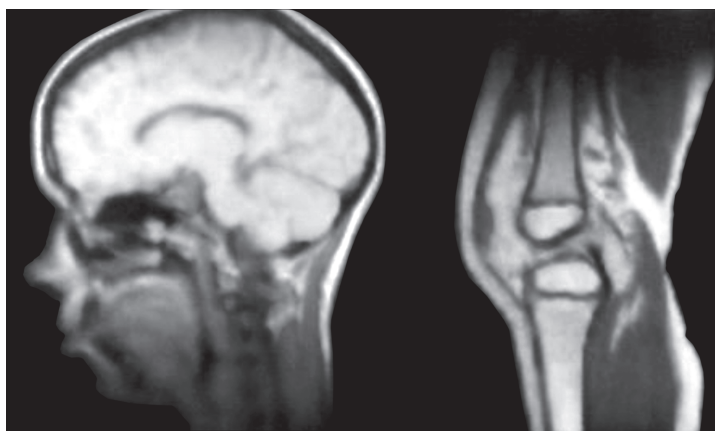


Fig. 16.13. Imagini de TRM.

Rezonanța magnetică nucleară ca fenomen a fost descoperită în anul 1946. Peste puțin timp de la introducerea RMN în arsenalul diagnostic al medicinei contemporane, termenul „nuclear” a fost exclus, pentru a nu produce asociație cu arma nucleară.

Actualmente, în literatura medicală mondială este folosit termenul **tomografie de rezonanță magnetică (TRM)**. Această metodă este cea mai modernă și lipsită de orice acțiuni dăunătoare în diagnosticarea medicală.

Despre importanța RMN pentru știința contemporană ne mărturisesc cele trei premii Nobel cu care a fost menționată: două în domeniul fizicii (1952; 1991) și unul în domeniul medicinei.

EXERCITII

1. Un conductor liniar parcurs de curent este situat într-un câmp magnetic omogen, perpendicular pe liniile de inducție. Lungimea conductorului (l) – 0,2 m, intensitatea curentului (I) – 8 A, inducția câmpului (\vec{B}) – 0,4 T. Determinați lucrul efectuat de forța Ampere la deplasarea conductorului pe distanța (d) – 0,025 m.

Răspuns: $16 \cdot 10^{-3}$ J.

2. Câte linii de inducție magnetică convențional trec printr-un dreptunghi cu laturile de 40 și 60 cm, situat într-un câmp magnetic omogen, cu inducția $B = 50$ T, perpendicular pe direcția câmpului?

Răspuns: 12 linii.

3. Un electron se mișcă pe circumferință într-un câmp magnetic omogen cu inducția $B = 0,18$ T. Determinați perioada de rotație a electronului.

Răspuns: $2 \cdot 10^{-10}$ s.

4. Care trebuie să fie intensitatea curentului electric printr-un conductor rectiliniu, situat într-un câmp magnetic omogen, cu inducția (B) – 20 T, perpendicular pe liniile de inducție, pentru ca el să se afle în stare de imponderabilitate, dacă se știe că 1 m din lungimea lui are greutatea de 30 N?

Răspuns: 1,5 A.

5. Un electron pătrunde într-un câmp magnetic cu inducția (B) de 0,05 T, în direcție perpendiculară pe liniile de inducție, având viteza (v) de $4 \cdot 10^4$ km \cdot s $^{-1}$. Determinați raza de curbură a traiectoriei electronului.

Răspuns: 4,55 mm.

6. Care este momentul magnetic al unui solenoid cu 500 spire, parcurs de un curent cu intensitatea de 0,3 A, dacă aria suprafeței unei spire este de 200 cm 2 ?

Răspuns: 3 A \cdot m 2 .

7. Calculați constanta giromagnetică a hidrogenului care rezonează la 42,57 MHz într-un câmp omogen cu inducția (B_0) egală cu 1 T.

Răspuns: $\gamma = 267,47 \cdot 10^6$ (S.I.).

8. Raportul dintre constanta giromagnetică a ^{19}F și a hidrogenului este de 0,94. Determinați frecvența de rezonanță a ^{19}F într-un câmp cu inducția (B_0) de 1 T. Este cunoscut că în acest câmp pentru hidrogen $\gamma_{\text{H}} = 267,47 \cdot 10^6$ (SI).

Răspuns: $\nu_0 = 40,03$ MHz.

9. Conform teoriei lui Bohr, în atomul de hidrogen neexcitat electronul se mișcă în jurul nucleului pe o circumferință cu raza de $0,53 \cdot 10^{-8}$ cm și viteza de $2,2 \cdot 10^6$ cm/s. Determinați momentul magnetic orbital al atomului de hidrogen.

Răspuns: $0,93 \cdot 10^{-25}$ A·m².

10. Un conductor cu lungimea de 6 m se mișcă perpendicular pe liniile unui câmp magnetic omogen cu inducția de 1,2 T, având viteza de 15 m/s. Determinați t.e.m. de inducție care apare la capetele conductorului.

Răspuns: 108 V.

11. Care trebuie să fie inductanța bobinei, pentru ca la trecerea prin ea a curentului cu intensitatea de 2 A energia câmpului magnetic să fie egală cu 1 J?

Răspuns: 0,5 H.

12. O bobină cu inductanța de 0,01 H este parcursă de un curent cu intensitatea de 20 A. Determinați t.e.m. de autoinducție, care apare la întreruperea circuitului, durată căreia este de $2 \cdot 10^{-3}$ s.

Răspuns: -100 V.

13. Un proton și un electron, accelerați de aceeași diferență de potențial, pătrund într-un câmp magnetic omogen. Care particulă are raza de curbură a traiectoriei mai mare și de câte ori?

Răspuns: protonul; de 43 ori.

17. STABILITATEA NUCLEELOR ATOMICE

17.1. FORȚELE NUCLEARE. DEFECTUL DE MASĂ ȘI ENERGIA DE LEGĂTURĂ

Forțele electrice sunt suficiente pentru a explica legarea electronilor în atom, dar nu pot să explice cum pot să formeze sisteme stabile protonii încărcăți pozitiv și neutronii fără sarcină electrică. Legătura protonilor și neutronilor în nucleu trebuie pusă pe seama unui alt tip de forțe – **forțele nucleare**.

Forțele electrice acționează la distanțe mari, pe când forțele nucleare nu se manifestă decât la distanțe foarte mici ($r \approx 10^{-15} \text{ m}$) (pentru comparație: raza nucleului este de aproximativ 10^{-14} m). În plus, aceste forțe acționează între toți nucleonii, indiferent de faptul dacă aceștia sunt sau nu încărcăți electric, și sunt mult mai intense decât forțele electrice, pentru a putea compensa respingerea reciprocă a protonilor.

Defectul de masă. S-a stabilit că masa tuturor nucleelor atomice este mai mică decât masele protonilor și neutronilor, care le formează, în stare liberă.

Mărimea acestei diferențe de masă se numește **defect de masă** și se determină din relația:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_N \quad (1),$$

unde: A – numărul de masă al atomului; Z – numărul de ordine; m_p – masa protonului; m_n – masa neutronului; M_N – masa nucleului.

Energia de legătură. Conform relației lui Einstein referitoare la echivalența dintre masă și energie, defectului de masă îi revine o anumită cantitate de energie, numită **energie de legătură** (W_{leg}):

$$W_{\text{leg}} = \Delta m c^2 \quad (2),$$

unde: Δm – defectul de masă al nucleului; c – viteza luminii în vid.

Altfel spus, energia de legătură este lucrul mecanic care trebuie efectuat pentru a desface un nucleu atomic în nucleoni separați.

Cea mai potrivită mărime pentru studierea stabilității nucleelor este **energia de legătură pe nucleon** (B), definită ca energia de legătură a unui nucleu împărțită la numărul de nucleoni (*fig. 17.1*).

$$B = \frac{W_{\text{lg}}}{A} \quad (3).$$

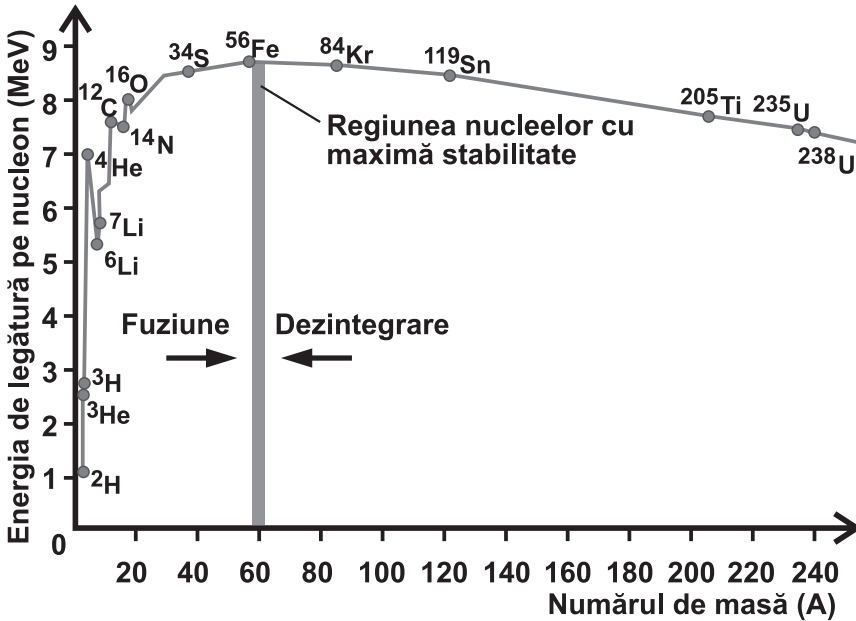


Fig. 17.1.

O valoare înaltă a energiei de legătură pe nucleon înseamnă o stabilitate înaltă a nucleului.

Figura 17.1 demonstrează că nucleele cu A cuprins între 40 și 140 au $B \approx 8,5$ MeV. La nucleele grele B scade până la $\approx 7,5$ MeV.

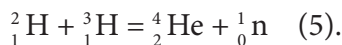
Procesul prin care nucleele grele își măresc B este **dezintegrarea α** :



Pentru nucleele ușoare B crește până la $A = 40$. În plus, există variații pronunțate pentru B. Nucleele cu $A = 4; 8; 12; 16$ au B mai mare față de cea a nucleelor vecine. Aceasta indică faptul că grupările de 4 nucleoni (2 protoni și 2 neutroni) sunt foarte stabile.

Creșterea B la trecerea de la nuclee ușoare la nuclee mai grele indică faptul că trebuie să fie posibil și un proces de unire a nucleelor ușoare, un proces de **fuziune** (fig. 17.2):

Creșterea B la trecerea de la nuclee ușoare la nuclee mai grele indică faptul că trebuie să fie posibil și un proces de unire a nucleelor ușoare, un proces de **fuziune** (fig. 17.2):



Procesele de fuziune sunt posibile la temperaturi foarte ridicate. Reacțiile termonucleare reprezintă sursa **energiei solare**.

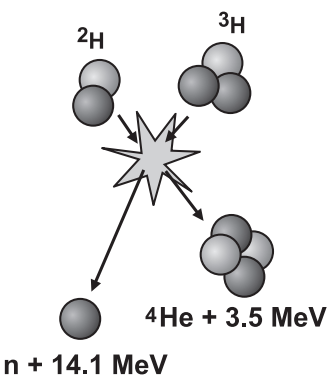


Fig. 17.2.

17.2. RADIOACTIVITATEA

Radioactivitatea (lat. *radius* – rază, *radiație*) este un fenomen rezultat din dezintegrarea radioactivă a atomilor sau, mai bine zis, a nucleelor acestora. Este procesul prin care nucleul unui atom se transformă spontan în altă specie de nucleu atomic. Elementul atomii căruia pot suferi dezintegrare radioactivă se numește **izotop radioactiv**. De regulă, transformarea este însoțită de expulzarea unor particule subatomice, având viteză foarte mare, precum și de emiterea unor unde electromagnetice cu lungime de undă foarte mică. Radioactivitatea este un fenomen exoterm (produce eliberarea energiei către mediu).

La dezintegrarea radioactivă există două tipuri de „radiații” emise:

1) particule subatomice (inițial, ele au fost numite *raze*, deoarece natura lor încă nu era cunoscută):

- nuclee de heliu (He^{2+}) de mare viteză, numite și *raze* α ;
- electroni, numiți și *raze* β ;
- pozitroni, numiți și *raze* β^+ ;
- neutroni;

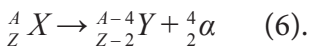
2) unde electromagnetice de energie înaltă (frecvență mare sau, echivalent, lungime de undă mică), numite și *radiații* (*raze*) *gamma* (γ).

Toate aceste „radiații” au proprietatea de a ioniza mediul prin care trec, astfel făcându-l conductor electric. Din acest motiv, aceste „radiații” se numesc **radiații ionizante**.

17.3. TRANSFORMĂRILE NUCLEARE. TIPURILE DE RADIAȚII NUCLEARE

La cele mai multe tipuri de descompunere radioactivă are loc transformarea unui nucleu în nucleul altui atom.

Dezintegrarea α (fig. 17.3) produce un nucleu al atomului cu număr de ordine cu 2 mai mic și număr de masă cu 4 mai mic, conform expresiei generale a reacției:



Energia particulelor α este bine determinată. De aceea, emisiile lor formează un spectru de linii, energiile fiind cuprinse între 4 MeV și 10 MeV.

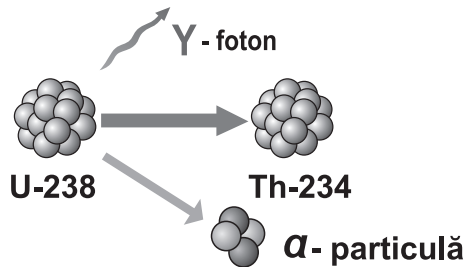


Fig. 17.3.

Dezintegrarea β (fig. 17.4) produce un nucleu cu număr atomic cu 1 mai mare și cu același număr de masă. La dezintegrarea β are loc transformarea unui neutron într-un proton și un electron, ultimul fiind expulzat ca particulă β . Expresia generală a reacției este:

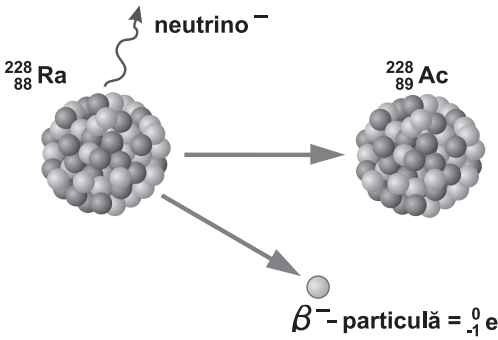
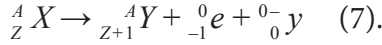


Fig. 17.4.

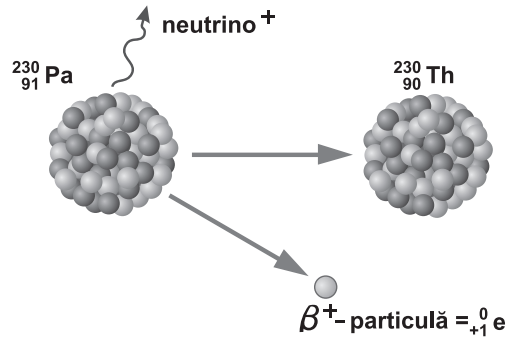


Fig. 17.5.

În urma reacției, din nucleu sunt excluse două particule ${}^0_{-1}e$ și ${}^0_0\bar{\nu}$ (anti-neutrino). Distribuția energiei degajate între aceste particule are un caracter aleatoriu, ceea ce face ca spectrul de emisie β să fie continuu.

Energiile particulelor β variază de la 0, când toată energia reacției aparține particulei ${}^0_0\bar{\nu}$, până la E_{\max} , când ${}^0_0\bar{\nu}$ este lipsită de energie.

Dezintegrarea β^+ (pozitroni) (fig. 17.5) se produce când nucleul are un exces de protoni în raport cu numărul neutronilor.



se produce un nucleu cu număr de ordine cu 1 mai mic și același număr de atomi. Deoarece în cazul dezintegrării β^+ , precum și în cazul β , se formează două particule, iar repartizarea energiei între ele are caracter aleatoriu, spectrul emisie este continuu.

Când β^+ vine în contact cu electronii dintr-un mediu, se produce o reacție **de anihilare**, cu eliberarea a două cuante de radiație γ ; este o caracteristică a radioactivității β^+ .

Radioactivitatea γ . Contrar diferitor tipuri de radioactivitate deja menționate, radioactivitatea γ nu prezintă o emisie de materie provenită din nucleu, ci o emisie de energie sub formă de radiație electromagnetică. Ea poate fi pură în cazul unui pasaj de tranziție de la un nivel metastabil la un nivel stabil.

În majoritatea cazurilor, radioactivitatea γ (fig. 17.6) rezultă din dezexcitarea nucleului, provenită de la dezintegrarea α sau β .

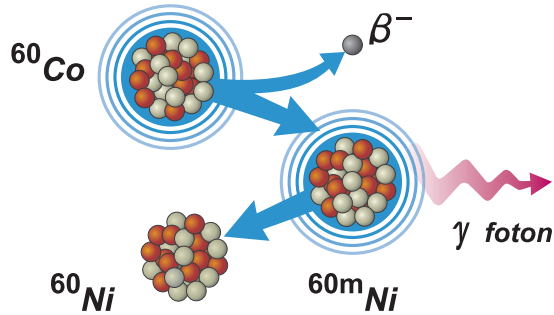
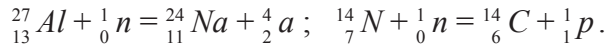


Fig. 17.6.

Fotonii γ a căror energie nu depășește câțiva MeV rezultă din tranziția nucleonilor printre nivelele energetice perfect definite în nucleu. Ei au un spectru de linii de origine nucleară. În unele cazuri, energia este comunicată direct unui electron care este expulzat. Acest fenomen este de conversie internă. El antrenează un rearanjament electronic al cărui spectru este de linii.

Fluxul de neutroni constituie o radiație ionizantă, deoarece în urma interacțiunii cu nucleeele atomice se formează particule încărcate și fotoni γ . Drept exemplu pot servi reacțiile nucleare provocate de captarea neutronilor:



Baza de producere a neutronilor este **reactorul nuclear** (fig. 17.7) în care are loc reacția în lanț dirijată (fig. 17.8).

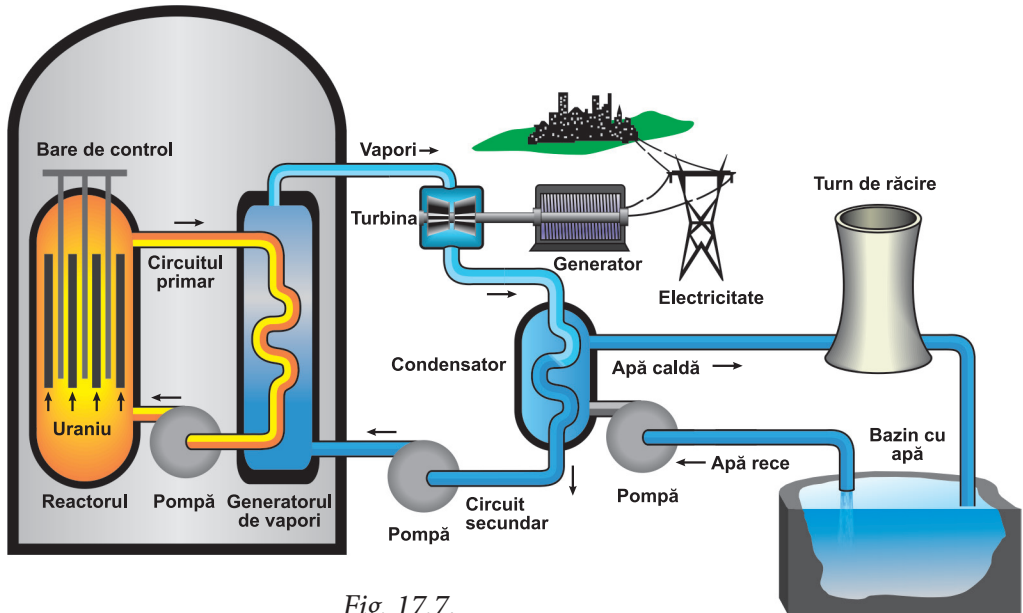
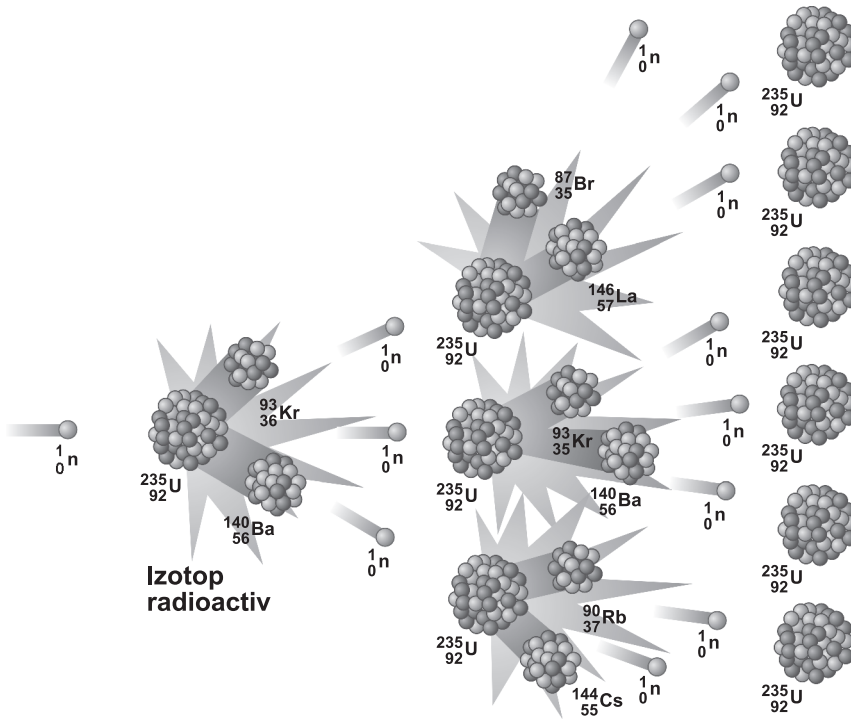
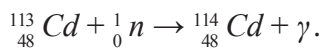
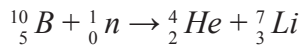


Fig. 17.7.



Interacțiunea neutronilor cu substanța se deosebește de interacțiunea celorlalte particule, datorită faptului că neutronul interacționează cu nucleele, provocând reacții nucleare. Probabilitatea acestor reacții este foarte mare, deoarece neutronul nu are sarcină și pătrunderea sa în nucleu nu este frânată de respingerea electrostatică. În procesele nucleare, neutronii sunt absorbiți. Cunoașterea proceselor de captură a neutronului în nuclee este utilizată pentru a ne putea proteja de fasciculele de neutroni. Materialele care au probabilitate mare de captură sunt

$^{10}_5\text{B}$ și $^{113}_{48}\text{Cd}$:



Trebuie menționat faptul că în procesele de captură interacționează neutronii cu viteză mică.

Neutronii rapizi interacționează elastic cu nucleele, asigurând un transfer maxim de energie, când masa nucleului este egală cu masa neutronului, adică la hidrogen. În țesuturile biologice, pentru neutronii cu energie de 10 MeV, peste 90% din transferul de energie se face prin ciocniri elastice cu nuclee de hidrogen. Restul energiei este cheltuită ca ciocniri neelastice (proces de captură).

Cele expuse confirmă utilizarea materialelor bogate în hidrogen (parafină, polietilenă) pentru ecranarea surselor de neutroni.

„Radițiile” α , β , γ și n se deosebesc prin **puterea de penetrare** (distanța pe care o pot parcurge într-un anumit mediu, până sunt absorbite complet). Razele α sunt cele mai rapide, dar oprite complet în grosimea unei foi de hârtie obișnuită sau în cel mult o zecime de milimetru de aluminiu (fig. 17.9). În aer, distanța maximă pe care o pot străbate nu depășește 11cm. Razele β sunt mai puțin rapide, dar considerabil mai dure decât α ; ele pot străbate 2-3 mm de aluminiu. În aer, distanța nu depășește mai mult de 10-15 m. În schimb, razele γ sunt cele mai penetrante, datorită puterii lor de ionizare foarte scăzută (procesele de interacțiune cu atomii substanței prin care trec sunt foarte rare). Neavând nici sarcină electrică și nici masă, razele γ pot străbate cu ușurință grosimi considerabile din țesuturile animale și vegetale, substanțe ușoare și chiar câțiva centimetri din substanțele grele, cum ar fi plumbul. Datorită puterii lor mari de penetrare, mai mare decât cea a razelor X, razele γ sunt folosite în aceleași scopuri ca cele dintâi. Astfel, ele sunt folosite în medicină și la măsurarea unor obiecte metalice din exterior, fără să fie necesară cel puțin desfacerea acestora, putându-se efectua controlul unor piese de mașini fabricate în serie, în cercetările geologice de prospectare a zăcămintele de petrol și multe altele.

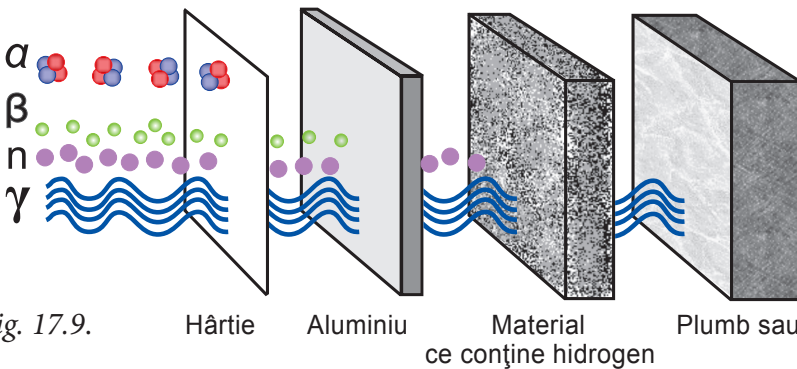


Fig. 17.9.

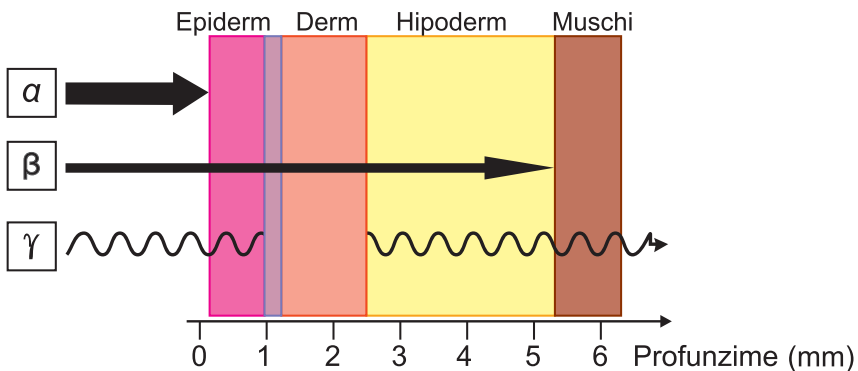


Fig. 17.10. Adâncimea de penetrare în țesuturi a diferitor tipuri de radiații nucleare.

17.4. ISTORIE

Radioactivitatea naturală

Fenomenul radioactivității a fost descoperit în 1896 de fizicianul **Henri Becquerel** la **uraniu**, ca urmare a dezvoltării generale a fizicii și drept consecință directă a descoperirii de către Röntgen, în 1895, a razelor X. Becquerel a observat că uraniul emite raze invizibile cu proprietăți asemănătoare cu ale razelor X. Ceva mai târziu s-a descoperit că și **toriu** emite radiații asemănătoare cu razele X. Proprietatea acestor elemente a fost numită **radioactivitate naturală**, iar radiația asemănătoare cu razele X – **radiații γ** .

În 1898, soții Pierre și Marie Curie au descoperit două noi specii atomice radioactive, pe care le-au numit: pe prima – **poloniu (Po)**, iar pe a doua – **radu (Ra)**, pentru deosebita sa radioactivitate. Apoi, și alți savanți, din diferite țări, au întreprins cercetări în acest domeniu.

Radioactivitatea artificială

Experiențele de bombardare cu raze α au dus la o nouă descoperire de importanță primordială. Este vorba de radioactivitatea artificială descoperită de soții **Frederic și Irene Joliot-Curie** – ginerele și fiica descoperitorilor poloniului și radiului. Aceștia, supunând unui bombardament cu raze α niște foițe de aluminiu au observat că în timpul bombardamentului aluminiul emitea neutroni. Când bombardamentul înceta, foițele de aluminiu încetau și ele să mai emită neutroni, însă continuau să emită o radiație asemănătoare cu razele β .

După multe cercetări, soții Joliot-Curie au putut explica ce se întâmpla: sub acțiunea razelor α , nucleul de aluminiu se transmuta într-un nucleu de **fosfor radioactiv**, care nu exista în natură.

În același mod, prin transmutarea **magneziului și borului** soții Joliot-Curie au obținut **siliciu** și, respectiv, **azot radioactiv**. Descoperirea posibilității de a crea pe cale artificială izotopi radioactivi ai celor mai diverse elemente a avut un răsunet deopotrivă de mare ca și descoperirea radioactivității naturale cu 36 de ani în urmă. Punând această idee în practică, fizicianul **Enrico Fermi** a bombardat vreo 60 de elemente, dintre care 40 au dat naștere izotopilor radioactivi artificiali, cu timp de înjumătățire cuprinși între câteva secunde și câteva zile.

Familii de elemente radioactive

Cel mai greu dintre izotopii naturali, **uraniul 238**, se dezintegrează foarte încet (timpul de înjumătățire durează 4,5 milioane ani) prin emisie de raze α . Pierzând astfel 4 unități din numărul său atomic, elementul uraniu se transformă

în elementul **toriu 234**. Acesta din urmă este și el radioactiv; nucleul său emite o particulă β și se transmută în nucleul de ^{234}Pa (protactiniu), care, la rândul său, de asemenea prin emisie de raze β , se transmută mai departe în nucleul de ^{234}U , când ia naștere un alt izotop al uraniului, diferit de cel de la începutul seriei și care se numește *uraniu II*. Fiind radioactiv prin emisie de raze α , acesta se transmută mai departe în ^{230}Th , adică într-un nou izotop de **toriu**, căruia i se dă un nume special – **ioniu**. Ioniul se dezintegrează tot prin emisie de raze α și dă naștere izotopului ^{226}Ra , adică **radiul** descoperit de soții Curie. Dezintegrându-se în continuare prin raze α , radiul dă naștere izotopului radioactiv ^{222}Rn (**radon**), care este un gaz inert asemănător, din punct de vedere chimic, cu heliul, neonul etc. Această cascadă de dezintegrări succesive continuă până ce se ajunge la izotopul ^{210}Po , descoperit de soții Curie. Poloniul se transmută în ^{206}Pb , adică **izotop al plumbului**. Acesta este „stabil”, ceea ce înseamnă că nici printr-un mijloc din cele cunoscute în prezent nu putem constata o eventuală dezintegrare a lui. Astfel, succesiunea de dezintegrări în cascadă se oprește practic aici și putem vedea că a luat naștere o **adevărată „familie radioactivă”, al cărei strămoș comun este uraniul**.

Familia pe care tocmai am descris-o se numește *familia radium-uraniu*. În natură există încă două familii radioactive: una dintre ele începe cu ^{235}U (numit și *actini-uraniu*) și se termină cu un izotop de plumb (^{207}Pb). Cealaltă familie este a **toriului**, care începe cu ^{232}Th și se termină tot cu un izotop de plumb (^{208}Pb).

17.5. LEGEA DEZINTEGRĂRII RADIOACTIVE

Dezintegrarea radioactivă este un fenomen **spontan**, deoarece nu poate fi manevrat din exterior. Nu depinde de temperatură, presiune sau structura chimică în care se află atomul, al cărui nucleu este nestabil. Pe de altă parte, este și un fenomen **aleator**: nu se poate prezice când se va dezintegra un anumit nucleu nestabil. Pentru o mulțime mare de nuclee radioactive de anumit tip poate fi stabilită legea statistică, ce exprimă dependența numărului nucleelor nedezintegrate de timp. Expresia matematică a acestei legi este:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Numărul de nuclee nestabile descrește în timp după legea exponențială, unde: N_0 – numărul inițial de atomi radioactivi; $N(t)$ – numărul de atomi radioactivi rămași; t – timpul scurs de la începutul experimentului; λ – constanta de dezintegrare caracteristică fiecărei substanțe radioactive.

Perioada (timpul) de înjumătățire

Practic, în locul constantei de dezintegrare, adesea este folosită o mărime, numită **perioadă de înjumătățire (T)**, specifică speciei de atomi și reprezintă timpul după care se dezintegrează o jumătate din cantitatea de substanță radioactivă inițială. Pentru a determina relația dintre λ și **T**, în expresia matematică a legii de dezintegrare substituim t prin **T** și $N(t)$ prin $\frac{N_0}{2}$ și obținem:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T}.$$

Simplificând prin N_0 și logaritmand, obținem: $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Utilizând relația dintre λ și **T**, legea dezintegrării poate fi scrisă și sub forma:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T} \cdot t} = N_0 \cdot (e^{-\ln 2})^{-\frac{t}{T}} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Forma nouă devine interesantă în cazul în care timpul (t) conține un număr întreg de perioade ($t = nT$), unde n este un număr întreg pozitiv. Expresia matematică a legii dezintegrării obține forma:

$$N(nT) = \frac{N_0}{2^n}.$$

Timpul de înjumătățire pentru diferite elemente variază în limite foarte largi (în funcție de tipul elementului), – de la fracțiuni de secundă până la milioane de ani. Cele mai lungi perioade de înjumătățire au uraniu-238, uraniu-235, thoriu-232 și kaliu-40.

Legea dezintegrării radioactive este reprezentată în figura 17.11.

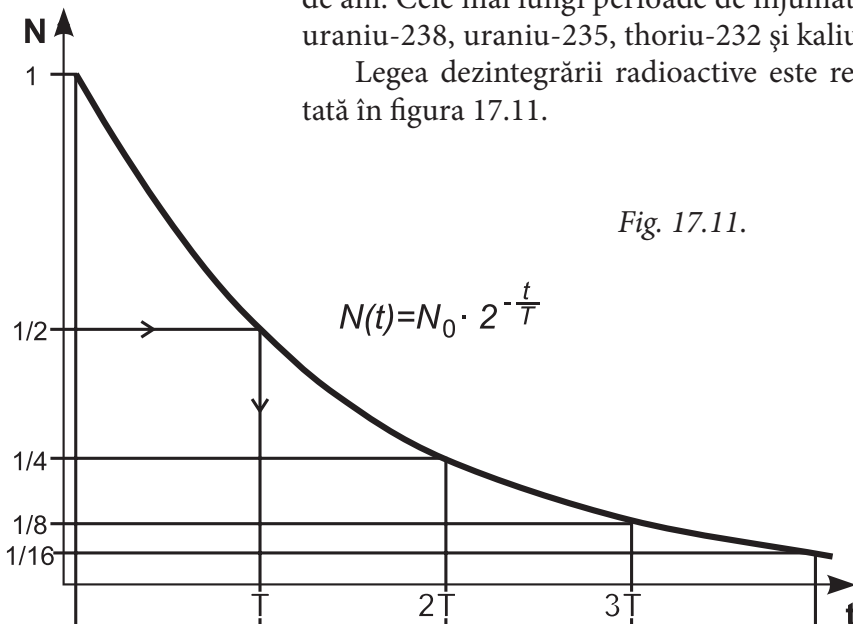


Fig. 17.11.

Activitatea radioactivă

Lucrând cu surse radioactive, este important să cunoaștem numărul de dezintegrări într-o unitate de timp, produse în sursa dată. Acest număr reprezintă o caracteristică importantă a preparatului radioactiv, numită **activitate radioactivă (A)**.

Unitatea de măsură a activității unei surse radioactive în **SI** este **becquerel (Bq)**, ceea ce corespunde activității unei surse radioactive în care se produce o dezintegrare într-o secundă.

O unitate mai frecvent utilizată în practică, ce corespunde activității unui **gram de radiu**, este numită **curie (Ci)**:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq.}$$

Deseori, în cercetările cu izotopi radioactivi este necesar să se cunoască așa-numita **activitate specifică**, ce caracterizează concentrația substanței radioactive în preparatul respectiv. Ea se definește ca activitatea unei unități de masă a preparatului (**Bq/kg** sau **Ci/kg**).

Experimental, activitatea unui preparat radioactiv se determină prin înregistrarea numărului de particule sau fotoni γ emiși din el într-o secundă.

Folosind noțiunea de activitate radioactivă, legea de dezintegrare are expresii matematice analogice celor menționate anterior:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad A(t) = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}; \quad \text{și} \quad A(nT) = \frac{A_0}{2^n}.$$

EXERCIȚII

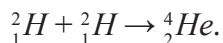
1. Calculați energia de legătură care îi revine unui nucleon pentru ^{235}U .

Răspuns: 7,4 MeV.

2. La dezintegrarea unui nucleu de uraniu-235 se eliberează 163 MeV. Calculați în jouli ce energie va elibera un gram de uraniu.

Răspuns: $67 \cdot 10^9$ J.

3. Calculați în jouli energia eliberată la prepararea 1 g de heliu prin reacția de fuziune:



Se dă: masa atomică a deuteriului = 2,014102 u.m.a.;

masa atomică a heliului = 4,002603 u.m.a.

Răspuns: $5,75 \cdot 10^{11}$ J.

4. Calculați în jouli energia eliberată în urma reacției de anihilare a unui pozitron cu un electron.

Răspuns: $1,64 \cdot 10^{-13}$ J.

5. Care trebuie să fie masa substanțelor radioactive ^{131}I și ^{60}Co , pentru ca activitatea fiecăreia să fie egală cu 1 mCi?

Se dă: $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$;
 perioada $^{131}\text{I} = 8,08$ zile;
 perioada $^{60}\text{Co} = 5,24$ ani.

Răspuns: $m_{\text{I}} = 8,1 \cdot 10^{-9}$ g; $m_{\text{Co}} = 8,7 \cdot 10^{-7}$ g.

6. Peste cât timp, exprimat în zile, activitatea unei surse de ^{131}I se va reduce de la 200 kBq la 25 kBq? $T_{\text{I}} = 8$ zile.

Răspuns: peste 24 zile.

7. În momentul inițial, activitatea unui preparat radioactiv de fosfor 32 a fost de 5 kBq. După 10 zile, activitatea preparatului s-a redus până la 3,08 kBq.

Determinați perioada de înjumătățire.

Răspuns: 14,3 zile.

8. Un flacon cu iod 131 are activitatea de 100 mCi în momentul $t = 0$. Calculați care va fi activitatea lui după o durată de 48 zile. Se dă $T \approx 8$ zile.

Răspuns: 1,56 mCi.

9. Care este (în Bq) radioactivitatea unei surse de 1 g de BaCl_2 ce conține $^{133}_{56}\text{Ba}$ radioactiv ($T = 8$ ani) și $^{36}_{17}\text{Cl}$ stabil?

Se dă: $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$

Răspuns: $8,11 \cdot 10^{12}$ Bq.

10. Cunoscând că radioactivitatea unui mg de NaI compus din $^{23}_{11}\text{Na}$ stabil și $^{131}_{53}\text{I}$ radioactiv are o activitate de 3920 MBq, determinați perioada iodului 131.

Se dă: $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

Răspuns: 8 zile.

11. În urma radioactivității α , nucleul ^{210}Po se transformă în nucleul ^{206}Pb . Determinați energia dezintegrării α .

Răspuns: 5,40 MeV.

12. Radiul (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) este un element foarte radioactiv, care la dezintegrare produce radon (Rn). Masa atomică a radiului este de 226,0254 u.a.m. Determinați defectul de masă și energia de legătură pe nucleon pentru radiu.

Răspuns: $\Delta m = 1,8176$ u.m.a.; $B = 7,49$ MeV.

13. Două elemente radioactive, A și B, au constantele de dezintegrare respectiv λ_A și λ_B . Cunoscând că $\lambda_A = 2\lambda_B$, determinați relația dintre perioadele de înjumătățire T_A și T_B .

Răspuns: $T_B = 2T_A$.

14. Izotopul instabil de carbon ${}^{10}\text{C}$ ($Z = 6$) la dezintegrare se transformă în bor ($Z = 5$). Activitatea unui preparat măsurată inițial ($t = 0$) este de $1,6 \cdot 10^4$ Bq, iar peste 1 minut devine egală cu $2 \cdot 10^3$ Bq. Determinați perioada de înjumătățire a izotopului de carbon.

Răspuns: $T = 20$ s.

15. Elementul radioactiv ${}^{99m}\text{Tc}$ cu perioada de înjumătățire $T = 6$ ore este utilizat în stabilirea diagnosticului medical. O examinare necesită injectarea unei soluții de 260 MBq. Determinați activitatea preparatului din organismul pacientului peste 2 zile.

Răspuns: $A = 1,02$ MBq.

16. Un mililitru apă de mare conține 10^{-15} g de radon. Ce cantitate de apă are radioactivitatea egală cu 10 mCi? (De considerat activitatea 1 g de radon – $6,46 \cdot 10^{-6}$ Ci).

Răspuns: $15 \cdot 10^{11}$ m³.

18. APARATE DE DETECTARE. BAZELE DOZIMETRIEI

18.1. PRINCIPIILE DE FUNCȚIONARE A DETECTOARELOR DE RADIAȚII NUCLEARE

Radiațiile ionizante utilizate în diferite scopuri sunt puse în evidență sau măsurate cu ajutorul **detectoarelor** cuplate în sisteme auxiliare, ce permit înregistrarea și prezentarea lor sub formă de curbe sau de impulsuri. Când este necesar, cu ajutorul detectoarelor se pot identifica și unele caracteristici ale radiației, cum ar fi tipul de radioactivitate, energia fotonilor sau particulelor, masa particulelor.

În dependență de principiul de funcționare sunt cunoscute mai multe tipuri de detectoare, dar cele mai utilizate sunt **detectoare care se bazează pe fenomenul de ionizare în gaze**. Un astfel de detector este **camera de ionizare** (fig. 18.1).

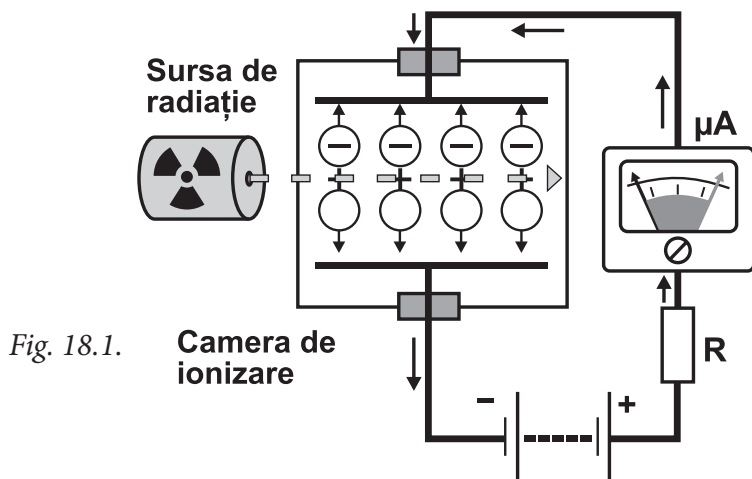


Fig. 18.1.

Într-o cameră închisă sunt montați doi electrozi izolați de corpul acesteia și conectați la o sursă de curent continuu. Spațiul camerei este umplut cu gaz, mai frecvent cu aer la presiunea normală. Sursa de radiație (cu puterea de penetrare mică, de exemplu **α -radiație**) este situată în interiorul camerei sau (cu putere de penetrare mare, de exemplu **γ -radiație**) în afara ei. La trecerea particulei ionizante prin cameră se produc perechi **ion-electron**, colectate de electrozi. Diferența de potențial dintre electrozi trebuie să fie suficient de mare, pentru ca microampermetrul din circuit să înregistreze curentul de saturație. Numai în

acest caz este exclus procesul de **recombinare** a ionilor și curentul de ionizare (i) este proporțional cu numărul total de perechi ion–electron, create de particule într-o unitate de timp, și, prin urmare, cu activitatea sursei de radiație. În camerele de ionizare curentul este foarte mic, fapt ce duce la sisteme de înregistrare complicate. De aceea, mai frecvent este utilizat alt detector cu gaz – **contorul Geiger–Müller** (fig. 18.2).

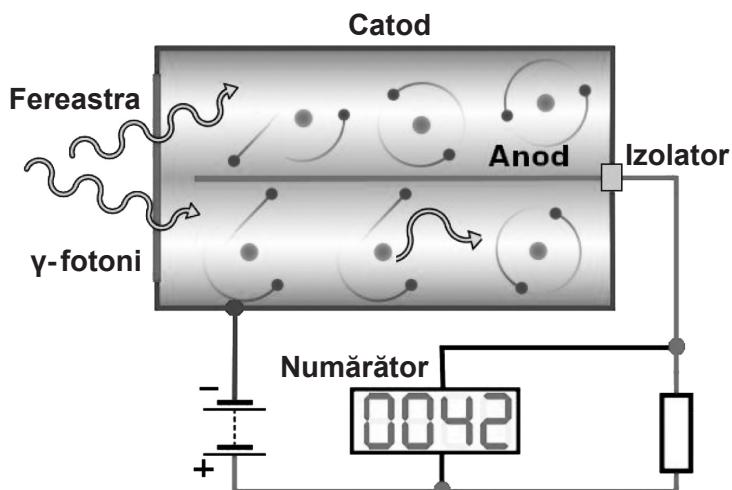


Fig. 18.2.

Contorul este format dintr-un condensator cilindric închis într-un tub de sticlă ce conține un amestec de argon și vapori de alcool la presiune mică. **Anodul** este un fir foarte subțire (0,1 mm), **catodul** – un cilindru metalic sau o peliculă metalică depusă pe peretele interior al tubului de sticlă. Electrozii sunt legați la o diferență de potențial de circa câteva sute de volți. La trecerea particulei ionizante prin gazul din interiorul contorului se produc perechi ion–electron. Electronii sunt accelerați puternic în câmpul intens al anodului și produc **ionizare secundară**. În acest fel se formează o avalanșă de electroni și ioni pozitivi. În circuit apare un curent de scurtă durată, ce produce la bornele rezistenței (R) o cădere de tensiune care este amplificată și înregistrată. Acesta este **impulsul de tensiune** obținut la trecerea unei particule ionizante prin contor. Contorul Geiger–Müller înregistrează doar numărul particulelor, însă nu permite determinarea altor caracteristici ale lor.

Detectoare ce se bazează pe apariția scintilațiilor

Detectorul cu scintilație se compune dintr-un cristal de **NaI**, fluorescent, activat cu taliu (**Tl**) și cuplat cu un fotomultiplicator, care alimentează cu impulsuri electrice un preamplificator (fig. 18.3).

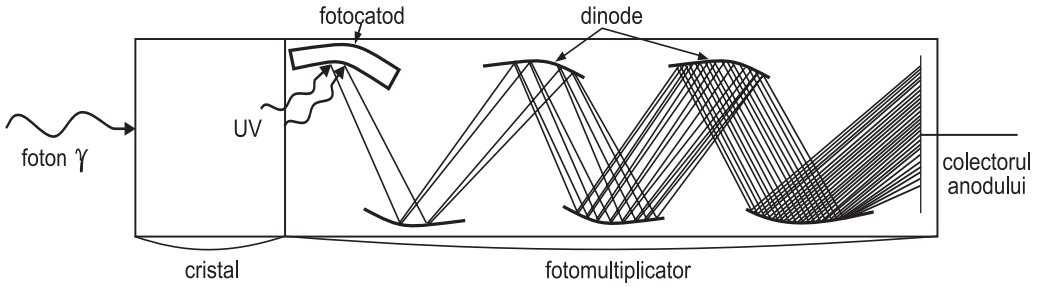


Fig. 18.3.

Contorul este conectat la o sursă cu tensiunea de 1000–1500 V și la un numărător de impulsuri. Energia radiației incidente, transportată de particule ionizante sau fotoni, se absoarbe în cristal, producând ionizarea sau excitarea atomilor cristalului. La dezexcitare, ultimii emit fotoni în domeniul UV (**scintilații**), intensitatea cărora este proporțională cu energia absorbită de cristal. Fotomultiplicatorul conține un fotocatod care emite fotoelectroni, când este iluminat de către cristal, iar dispozitivul de multiplicare (de 10^{10} ori) produce la ieșire un impuls electric de scurtă durată (10^{-6} – 10^{-8} s). Semnalele culese sunt amplificate de un preamplificator și prelucrate (numărate de un numărător de impulsuri adecvat). Spre deosebire de contorul Geiger–Müller, detectorul cu scintilație se folosește atât la numărarea particulelor ionizante, cât și la măsurarea energiei acestora.

Detectoare ce se bazează pe fenomenul de formare a perechilor electron–gol în cristale semiconductoare

Prin structura lor, semiconductoarele conțin un anumit număr de electroni liberi care se pot deplasa în interiorul substanței. Dacă printr-un astfel de cristal semiconductor, așezat între doi electrozi metalici (fig. 18.4), trece radiație ionizantă, are loc ionizarea cristalului, iar datorită perechilor electron–gol, crește considerabil intensitatea curentului electric prin cristal. Cristalele semiconductoare

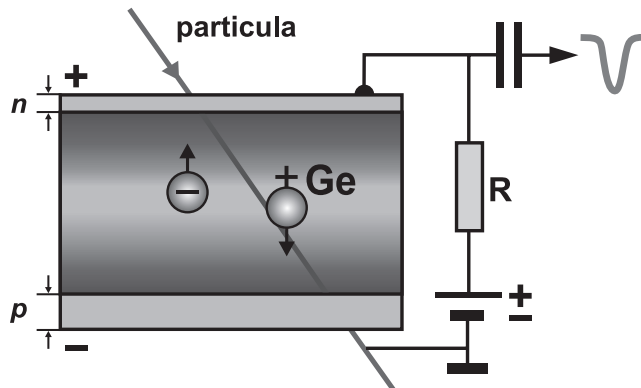


Fig. 18.4.

din detectoare se confecționează din **sulfură de cadmiu**. Numărul perechilor electron–gol este proporțional cu energia particulei ionizante. Amplitudinea impulsului electric format este proporțională cu energia particulelor nucleare înregistrate. Principalele calități ale detectoarelor cu cristale semiconductoare sunt: dimensiuni mici, rezoluție energetică foarte bună și faptul că pot fi utilizate deopotrivă pentru toate tipurile de radiație nucleară (α , β , γ).

18.2. DOZELE DE RADIAȚII

Efectele biologice ale radiațiilor ionizante depind de mai mulți factori: natura radiațiilor, geometria de iradiere etc.

Este dificil de a propune o mărime ce ar putea fi măsurată ușor și valabilă pentru toate efectele biologice ale radiațiilor ionizante. Deoarece efectele biologice sunt, în mare măsură, cumulative, s-a ales mărimea numită **doza de radiație**. Există două sisteme de măsurare a dozei – **roentgenologic** și **radiobiologic**.

Sistemul roentgenologic poate fi aplicat doar în radiațiile X și γ , fotonii cărora au energia cuprinsă între 0,03 și 3 MeV. Acest sistem se bazează pe măsurarea ionizării obiectului iradiat; mărimea fundamentală a lui este **doza de ioni** (Δ), definită prin relația:

$$\Delta = q/m,$$

unde: **q** – sarcina electrică totală a ionilor de ambele semne; **m** – masa obiectului.

Unitatea de măsură a dozei de ioni în S.I. este coulomb/kilogram ($C \cdot kg^{-1}$). Însă, practic, mai frecvent este folosită unitatea numită **roentgen** (**R**).

Prin definiție, roentgenul este doza de radiație X sau γ care, în masa de aer de 1 kg, în condiții normale, produce un număr de ioni, sarcina totală a cărora este de $2,58 \cdot 10^{-4} C$.

Prin urmare, $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C kg^{-1}$.

Debitul dozei (δ) este raportul dintre doza de radiație și timpul de iradiere a obiectului:

$$\delta = \frac{\Delta}{t} \text{ (R/s; R/min; R/h)}.$$

Sistemul radiobiologic se bazează pe determinarea energiei absorbite de obiectul iradiat. Mărimea fundamentală a acestui sistem este **doza absorbită** (**D**), definită ca energie absorbită de unitatea de masă:

$$D = \frac{W}{m},$$

unde: **m** – masa de substanță sau țesut iradiat; **W** – energia absorbită în această masă.

Unitatea de măsură în S.I. a dozei absorbite este **gray** ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

S-a constatat că aceeași energie absorbită a radiațiilor ionizante de diferită natură produce efecte biologice diferite. Aceasta a făcut necesară introducerea în sistemul radiobiologic a unui coeficient numit **efectivitate biologică relativă (Q)** (factor de calitate). Produsul dintre doza absorbită (**D**) și factorul de calitate (**Q**) reprezintă **doza biologică (B)**:

$$B = Q \cdot D.$$

$Q = 1$ pentru radiațiile β și γ ;

$Q = 3-10$ pentru neutroni (în funcție de energia lor);

$Q = 10$ pentru particulele α .

Unitatea de măsură a dozei biologice în SI se numește **sievert (Sv)**.

O altă mărime frecvent utilizată este **debitul dozei biologice (b)** dat de relația:

$$b = B/t,$$

unde: **t** este timpul de iradiere.

Doza biologică integrală (B_i) este dată de relația:

$$B_i = B \cdot m,$$

unde **m** este masa organismului sau țesutului iradiat.

Organismul uman este iradiat în permanență sau ocazional de câteva surse de radiații ionizante: naturale, sanitare, tehnice etc.

Iradieră naturală se datorează fondului natural (fondul mediului ambiant), format din 30% radiație cosmică, 45% radiații ce provin din activitatea radioelementelor din sol, 24% radiația elementelor care iau naștere în metabolism și 1% radioactivitatea din atmosferă.

Normele fundamentale de securitate radiobiologică, elaborate de **Comisia Națională din România** pentru Controlul Activităților Nucleare (29 august 2000), prevăd pentru doza anuală maximă permisă anumite valori (tab. 2).

Tabelul 2

| Obiectul iradiat | Doza maximă permisă | |
|-------------------------|-----------------------|-----------|
| | Expunere profesională | Populație |
| Întreg corpul | 20 mSv/an | 2 mSv/an |
| Cristalin | 150 mSv/an | 15 mSv/an |
| Piele | 500 mSv/an | 50 mSv/an |
| Extremitățile membrelor | 500 mSv/an | 50 mSv/an |

18.3. EFECTELE BIOLOGICE ALE RADIAȚIILOR ȘI MĂSURILE DE RADIOPROTECȚIE

În urma interacțiunii dintre radiații și organismele vii apar fenomene fizice (ionizări, excitări) care determină fenomene chimice (alterări ale macromoleculor și ale sistemelor enzimatic). Dar cele mai importante efecte se observă la celulele germinare. În urma interacțiunii dintre radiații și celulele germinare se observă o alterare a cromozomilor și a codului genetic – ADN. Gravitatea acestor probleme este amplificată prin transmiterea lor la descendenți chiar și la doze foarte mici.

Pentru cei care lucrează în medii radioactive, una dintre cele mai simple soluții, folosite pentru micșorarea dozelor absorbite, este învelirea cu ecrane protectoare (din plumb) a aparatelor ce utilizează radiații. Activitatea cu orice surse de radiații ionizante necesită protejarea personalului contra acțiunii lor dăunătoare. Convențional, există trei tipuri de protecție: prin timp, prin distanță și prin materiale de ecranare. În *figura 18.5* sunt prezentate simbolurile informaționale de avertizare substanțelor radioactive.

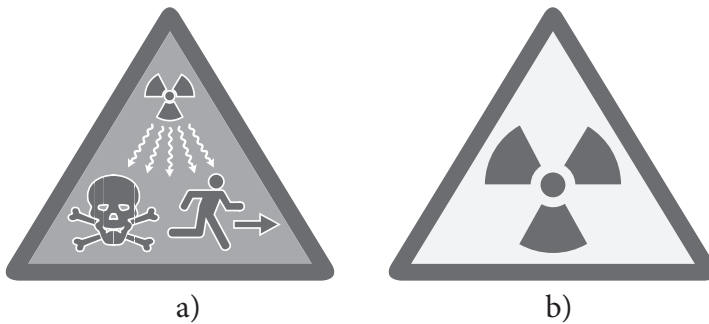


Fig. 18.5: a) simbol de pericol nou de avertizare pentru elemente deosebit de radioactive; b) simbol de avertizare a prezenței substanțelor radioactive depozitate în recipiente protectoare.

Fluxul de radiație ionizantă poate fi redus prin interpunerea de ecrane protectoare între sursă și obiectul iradiat.

Această metodă se bazează pe legea de atenuare a intensității radiațiilor la trecerea printr-un strat de substanță.

Eficacitatea unui ecran (E) în atenuare se determină din relația:

$$E = \frac{A_0 - A}{A_0},$$

unde: A_0 – activitatea inițială a sursei în lipsa ecranului; A – activitatea sursei cu ecran.

EXERCIȚII

1. O sursă punctiformă de radiație gama are un debit de doză de 200 Gy/oră la distanța de un metru. Calculați debitul dozei la distanța de doi metri de la sursă.

Răspuns: 50 Gy/oră.

2. Timp de 6 ore, un corp cu masa de 60 kg a absorbit $W = 1$ J energie de radiație ionizantă. Determinați doza absorbită în gray.

Răspuns: 0,017 Gy.

3. Într-un oraș, fondul radioactiv este de 30 mR/h. Determinați doza de ioni primită de fiecare locuitor din acest oraș în decursul unui an.

Răspuns: $0,676 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4. În 10 g de apă s-au absorbit 10^{20} protoni cu energia 5MeV. Determinați doza absorbită.

Răspuns: $8 \cdot 10^9$ Gy.

5. O particulă α produce în aer $15 \cdot 10^4$ perechi de ioni. Determinați curentul de ionizare produs de o sursă care emite 100 α particule într-o secundă.

Răspuns: $2,4 \cdot 10^{-12}$ A.

6. Trecând printr-un strat de substanță cu grosimea de 5 cm, Intensitatea radiației γ s-a micșorat de 6 ori. Determinați coeficientul liniar de atenuare a acestei substanțe.

Răspuns: $0,36 \text{ cm}^{-1}$.

7. Debitul dozei de ioni la distanța de 10 cm de la sursă este de 85 mR/h. La ce distanță de la sursă ne putem afla, fără protecție, dacă doza admisibilă este de 0,017 mR/h?

Răspuns: 70,71m.

8. Activitatea unei surse radioactive ^{60}Co , utilizată în radioterapie, este de 10^{12} Bq. Debitul dozei produs de ^{60}Co la distanța de 1 m este de $3,5 \cdot 10^{-13}$ Sv \cdot ora $^{-1}$. Dozimetrul individual al operatorului, locul de lucru al căruia este la distanța de 5 m de la sursă, indică 1 mSv. Determinați durata expunerii.

Răspuns: 4,35 min.

19. ACCELERATOARELE DE PARTICULE. BAZELE FIZICE ALE RADIOTERAPIEI

19.1. ACCELERATOARELE DE PARTICULE

Noțiuni generale

Este cunoscut că pentru accelerarea unui corp, asupra lui trebuie să se aplice o forță. În cazul acceleratoarelor de particule, forța de accelerare este de natură electrică; ea nu poate fi aplicată decât numai asupra particulelor electrizate – e^- , p^+ , α^{++} sau diferiți ioni.

Forțele aplicate sunt de două tipuri:

- electrice;
- magnetice.

Forțe electrice

Prin definiție, forța cu care câmpul electric acționează asupra unei unități de sarcină electrică introdusă în punctul dat este intensitatea câmpului (\vec{E}) în acest punct. Dacă \vec{E} este aceeași în orice punct al câmpului, el se consideră uniform.

Deplasarea unei particule cu sarcina $+q$ într-un câmp electric longitudinal, creat de o diferență de potențial (V), este prezentată în *figura 19.1*.

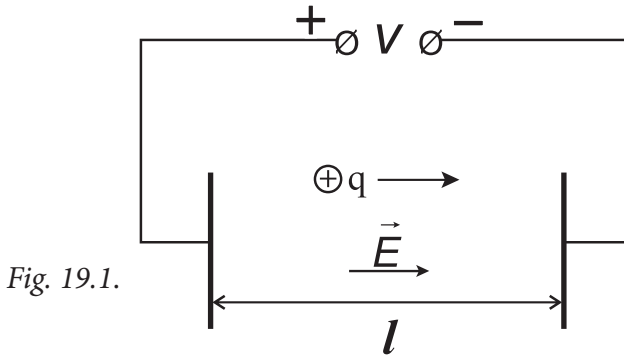


Fig. 19.1.

Asupra particulei acționează forța:

$$\vec{F} = qE; \quad E = \frac{V}{l}; \quad F = q \frac{V}{l}.$$

Sub acțiunea acestei forțe, la traversarea diferenței de potențial (V), particula cu sarcina q capătă energie cinetică cu valoarea:

$$W = qV = \frac{1}{2}mv^2,$$

unde: v – viteza finală; m – masa particulei.

În cazul unui câmp electric transversal, viteza inițială a particulei rămâne constantă după modul, variind numai după direcție.

Deviația mișcării particulei în raport cu direcția inițială este invers proporțională cu viteza inițială și masa particulei.

Forțe magnetice

Forța cu care câmpul magnetic acționează asupra unei particule electrizate în mișcare se numește **forța Lorentz**.

Într-un câmp magnetic uniform nelimitat traiectoria descrisă de particulă va prezenta un cerc.

Diferite acceleratoare de particule

Există mai multe tipuri de acceleratoare de particule. Ele pot fi clasificate în funcție de: forma traiectoriei fasciculului de particule accelerate, caracterul câmpurilor acceleratoare, domeniul de energii imprimate particulelor și de natura particulelor accelerate. Ne vom referi doar la unele tipuri de acceleratoare utilizate mai frecvent în medicină.

a. Acceleratoare electrostatice de tensiune înaltă Van der Graaf

Acest tip de accelerator necesită o mare diferență de potențial. El constă din două componente:

- un generator de înaltă tensiune (*fig. 19.2*);
- un tub vidat de accelerare.

Schema acceleratorului electrostatic de acțiune directă este reprezentată în *figura 19.3*. Particulele sau ionii nucleari se accelerează datorită traversării nemijlocite a unei mari diferențe de potențial, 5–6 MV. În tubul de accelerare se realizează un vid maximal posibil (10^{-5} – 10^{-6} mm Hg).

Particula cu sarcina Ze capătă energie cinetică $W = ZeV$. Avantajele acceleratoarelor de acțiune directă sunt: continuitatea, intensitatea înaltă și stabilitatea energetică a fluxului accelerat, unde curentul poate atinge câțiva miliamperi. Ele sunt utilizate în fizica nucleară și în radioterapie; cu ajutorul electronilor accelerați, se obțin raze X de mare energie. Însă, în aceste acceleratoare energia particulelor nu depășește 50 MeV. Pentru a atinge o mai mare energie a particulelor, se utilizează **acceleratoare liniare**.

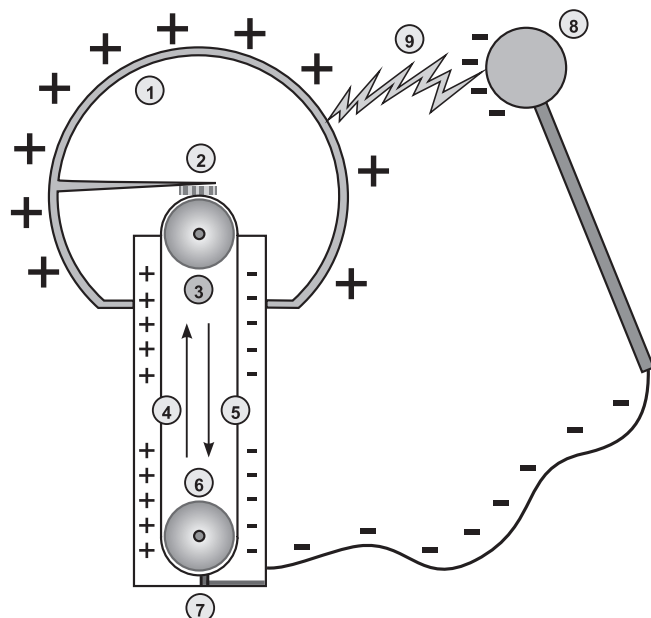


Fig.19.2. Schema generatorului de înaltă tensiune Van der Graaf:

- 1) sfera metalică goală; 2) electrodul superior; 3) cilindrul superior (din metal); 4) partea centurii încărcată pozitiv; 5) partea opusă a centurii încărcată negativ; 6) cilindrul inferior (din sticlă acrilică); 7) electrodul inferior (pământ); 8) dispozitivul sferic cu sarcină negativă, folosit pentru a descărca sfera principală; 9) scânteia produsă de diferență de potențial.

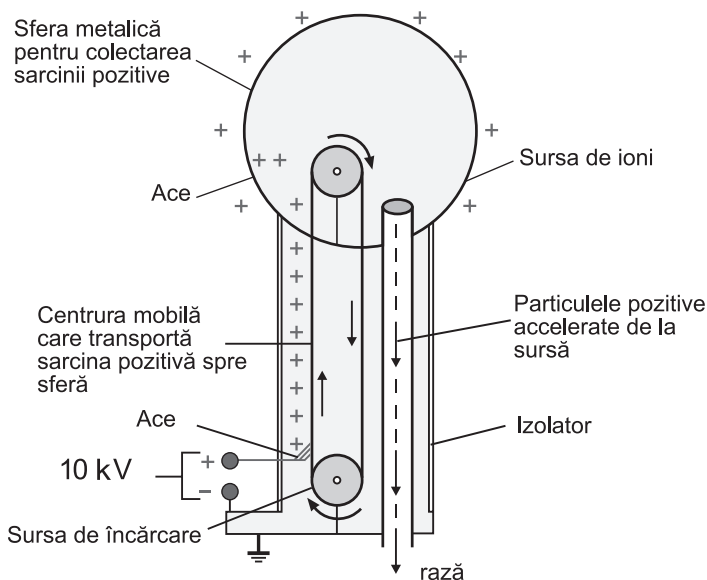


Fig. 19.3.

b. Acceleratoare liniare

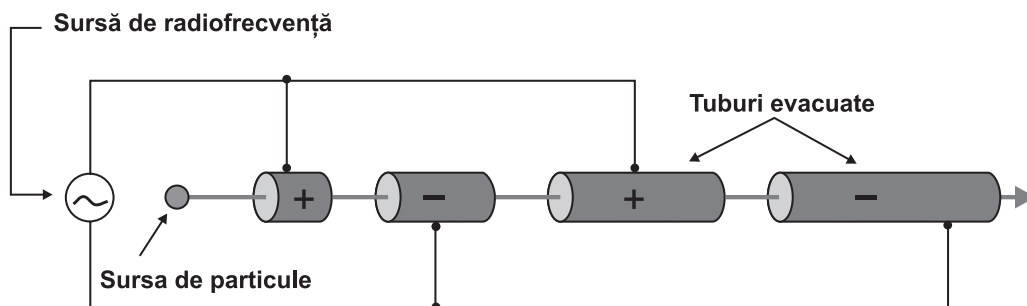


Fig. 19.4.

În acceleratorul linear (fig. 19.4), particula este supusă accelerării multiple, trecând printr-o serie de tuburi cilindrice, conectate la generatorul electric de înaltă frecvență (radiofrecvență). Impulsul de particule se mișcă de-a lungul axei tuburilor. În interiorul fiecărui tub, câmpul electric este nul. Tuburile vecine posedă polaritate opusă. Astfel, câmpul de accelerare se află în intervalul dintre tuburi. Frecvența generatorului și dimensiunile tuburilor trebuie să corespundă condiției, încât impulsul de particule să apară la următorul interval în momentul când polaritatea tuburilor respective se inversează. Pentru aceasta, lungimea tubului (l), viteza particulei (v) și frecvența câmpului (ν) trebuie să corespundă relației:

$$l = \frac{v}{\nu}.$$

Pentru a căpăta energii mari, trebuie de construit acceleratoare liniare de lungime mare.

Unul dintre cele mai mari acceleratoare, construit în SUA, a funcționat în anii 1989–1998. El avea lungimea de 3 km și accelera atât electroni, cât și protoni până la energia de 50 GeV. Pentru a atinge o astfel de energie, particulele erau supuse la 80 000 acte de accelerare.

c. Acceleratoare ciclice

Câmpul magnetic perpendicular (\vec{B}), care trece vertical prin electrozii în formă de D ai unui ciclotron, acționează asupra curentului de electroni sau ioni, forțând particulele să se deplaseze pe o traiectorie circulară, astfel încât acestea trec repetat prin spațiul îngust dintre duante.

O diferență de potențial alternantă de înaltă frecvență (ν), aplicată între cei doi electrozi metalici, generează un câmp electric uniform în acest spațiu (câmpul electric în interiorul duantelor este nul). Frecvența de oscilație a tensiunii aplicate,

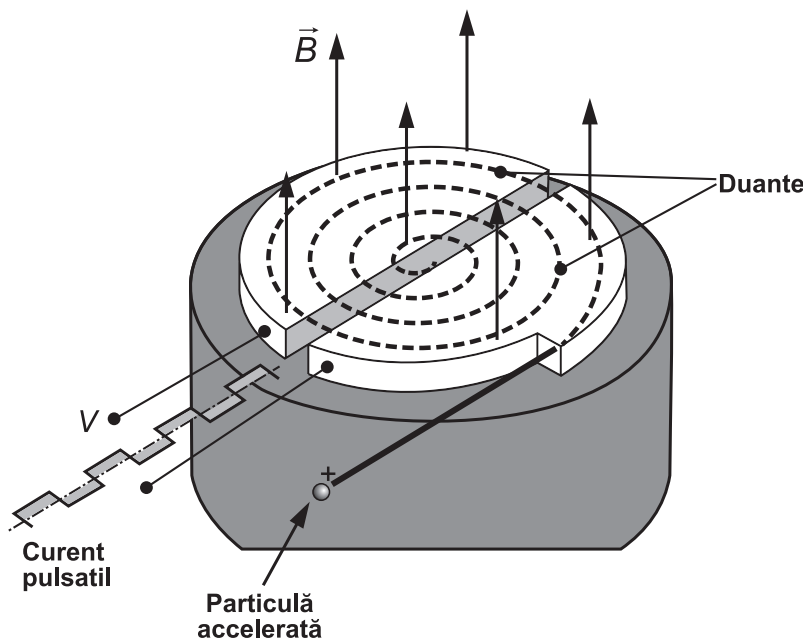


Fig. 19.5. Schema simplificată a unui ciclotron.

numită *frecvență de ciclotron*, este determinată de inducția câmpului magnetic, sarcina și masa particulelor:

$$\nu = \frac{Bq}{2\pi m}.$$

Deoarece viteza particulelor și raza traiectoriei acestora cresc treptat, polaritatea câmpului electric este alternată, astfel încât particulele sunt întotdeauna accelerate atunci când traversează spațiul dintre electrozi. Particulele sunt introduse în centrul dispozitivului și extrase la raza și viteza (sau energia) maximă.

19.2. RADIOTERAPIA

Radioterapia este metoda de utilizare a radiațiilor ionizante în tratamentul anumitor boli, îndeosebi a cancerului. Termenul de radioterapie, întrebunțat singur, se referă mai ales la radioterapia externă, denumită și *radioterapie transcutanată* sau *teleradioterapie*, în care sursa radiațiilor este exterioară bolnavului și produce un fascicul care atinge țesuturile profunde, după ce a traversat pielea și țesuturile superficiale. Radioterapia externă apelează la două tipuri de radiații electromagnetice (X și γ) precum și radiații constituite din particule elementare (electroni, protoni, neutroni). Ea utilizează două surse de radiații:

fie radioelemente în sine (cobalt 60), care sunt adesea izotopi radioactivi ai unei substanțe, fie aparate (acceleratori de particule), care pun în mișcare particulele elementare și le trimit spre bolnav, sau radiația pe care acestea o produc.

Aceste acceleratoare folosesc un clistron și un aranjament complex de magneți care produc o rază cu o energie de 6–30 MeV. Electronii accelerați pot fi folosiți direct sau pot fi ciocniți de o țintă, pentru a produce raze X (fig. 19.6).

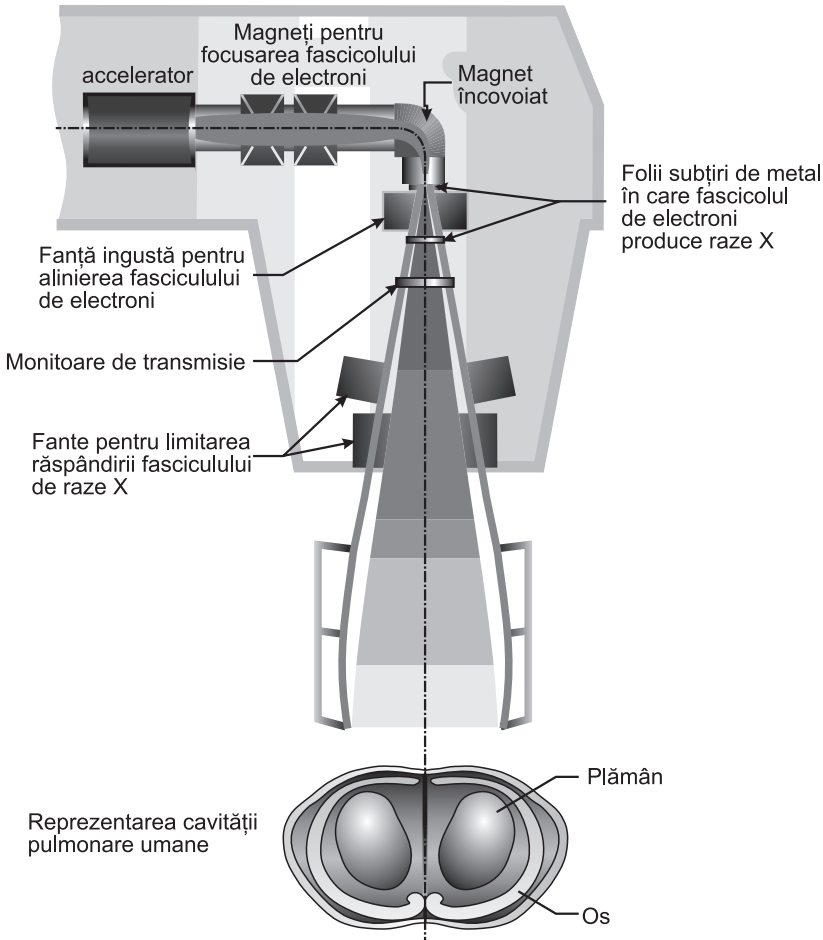


Fig. 19.6. Schema a unui accelerator medical tipic utilizat în terapia cancerului.

Siguranța, flexibilitatea și acuratețea razei produse au înlocuit terapia cu cobalt-60 ca instrument de tratament.

Indicații

La doze mici, radioterapia are un efect antiinflamator, utilizat uneori în tratamentul zonei zoster sau al keloidelor (cicatricele patologice).

Indicația principală a radioterapiei este, totuși, cancerul. O radioterapie are drept obiectiv furnizarea unei doze suficiente pentru a trata tumoarea, protejând organele învecinate. Doza absorbită este exprimată în Gray (J/kg).

Radiațiile ionizante, prin acțiunea lor, distrug structurile cromozomice responsabile de divizarea celulelor, ceea ce antrenează moartea celulelor canceroase și celulele sănătoase sunt atacate, dar ele au o capacitate de restaurare mai mare. Acțiunea anticanceroasă a radiațiilor este utilizată în mod izolat sau asociată cu o altă metodă (chirurgie, chimioterapie). Astfel, radiochimioterapia (administrarea simultană a radiațiilor și a medicamentelor) este utilizată în caz de carcinom epidermoid al faringelui, bronhiilor, esofagului și canalului anal.

Radioterapia preoperatorie constă în iradierea unei tumori profunde (rectală, pancreatică etc.) cu electroni în cursul unei intervenții chirurgicale, după ce au fost date deoparte organele învecinate (intestine, rinichi etc.). Radioterapia se aplică și în alte scopuri:

- radioterapia corporală totală – este destinată pregătirii unei grefe de maduvă osoasă, pentru a trata anumite forme de leucemie, de hematopatii;
- radioterapia cutanată totală – utilizează electroni de intensitate joasă în tratamentul limfoamelor cutanate.

Diferite tipuri de aparate

Tuburile tradiționale care produc radiații X de energie joasă nu mai sunt întrebuințate decât în tratamentul cancerelor cutanate. Acceleratoarele lineare sunt aparatele cel mai frecvent folosite; ele produc fie electroni activi la suprafață și indicați în tratamentul tumorilor superficiale, fie radiații X de energie înaltă, care pătrund în profunzime sub piele și sunt adaptate tratamentului cancerelor profunde ale toracelui și abdomenului. O altă varietate de acceleratoare de particule, **ciclotroanele**, ce produc neutroni sau protoni, se utilizează în tratamentul unor forme rare de cancer, care cere multă prudență (melanomul ochiului, sarcomul bazei craniului). Și, în sfârșit, aparatele ce conțin cobalt, care emit radiații γ , tratează țesuturile profunde, dar nu afectează pielea. Ele sunt aplicate în tratamentul cancerelor de cap, de gât, de sân și ale membrelor.

Tehnica

Radioterapia modernă presupune un mediu tehnic costisitor. Un examen prealabil la scaner permite să se repereze amplasarea organului sau organelor de iradiat. Este realizată o simulare prin radiografie simplă pentru a permite o poziționare bună a fasciculului. Doza de radiație necesară distrugerii celulelor canceroase este calculată prin dozimetrie. Pentru a crește eficacitatea radiației

fără a leza țesuturile sănătoase, este folosită tehnica fasciculelor convergente: un fascicul iradiază fața anterioară a părții bolnave, al doilea – fața posterioară, al treilea – din partea dreapta și ultimul – din partea stângă. Fiecare fascicul are o intensitate prea slabă pentru a putea leza țesuturile sănătoase de pe traiectul lui, dar suma intensităților celor patru fascicule are un efect însemnat asupra tumorii.

Iradieră prin multiple minifascicule convergente (*fig. 19.7*), este utilizată în tratamentul malformațiilor arteriovenoase sau al tumorilor cerebrale limitate, dar inoperabile. Efectele nedorite ale radioterapiei sunt cauzate de afectarea celulelor sănătoase. Prevenirea acestor efecte se bazează pe precauții tehnice: doza de radiație și volumul corporal iradiat să fie în doze cât mai mici posibile, diminuarea dozelor de administrat pe ședință și creșterea, în schimb, a numărului de ședințe.

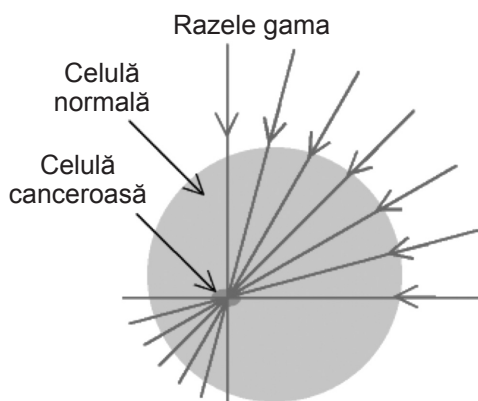


Fig. 19.7.

Radioterapia de ultimă oră

Radioterapia pe bază de fotoni, utilizată pe larg în prezent, permite distrugerea într-o ședință de tratament a doar aproximativ 10% din celulele tumorale iradiate. De aceea, specialiștii în domeniu ne atrag atenția asupra riscului înalt de refacere a celorlalte celule.

Un nou tip de radioterapie, numit **hadronoterapia**, care există deja în Japonia, în Statele Unite ale Americii, în Rusia și în alte țări Europene, are capacitatea de a distruge pe loc aproape toate celulele tumorale iradiate.

Hadronoterapia constă în utilizarea hadronilor (cu precădere protoni și ioni de carbon) pentru eliminarea tumorilor canceroase țintite. Unul dintre principalele avantaje ale acestui tip de terapie, în domeniul oncologic, este eficiența sa în cazul tumorilor care nu răspund la tratamentul radioterapeutic convențional.

În plus, protonii și ionii de carbon au o precizie superioară celei specifice fotonilor, ceea ce face ca hadronoterapia să distrugă țesuturile maligne, crușându-le în cea mai mare măsură pe cele sănătoase.

O altă calitate a hadronoterapiei este faptul că nu există riscul apariției radiorezistenței, ceea ce înseamnă că celulele canceroase nu vor căpăta rezistență la tratamentul cu protoni și ioni de carbon. Hadronoterapia se aplică în tumorile maligne inoperabile, mai ales în cele localizate la nivelul craniului, glandelor salivare, sinusurilor, prostatei și ochiului.

EXERCIȚII

1. Care trebuie să fie intensitatea câmpului electric dintre plăcile unui condensator situate orizontal, pentru a menține în echilibru un electron?

Răspuns: $5,7 \cdot 10^{-11} \text{ Vm}^{-1}$.

2. Determinați energia cinetică a unui electron care posedă viteza de $5 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Răspuns: $7,1 \cdot 10^{-3} \text{ Mev}$.

3. Determinați valoarea tensiunii de accelerare, care permite de a obține electroni cu viteza de $5 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ într-un accelerator de tip Van der Graaf.

Răspuns: 7,1 kV.

4. Determinați viteza unui electron accelerat de o diferență de potențial 4,55 kV într-un accelerator de tip Van der Graaf.

Răspuns: $4 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. Calculați forța exercitată de un câmp magnetic uniform cu $B = 10^{-2} \text{ T}$ asupra unui electron care se mișcă cu viteza de $2 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ perpendiculară pe direcția câmpului.

Răspuns: $8,8 \cdot 10^{-30} \text{ N}$.

6. Ce tensiune trebuie să se aplice între duantele unui ciclotron, pentru ca particulele cu raportul $\frac{q}{m} = 9,6 \cdot 10^7 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ să se miște din primul tur pe o traiectorie circulară cu raza de 0,5 m?

Răspuns: $12 \cdot 10^3 \text{ kV}$.

7. Un accelerator liniar funcționează de la un curent alternativ de frecvență înaltă $\nu = 5 \cdot 10^6$ Hz. Electronii care trebuie accelerați se injectează la intrarea în primul electrod în momentul $t = 0$, având viteza inițială (v_0) de 10^6 m/s⁻¹. Determinați lungimea primului electrod.

Răspuns: 10 cm.

8. Într-un accelerator liniar, un electron cu energia inițială (E_0) continuă mișcarea între doi electrozi cilindrici: unul cu potențialul nul, iar celălalt cu potențialul $V > 0$. Determinați viteza electronului în interiorul celui de al doilea electrod.

$$\text{Răspuns: } v = \sqrt{\frac{(2E_0 + eV)}{m}}.$$

9. Pentru un curs de radioterapie au fost utilizate particulele β^- cu energie de 4 MeV și parcursul liniar în țesut de 1 cm. Cunoscând energia cheltuită la formarea unei perechi de ioni, determinați transferul liniar de energie (TEL) și densitatea liniară de ionizare (DLI).

Răspuns: TEL = $4 \cdot 10^6$ eVcm⁻¹; DLI = 10^5 cm⁻¹.

20. ANALIZORUL AUDITIV

20.1. GENERALITĂȚI DESPRE SUNETE

Unda sonoră

Sunetele reprezintă unde mecanice longitudinale, altfel spus, o mișcare mecanică oscilatorie, care se transmite prin mediile materiale. Spre deosebire de undele electromagnetice, undele sonore nu se pot propaga în vid.

Unda sonoră impune particulele mediului să oscileze în raport cu poziția de echilibru în direcție paralelă cu direcția de propagare a undei. În figura 20.1 este reprezentată analogia dintre undele longitudinale și cele transversale.

Surse de sunete sunt obiectele capabile de a transmite vibrațiile mecanice proprii mediului material din jurul lor.

Evident, frecvența sursei este și frecvența undei sonore.

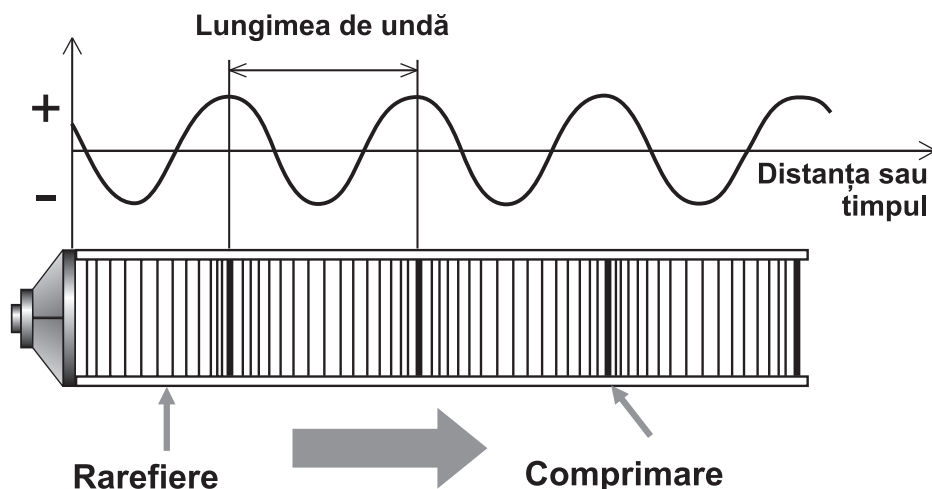


Fig. 20.1.

Pentru sunetele percepute de urechea omului banda de frecvențe este de la 16 Hz până la 20 KHz.

În aer, în funcție de presiunea atmosferică, viteza de propagare a undelor sonore variază între 330 și $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Viteza sunetului esențial depinde de densitatea mediului – în apă, de exemplu, ea este de $1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; în os – de $3300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Sunete pure

Acestea sunt cele mai simple sunete; deplasarea longitudinală a particulelor, care intră în oscilație, în raport cu poziția de echilibru, este reprezentată de o funcție sinusoidală:

$$x = A \sin \omega t,$$

unde: A – amplitudinea (deplasarea maximă a particulei de la poziția de echilibru);

ω – frecvența ciclică ($\omega = 2\pi\nu$); $T = \frac{1}{\nu}$ – perioada.

Distanța parcursă de sunet într-un mediu material timp de o perioadă se numește *lungime de undă* (λ):

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu},$$

unde c – viteza sunetului în mediul dat.

Trebuie să menționăm că frecvența (ν) este caracteristica sursei sonore independent de mediu, pe când lungimea de undă (λ), care depinde de viteza sunetului, variază în funcție de mediu.

Două sunete pure pot impune deplasări longitudinale particulelor dintr-un mediu comun, însă aceste mișcări pot fi declanșate în timp.

Între $X_1 = A \sin \omega t$ și $X_2 = A \sin(\omega t + \varphi)$ nu există diferență în mișcarea particulelor, însă cea de a doua mișcare, în raport cu prima, este în avans de un timp:

$$\tau = \frac{\varphi}{\omega},$$

unde: $(\omega t + \varphi)$ – faza oscilațiilor; φ – faza inițială.

Viteza instantanee a particulelor (v) este prima derivată după timp a funcției de deplasare:

$$x = A \sin \omega t;$$

$$v = \frac{dx}{dt} = A \omega \cos \omega t.$$

Sunete complexe și zgomote

Sunetele complexe impun particulelor mediului mișcări periodice, însă ele nu mai sunt sinusoidale.

În baza teoremei lui Fourier, **orice mișcare periodică poate fi considerată ca superpoziția unui număr finit sau infinit de mișcări sinusoidale de diverse amplitudini, frecvențele cărora sunt multiple ale frecvenței fundamentale** (fig. 20.2).

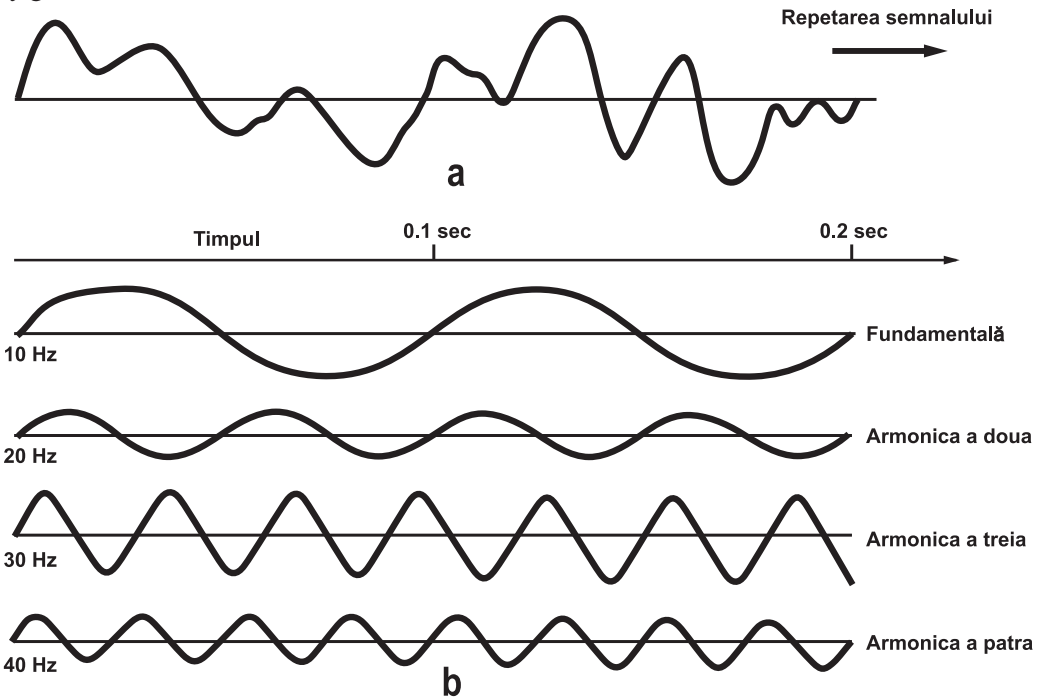


Fig. 20.2.

Într-un sunet complex se disting:

- o mișcare oscilatorie periodică ne sinusoidală;
- un sunet fundamental de frecvență ν ;
- un anumit număr de armonice cu frecvențe mai mari, multiple frecvenței ν .

$$X_{re} = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega + \varphi_n).$$

Caracteristicile amplitudine-frecvență ale tuturor componentelor armonice reprezintă **spectrul armonic** al sunetului complex.

În *figura 20.3* sunt reprezentate spectrele armonice ale semnalelor acustice emise de diferite instrumente muzicale.

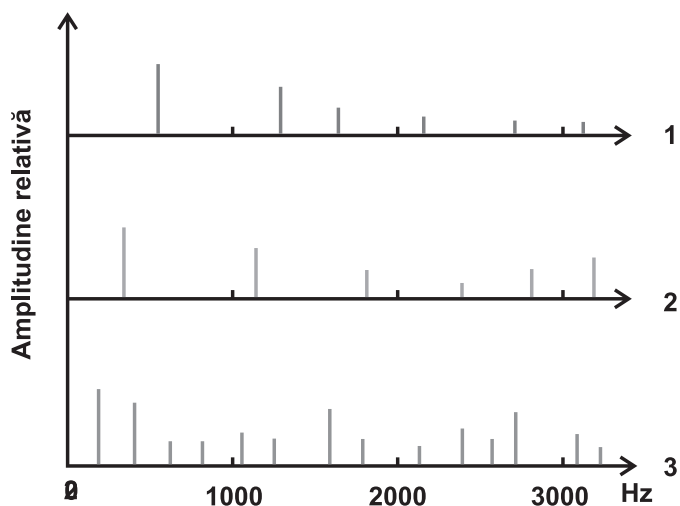


Fig. 20.3.

Zgomotele sunt produse de vibrații neperiodice, iar prin aplicarea teoremei lui Fourier pot fi considerate ca integritate a unui număr infinit de mare de funcții sinusoidale, frecvențele cărora sunt infinit variate.

Spectrul armonic al zgomotului este continuu.

Presiunea acustică (P) se determină din relația:

$$P = \nu \rho c,$$

unde: ρ – densitatea mediului; c – viteza sunetului în mediul dat; ν – viteza instan-tanee a particulelor incluse în vibrație.

Intensitatea acustică

Energia transportată de unda sonoră printr-o unitate de suprafață într-o unitate de timp reprezintă **intensitatea acustică**; ea se determină, pentru un sunet pur, din relația:

$$I = \nu P; \quad P = \nu \rho c; \quad I = \nu^2 \rho c.$$

Pentru funcția sinusoidală: $v^2 = \frac{1}{2} \omega^2 A^2$.

Expresia finală pentru valoarea medie a intensității acustice este:

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2.$$

Legătura dintre intensitatea sunetului și presiunea acustică se determină din relația:

$$I = \frac{P^2}{\rho c},$$

unde: ρ – densitatea mediului în care se propagă sunetul, c – viteza sunetului.

Nivelul acustic

Pe lângă mărimile fizice caracteristice oricărui tip de unde, în caracterizarea undelor sonore se folosesc mărimi și unități specifice acestora, printre care și **nivelul acustic**.

Nivelul acustic al unui sunet cu intensitatea I se determină prin comparare cu un sunet pur de referință cu intensitatea inițială (I_0) de 10^{-12} W/m² și frecvența de 1000 Hz.

Nivelul acustic (**N**) se consideră logaritmul zecimal al raportului $\frac{I}{I_0}$, unitatea de măsură fiind **belul (B)**:

$$N = \lg \frac{I}{I_0}.$$

În practica medicală, nivelul acustic se exprimă în decibeli (**dB**) din relația:

$$N = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ dB.}$$

Câteva exemple de nivele acustice:

- 0 dB – prag de audibilitate;
- 20 dB – vorbire;
- 90 dB – zgomotul motocicletei;
- 130 dB – zgomotul avionului reactiv.

Impedanța acustică reprezintă o caracteristică importantă a mediului. Într-un punct al mediului, impedanța acustică este egală cu raportul dintre presiunea acustică și viteza de vibrație (v) a particulelor în acest punct:

$$Z = \frac{P}{v} = \frac{v \cdot \rho \cdot c}{v} = \rho c.$$

Câteva valori ale impedanței în diferite medii:

- aer $z = 0,04 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- apa $z = 1,48 \cdot 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- os $z = 7,80 \cdot 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rezonanța sonoră

În cazul răspândirii libere a sunetului în porțiuni limitate ale mediului, la coincidența frecvenței sunetului cu frecvența porțiunii mediului, amplitudinea oscilațiilor crește brusc; acest fenomen se numește **rezonanță sonoră**. Drept rezonatori sonori pot servi coloane de aer care umplu cavități cu mărimi și forme respective.

Când în rezonator pătrunde o undă sonoră complexă, unele tonuri armonice (cu frecvențe multiple frecvenței proprii) se amplifică, iar altele (cu frecvențe nemultiple frecvenței proprii) se atenuează.

În al doilea caz, rezonatorul servește ca **atenuator** de sunete – dispozitiv utilizat adesea în combaterea zgomotelor.

Dispozitivul didactic utilizat pentru confirmarea efectelor menționate este reprezentat în figura 20.4.

Un vas cilindric de sticlă (1) se umple aproape până sus cu apă puțin colorată. În el se introduce un tub de sticlă gradat (2), menținându-l suspendat. De capătul de sus al tubului se apropie un diapazon în stare de vibrație. Pornind din poziția cea mai joasă posibilă, tubul și diapazonul se mișcă lin în sus. Când lungimea coloanei de aer din tub devine egală cu $\frac{1}{4}$ din lungimea de undă a sunetului simplu difuzat de diapazon (λ_s), se aude o amplificare evidentă a intensității sunetului. La ridicarea tubului și diapazonului până când lungimea coloanei de aer devine egală cu $\frac{1}{2}$ (λ_s), se simte o atenuare evidentă a sunetului.

Menționăm că un rezonator sonor este și coloana de aer din **conductul auditiv**. Cunoscând lungimea acestui conduct ($l \approx 2,3$ cm) și luând în considerație rezultatele experienței descrise, putem determina cu ușurință frecvența sunetului simplu care se amplifică maximal în conductul auditiv:

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,5 \cdot 10^2}{4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-2}} \approx 3,5 \text{ kHz} .$$

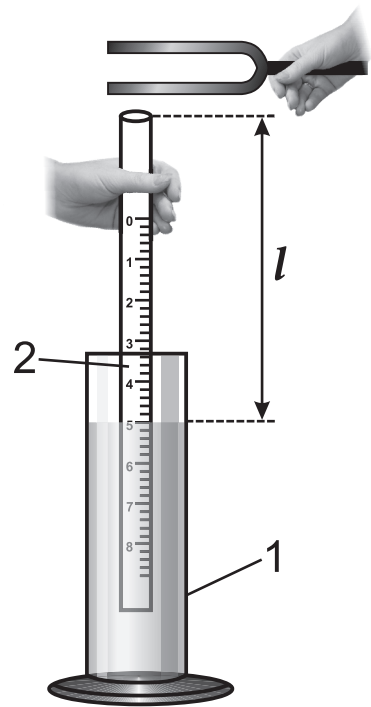


Fig. 20.4.

20.2. ANATOMIA ȘI FIZIOLOGIA URECHII

Analizorul auditiv stabilește legătura directă a receptorului de unde sonore cu sistemul nervos central. Folosind noțiunea de cibernetică, se poate spune că analizorul auditiv recepționează și transmite informația.

În cele ce urmează, din sistemul auditiv integral ne vom referi la structura și procesele fizice care au loc în ureche.

Urechea este organul folosit pentru detectarea și procesarea preventivă a sunetului. Ea este alcătuită din trei compartimente: **urechea externă**, **urechea medie** și **urechea internă** (fig. 20.5).

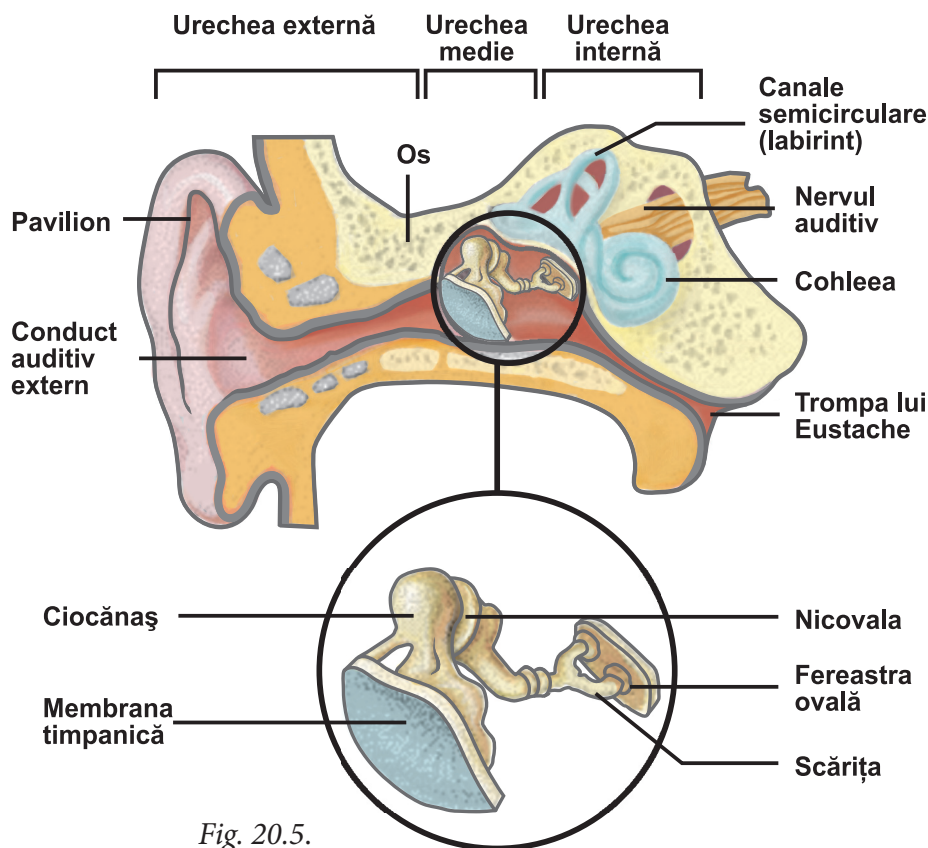


Fig. 20.5.

Urechea externă e formată din **pavilion**, care captează undele sonore incidente, **canal auditiv**, care conduce energia sonică spre urechea medie.

În canalul auditiv are loc **prima amplificare** a sunetului datorită fenomenului de **rezonanță**. Trecând prin canalul auditiv, undele sonore pun în mișcare oscilatorie membrana timpanică aflată pe intrarea urechii medii.

Urechea medie este o cavitate ($15 \times 5 \times 2$ mm) în care se află trei oscioare, fiecare dintre ele cu o formă caracteristică: **ciocănaș**, **nicovală**, **scăriță**.

Vibrațiile membranei timpanice se transmit mai întâi la ciocănaș, apoi la nicovală și scăriță, iar de acolo – la **fereastra ovală**, *situată la limita dintre urechea medie și cea internă*.

Oscioarele funcționează ca o pârghie ce micșorează amplitudinea mișcării, măbind forța. Prin aceasta se realizează **a doua amplificare** a sunetului.

Spațiul urechii medii comunică cu cavitatea nazală (faringe) prin **trompa Eustache**. În mod normal, această legătură este închisă. Dacă omul ajunge într-un mediu cu altitudine înaltă sau se scufundă în apă, între urechea medie și mediul înconjurător se produce o diferență de presiune. Aceasta produce dureri, iar la o diferență de presiune relativ mare timpanul este expus riscului de a se sparge. Aceste momente pot fi evitate folosind una dintre funcțiile *trompei lui Eustache*, care se deschide pentru un timp scurt, când se înghite, și astfel se produce o echilibrare a presiunilor.

Fereastra ovală și **fereastra rotundă** despart urechea medie de urechea internă. Fereastra ovală este de 14–20 de ori mai mică decât timpanul, ceea ce produce o amplificare suplimentară a presiunii acustice, egală cu raportul dintre suprafețe.

Urechea internă cuprinde organul de auz (**cohleea**) și **aparatur vestibular**, care este un organ de orientare spațială și de menținere a echilibrului, format din **trei canale semicirculare și vestibul**.

Cohleea este o cavitate umplută cu endolimfă, lichid care recepționează undele sonore transmise prin urechea externă și cea medie. Cohleea are o formă spiralată și conține membrana bazilară, a cărei rezonanță este diferită pe lungimea sa, depinzând de frecvența undelor sonore.

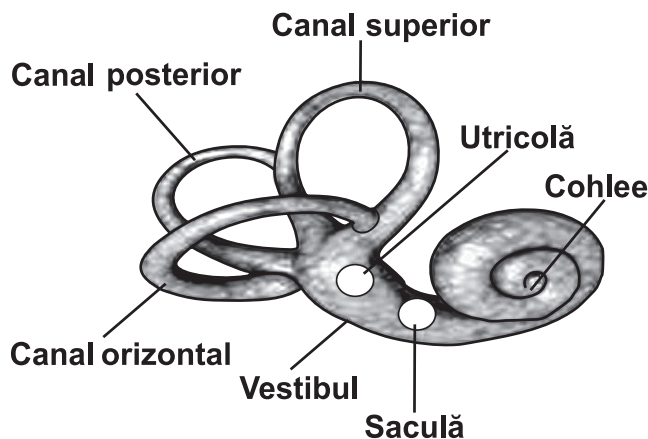


Fig. 20.6. Structura urechii interne.

Altfel spus, în urechea internă are loc o analiză **Fourier** a sunetelor recepționate. La suprafața membranei bazilare se află un strat celular cunoscut sub numele de **organul lui Corti**, format din **celule senzoriale (cili)**. Vibrațiile care trec prin canalul cohlear pun în mișcare **membrana bazilară** și cea **tectorială**, ce acționează asupra cililor. În aceste celule senzoriale are loc **codificarea oscilațiilor mecanice în potențiale electrice de acțiune** transmise către creier, unde acestea din urmă sunt transformate în **senzații auditive**.

Din cele expuse anterior rezultă că prelucrarea sunetelor în analizorul auditiv se realizează în două etape:

1) captarea sunetelor și prelucrarea lor cu menținerea caracterului de oscilații mecanice;

2) codificarea oscilațiilor mecanice în biopotențiale electrice de acțiune de către celulele senzoriale, apoi prelucrarea lor neuronală care conduce la senzația auditivă.

Orientarea spațială și menținerea echilibrului se realizează cu ajutorul **labirintului membranos**, un rol esențial revenându-le **canalelor semicirculare**. Modificările de gravitație și de accelerație ale corpului determină modificări în dinamica lichidelor din cele trei canale semicirculare, care, la rândul lor, acționează asupra cililor celulelor senzitive prezente atât în canalele semicirculare, cât și în utriculă și saculă. Apoi, informațiile sunt transmise, prin intermediul nervului vestibular, cerebelului, care le transformă în cunoștințe privind poziția corpului față de direcția accelerației gravitaționale și apoi în decizii de acțiune pentru păstrarea echilibrului.

20.3. FENOMENE SUBIECTIVE ALE AUDITIVITĂȚII

Analizorul auditiv realizează corespondența dintre lumea acustică fizică și lumea sonoră **perceptuală**.

1. **Înălțimea tonală** are drept corespondent fizic (obiectiv) **frecvența fundamentală a semnalului acustic**. Sunetele joase au frecvențe mici, iar cele înalte – frecvențe mari.

2. **Tăria sonoră** are drept corespondent obiectiv **nivelul acustic**.

Sensibilitatea urechii nu e constantă în întregul domeniu al frecvențelor audibile. Ea este maximă între 2000 și 5000 Hz și descrește pentru frecvențe mai mici și mai mari (*fig. 20.7*).

Pentru a ține seama de sensibilitatea diferită a urechii în funcție de frecvență, a fost necesară introducerea unei unități de măsură a tăriei sonore (**fonul**). Drept referință se ia intensitatea minimă a unui sunet audibil de urechea normală la

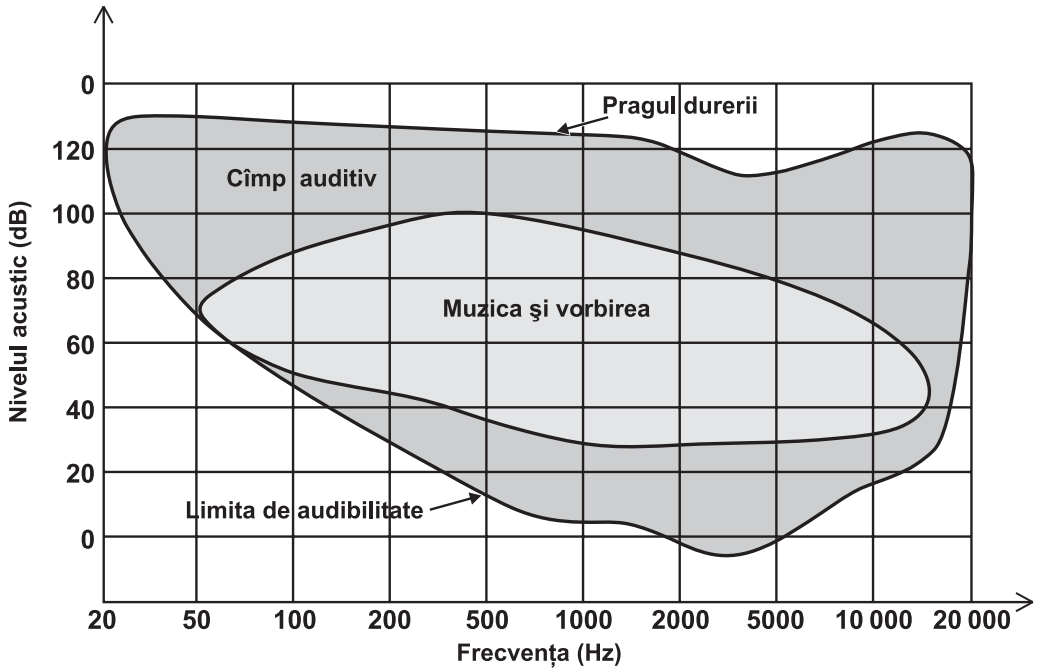


Fig. 20.7.

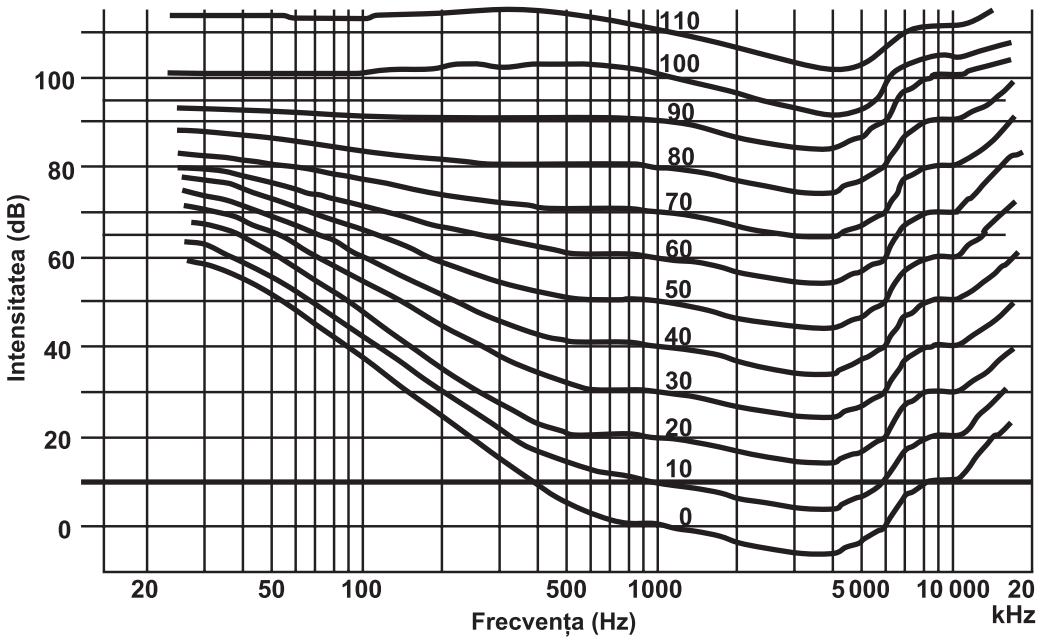


Fig. 20.8.

frecvența respectivă. În felul acesta, pragul de audibilitate pentru urechea normală este de **0 foni** la orice frecvență. La frecvența de 1000 Hz, 1 fon = 1 dB numai prin convenție.

În figura 20.8 sunt trasate curbele de egală tărie sonoră (izosonice) în funcție de frecvență și corespondența fon–dB. Așa cum se observă și din desen, cercetările recente au arătat că pragul de audibilitate (0 foni) corespunde cu 0 dB la 2000 și la 5000 Hz, la 1000 Hz fiind de +4 dB. Prin convenție se păstrează totuși echivalența fon–dB și la 1000 Hz.

3. **Timbrul** este o caracteristică deosebit de complexă a percepției sonore, fiind expresia subiectivă a mai multor caracteristici fizice ale sunetului, și anume:

- compoziția spectrală a sunetului;
- evoluția intensității la formare și la stingere.

EXERCIȚII

1. Punctul, situat la distanța (l) de 0,5 m de la sursa oscilațiilor, în momentul $t = \frac{T}{3}$ are elongația $x = \frac{A}{2}$. Determinați lungimea de undă, cunoscând că $\varphi_0 = 0$.

Răspuns: 2 m.

2. Diferența distanțelor a două puncte de la sursa undei (Δl) este de 50 cm. Viteza undei – $C = 50$ m/s; perioada oscilațiilor – $T = 0,05$ s. Determinați diferența de fază pentru oscilațiile acestor puncte.

Răspuns: $0,4\pi$.

3. Diferența de drum a undelor sonore care pătrund în ureche (Δl) este de 1 cm. Determinați diferența de fază dintre ambele senzații auditive pentru tonul cu frecvență $\nu = 1000$ Hz.

Răspuns: $\frac{\pi}{17}$.

4. Determinați valoarea medie a forței care acționează asupra timpanului omului ($S = 66$ mm²) în cazul pragului dureros pentru frecvența sunetului de 1000 Hz.

Răspuns: $\approx 6,17$ mN.

5. Cu cât va crește tăria sunetului, dacă intensitatea lui s-a mărit de la pragul auditiv de 1000 ori? Rezolvați exercițiul pentru sunetul cu frecvența: a) 100 Hz; b) 1000 Hz.

Răspuns: cu 45 foni și cu 30 foni.

6. Două sunete cu frecvențe egale ($\nu = 1$ kHz) diferă prin tărie cu 20 foni. De câte ori diferă intensitatea acestor sunete?

Răspuns: de 100 ori.

7. Într-o secție de producție s-a stabilit tăria limită a zgomotului de 70 foni. Considerând frecvența zgomotului $\nu = 1$ kHz, determinați valoarea maximă admisibilă a intensității sonore.

Răspuns: $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

8. Ruperea timpanului are loc la nivelul acustic $N = 150$ dB. În acest caz care va fi intensitatea sunetului?

Răspuns: $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

9. O sursă emite sunet de 50 dB. Care va fi nivelul acustic de la două surse identice?

Răspuns: 53 dB.

10. 3 sunete de 20 dB absolut identice se suprapun. Care este nivelul acustic al sunetului rezultat?

Răspuns: 24,77 dB.

11. Dacă pragul auditiv dureros corespunde unui sunet de 120 dB cu frecvența de 1000 Hz, care este intensitatea acestui sunet?

Răspuns: $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

12. Un sunet de frecvența 1000 Hz și intensitatea (I_1) de $10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ este emis simultan cu un sunet de frecvență 2000 Hz și intensitatea (I_2) de $10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Determinați nivelul acustic al sunetului rezultat.

Răspuns: ≈ 80 dB.

13. Considerăm două sunete de aceeași intensitate acustică: $I = 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Unul are frecvența de 200 Hz, celălalt – de 600 Hz. Care va fi nivelul acustic la emisia simultană a acestor sunete?

Răspuns: ≈ 103 dB.

14. Două sunete de aceeași frecvență diferă după nivelul acustic cu 30 dB. Determinați raportul dintre amplitudinile presiunii acustice.

Răspuns: $\frac{p_1}{p_2} = 32$.

21. ANALIZORUL VIZUAL

21.1. OCHIUL CA INSTRUMENT OPTIC

Analizorul vizual este un sistem biologic sensibil la radiația electromagnetică, din domeniul cu lungimi de undă cuprinse în limitele 400–750 nm, prin care organismul uman primește informații despre forma, dimensiunile, poziția, mișcarea, luminozitatea și culoarea obiectelor ambianței. În același timp, el este un organ de expresie a stărilor psihice (emițător de informație).

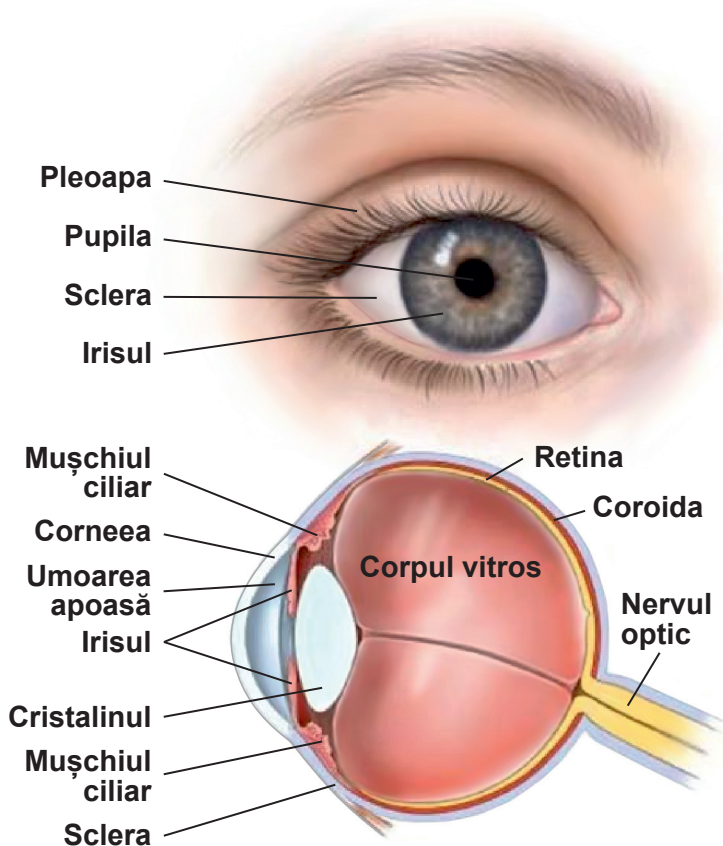


Fig. 21.1.

Componenta optică a analizorului vizual este **ochiul**, care reprezintă un sistem optic centrat (fig. 21.1), format din 4 medii transparente: **corneea**, **umoarea apoasă**, **cristalinul** și **umoarea sticloasă** cu indicele de refracție (n) diferit:

corneea și umoarea apoasă au $n = 1,337$, cristalinul are indicele de refracție variabil, între 1,375 și 1,473, umoarea sticloasă are $n = 1,336$.

Este cunoscut faptul că puterea optică (convergența) lentilelor sferice reprezintă mărimea inversă a distanței focale:

$$D = \pm \frac{1}{f} m^{-1} \text{ (dioptrii).}$$

Prezintă interes modalitatea de determinare a convergenței unui dioptru sferic (fig. 21.2) cu indicele de refracție (n) situat în aer ($n = 1$), din motivul că un astfel de dioptru este și **corneea** ochiului. În acest scop se folosește relația:

$$D = \frac{n - 1}{R},$$

unde: $R = \overline{SC}$ este raza de curbură a dioptrului, exprimată în metri.

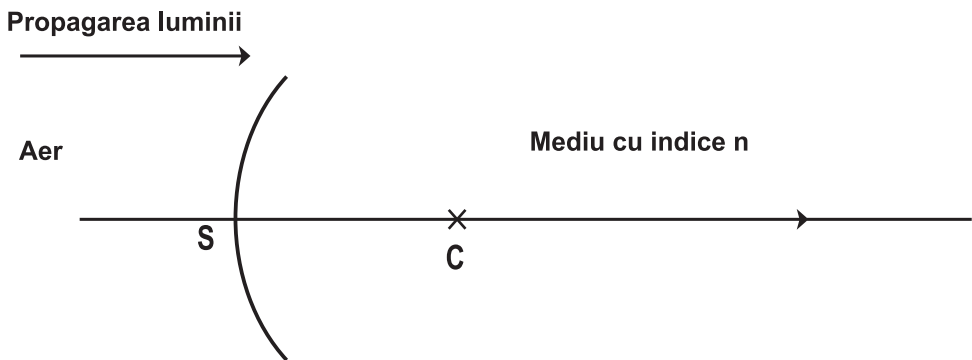


Fig. 21.2.

Folosind această relație, se determină convergența corneei, pentru care raza de curbură $R \approx 7,9$ mm:

$$D_{cor} = \frac{1,337 - 1}{7,9 \cdot 10^{-3} m} = \frac{0,337 \cdot 10^3}{7,9 m} = 42,13 \cdot m^{-1}.$$

21.2. OCHIUL REDUS

În diverse cercetări ochiul normal se înlocuiește cu un model simplificat, numit **ochi redus**. În el, ansamblul dioptrilor sferice oculare este reprezentat printr-un dioptru unic (fig. 21.3).

Acesta reprezintă o schemă optică simplificată a ochiului, care permite studiarea funcționalității ochiului normal, numit **emetrop**, și a ochiului patologic, numit **ametrop**, cu referire la ochi ca sistem optic.

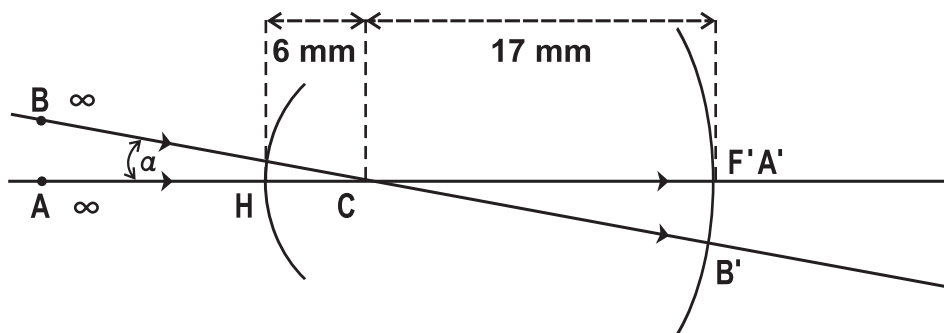


Fig. 21.3.

Convergența sistemului este de aproximativ 60 de dioptrii. Distanța dintre centrul optic și retină e de circa 17 mm; deci, diametrul globului ocular e de aproximativ 23 mm.

Retina e plasată în planul focal. Refracția razelor de lumină se realizează numai la suprafața de separație dintre aer și dioptrul ocular.

Unghiul a sub care se vede obiectul se numește **diametru aparent**.

21.3. ACUITATEA VIZUALĂ

Diametrul aparent limită, sub care imaginile celor două puncte nu se suprapun, poartă numele de **distanță separatoare minimă** (în minute de arc).

Inversul distanței separatoare minime definește **puterea de rezoluție** sau **acuitatea vizuală**. Ca unitate de **acuitate** se ia acuitatea unui ochi care vede separate două puncte, ale căror raze fac între ele un unghi de un minut. Un ochi care separă numai două puncte ale căror raze formează un unghi de 10 minute are o acuitate vizuală egală cu $0,1 \text{ min}^{-1}$.

Ochiul poate vedea separate două puncte atunci când imaginile lor formate pe retină se află la o distanță de cel puțin $4,5 \mu\text{m}$ una de alta, fiindcă ele sunt separate numai dacă se formează pe două elemente diferite ale retinei, care au cam această mărime. Calculul arată că în realitate distanța dintre cele două puncte trebuie să fie de cel puțin 60 mm, când ele se află la distanța minimă de vedere distinctă (25 cm).

Acuitatea vizuală variază cu vârsta: maximul ei este atins la băieți la 14 ani și la fete la 12 ani. În afară de vârstă, acuitatea vizuală depinde și de:

- factorii dioptrici, cum ar fi aberația de sfericitate și cromatică, ametropiile, diametrul pupilar și altele;
- factorii retinieni, care sunt legați de structura discontinuă granulară a retinei, centrul petei ce reprezintă imaginea trebuind să se găsească pe celule receptoare distincte;

– factori privind sistemul: forma detaliului, contrastul de luminozitate, timpul de expunere, compoziția cromatică (lumina monocromatică mărește acuitatea vizuală prin eliminarea aberațiilor cromatice).

Pentru a mări puterea separatoare a ochiului, trebuie să-l ajutăm cu diferite instrumente optice.

Diminuarea acuității vizuale se numește **ambliopie**.

21.4. ACOMODAREA PENTRU FORMAREA IMAGINILOR CLARE

Pentru ca imaginea unui obiect să fie percepută clar, ea trebuie să se formeze pe retină. **Acomodarea** pentru formarea imaginilor clare se realizează prin **modificarea curburii cristalinului**.

Cristalinul are formă de lentilă biconvexă cu razele de curbura în stare neacomodată: $R_1 = 10 \text{ mm}$ și $R_2 = 6 \text{ mm}$.

Cristalinul e înconjurat de un ligament circular, numit **zonula lui Zinn**. Inserată pe zonulă se află **musculatura ciliară**, formată din fibre **circulare** și **radiare**. Când se contractă fibrele circulare, zonula lui Zinn se relaxează și cristalinul manifestă tendința spontană de a se **bomba**, mărindu-și puterea optică (imagine spre anterior). Când se contractă fibrele radiare, zonula lui Zinn e pusă sub tensiune, cristalinul se aplatizează și își micșorează convergența (imagine spre posterior).

Modificarea convergenței cristalinului se realizează printr-un proces de legătură inversă negativă. Trebuie menționat că mușchii ciliari sunt cei mai rapizi din organism.

Puterea de acomodare scade cu vârstă, ducând la **presbitism**.

21.5. AMETROPIILE ȘI CORECȚIA LOR

Defectele de formare a imaginii se numesc **ametropii**. **Punctum proximum** (m) e punctul cel mai apropiat de pe axa optică principală, în care un obiect se vede clar, cu acomodare maximă. **Punctum remotum** (M) este punctul cel mai îndepărtat în care obiectul poate fi văzut clar, fără acomodare. Pentru ochiul emetrop $m = 25 \text{ cm}$, iar $M = \infty$.

Miopia

Punctum proximum și **punctum remotum** sunt mai mici decât normal (*fig. 21.4 a*). **Miopia axială** este cea mai frecventă și, în general, organică. Axul antero-posterior al ochiului e mai lung.

Miopia de curbură. Curbura cristalinului, mai frecvent cea posterioară, e mai mare, legată de oboșeala oculară.

Miopia de indice. Indicele de refracție crește datorită măririi concentrației saline a mediilor refringente.

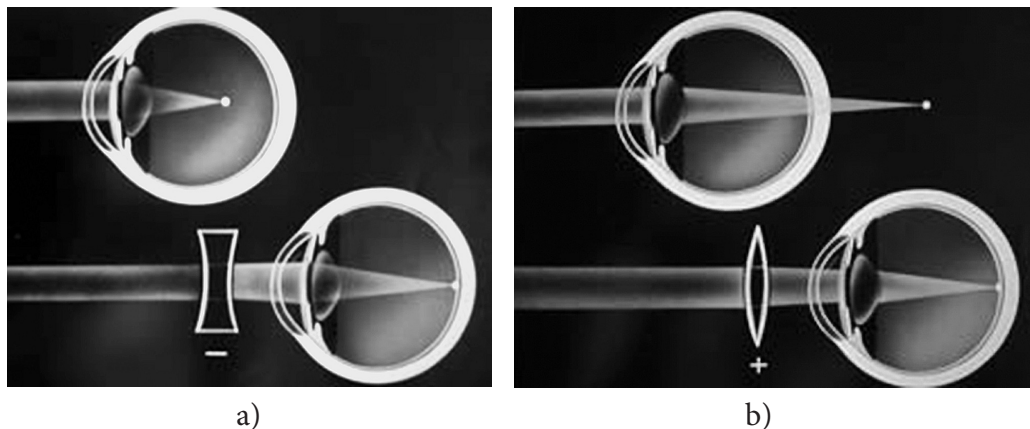


Fig. 21.4.

Hipermetropia

Punctum **proximum** și punctum **remotum** sunt mai mari decât normal. Imaginea se formează în spatele retinei (fig. 21.4 b).

Hipermetropia axială. Axul antero-posterior e mai scurt.

Hipermetropia de curbură. Cristalinul e mai alungit, deci are o convergență mai mică.

Hipermetropia de indice: n scade datorită micșorării concentrației saline. E mai mult o abstracție decât o realitate practică.

Presbitismul – hipermetropia bătrânilor (micșorarea capacității de acomodare).

Astigmatismul

Are loc atunci când razele de curbură, și implicit distanțele focale, nu sunt egale de la un meridian la altul al dioptrilor oculare (în special în corne).

În cazul când raza de curbură variază de la un meridian la altul în mod monoton și continuu, **astigmatismul** se numește **regular** (fig. 21.5).

Astigmatismul iregular are loc numai atunci când raza de curbură variază neregulat și întâmplător de la un meridian la altul. Astigmatismul este însoțit deseori și de o altă ametropie.

Corijarea ametropiilor se face:

– cu lentile **divergente** pentru **miopie**;

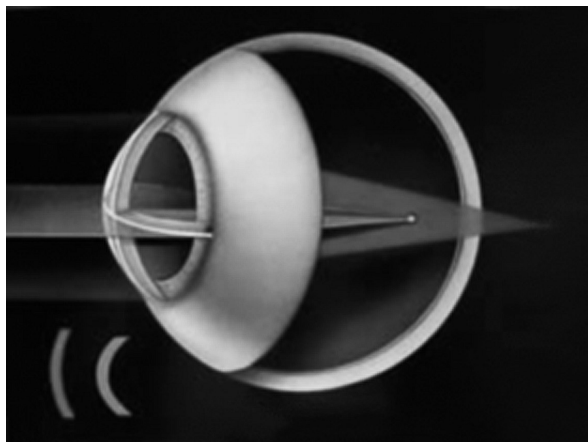


Fig. 21.5.

- cu lentile **convergente** pentru **hipermetropie**;
- cu lentile **cilindrice** pentru **astigmatismul regular**.

Astigmatismul iregular este o problemă foarte complicată: până nu demult era corectat cu **lentile de contact individuale**.

Cataracta

Este consecința modificării transparenței cristalinului. Necesită intervenție chirurgicală.

Utilizarea laserelor în corectarea ametropiilor

Prima intervenție pe ochiul uman a radiației s-a realizat în 1988 în Germania și s-a numit **PRK** (keratectomie fotoreactivă). Această metodă este perfecționată încontinuu, pentru corijarea miopiei, hipermetropiei și astigmatismului. O altă tehnică, numită **LASIC** (*laser assisted in situ keratomileusis*), este mai eficace în viciile de refracție severe. Fiind complet nedureroasă, are un efect spectaculos: după câteva ore de la operație, pacientul este complet refăcut. În esență, în timpul unei intervenții, raza laser, ghidată de computer, șlefuieste corneea, modelându-i curbura acesteia, în funcție de tipul și gradul viciului de refracție. Cu o precizie extraordinară, laserul înlătură straturi ultrasubțiri de țesut. În cazul miopiei, de exemplu, laserul scurtează axul ochiului, aplatizând corneea; în cel al hipermetropiei, laserul îl alungește, îndepărtând țesutul de la periferie. În astigmatismul regular, se îndepărtează o suprafață eliptică dintr-un anumit meridian al corneei.

Terapia laser se folosește în decolarea retinei, deoarece fasciculul laser cu CO₂ poate străbate mediile transparente ale ochiului fără a fi absorbit de acestea, întreaga lui energie fiind cedată retinei, care se lipește de sclerotică prin fotocoagulare.

Laserul este utilizat și în tratamentul glaucomului, permițând refacerea sistemului de drenaj al lichidului intraocular și diminuând astfel tensiunea intraoculară (fig. 21.6).

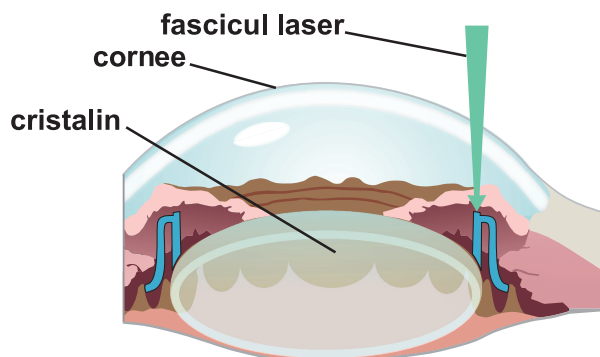


Fig. 21.6. Intervenție cu laser pentru refacerea sistemului de drenaj.

21.6. BAZELE BIOFIZICE ALE SENZAȚIEI VIZUALE. MECANISMUL VEDERII COLORATE

Structura retinei

Retina are o grosime de 350 μm și este alcătuită din 6 tipuri de celule, dispuse în structuri succesive, fiecare îndeplinind un anumit rol (fig. 21.7). Ultimele în calea luminii sunt **celulele epiteliului pigmentar**, urmate de **celulele fotoreceptoare**

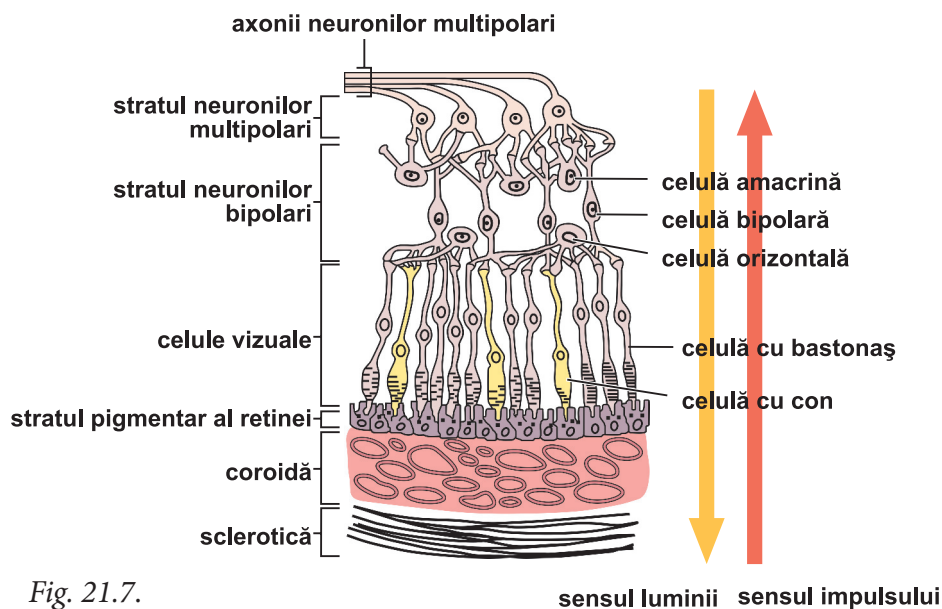


Fig. 21.7.

cu **conuri și bastonașe** care conțin pigmenți fotosensibili. Fotoreceptorii sunt distribuiți neuniform în retină, în zona nervului optic sunt absenți și de aceea zona este numită **pata oarbă**.

Sensibilitatea ochiului

Fotometria constă în aprecierea nivelului de luminozitate de către ochi ca receptor selectiv. Reacția ochiului variază nu doar la fluxul energetic de la sursa de lumină, ci și la lungimea de undă a radiației.

Celulele retiniene sensibile la lumină, **bastonașele** și **conurile**, îndeplinesc roluri diferite în realizarea senzațiilor de lumină. Bastonașele sunt mai sensibile la lumină, însă nu disting culorile. Ele asigură vederea **scotopică** (gr. **scotos** – *întuneric*) la lumina slabă necolorată (alb-negru).

Conurile asigură vederea **fotopică** (gr. **fotos** – *lumină*) la lumină puternică și vedere colorată; ele au o sensibilitate mai scăzută decât cea a bastonașelor.

La o luminozitate suficientă a obiectului, conurile sunt sensibile la aprecierea elementelor imaginii. De aceea, puterea de rezoluție a ochiului depinde de repar-tizarea conurilor pe retină.

Mărimea inversă luminozității de prag (luminozitatea minimă, care provoacă senzație vizuală) se numește **sensibilitatea ochiului**.

Sensibilitatea ochiului variază în limite largi, datorită adaptării vizuale care se realizează prin câteva moduri: prin variația diametrului pupilei; prin micșorarea concentrației pigmentilor sensibili la lumină; prin ecranarea conurilor și bastonașelor printr-un pigment întunecat; prin variația în funcție de luminozitatea

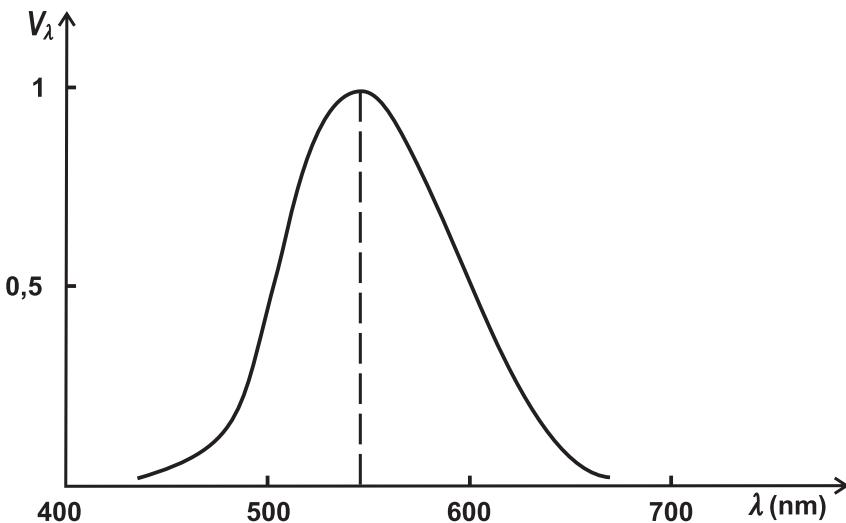


Fig. 21.8.

obiectului și a gradului de participare a celulelor receptoare la excitarea senzației vizuale.

Adaptarea îi permite ochiului să funcționeze normal în intervalul luminozității de la 10^{-7} până la 10^5 lx.

Sensibilitatea spectrală a ochiului se caracterizează prin coeficientul de eficacitate a luminii (V_λ), care variază de la 0, pentru lungimile de undă invizibile, până la 1, pentru lungimea de undă $\lambda_m = 555$ nm, pentru care sensibilitatea ochiului este maximă (fig. 21.8).

Maximul curbei de sensibilitate a vederii ftopice corespunde cu densitatea spectrală maximă a radiației solare care străbate atmosfera, ajungând pe suprafața Pământului. Prin aceasta și se manifestă raționalitatea structurii ochiului uman.

La vederea scotică, maximul curbei de sensibilitate, în raport cu vederea ftopică, este deplasat și corespunde lungimii de undă $\lambda = 510$ nm (fig. 21.9).

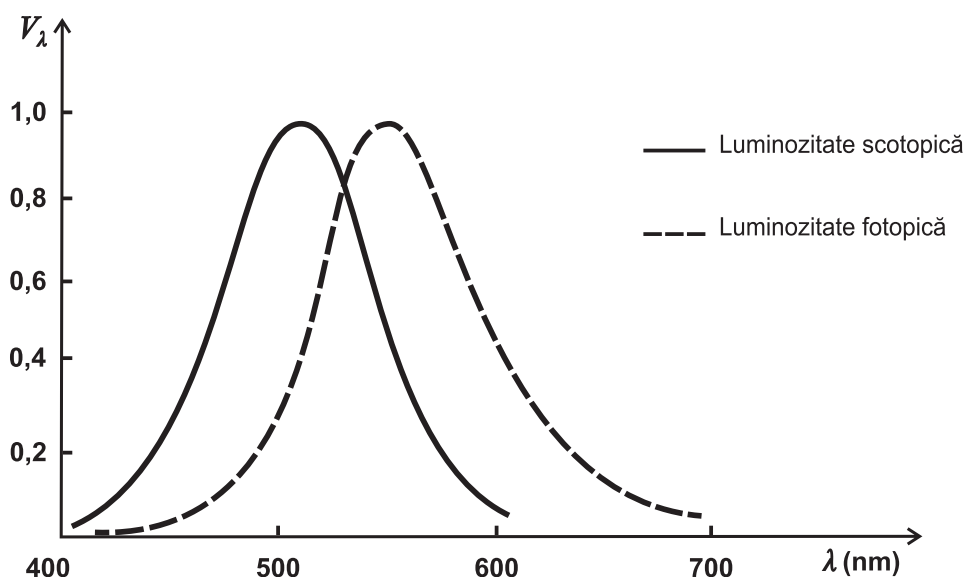


Fig. 21.9.

Mecanismul vederii colorate

Cu referire la vederea culorilor (vederea colorată) au fost elaborate mai multe teorii. Dintre ele sunt de menționat **teoria tricromatică** și **teoria culorii opuse**. Prima a fost elaborată la începutul secolului XIX de către **Thomas Young**, având la bază presupunerea existenței a trei culori fundamentale: **roșu, verde și albastru**.

Cu 50 de ani mai târziu, **James Clerk Maxwell** și, independent de el, **Hermann von Helmholtz** au demonstrat că toate culorile pe care le vedem pot fi obținute

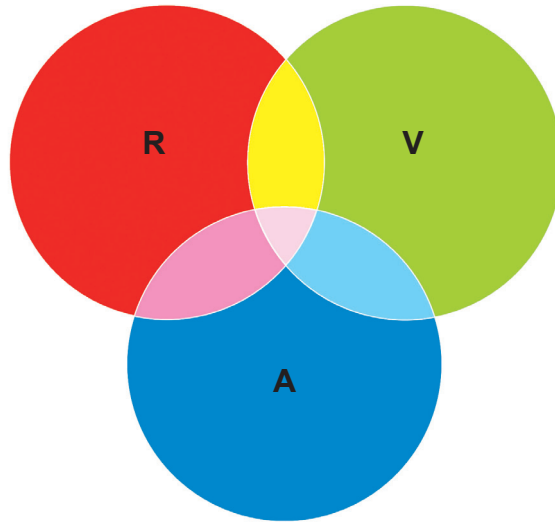


Fig. 21.10.

prin mixajul, în diferite proporții, a trei lungimi de undă alese în mod convenabil din domeniile respective ale culorilor primare: roșu, verde și albastru (fig. 21.10).

Această demonstrație a fost o confirmare în favoarea teoriei tricromatice.

Matematic, orice culoare (C) se poate exprima ca o combinație liniară a celor trei culori primare: R (roșu), V (verde) și A (albastru):

$$C = xR + yV + zA,$$

în care: x , y și z poartă numele de **coeficienți cromatici** și reprezintă proporția culorii primare în culoarea C. Ei pot lua valori pozitive sau nule. O anumită senzație de culoare se poate obține din combinarea unor radiații de lungimi de undă diferite. Exemplu: într-un anumit raport, amestecul de radiații galbene și albastre reproduce culoarea verde.

Există anumite reguli de combinare a culorilor, și anume:

- dacă două semnale, C și C^I, au aceeași culoare (C = C^I), atunci, suprapunând peste ele un al treilea semnal (C^{II}), se obțin tot culori identice (C + C^{II} = C^I + C^{II});
- dacă se mărește intensitatea fiecărei culori primare în același raport, coeficienții cromatici se multiplică în același număr de ori (nC , nC^I , nC^{II}), culoarea rezultantă fiind aceeași cu cea inițială, dar cu o strălucire (intensitate) mai mare.

În baza celor expuse mai sus, menționăm: **culoarea este o caracteristică a percepției vizuale, și nu o caracteristică fizică a semnalului luminos**. Doi stimuli cu o percepție vizuală identică (au aceeași culoare) pot avea o caracteristică spectrală diferită.

Ulterior, teoria tricromatică a fost confirmată experimental prin metode fotochimice și electrofiziologice.

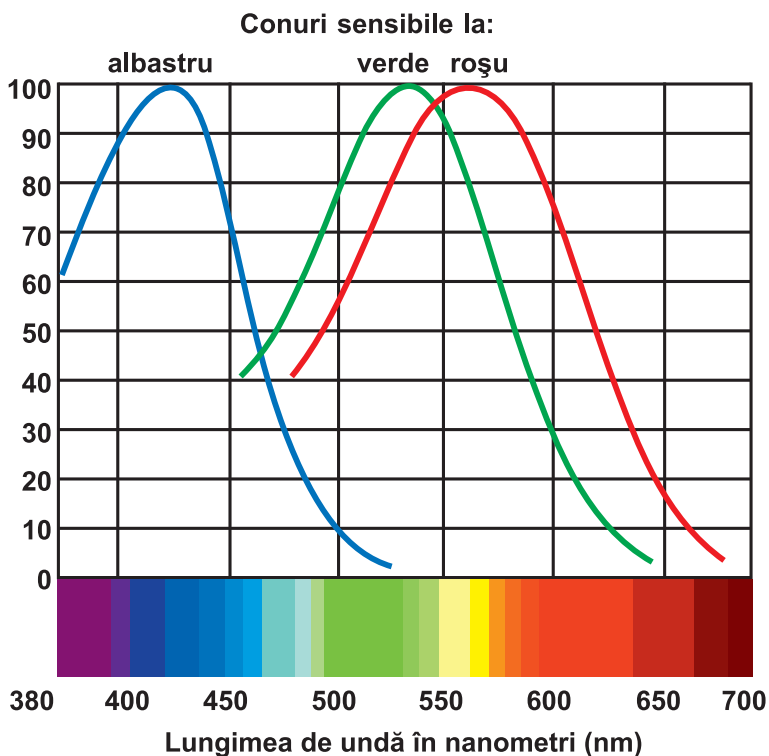


Fig. 21.11.

În anul 1964, **Preston Nichols**, **Frederick Hopkins** și **George Wald** au scos în evidență existența în retina umană a trei pigmenți, având maxime de absorbție la **420 nm (albastru)**, **530 nm (verde)** și **565 nm (roșu)** (fig. 21.11). Fiecare con cuprinde unul din acești trei pigmenți; deci, există trei tipuri de conuri.

Senzația de negru o dă lipsa de lumină, însă prezența retinei este absolut necesară. Prin urmare, și senzația de culoare neagră este legată de o anumită activitate retiniană, posibil sub acțiunea radiațiilor invizibile.

Cea de a doua teorie, menționată la început, aparține lui **Eswald Hering** și este mai puțin recunoscută. Conform acestei teorii, se disting trei perechi de culori opuse: roșu și verde, galben și albastru, alb și negru. În retina, pentru fiecare pereche de culori există substanțe speciale. Sub acțiunea luminii, are loc distrugerea acestor substanțe (**disimilația**), iar la întuneric – restabilirea (**asimilația**). Diferite combinații ale proceselor de disimilație și asimilație creează diversitatea senzațiilor de culori.

Rezultatele obținute prin cele mai moderne metode au confirmat că **teoria tricromatică** are valabilitate la nivelul fotoreceptorilor, iar cea a **culorii opuse** – în transmiterea informațiilor.

Daltonismul. Context medical

Daltonismul, denumit științific **cecitate cromatică**, este o stare patologică, o tulburare a vederii cromatice, constând în incapacitatea de a deosebi unele culori de altele (mai ales **roșul** de **verde**), deoarece fie receptorul responsabil pentru culoarea verde, fie cel pentru culoarea roșie nu funcționează deloc și astfel persoanele văd în negru sau gri. Cecitatea pentru roșu se numește **protanopie**, iar cecitatea pentru verde – **deuteranopie**. Aceste forme de cecitate exprimă faptul că persoanele respective confundă roșul cu verdele și chiar cu alte culori de aceeași strălucire sau saturație, cum ar fi albastrul sau cenușiul.

Pentru investigarea tulburărilor cromatice se folosesc planșe pseudoizocromatice stilling, ishihara sau atlasul polack.

Aceste probe sunt alcătuite din planșe pe care sunt prezentate, prin cercele de mărimi, culori și nuanțe, diferite cifre, litere sau figuri. Subiectului i se prezintă pe rând aceste planșe și i se cere să identifice cifra, litera sau semnul imprimat. Aceste planșe sunt astfel realizate, încât **ochiul** normal le poate citi clar, în timp ce persoanele care suferă de cecitate cromatică identifică cifrele, literele sau semnele cu greutate, incorect sau deloc. Daltonismul este o boală congenitală, cauzată de o defecțiune a retinei sau a unei porțiuni din nervul optic. Deși boala este moștenită pe linie maternă, de daltonism suferă în special bărbații.

EXERCITII

1. Limita de sus a fluxului de lumină care pătrunde în ochiul omului și nu produce durere este de $2 \cdot 10^{-5}$ W. Determinați numărul fotonilor care în acest caz pătrund în ochi, dacă lungimea de undă a radiației este de 555 nm.

Răspuns: $55,8 \cdot 10^{12}$ fotoni.

2. Senzația vizuală la om apare când energia radiației luminoase ce pătrunde în ochi este de $2 \cdot 10^{-13}$ J. Câți fotoni cu lungimea de undă de 700 nm trebuie să pătrundă concomitent în ochi pentru a produce senzație vizuală?

Răspuns: $0,7 \cdot 10^6$ fotoni.

3. La ce distanță de obiect trebuie plasată o lupă cu distanța focală $f = 10$ cm pentru a obține un grosimet egal cu 10?

Răspuns: 9 cm.

4. Un ochi are punctul proximum situat la 1,5 m. Determinați puterea optică a lentilei, care îi va permite să vadă clar un obiect la distanța de 25 cm.

Răspuns: $+3,33 \text{ m}^{-1}$.

5. Care trebuie să fie convergența unei lupe, pentru a permite observarea unui obiect de $12,5 \mu\text{m}$ sub un unghi de $5,8 \cdot 10^{-4}$ radiani?

Răspuns: 46,4 dioptrii.

6. După operația de cataractă, pentru corijarea la infinit se folosește o lunetă de 15 dioptrii. Calculați distanța focală a unei lunete de corijarea necesară, pentru ca bolnavul să poată citi un text plasat la distanța de 30 cm.

Răspuns: 5,45 cm.

BIBLIOGRAFIE

Croitoru D. *Experiment demonstrativ de fizică*. F.E.-P. „Tipografia centrală”, Chișinău, 1997.

Croitoru D., Aramă E. *Biofizica medicală*. Centru Tehnologii Informaționale al FJSC, Chișinău, 1999.

Croitoru D. și colab. *Teste de fizică*. C.E.P. „Medicina”, Chișinău, 2003.

Davidovits P. *Physics in medicine and Biology*. Harcourt Academic Press-2001 (second edition), USA.

Dimoftache C., Herman S. *Biofizica medicală*. Editura „Cerma”, București, 1996.

Dragomirescu E., Enache L. *Biofizică*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1993.

Diana Ionescu, Jean Vinersan. *Biofizică medicală*. Editura Universitară „Carol Davila”, București, 2008.

Jacques Rene Magne, Rose-Marie Magne-Marty. *Biophysique /Physico – chimie/ Physique*. Edition Marketing. Editeur de preparations grades Ecoles Medecine, Paris.

Mihăilescu D., Flonta Maria-Luiza, Movileanu L. *Probleme de biofizică*. Editura Universității din București, 1997.

Monica Neagu ș.a. *Lucrări practice de Biofizică*. Editura „Eurobit”, Timișoara, 2007.

M. Ghomi, B. Hernandez. *Physique Biophysique*, V-I Ed. Maloine. UE 3. 2012.

S. Damjanovich, J. Fidy, J. Szollosi. *Medical Biophysics*. Editura „Medicina”, Budapest, 2009.

Nagy I. *Fizica farmaceutică*. Editura „Eurobit”, Timișoara, 1990.

Osiac E. *Biofizică medicală. Note de curs*. Editura Medicală Universitară, Craiova, 2007.

Popescu A. *Fundamentele biofizicii medicale*. Vol. I. Editura ALL, București, 1994.

Popescu A. *Fundamentele biofizicii medicale*. Vol. II. Editura ALL, București, 2000.

Тарьян И. *Физика для врачей и биологов*. Budapest, 1969.

Корнеев Ю. и др. *Медицинская и биологическая физика*. Издательство „Медицинская книга”, Москва, 2001.

Омельченко В. и др. *Тестовые задания по медицинской и биологической физике*. ГОУ ВУНМЦ МЗ РФ, Москва, 2001.

Ремизов А., Максина А. *Сборник задач по медицинской и биологической физике*. Издательство „Дрофа”, Москва, 2001.

D. Croitoru, V. Vovc, R. Croitor, I. Hotineanu. *Biofizica medicală*. „Digital Hardware”, Chișinău, 2010.

CUPRINS

| | |
|--|----|
| Prefață | 3 |
| 1. Structura materiei. Atomul lui Bohr | |
| 1.1. Noțiuni generale | 5 |
| 1.2. Atomul lui Bohr | 7 |
| 1.3. Numere cuantice | 11 |
| 1.4. Concluzie | 13 |
| Exerciții | 13 |
| 2. Elemente de biofizică moleculară | |
| 2.1. Forțe și legături interatomice și intermoleculare | 14 |
| 2.2. Transformări de fază. Cristale lichide | 20 |
| 2.3. Macromolecule | 25 |
| Exerciții | 29 |
| 3. Apa. Structură și proprietăți | |
| 3.1. Structura și proprietățile moleculei de apă | 30 |
| 3.2. Unele proprietăți fizice ale apei și rolul lor biologic | 31 |
| 3.3. Rolul biologic și repartiția apei în organism | 34 |
| 3.4. Disocierea apei | 35 |
| 3.5. Apa-grea și apa tritiată | 36 |
| Exerciții | 37 |
| 4. Biofizica sistemelor disperse | |
| 4.1. Definiția și clasificarea sistemelor disperse | 39 |
| 4.2. Concentrația soluțiilor | 40 |
| 4.3. Proprietățile electrice ale soluțiilor ionice | 42 |
| Exerciții | 45 |
| 5. Noțiuni de biomecanică a fluidelor | |
| 5.1. Statica fluidelor. Unități de presiune | 48 |
| 5.2. Dinamica fluidelor | 51 |
| 5.3. Fluide reale. Vâscozitatea | 54 |
| 5.4. Elasticitatea peretelui vascular | 58 |

| | |
|---|-----|
| Exerciții | 60 |
| 6. Elemente de hemodinamică | |
| 6.1. Rolul de pompă al inimii | 63 |
| 6.2. Schema generală a patului vascular | 66 |
| 6.3. Viteza de curgere a sângelui | 67 |
| 6.4. Presiunea arterială | 68 |
| 6.5. Unda pulsatilă | 71 |
| Exerciții | 73 |
| 7. Elemente de termodinamică biologică | |
| 7.1. Noțiuni generale | 73 |
| 7.2. Primul principiu al termodinamicii | 75 |
| 7.3. Circuitul energiei în biosferă | 77 |
| 7.4. Al doilea principiu al termodinamicii | 79 |
| 7.5. Funcții termodinamice | 80 |
| Exerciții | 82 |
| 8. Fenomene moleculare de transport | |
| 8.1. Difuzia simplă. Legile lui Fick | 83 |
| 8.2. Difuzia prin membrane artificiale | 85 |
| 8.3. Difuzia prin membrane celulare. Transportul pasiv simplu | 87 |
| 8.4. Metode fizice în studiul permeabilității membranelor | 94 |
| 8.5. Importanța difuziei gazelor în biologie și medicină | 94 |
| 8.6. Difuzia facilitată | 96 |
| 8.7. Sisteme de transport activ | 97 |
| Exerciții | 99 |
| 9. Potențiale de electrod | |
| 9.1. Oxidare și reducere | 101 |
| 9.2. Potențialul de electrod standard | 104 |
| 9.3. Pila de concentrație | 105 |
| Exerciții | 106 |
| 10. Fenomene bioelectrice | |
| 10.1. Elementul de concentrație a lui Nernst | 107 |
| 10.2. Echilibrul Donnan | 109 |
| 10.3. Potențialul membranelor de repaus | 110 |
| 10.4. Potențialul de acțiune celular | 112 |
| 10.5. Aprecierea cantitativă a excitabilității | 116 |

| | |
|--|-----|
| Exerciții | 118 |
| 11. Radiații electromagnetice. Interacțiunea fotonilor cu materia | |
| 11.1. Unde electromagnetice | 119 |
| 11.2. Efectele interacțiunii fotonilor cu materia | 121 |
| 11.3. Legea de atenuare | 125 |
| Exerciții | 126 |
| 12. Radiația X | |
| 12.1. Producere și emisie. Tubul lui Coolidge | 128 |
| 12.2. Relații fundamentale | 131 |
| 12.3. Metode de difracție cu raze X | 132 |
| 12.4. Radiografia și radiosopia cu raze X | 136 |
| 12.5. Tomografia computerizată | 136 |
| Exerciții | 138 |
| 13. Radiația termică | |
| 13.1. Caracteristicile radiației termice. Legea lui Kirchhoff | 139 |
| 13.2. Legile radiației termice a corpului absolut negru | 141 |
| 13.3. Radiația soarelui | 142 |
| 13.4. Radiațiile infraroșii (IR). Proprietăți și efecte asupra organismelor vii | 144 |
| 13.5. Radiațiile ultraviolete (UV). Proprietăți și efecte asupra organismelor vii | 146 |
| Exerciții | 148 |
| 14. Luminescența | |
| 14.1. Tipuri de luminescență | 149 |
| 14.2. Fotoluminescența. Legea lui Stokes | 149 |
| 14.3. Analiza luminescență (AL) | 152 |
| 14.4. Plasma și fotoluminescența. Utilizări tehnice | 153 |
| 15. Laserele și aplicarea lor în medicină | |
| 15.1. Noțiuni teoretice și fenomene ce stau la baza funcționării laserelor | 155 |
| 15.2. Elementele constructive ale diferitor tipuri de lasere | 159 |
| 15.3. Utilizarea radiației laser în cercetările biofizice și în practica medicală | 162 |
| Exerciții | 164 |
| 16. Proprietățile magnetice ale substanțelor. Rezonanța magnetică | |
| 16.1. Câmpul magnetic. Noțiuni generale | 165 |

| | |
|--|------------|
| 16.2. Momentele magnetice ale electronului | 168 |
| 16.3. Substanțe paramagnetice și diamagnetice | 169 |
| 16.4. Rezonanța magnetică nucleară (RMN) | 170 |
| Exerciții | 175 |
| 17. Stabilitatea nucleelor atomice | |
| 17.1. Forțele nucleare. Defectul de masă și energia de legătură | 177 |
| 17.2. Radioactivitatea | 179 |
| 17.3. Transformările nucleare. Tipurile de radiații nucleare | 179 |
| 17.4. Istorie | 184 |
| 17.5. Legea dezintegrării radioactive | 185 |
| Exerciții | 187 |
| 18. Aparate de detectare. Bazele dozimetriei | |
| 18.1. Principiile de funcționare a detectoarelor de radiații nucleare | 190 |
| 18.2. Dozele de radiații | 193 |
| 18.3. Efectele biologice ale radiațiilor și măsuri de radioprotecție | 195 |
| Exerciții | 196 |
| 19. Acceleratoare de particule. Bazele fizice ale radioterapiei | |
| 19.1. Acceleratoarele de particule | 197 |
| 19.2. Radioterapia | 201 |
| Exerciții | 205 |
| 20. Analizorul auditiv | |
| 20.1. Generalități despre sunete | 206 |
| 20.2. Anatomia și fiziologia urechii | 212 |
| 20.3. Fenomene subiective ale auditivității | 214 |
| Exerciții | 216 |
| 21. Analizorul vizual | |
| 21.1. Ochiul ca instrument optic | 218 |
| 21.2. Ochiul redus | 219 |
| 21.3. Acuitatea vizuală | 220 |
| 21.4. Acomodarea pentru formarea de imaginilor clare | 221 |
| 21.5. Ametropiile și corecția lor | 221 |
| 21.6. Bazele biofizice ale senzației vizuale. Mecanismul vederii colorate | 224 |
| Exerciții | 229 |
| Bibliografie | 231 |

Tipografia „Bons Offices” SRL
MD-2005, Republica Moldova, mun. Chişinău, str. Feredeului 4/6