

Mihai **MARINCIUC** | Ion **NACU**
Spiridon **RUSU** | Ștefan **TIRON**

Fizică

Astronomie

Manual pentru clasa a **XII** -a

CZU 53+52 (075.3)

F 62

Manualul este elaborat conform Curriculumului disciplinar în vigoare, aprobat prin Ordinul ministrului educației (nr. 510 din 13 iunie 2011) și finanțat din *Fondul special pentru manuale*.

Contribuția autorilor:

Mihai Marinciuc – cap. 1 (temele 1.1–1.5), cap. 4–6, 7 (temele 7.1–7.6), cap. 9 (tema 9.1);

Spiridon Rusu – cap. 1 (temele 1.6–1.8), cap. 2, 3, 7 (temele 7.7, 7.8);

Ion Nacu – cap. 8 (temele 8.1–8.3 (a, b, c), 8.4);

Ștefan Tiron – cap. 8 (temele 8.3 (d), 8.5–8.7), cap. 9 (tema 9.2)

Comisia de evaluare: *Viorel Dușciac*, doctor conferențiar, USM; *Tatiana Comerzan*, șefa Centrului metodic DGÎTS Cimișlia, prof. școlar (gr. did. superior); *Ion Albu*, prof. școlar (gr. did. superior), Liceul Teoretic „Mihai Eminescu”, Drochia; *Efim Lungu*, prof. școlar (gr. did. superior), Liceul Teoretic „Mihai Corlăteanu”, Glinjeni, Fălești; *Pavel Stratan*, prof. școlar (gr. did. I), Liceul Teoretic „Onisifor Ghibu”, Orhei

Acest manual este proprietatea Ministerului Educației al Republicii Moldova.

Liceul _____				
Manualul nr. _____				
Anul de folosire	Numele de familie și prenumele elevului	Anul școlar	Aspectul manualului	
			la primire	la restituire
1				
2				
3				
4				
5				

Dirigintele controlează dacă numele elevului este scris corect.

Elevul nu trebuie să facă niciun fel de însemnări în manual.

Aspectul manualului (la primire și restituire) se va aprecia cu calificativele: *nou, bun, satisfăcător, nesatisfăcător*.

Responsabil de ediție: *Larisa Dohotaru*

Redactor: *Mariana Belenciuc*

Corectori: *Maria Cornesco, Tatiana Darii*

Redactor tehnic: *Nina Duduciuc*

Machetare computerizată: *Olga Ciuntu, Valentin Vărtosu jr.*

Copertă: *Romeo Șveț*

Întreprinderea Editorial-Poligrafică Știința,

str. Academiei, nr. 3; MD-2028, Chișinău, Republica Moldova;

tel.: (+373 22) 73-96-16; fax: (+373 22) 73-96-27;

e-mail: prini_stiinta@yahoo.com; prini@stiinta.asm.md;

www.editurastiinta.md

DIFUZARE:

ÎM Societatea de Distribuție a Cărții PRO-NOI,

str. Alba-Iulia, nr. 75; MD-2051, Chișinău, Republica Moldova;

tel.: (+373 22) 51-68-17, 71-96-74; fax: (+373 22) 58-02-68;

e-mail: info@pranoi.md; www.pronoi.md

Toate drepturile asupra acestei ediții aparțin Întreprinderii Editorial-Poligrafice Știința.

Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții

Fizică. Astronomie: Manual pentru clasa a 12-a / Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu, Ion Nacu [et al.]; Min. Educației al Rep. Moldova. – Ch.: Î.E.P. Știința, 2017 (Tipogr. „BALACRON” SRL). – 168 p.

ISBN 978-9975-85-074-2

53+52 (075.3)

ISBN 978-9975-85-074-2

© Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu, Ion Nacu, Ștefan Tiron. 2011, 2017

© Î.E.P. Știința. 2011, 2017

CUPRINS¹

Capitolul 1. ELECTROMAGNETISMUL

1.1. Câmpul magnetic. Liniile câmpului magnetic . . .	5
1.2. Inducția magnetică. Forța electromagnetică . . .	7
1.3. Acțiunea câmpului magnetic asupra sarcinilor electrice în mișcare. Forța Lorentz	9
1.4. Mișcarea particulelor încărcate în câmp magnetic	11
1.5.* Proprietățile magnetice ale substanței. Permeabilitatea relativă	13
1.6. Inducția electromagnetică	15
a. Fenomenul inducției electromagnetice. Aplicații practice	15
b. Fluxul câmpului magnetic. Regula lui Lenz . . .	17
c. Legea inducției electromagnetice. Tensiunea electromotoare de inducție	19
1.7. Autoinducția. Inductanța circuitului	21
a. Fenomenul de autoinducție	21
b. Inductanța. <i>T.e.m.</i> de autoinducție	22
1.8. Energia câmpului magnetic	23

Capitolul 2. CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV

2.1. Generarea tensiunii electromotoare alternative . .	24
2.2. Valorile efective ale intensității și tensiunii alternative	26
2.3.* Circuite în curent alternativ	27
a. Particularitățile circuitelor în curent alternativ	27
b. Rezistor ideal în curent alternativ	28
c. Bobină ideală în curent alternativ	28
d. Condensator ideal în curent alternativ	30
e. Circuite <i>RLC</i> serie în curent alternativ. Legea lui Ohm	31
f. Rezonanța tensiunilor. Factorul de calitate	33
2.4.* Puterea în circuit de curent alternativ	35
2.5. Transportul energiei electrice la distanțe mari . .	38
a. Generatorul de curent alternativ	38
b. Randamentul liniei de transport. Impactul asupra organismelor vii	39
c. Transformatorul	40

Capitolul 3. OSCILAȚII ȘI UNDE ELECTROMAGNETICE

3.1. Oscilații electromagnetice	42
a. Circuitul oscilant ideal	42
b.* Analogia dintre oscilațiile mecanice și electromagnetice. Perioada și frecvența oscilațiilor electromagnetice	43
c.* Oscilații electromagnetice amortizate și forțate	44
3.2.* Câmpul electromagnetic	45
3.3. Undele electromagnetice	47
a.* Existența undelor electromagnetice	47
b. Propagarea undelor electromagnetice	47
3.4. Clasificarea undelor electromagnetice	49
3.5. Comunicații prin unde electromagnetice	50
a. Principiile radiocomunicației	50
b. Radiolocația	51
3.6. Evoluția concepțiilor despre natura luminii	52
3.7. Interferența luminii	53
a. Coerența undelor luminoase. Condițiile de observare a interferenței luminii	54
b.* Dispozitivul lui Young	55
c.* Lama cu fețe plan-paralele	56
d.* Inelele lui Newton	57
e. Aplicații ale interferenței luminii	58
3.8. Difracția luminii	60
a. Studiul calitativ al difracției luminii	60
b. Difracția luminii de la o fantă. Rețeaua de difracție	61
3.9.* Polarizarea luminii	65
a. Modelul mecanic al stării de polarizare. Planul de polarizare	65
b. Starea de polarizare a luminii. Transversalitatea undelor de lumină	65
c. Polarizarea luminii prin reflexie	67
3.10.* Împrăștierea luminii	68

Capitolul 4. ELEMENTE DE TEORIE A RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

4.1.* Principiul relativității în fizică. Postulatele lui Einstein	69
---	----

¹ Temele, exercițiile, problemele marcate convențional cu * sunt destinate doar elevilor de la profilul real.

4.2.* Spațiul și timpul în teoria relativității restrânse . . .	71	Capitolul 8. ELEMENTE DE ASTRONOMIE	
a. Relativitatea simultaneității	71	8.1. Astronomia în cadrul științelor fizice	123
b. Relativitatea intervalelor de timp	72	a. Obiectul și problemele fundamentale ale astronomiei	123
c. Relativitatea dimensiunilor longitudinale . . .	73	b. Metodele de cercetare astrofizică	124
4.3.* Transformările lui Lorentz și consecințele acestora	75	8.2. Elemente de astronomie practică	125
a. Transformările lui Lorentz	75	a. Mișcarea aparentă a stelelor. Constelațiile . . .	125
b. Compunerea relativistă a vitezelor	76	b. Sfera cerească și elementele ei	127
4.4.* Noțiune de dinamică relativistă	77	c. Mișcarea anuală aparentă a Soarelui. Ecliptica	127
Capitolul 5. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ		d. Sistemele de coordonate cerești. Culminația astrilor. Echinocțiile și solstițiile . .	128
5.1. Radiația termică. Ipoteza cuantelor	79	e. Mișcarea periodică a Pământului și a Lunii. Fazele Lunii. Eclipsese de Soare și de Lună . . .	130
5.2. Efectul fotoelectric extern	81	f. Timpul și măsurarea lui. Calendarul	133
a. Efectul fotoelectric. Legi experimentale	81	8.3. Sistemul Solar	135
b. Fotonii. Teoria cuantică a efectului fotoelectric extern	83	a. Planetele de tip terestru și planetele gigante. Sateliții planetelor. Planetele pitice	135
c. Celule fotoelectrice	85	b. Corpurile mici ale Sistemului Solar	139
5.3.* Presiunea luminii	86	c. Pământul. Structura internă, hidrosfera, atmosfera și magnetosfera Pământului. Luna. Mareele	142
5.4.* Proprietățile ondulatorii ale microparticulelor. Dualismul undă–corpuscul	88	d. Noțiuni de cosmogonie. Originea și evoluția Sistemului Solar	145
a. Undele de Broglie. Difracția electronilor	88	8.4. Elemente de mecanică cerească	146
b. Microscopul electronic	89	a. Mișcarea aparentă a planetelor. Concepția heliocentrică a Universului	146
Capitolul 6. ELEMENTE DE FIZICĂ A ATOMULUI		b. Perioada siderală și perioada sinodică de revoluție a planetelor. Legile lui Kepler	148
6.1. Fenomene în care se manifestă structura compusă a atomului	91	8.5. Soarele	149
6.2. Experimentul lui Rutherford. Modelul planetar al atomului	93	a. Structura internă și atmosfera Soarelui	149
6.3. Modelul atomului după Bohr	95	b. Activitatea solară și relațiile Soare–Pământ . .	150
a. Postulatele lui Bohr	95	8.6. Stelele	151
b.* Atomul de hidrogen în cadrul teoriei lui Bohr . .	95	a. Clasificarea stelelor	151
6.4.* Emisia stimulată a radiației. Laserul	99	b. Diagrama „spectru–luminozitate”. Evoluția stelelor. Stelele variabile și nestaționare	152
Capitolul 7. ELEMENTE DE FIZICĂ A NUCLEULUI ATOMIC. PARTICULE ELEMENTARE		8.7. Noțiuni de cosmologie	154
7.1. Nucleul atomic: caracteristicile fizice și structura	102	a. Galaxia noastră. Roiuri stelare. Mișcarea proprie a stelelor și a Sistemului Solar. Mișcarea de rotație a Galaxiei	154
7.2.* Forțele nucleare. Energia de legătură a nucleului	105	b. Clasificarea galaxiilor. Galaxii cu nuclee active. Quasarii. Expansiunea Universului. Marea Explozie . .	155
7.3. Radioactivitatea	107	Capitolul 9. TABLOUL ȘTIINȚIFIC AL LUMII	
a. Descoperirea radioactivității. Transformări radioactive	107	9.1. Etapele de dezvoltare a tabloului fizic al lumii	158
b.* Legea dezintegrării radioactive	108	9.2. Astronomia și concepția științifică despre lume	161
7.4.* Reacțiile nucleare	111	Planșă color	162
a. Reacțiile nucleare. Caracteristici generale	111	Teste de evaluare sumativă	164
b. Fiziunea nucleelor de uraniu	111	Răspunsuri la probleme	168
c. Reacția în lanț. Reactorul nuclear	112		
d. Fuziunea termonucleară	113		
7.5.* Detectoare de radiații ionizante	115		
7.6.* Efectul biologic al radiațiilor nucleare	118		
7.7.* Particule elementare	119		
a. Descoperirea particulelor elementare	119		
b. Particule și antiparticule	120		
7.8.* Interacțiuni fundamentale. Clasificarea particulelor elementare	121		



1.1. CÂMPUL MAGNETIC. LINIILE CÂMPULUI MAGNETIC

Să ne amintim

Corpurile care au proprietatea de a atrage fierul sunt numite **magneți**. Aceștia pot fi **naturali** și **artificiali**. Regiunile magnetului în care atracția obiectelor din fier este maximă sunt numite **poli magnetici**.

Polii magnetici nu pot fi separați unul de altul.

Magnetul mic care se poate roti liber în jurul axei verticale, perpendiculară pe direcția ce trece prin polii săi – numit **ac magnetic** – ocupă în spațiu o poziție anumită: acesta indică aproximativ direcția terestră sud-nord. Polul magnetului orientat spre polul terestru nord este numit pol magnetic **nord** (cu simbolul N), celălalt pol al magnetului fiind numit **sud** (cu simbolul S).

Polii magneților de același nume se resping, iar polii de nume diferite se atrag.

Ținând seama de orientarea acului magnetic, precum și de caracterul interacțiunii polilor magnetici, conchidem că *în regiunea polului geografic terestru Nord se află polul geomagnetic sud, iar în regiunea polului geografic Sud se află polul geomagnetic nord.*

Interacțiunea magnetică se realizează prin intermediul **câmpului magnetic** existent în jurul magneților.

Câmpurile magnetice se cercetează cu ajutorul ácelor magnetice. Pentru a obține o anumită imagine a câmpului, se trasează **liniile magnetice**.

Liniile câmpului magnetic sunt liniile trasate astfel încât **tangentele** duse în orice punct al lor coincid cu direcția acului magnetic în locul respectiv.

În figura 1.1 sunt reprezentate liniile magnetice – **spectrul câmpului magnetic** – ale unei bare magnetice rectilinii. Ele ies din polul magnetic nord și intră în polul magnetic sud. Observăm că în vecinătatea polilor magnetici, în regiunile în care acțiunea magnetică este mai puternică, densitatea liniilor magnetice este mai mare. Și invers, în regiunile în care acțiunea magnetică este mai slabă, densitatea liniilor magnetice este mai mică. Situația dată este similară celei din cazul câmpului electrostatic.

Spectrul câmpului magnetic poate fi vizualizat folosind pilitură de fier, în locul ácelor magnetice.

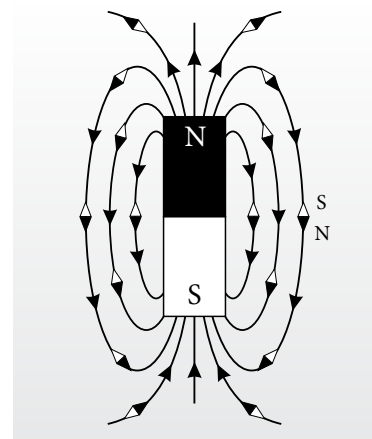


Fig. 1.1

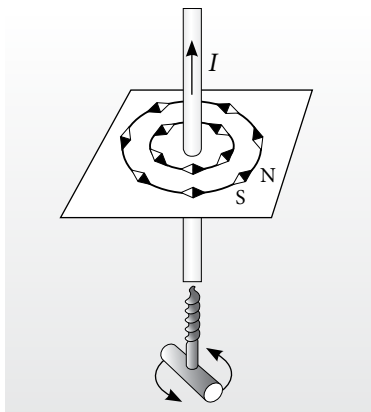


Fig. 1.2

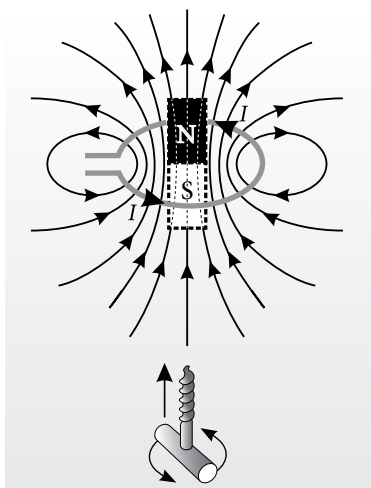


Fig. 1.3

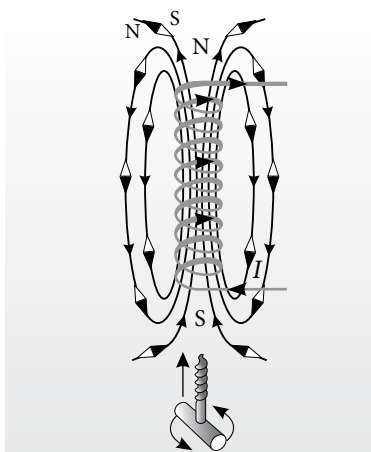


Fig. 1.4

În anul 1820, fizicianul danez Hans Cristian Oersted (1777–1851) a observat acțiunea curentului electric asupra acului magnetic. Astfel, s-a stabilit că **în jurul conductorului prin care circulă curent electric există câmp magnetic.**

Curentul electric prezintă mișcarea ordonată a purtătorilor de sarcină electrică, prin urmare **surse ale câmpului magnetic sunt particulele, încărcate cu sarcină electrică, în mișcare.** Dacă particulele încărcate sunt în repaus, ele generează numai câmp electric. Pe când aflându-se în mișcare ele generează nu numai câmp electric, ci și câmp magnetic.

Pentru a stabili forma liniilor magnetice ale câmpului creat de un conductor parcurs de curent electric – spectrul câmpului magnetic –, trecem conductorul prin orificiul unei bucați de carton. Plasăm conductorul vertical, iar cartonul orizontal și așezăm pe el mai multe ace magnetice mici, care se pot roti în jurul axelor verticale. În lipsa curentului, ácele sunt paralele între ele și indică cu capătul nord spre polul geomagnetic sud. Dacă însă prin conductor circulă curent electric, ácele își schimbă direcțiile formând cercuri (fig. 1.2). Conchidem că **liniile magnetice ale câmpului creat de un conductor rectiliniu parcurs de curent au forma unor cercuri situate în plane perpendiculare pe conductor, având ca centre punctele de intersecție ale planelor cu acesta.**

Sensul liniilor magnetice este indicat de polul nord al ácelor magnetice. Între sensul liniilor magnetice și sensul curentului electric există o anumită legătură care poate fi exprimată sub formă de mai multe reguli. Cea mai frecvent folosită este **regula burghiului cu filet de dreapta:**

La rotirea **burghiului cu filet de dreapta**, astfel încât acesta să se deplaseze în sensul curentului electric, sensul rotației mânerului său indică sensul liniilor magnetice.

În figura 1.2 se observă o proprietate importantă: **liniile magnetice sunt linii închise.** În cazul barei magnetice, liniile reprezentate în figura 1.1 din exteriorul ei sunt închise în interiorul barei. Astfel, liniile magnetice se deosebesc esențial de liniile intensității câmpului electrostatic, care sunt linii deschise, având capetele lor la sarcinile electrice sau la infinit. Compararea caracterului liniilor magnetice cu al celor electrice denotă lipsa în natură a unor sarcini magnetice care ar avea un rol similar celui al sarcinilor electrice în cazul interacțiunii electrostatice.

Cu ajutorul ácelor magnetice mici poate fi stabilit caracterul liniilor câmpului pentru curentul circular, cum este numit inelul conductor parcurs de curent electric (fig. 1.3). Comparând figurile 1.3 și 1.1, constatăm că liniile câmpului magnetic al curentului circular sunt similare celor ale unei bare magnetice scurte (în figura 1.3 bara este reprezentată prin linii întrerupte). Pentru a determina sensul liniilor magnetice ale curentului circular, poate fi folosită o altă variantă a **regulii burghiului:**

Sensul liniilor magnetice coincide cu sensul deplasării burghiului la rotirea mânerului său în sensul curentului electric din inel.

Această regulă se aplică și la determinarea sensului liniilor magnetice în interiorul unei bobine lungi parcurse de curent electric, denumită, de obicei, **solenoid** (fig. 1.4). Câmpul magnetic al solenoidului este similar câmpului barei magnetice (fig. 1.1). În interiorul solenoidului liniile câm-

pului sunt paralele și au densitate constantă. Acest câmp este **omogen**.

Asemănarea dintre câmpurile magnetice ale curentului circular și barei magnetice a fost stabilită în anul 1820 de către André-Marie Ampère (1775–1836), înainte de introducerea noțiunii de câmp și

de linii ale acestuia. Ea a fost folosită pentru explicarea proprietăților magnetice ale substanței.

Pentru a explica magnetismul terestru, Ampère a presupus existența în interiorul Pământului a unor curenți circulari. În prezent se consideră că acești curenți există în nucleul metalic al Pământului.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce prezintă polii unui magnet? Cum interacționează polii magnetici de același nume? Dar de nume diferite?
2. Ce proprietate a acului magnetic permite folosirea lui în busolă?
3. Ce reprezintă liniile magnetice? Cum se determină sensul lor?
4. Care este caracterul acțiunii magnetice în funcție de densitatea liniilor magnetice?
5. În ce constă concluzia principală dedusă în baza experienței lui Oersted?
6. Care sunt sursele câmpului magnetic?
7. Care este deosebirea principală dintre caracterul liniilor magnetice și cel al liniilor de intensitate a câmpului electrostatic?

1.2. INDUCȚIA MAGNETICĂ. FORȚA ELECTROMAGNETICĂ

Să ne amintim

Pentru a defini mărimea fizică ce caracterizează câmpul magnetic, vom trece în revistă mărimile respective introduse pentru câmpul gravitațional și cel electrostatic. În ambele cazuri se cercetează acțiunea câmpului asupra unui **corp de probă**, introdus în fiecare dintre ele.

În cazul câmpului gravitațional, corpul de probă este un corp punctiform de masă m . La introducerea în unul și același punct al câmpului a corpurilor de probă de mase m diferite, asupra lor acționează forțe \vec{F} diferite. Experimentele arată însă că raportul $\frac{\vec{F}}{m}$ rămâne constant. Anume această mărime $\vec{T} = \frac{\vec{F}}{m}$, denumită **intensitate a câmpului gravitațional**, este considerată caracteristica de forță a acestuia.

Corpul de probă în cazul câmpului electrostatic reprezintă un corp punctiform electricizat cu sarcina q . La introducerea corpurilor de probă cu sarcini diferite q în unul și același punct al câmpului, asupra acestora acționează forțe \vec{F} diferite, raportul $\frac{\vec{F}}{q}$ fiind același. Raportul $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ este caracteristica de forță, denumită **intensitate a câmpului electric**.

Pentru a cerceta câmpul magnetic, efectuăm experimentul următor. De un dinamometru sensibil suspendăm un cadru de forma unui triunghi isoscel format din mai multe spire conductoare, izolate între ele. Latura inferioară a cadrului se află între polii unor magneți permanenți în formă de potcoavă (fig. 1.5). Dinamometrul indică forța de greutate a cadrului. Montăm circuitul format din cadru, sursă de curent, ampermetru și reostat (în figură nu sunt indicate). Dacă intensitatea curentului printr-o spirală este egală cu I , intensitatea lui prin latura cadrului este egală cu NI , unde N este numărul de spire.

În prezența curentului electric, asupra porțiunii de cadru aflată între polii magnetici acționează o forță, iar indicația dinamometrului se mărește sau se micșorează în funcție de sensul curentului în cadru. Prin urmare, câmpul magnetic acționează asupra conductorului parcurs de curent electric cu o forță denumită **forță electromagnetică** F_m . Calculând diferența indicațiilor dinamometrului, se determină valoarea forței magnetice.

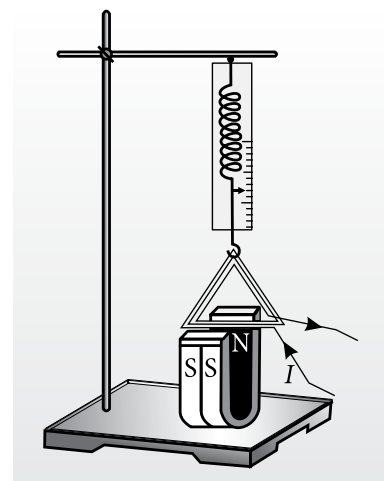


Fig. 1.5

Variind intensitatea curentului I cu ajutorul reostatului, stabilim că $F_m \sim I$. Pentru a modifica lungimea l a porțiunii de conductor, aflată în câmp magnetic, se folosesc mai mulți magneți de același fel. Se constată că în cazul a doi magneți forța electromagnetică este de două ori mai mare decât în cazul numai a unuia din ei, stabilindu-se astfel că $F_m \sim l$. Rotind magneții în jurul axei verticale, modificăm unghiul α dintre conductorul parcurs de curent și linia magnetică. Se observă că micșorarea acestui unghi este însoțită de micșorarea forței electromagnetice.

Să introducem caracteristica de forță a câmpului magnetic. Vom admite, pentru simplitate, că acesta este omogen. Câmpul magnetic acționează asupra conductorului parcurs de curent. De aceea în calitate de corp de probă se ia o porțiune rectilinie a conductorului, denumită **element de curent**. El este caracterizat atât de intensitatea curentului I în el, cât și de lungimea l a porțiunii, adică de produsul Il . După cum s-a menționat, forța electromagnetică ce acționează asupra elementului de curent depinde nu numai de produsul Il , ci și de orientarea elementului de curent față de câmpul magnetic. Forța este maximă ($F = F_{\max}$), dacă conductorul este perpendicular pe liniile magnetice și este nulă ($F = 0$), dacă conductorul este orientat de-a lungul acestor linii.

S-a stabilit că pentru locul dat al câmpului magnetic forța F_{\max} ia valori diferite pentru valori diferite ale produsului Il , dar mărimea $\frac{F_{\max}}{Il}$ rămâne constantă. Această mărime este considerată caracteristica de forță a câmpului magnetic cu denumirea de **inducție a câmpului magnetic** sau, simplu, **inducție magnetică**, cu simbolul \vec{B} .

Astfel, conform definiției, valoarea inducției magnetice

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}. \quad (1.1)$$

Inducția magnetică este o mărime vectorială al cărei modul este egal cu raportul dintre valoarea forței maxime, care acționează din partea câmpului magnetic omogen asupra unei porțiuni rectilinii de conductor, și produsul intensității curentului în conductor la lungimea acestei porțiuni.

Unitatea de inducție magnetică este numită **tesla** (T), în memoria savantului croat Nicola Tesla (1856–1943), considerat fondator al industriei electrotehnice moderne. Conform formulei (1.1), avem:

$$[B] = \frac{[F_{\max}]}{[I][l]} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \text{T},$$

adică $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$.

Un tesla (T) este inducția câmpului magnetic omogen, care acționează cu o forță maximă de 1 N asupra porțiunii cu lungimea de 1 m a unui conductor rectiliniu destul de lung, parcurs de un curent electric de intensitate 1 A.

Direcția și sensul vectorului inducției magnetice \vec{B} sunt indicate de direcția sud-nord (S–N) a acului magnetic situat în locul respectiv al câmpului.

Introducerea vectorului inducției \vec{B} necesită precizarea unor noțiuni menționate mai sus. **Linie magnetică** a fost definită linia în fiecare punct al căreia direcția tangentei coincide cu cea a acului magnetic (tema 1.1). Prin urmare, în fiecare punct al acestei linii vectorul \vec{B} are direcția tangentei ei. Acest lucru justifică precizarea denumirii complete a liniei magnetice – **linie de inducție magnetică**. În corespundere cu cele menționate în tema 1.1, liniile de inducție sunt linii închise. Câmpul ale cărui linii sunt închise este numit **câmp turbionar**. Prin urmare, **câmpul magnetic este turbionar**. Încă o precizare: **câmp omogen este câmpul în toate punctele căruia inducția magnetică \vec{B} este aceeași**.

Pornind de la formula (1.1), exprimăm forța electromagnetică maximă

$$F_{\max} = IlB. \quad (1.2)$$

După cum s-a menționat, forța electromagnetică este maximă, dacă conductorul rectiliniu este perpendicular pe vectorul inducției magnetice \vec{B} . S-a stabilit că, la rândul său, forța electromagnetică \vec{F}_{\max} este perpendiculară atât pe conductor, cât și pe vectorul \vec{B} . Sensul acestei forțe se determină, cel mai frecvent, folosind **regula mâinii stângi**:

Dacă așezăm mâna stângă astfel încât liniile de inducție magnetică să intre perpendicular în palmă, iar cele patru degete întinse să indice sensul curentului electric, atunci degetul mare, poziționat lateral sub unghi drept față de celelalte în planul palmei, indică sensul forței electromagnetice (fig. 1.6, a).

Regula dată a fost formulată de către fizicianul englez John A. Fleming (1849–1945) și, datorită acestui fapt, îi poartă numele.

În cazul în care inducția magnetică \vec{B} nu este perpendiculară pe conductor, formând cu el un unghi arbitrar α , vectorul \vec{B} se descompune în două componente: \vec{B}_{\parallel} – paralelă cu conductorul și \vec{B}_{\perp} – perpendiculară pe el (fig. 1.6, b). Așadar, acțiunea mag-

netică asupra conductorului este efectuată numai de componenta \vec{B}_\perp . Respectiv, forța electromagnetică: $F_m = IlB_\perp$. Studiind *figura 1.6, b*, observăm că $B_\perp = B \sin \alpha$. Astfel, obținem expresia generală a forței electromagnetice

$$F_m = IlB_\perp = IlB \sin \alpha. \quad (1.3)$$

La determinarea sensului forței \vec{F}_m , în acest caz, folosim regula mâinii stângi cu o singură deosebire: în palmă intră componenta \vec{B}_\perp a inducției magnetice.

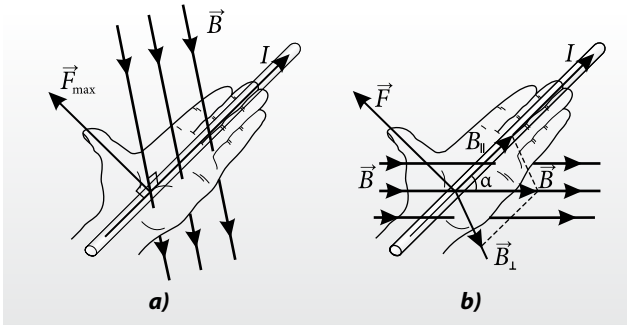


Fig. 1.6

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se definește modulul inducției câmpului magnetic? Care este unitatea acesteia?
2. Cum poate fi determinată direcția și sensul forței electromagnetice?
3. Ce factori determină valoarea forței care acționează din partea câmpului magnetic asupra unei porțiuni de conductor parcurs de curent electric?
4. Un conductor rectiliniu cu lungimea de 0,6 m se află într-un câmp magnetic omogen, perpendicular pe liniile de inducție ale acestuia. Care este inducția câmpului ce ar acționa asupra conductorului cu o forță de 0,15 N la o intensitate a curentului în el egală cu 2,5 A?
5. O porțiune a unui conductor parcurs de curent electric se află într-un câmp magnetic omogen. La intensitatea curentului prin conductor, egală cu 2,4 A, asupra acestei porțiuni acționează o forță electromagnetică de 0,48 N. Ce forță ar acționa asupra acestei porțiuni dacă, fără a schimba poziția ei, intensitatea curentului în ea ar deveni egală cu 3,6 A?
6. Un conductor ce formează un unghi de 30° cu liniile de inducție ale câmpului magnetic este parcurs de un curent electric cu intensitatea de 1,2 A. Determinați valoarea forței electromagnetice care acționează asupra porțiunii de conductor cu lungimea de 0,75 m, dacă inducția magnetică este egală cu 0,8 T.
- 7.* Un conductor cu masa de 8 g și lungimea de 20 cm, suspendat orizontal de două fire metalice subțiri, se află în câmp magnetic orizontal, fiind perpendicular pe liniile de inducție magnetică ale acestuia. Determinați forța de tensiune a fiecărui fir în cazul în care prin conductor circulă curent cu intensitatea de 3 A, iar inducția magnetică este egală cu 0,05 T. Analizați cazurile posibile.
8. Elaborați planul lucrării de laborator „Studiul acțiunii câmpului magnetic asupra curentului electric” în baza experimentului din *figura 1.5*. Realizați lucrarea și formulați concluziile.

1.3. ACȚIUNEA CÂMPULUI MAGNETIC ASUPRA SARCINILOR ELECTRICE ÎN MIȘCARE. FORȚA LORENTZ

Câmpul magnetic acționează asupra conductorului parcurs de curent cu forța electromagnetică $F_m = IlB \sin \alpha$ (1.3). Curentul electric reprezintă mișcarea ordonată a particulelor încărcate (a sarcinilor electrice). Evident, forța electromagnetică ce acționează asupra conductorului parcurs de curent este rezultanta forțelor exercitate asupra tuturor particulelor încărcate ce se mișcă ordonat în porțiunea respectivă a conductorului.

Să exprimăm intensitatea curentului electric din conductor prin caracteristicile purtătorilor de sarcină ce se mișcă ordonat cu viteza \vec{v} prin el. Considerăm porțiunea de conductor de lungime l și aria secțiunii transversale S (*fig. 1.7*). Notăm cu n concentrația purtătorilor de sarcină și cu q_0 valoarea sarcinii electrice a unuia din ei. Atunci numărul de purtători din porțiunea luată $N = nV = nls$, iar sarcina electrică totală a lor $q = q_0N = q_0nls$. Purtătorii de sarcină parcurg lungimea porțiunii în

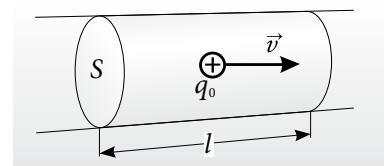


Fig. 1.7

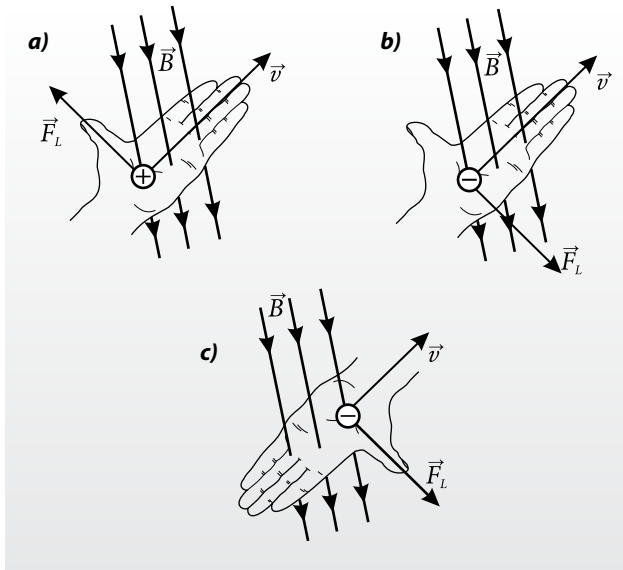


Fig. 1.8



HENDRIK ANTOON
LORENTZ
(1853–1928)

fizician, teoretician olandez

A dezvoltat teoria câmpului electromagnetic a lui Maxwell, punând la bază caracterul corpuscular al particulelor încărcate și precizând ecuațiile Maxwell–Lorentz pentru câmpul electromagnetic în medii. A stabilit relația dintre indicele de refracție al substanței și densitatea ei, dintre indicele de refracție și frecvența undei incidente. A dedus expresia pentru forța ce acționează asupra particulei încărcate din partea câmpului electromagnetic în care se mișcă, cunoscută sub denumirea de *forța Lorentz*.

A prezis influența câmpului magnetic asupra radiației atomilor, descoperită experimental (a. 1896) de către Pieter Zeeman (1865–1943), unul dintre elevii săi, și cunoscută ca „efectul Zeeman”. Pentru aceste lucrări li s-a decernat Premiul Nobel în domeniul fizicii (a. 1902). Lorentz a dedus (a. 1904) formulele care leagă coordonatele spațiale și momentele de timp ale unui și aceluiași eveniment în două sisteme de referință inerțiale diferite, numite apoi *transformările lui Lorentz*.

În anul 1918, Lorentz a prezidat Comitetul științific având sarcina de a elabora construcția digului de la Zuiderzee, care permitea asanarea unui teritoriu mare – o problemă de importanță deosebită pentru Olanda.

timpul $t = \frac{l}{v}$ și transportă sarcina q prin secțiunea transversală a conductorului. Intensitatea curentului electric în acesta este

$$I = \frac{q}{t} = q_0 n v S. \quad (1.4)$$

Substituind (1.4) în (1.3), obținem $F_m = q_0 v n S l B \sin \alpha$. Introducând $N = n S l$, obținem $F_m = q_0 v N B \sin \alpha$.

Forța ce acționează asupra unei particule din partea câmpului magnetic în care se mișcă, numită forța Lorentz, este

$$F_L = \frac{F_m}{N} = q_0 v B \sin \alpha. \quad (1.5)$$

În formula (1.3) unghiul α este unghiul dintre sensul curentului electric și vectorul inducției magnetice \vec{B} . În cazul în care sarcina electrică a purtătorilor este pozitivă, sensul curentului coincide cu sensul vitezei \vec{v} a sarcinilor. Prin urmare, în cazul sarcinilor pozitive, unghiul α este unghiul format de vectorii \vec{v} și \vec{B} . Forța electromagnetică \vec{F}_m este perpendiculară pe direcția conductorului și pe vectorul \vec{B} . Deci forța Lorentz este perpendiculară pe ambii vectori: \vec{v} și \vec{B} .

Sensul forței ce acționează asupra particulei încărcate cu sarcină pozitivă poate fi ușor determinat aplicându-se **regula mâinii stângi**:

Așezăm palma astfel încât liniile de inducție magnetică să intre în palmă, iar cele patru degete întinse să fie orientate în sensul vectorului vitezei. Atunci degetul mare, poziționat lateral sub un unghi drept față de celelalte în planul palmei, indică sensul forței Lorentz (fig. 1.8, a).

Dacă însă sarcina electrică a particulei este negativă, sensul forței Lorentz poate fi determinat în baza aceleiași reguli pe două căi: așezăm palma ca și în cazul sarcinii pozitive și considerăm sensul forței opus celui indicat de degetul mare (fig. 1.8, b) sau orientăm degetele întinse în sens contrar vitezei și considerăm drept sens al forței cel indicat de degetul mare (fig. 1.8, c).

Forța Lorentz permanent este perpendiculară pe viteza particulei încărcate, deci și pe direcția deplasării ei. Prin urmare, lucrul mecanic al ei este nul. Din mecanică se știe că variația energiei cinetice a particulei este egală cu lucrul forțelor ce acționează asupra ei. În cazul de față, lucrul este nul și variația energiei cinetice este nulă. **Energia cinetică, deci și modulul vitezei particulei încărcate ce se mișcă în câmp magnetic, nu variază, ci rămân constante.** Câmpul magnetic nu modifică valoarea vitezei particulei, dar influențează numai direcția ei. Adică *mișcarea sarcinii electrice în câmp magnetic este o mișcare uniformă.*

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce factori determină valoarea forței care acționează din partea câmpului magnetic asupra sarcinii electrice ce se mișcă în el?
2. Cum se determină direcția și sensul forței Lorentz?
3. Care este proprietatea principală a mișcării particulelor încărcate în câmp magnetic?
4. Un proton se mișcă cu viteza de $5 \cdot 10^6$ m/s într-un câmp magnetic omogen a cărui inducție magnetică este egală cu 0,04 T. Determinați valoarea maximă a forței ce acționează asupra protonului din partea

acestui câmp. Care este valoarea forței în cazul în care viteza protonului ar forma un unghi de 60° cu vectorul inducției magnetice? Sarcina protonului $q_p = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C.

- 5.* Un electron, având energia cinetică egală cu $4,55 \cdot 10^{-19}$ J, intră într-un câmp magnetic omogen de inducție egală cu 0,3 T, perpendicular pe liniile magnetice. Determinați accelerația imprimată electronului de câmpul magnetic. Masa electronului $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, sarcina electrică $|q_e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

1.4. MIȘCAREA PARTICULELOR ÎNCĂRCATE ÎN CÂMP MAGNETIC

Considerăm o particulă încărcată cu sarcina electrică q care intră cu viteza \vec{v} într-un câmp magnetic omogen de inducție \vec{B} . Să cercetăm cazuri concrete de orientare a vectorului \vec{v} față de inducția \vec{B} .

În cazul în care la intrarea în câmpul magnetic viteza \vec{v} are direcția vectorului \vec{B} , unghiul $\alpha = 0$ sau 180° , adică $\sin \alpha = 0$. Din expresia (1.5) rezultă că forța Lorentz $F_L = 0$, deci câmpul magnetic nu acționează asupra particulei încărcate. Aceasta nu-și modifică viteza \vec{v} , se mișcă rectiliniu uniform de-a lungul liniei de inducție magnetică.

Admitem că particula încărcată pătrunde în câmpul omogen cu viteza \vec{v} perpendiculară pe vectorul \vec{B} al inducției magnetice. În acest caz $\alpha = 90^\circ$ și $\sin \alpha = 1$. Forța Lorentz are valoare maximă $F_L = qvB$ și imprimă particulei încărcate accelerația

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{q}{m} vB. \quad (1.6)$$

După cum s-a menționat în *tema 1.3*, forța Lorentz este perpendiculară atât pe vectorul \vec{B} , cât și pe cel al vitezei \vec{v} , prin urmare, și accelerația este perpendiculară pe acești vectori. În concluzie, traiectoria particulei este o curbă plană situată în planul perpendicular pe vectorul inducției magnetice \vec{B} .

Unica mișcare în care viteza și accelerația mobilului posedă aceste proprietăți este mișcarea circulară uniformă. În ea accelerația caracterizează rapiditatea variației direcției vitezei, este orientată spre centrul cercului pe care se mișcă punctul material (*fig. 1.9*), poartă numele de **accelerație centripetă** și are valoarea $a = v^2/r$, unde r este raza cercului.

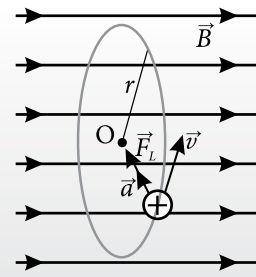


Fig. 1.9

Egalând această valoare cu (1.6), exprimăm raza cercului:

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (1.7)$$

Pentru perioada de rotație a particulei încărcate în câmp magnetic obținem:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (1.8)$$

Observăm că perioada de rotație T depinde doar de natura particulei (de masa ei m și sarcina electrică q), precum și de inducția magnetică B , însă nu depinde de viteza particulei încărcate: la viteze mai mari ea parcurge în același timp cercuri de raze mai mari. Această proprietate se manifestă doar dacă vitezele particulelor v au valori mult mai mici decât viteza luminii în vid $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. La valori ale vitezei v care se apropie de c , masa particulelor nu mai rămâne constantă, depinzând de viteză. La creșterea vitezei ea se mărește. (*Mișcarea la viteze $v \rightarrow c$ este explicată detaliat în capitolul 4.*) Evident, în aceste condiții perioada de rotație nu rămâne constantă, ci variază în funcție de viteză.

Mișcarea particulelor încărcate în câmp magnetic pe traiectorii circulare are diverse aplicații practice. Să analizăm cele mai importante dintre ele.

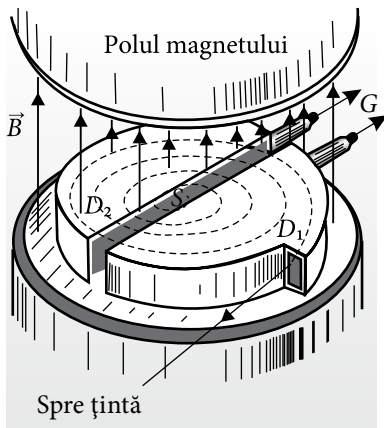


Fig. 1.10

1. Ciclotronul este un accelerator ciclic utilizat în cercetările din domeniul fizicii nucleare pentru a imprima viteze mai mari particulelor încărcate grele (protoni, nuclee ale atomilor de heliu ș.a.), în scopul studierii interacțiunii acestora cu substanța. A fost inventat în 1930 de către savantul american Ernest Orlando Lawrence (1901–1958).

Schema de principiu a ciclotronului este prezentată în figura 1.10. Cu D_1 și D_2 sunt notați duanții – două cavități semicilindrice de forma literei D . Duanții sunt conectați la un generator G de tensiune electrică alternativă, de frecvență înaltă. Astfel, în spațiul dintre duanți, asupra particulelor încărcate acționează un câmp electric (în interiorul duantului acest câmp lipsește). În spațiul dintre duanți, aproape de centrul lor, se află sursa S de particule încărcate. Această parte a instalației se află într-o cutie etanșă (în figură nu este indicată), din care s-a scos aerul pentru a evita ciocnirile dintre particulele încărcate și moleculele din componența lui. Cutia este situată între polii unui electromagnet puternic.

Considerăm o particulă încărcată emisă de sursă, care sub acțiunea câmpului electric din spațiul dintre duanți intră în duantul D_1 . Asupra particulei încărcate acționează numai câmpul magnetic care o determină să se miște pe un arc de cerc. La ieșirea din duantul D_1 , sensul câmpului electric este schimbat în opus, astfel încât particula este accelerată și intră în duantul D_2 cu viteză mărită. Raza semicercului descris de ea în acest duant este mai mare decât în cel precedent. La ieșirea din duantul D_2 sensul câmpului electric dintre duanți este iarăși schimbat în opus, particula este accelerată din nou, intră în duantul D_1 cu o viteză și mai mare, este mai mare de asemenea și raza semicercului descris de ea sub influența câmpului magnetic etc. În concluzie, particula încărcată descrie o traiectorie de forma unei „spirale”, iar la trecerea dintr-un duant în altul viteza ei se mărește. Evident, procesul de accelerare continuă are loc numai dacă particula încărcată ieșită dintr-un duant ajunge de fiecare dată în câmp electric care o accelerează spre celălalt duant. Pentru aceasta perioada de rotație a particulei încărcate în câmp magnetic trebuie să fie egală cu perioada de variație a tensiunii electrice alternative care alimentează duanții. Fasciculul de particule accelerate este scos din ciclotron și îndreptat spre ținta respectivă, interacțiunea cu care este cercetată de savanți.

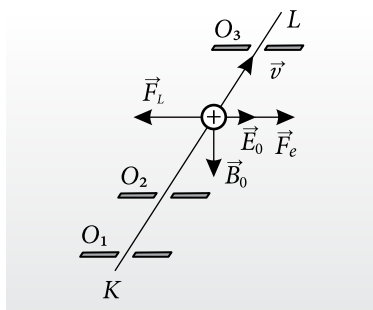


Fig. 1.11

2. Spectrograful de masă este instalația destinată determinării maseilor particulelor încărcate după raza arcului descris de ele la mișcarea în câmp magnetic. Din formula (1.7) exprimăm masa

$$m = \frac{qBr}{v}. \quad (1.9)$$

Pentru a determina viteza particulelor încărcate, acestea trec printr-un filtru special de viteze în care particulele accelerate se mișcă prin câmpuri electrice și magnetice reciproc perpendiculare (fig. 1.11). Orificiile O_1 și O_2 evidențiază un fascicul de particule încărcate care se propagă cu viteze diferite în direcția KL . În spațiul dintre orificiile O_2 și O_3 asupra lor acționează simultan două forțe perpendiculare pe direcția vitezei particulelor, forțe cu dreapta-suport comună și sensuri opuse: forța $\vec{F}_e = q\vec{E}_0$ din partea câmpului electric de intensitate \vec{E}_0 și forța Lorentz de valoare $F_L = qvB_0$ din partea câmpului magnetic de inducție B_0 . Prin orificiul O_3 vor ieși particulele care se mișcă rectiliniu, adică cele ce se mișcă cu

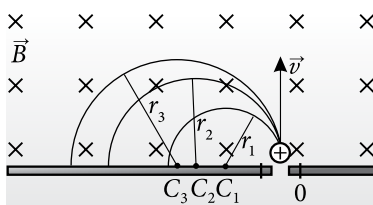


Fig. 1.12

viteza v ce corespunde egalității modulelor forțelor, $F_L = F_e$. Prin urmare, $qvB_0 = qE_0$. Astfel, prin orificiul O_3 ies particule cu o viteză bine determinată:

$$v = \frac{E_0}{B_0}. \quad (1.10)$$

Particulele încărcate intră într-un alt câmp magnetic cu aceste viteze perpendiculare pe vectorul de induc-

ție \vec{B} și se mișcă pe semicercuri de raze r (fig. 1.12). Valorile razelor variază în funcție de masele particulelor: cele cu masă mai mare se deplasează pe semicercuri de rază mai mare. Căzând pe un film fotografic, ele lasă urme în locurile respective. Cunoscând inducția B , sarcina particulei q și măsurând raza r , din formulele (1.9) și (1.10) se determină masa ei.

➔ Verificați-vă cunoștințele

- Poate oare o particulă încărcată să se miște uniform rectiliniu într-un câmp magnetic omogen? În ce condiții?
- Care sunt parametrii ce determină valoarea razei cercului descris de particula încărcată într-un câmp magnetic omogen? Dar a perioadei de rotație?
- Ce condiție trebuie satisfăcută pentru a asigura accelerarea continuă a particulelor încărcate în ciclotron?
- Un electron intră într-un câmp magnetic omogen cu viteza de $2 \cdot 10^6$ m/s, orientată perpendicular pe liniile de inducție magnetică, și descrie un arc de cerc cu raza de 4,55 mm. Determinați valoarea inducției câmpului magnetic. Se cunosc: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, $|q_e| = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C.
- Care trebuie să fie raza minimă a duanților unui ciclotron ce ar permite accelerarea protonilor până la energii cinetice egale cu $8 \cdot 10^{-13}$ J? Inducția câmpului magnetic din ciclotron este egală cu 0,26 T. În timpul accelerării masa protonului se va considera constantă și egală cu $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

1.5.* PROPRIETĂȚILE MAGNETICE ALE SUBSTANȚEI. PERMEABILITATEA RELATIVĂ

Să ne amintim

Pentru a studia tema dată, ne aducem aminte despre influența dielectricului asupra câmpului electric în care este introdus. Ne imaginăm un condensator plan cu vid (aer) încărcat cu sarcina electrică q_0 . Notăm cu \vec{E}_0 intensitatea câmpului electric dintre armături. Introducem în condensator un dielectric care umple tot spațiul dintre armături. Toate sarcinile electrice ale dielectricului sunt **sarcini legate**, ele se pot deplasa doar în limitele moleculei (ale atomului). Sub influența câmpului electric exterior se produce o rearanjare a sarcinilor legate, ele se deplasează întrucâtva spre armăturile cu sarcini de semne opuse ale condensatorului. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de **polarizare a dielectricului**. În consecință, pe fețele dielectricului se află sarcinile electrice legate de semne opuse celor de pe armăturile învecinate ale condensatorului și diminuează câmpul electric al acestora. Respectiv, intensitatea câmpului electric în dielectric E devine mai mică decât în vid (E_0).

Mărimea fizică ϵ_r , care arată de câte ori intensitatea câmpului electric în vid este mai mare decât intensitatea câmpului în același loc după introducerea dielectricului în el se numește **permitivitate relativă a substanței** $\epsilon_r = \frac{E_0}{E}$ sau $E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$. Sub formă vectorială

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon_r}. \quad (1.11)$$

Evident, mărimea adimensională $\epsilon_r > 1$.

Să analizăm influența substanței asupra câmpului magnetic în care este introdusă. Primul savant care a abordat această problemă a fost Ampère. El a pornit de la faptul că substanța este formată din molecule (atomi) și a admis că în ele există curenți electrice circulari, numiți **curenți moleculari**, ale căror câmpuri magnetice sunt similare celor ale unor bare magnetice minuscule (fig. 1.3, pag. 6).

Această ipoteză a lui Ampère a fost foarte îndrăzneată pentru timpul său, precedând cu circa 90 de ani stabilirea modelului planetar al atomului. În conformitate cu acest model, în centrul atomului se află nucleul în care este localizată practic toată masa atomului și este încărcat cu sarcină electrică pozitivă, iar în jurul lui se mișcă electronii. Din punct de vedere electric, această mișcare este

echivalentă cu existența unor curenți electrici circulari elementari.

Pentru simplitate, admitem existența în moleculă (atom) doar a unui curent circular al cărui câmp magnetic este echivalent cu câmpul creat de toți electronii ce se mișcă în moleculă. Acest curent este **curentul molecular**, a cărui intensitate se notează cu I_{mol} . Având în vedere că în jurul nucleului se mișcă mai mulți electroni, este posibilă situația în care intensitatea curentului molecular este nulă: $I_{mol} = 0$.

Substanțele formate din molecule (atomi) în care există curenți moleculari ($I_{mol} \neq 0$) sunt numite **paramagnetici**, iar cele formate din molecule caracterizate de $I_{mol} = 0$ sunt numite **diamagnetici**.

Să analizăm influența acestor substanțe asupra câmpului magnetic în care sunt introduse.

Ne imaginăm un solenoid prin ale cărui spire circulă un curent electric de intensitate I_0 . Notăm cu \vec{B}_0 inducția câmpului magnetic din interiorul solenoidului, al cărei sens se determină în conformitate cu regula burghiului (v. *fig. 1.4*). Menționăm că în partea centrală a solenoidului câmpul magnetic este aproximativ omogen (*fig. 1.13*). Introducem în interiorul solenoidului, coaxial cu el, un cilindru din substanță paramagnetică. Câmpul magnetic al solenoidului orientează „magneții” moleculelor în sensul inducției \vec{B}_0 , iar curenții moleculari I_{mol} circulă în sensul curentului de intensitate I_0 din spirele solenoidului (*fig. 1.14*). Distribuția curenților într-o secțiune transversală a solenoidului și a cilindrului paramagnetic este reprezentată în *figura 1.15*.

Observăm că în partea interioară a paramagneticului curenții moleculari vecini circulă în sensuri opuse, iar la suprafața lui toți curenții au unul și același sens – cel al curentului din solenoid. Inducțiile magnetice ale câmpurilor respective au același sens, deci inducția magnetică \vec{B} în paramagnetic este mai mare în modül decât inducția magnetică în vid \vec{B}_0 , adică

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0, \quad (1.12)$$

unde $\mu_r \equiv \mu_r^{para} > 1$.

Mărimea adimensională μ_r care arată de câte ori inducția magnetică în substanță este mai mare în modül decât inducția magnetică în vid, până la introducerea substanței în locul dat, este numită **permeabilitate relativă a substanței**. Paramagneticii amplifică câmpul magnetic în care sunt introduși.

Cu totul alta este situația în cazul substanțelor diamagnetice. În lipsa câmpului magnetic exterior, curenții moleculari sunt nuli: $I_{mol} = 0$. La intro-

ducerea acestor substanțe în câmp magnetic exterior, mișcarea electronilor din molecule se modifică, astfel încât apar curenți moleculari care circulă în sens contrar celui din spirele solenoidului. Ca rezultat, inducția câmpului magnetic în diamagnetic este mai mică decât era în locul respectiv până la introducerea în el a substanței. Astfel, pentru diamagnetici permeabilitatea relativă $\mu_r \equiv \mu_r^{dia} < 1$.

În tabelul de mai jos sunt incluse valorile permeabilității relative pentru câteva substanțe.

Permeabilitatea relativă

Paramagneticul	μ_r	Diamagneticul	μ_r
Aluminiu	1,000023	Bismut	0,999824
Aer	1,00000038	Apă	0,999991
Oxigen	1,0000019	Cupru	0,999990
Wolfram	1,000176	Sticlă	0,999987

Din analiza tabelului constatăm că permeabilitatea relativă a acestor substanțe diferă foarte puțin de 1, prin urmare ele au proprietăți magnetice ne semnificative.

Există câteva metale – fierul (Fe), gadoliniul (Gd), cobaltul (Co), nichelul (Ni) – și aliajele acestora care sunt caracterizate de proprietăți magnetice deosebite. Ele poartă numele de **feromagnetici**, deoarece fierul este cel mai răspândit și posedă proprietăți mai pronunțate. Permeabilitatea relativă a lor are valori destul de mari, de până la $\mu_r = 8\ 000$, adică de atâtea ori amplifică câmpul magnetic și acțiunile lui.

Feromagneticii se utilizează pe larg în **electromagneți**. Aceștia prezintă bobine de sârmă izolată înfășurată în unul sau mai multe straturi, în interiorul cărora se află un miez din substanță feromagnetică. Substanța se alege astfel încât la întreruperea curentului electric în bobine să dispară proprietatea de atracție magnetică.

Electromagneții au un domeniu vast de aplicabilitate, inclusiv în **relee electromagnetice**. (Anumite aplicații ale electromagneților vă sunt cunoscute de la orele de fizică din clasa a VIII-a.)

Unele substanțe (aliaje) feromagnetice rămân magnetizate și atunci când intensitatea curentului în bobină devine nulă, adică rămân magnetizate și în lipsa câmpului magnetic exterior. Această stare de magnetizare este numită **remanentă**. Ea este caracteristică pentru magneții permanenți. Drept exemplu sunt magneții în formă de bară sau de potcoavă și acele magnetice folosite în busole.

Magneții permanenți sunt părți componente ale unor aparate electrice de măsurat, de exemplu, ale celor **magnetoelectrice**. Ele reprezintă un magnet în formă

de potcoavă, între ai cărui poli se poate roti ușor un cadru (o bobină) parcurs(ă) de curentul măsurat (fig. 1.16). La polii magnetului sunt fixate capetele (1) prelucrate astfel încât între ele, cilindru (2) și bobină (3) să rămână spații înguste. Pe axul bobinei este întărit acul indicator (4) și capetele unor arcuri spiralate (5) care mențin bobina astfel încât o pereche de laturi ale ei să fie paralele liniilor de inducție magnetică. Atunci când prin bobină circulă curent electric, în conductoarele din ea, situate paralel generatoarelor cilindricului, curenții au sensuri opuse. Forțele ce acționează asupra acestor conductoare din partea câmpului magnetic la fel au sensuri opuse și rotesc bobina până în poziția în care aceste forțe electromagnetice sunt echilibrate de forțele elastice din arcurile spiralate. La o intensitate mai mare a curentului din bobină, forțele, deci și unghiul de rotație a acului indicator, vor fi mai mari.

Aparatele de acest tip pot fi folosite numai la măsurători în curent continuu.

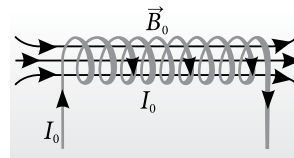


Fig. 1.13

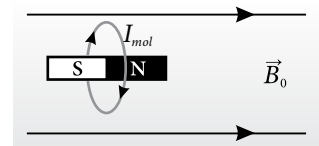


Fig. 1.14

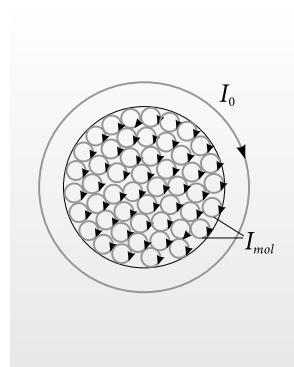


Fig. 1.15

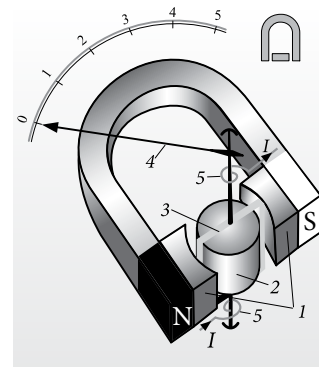


Fig. 1.16

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care este sensul fizic al permeabilității relative a substanței? Ce valori are ea pentru paramagnetici? diamagnetici? feromagnetici?
2. Ce subînțelegem prin magnetism remanent?
3. Ce proprietăți trebuie să poseze miezul unui electromagnet?
4. Propuneți construcția unui aparat electric de măsurat în care ar fi folosită atracția feromagnetului de bobina parcursă de curent electric.
5. Scrieți un referat la tema: „Aplicații practice ale electromagneților”.

1.6. INDUCȚIA ELECTROMAGNETICĂ

Descoperirea de către Oersted, în anul 1820, a existenței câmpului magnetic în jurul conductoarelor parcurse de curent a pus în evidență legătura dintre fenomenele electrice și magnetice. Dacă conductorul parcurs de curent electric creează în jurul său câmp magnetic, atunci de ce n-ar fi posibil să se obțină electricitate cu ajutorul câmpului magnetic? Această ipoteză a fost formulată pentru prima dată de către Michael Faraday în anul 1821. În urma mai multor experimente realizate cu magneți și bobine pe parcursul a zece ani, cercetările lui s-au încununat de succes. Astfel, în anul 1831, Faraday a descoperit **inducția electromagnetică**.

a. Fenomenul inducției electromagnetice. Aplicații practice

Schema experimentului în care Faraday a obținut curent electric cu ajutorul câmpului magnetic este

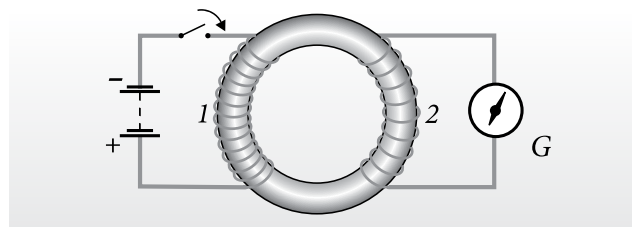
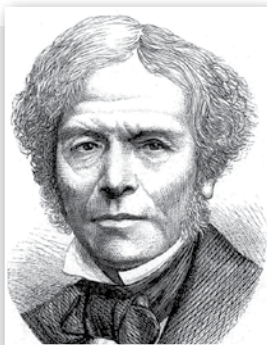


Fig. 1.17

prezentată în figura 1.17. El a confecționat un inel din fier de aproximativ 2 cm grosime și 15 cm în diametru și a înfășurat pe acesta două bobine din sârmă de cupru. A conectat bobina (1) la o sursă puternică de curent continuu, care genera în interiorul ei un câmp magnetic, amplificat de miezul de fier, iar circuitul bobinei (2) l-a închis printr-un galvanometru sensibil G pentru înregistrarea existenței curentului de intensitate mică. În urma acestui experiment, Faraday a observat că la închiderea circuitului bobinei (1) acul indicator al galvanometrului din circuitul bobinei (2)



MICHAEL FARADAY
(1791–1867)

fizician și chimist englez

Primele sale cercetări științifice țin de domeniul chimiei, dintre care cele mai importante sunt experimentele legate de lichefierea gazelor. În anul 1821, Faraday face prima sa descoperire în domeniul electromagnetismului, construind modelul primului motor electric. Descoperă în 1831 fenomenul inducției electromagnetice, iar în 1833 – legile electrolizei, care au avut nu numai importanță practică, dar au confirmat și concepția despre natura discretă a cantității de electricitate. A introdus în fizică un șir de noțiuni noi: mobilitatea purtătorilor de sarcină (a. 1827), catod, anod, ioni, electroliză, electroliți, electrozi (a. 1834). A descoperit polarizarea dielectricilor și a introdus noțiunea de permitivitate electrică (a. 1837). În anul 1843 a demonstrat experimental legea conservării sarcinii electrice. A pus bazele teoriei diamagnetismului (a. 1845), a paramagnetismului (a. 1847) și a introdus noțiunea de câmp. În cinstea lui Faraday, unitatea capacității electrice în Sistemul Internațional de Unități a fost numită *farad*.

deviază brusc, apoi revine rapid la poziția inițială. Același comportament al acului indicator a fost observat și la întreruperea circuitului bobinei (1), însă deviația bruscă se producea în sens opus celei precedente. Întrucât la închiderea (întreruperea) circuitului bobinei (1) intensitatea curentului crește (descrește) până la stabilirea valorii maxime (nule), inducția câmpului magnetic din bobina (2) variază în același mod, adică se mărește până la o valoare maximă sau se micșorează până la zero. Astfel, Faraday a ajuns la concluzia că pentru obținerea curentului în circuitul bobinei (2) este necesară existența unui câmp magnetic variabil. Acest curent a fost numit **curent de inducție** sau **curent indus**, iar fenomenul de generare a curentului electric cu ajutorul câmpului magnetic – **inducție electromagnetă**.

Pentru stabilirea condițiilor de apariție a curentului de inducție, Faraday a efectuat un șir de alte experimente, pe care le vom analiza în continuare.

Într-o bobină cu multe spire, conectată la galvanometrul G , este introdus sau înlăturat în diferite moduri un magnet-bară (fig. 1.18, a, b). Se constată că acul indicator al galvanometrului deviază numai în timpul mișcării magnetului de-a lungul axei bobinei și revine la poziția zero când acesta se oprește. Cu cât viteza de mișcare a magnetului este mai mare, cu atât deviația acului galvanometrului este mai bruscă, deci intensitatea curentului de inducție este mai mare. Dacă însă magnetul se mișcă într-un plan perpendicular pe axa bobinei, atunci galvanometrul nu înregistrează existența curentului de inducție (fig. 1.18, c). Aceleași rezultate se obțin și atunci când în experimentele reprezentate schematic în figura 1.18 magnetul este imobil, iar bobina se mișcă. În concluzie, **curentul de inducție ia naștere doar în cazul mișcării relative a magnetului și a bobinei**.

Menționăm că magnetul permanent din experimentele precedente poate fi înlocuit cu un solenoid prin care circulă curentul continuu de intensitate I .

Fenomenul inducției electromagnetice are nu numai importanță științifică fundamentală, dar și numeroase aplicații practice. El se află la baza construcției generatoarelor de curent alternativ și continuu, a motoarelor electrice, transformatoarelor, diferitor dispozitive electrotehnice și radiotehnice.

Există foarte multe aparate și dispozitive în care este folosită inducția electromagnetă. Ele se utilizează în diverse domenii, începând cu aparatele casnice

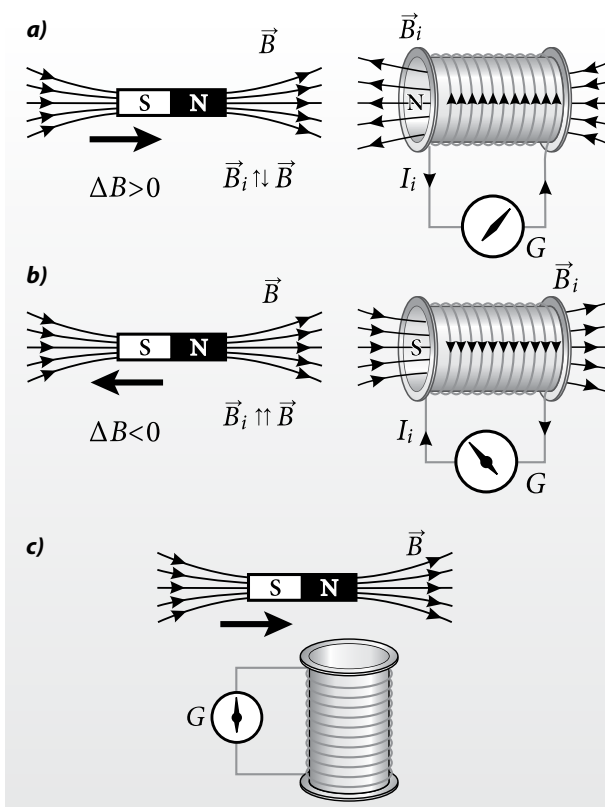


Fig. 1.18

și terminând cu cele mai avansate tehnologii industriale. În cele ce urmează vom analiza construcția și principiul de funcționare a câtorva dintre ele.

Unul dintre dispozitivele folosite pentru transformarea oscilațiilor sonore în cele electrice este **microfonul electrodinamic** prezentat în *figura 1.19* în secțiune. El constă dintr-un magnet permanent (1) de formă cilindrică cu un miez situat la mijloc, astfel încât se obține un spațiu îngust (2) cu un câmp magnetic puternic, în care se poate deplasa liber bobina (3). Membrana (4) este legată cu bobina și se mișcă împreună. Pentru asigurarea unei mobilități mai bune, marginile membranei sunt gofrate. Dacă la membrană ajung variațiile de presiune ale aerului determinate de propagarea undelor sonore, atunci ea împreună cu bobina începe să oscileze în câmp magnetic. Drept urmare, în conformitate cu legea inducției electromagnetice, în bobină ia naștere o tensiune electromotoare (abreviat *t.e.m.*) de inducție variabilă de aceeași frecvență cu cea a oscilațiilor sonore. Cu cât oscilațiile sonore au o amplitudine mai mare, cu atât mai mare este și amplitudinea *t.e.m.* de inducție variabilă.

Curenții de inducție care apar în conductoarele metalice masive aflate în câmp magnetic variabil sunt numiți **curenți turbionari** sau **curenți Foucault** (în cinstea fizicianului francez J.B.L. Foucault (1819–1868) care i-a descoperit). Întrucât rezistența conductoarelor masive este mică, curenții turbionari pot atinge valori foarte mari provocând o încălzire considerabilă a conductoarelor. Acest fenomen stă la baza funcționării **cuptoarelor de inducție**. Elementul de bază al unui cuptor de inducție este o bobină, numită **inductor**, prin care circulă curent alternativ. Corpul metalic, care trebuie prelucrat termic, se introduce în câmpul magnetic variabil al inductorului. În consecință, corpul de prelucrat este parcurs de curenți turbionari de intensitate mare și, încălzindu-se prin efect termic, atinge temperaturi foarte înalte. Variind frecvența câmpului magnetic, se modifică adâncimea la care pătrund curenții turbionari.

b. Fluxul câmpului magnetic. Regula lui Lenz

Pentru descrierea cantitativă a fenomenului inducției electromagnetice vom constata o trăsătură comună a tuturor experimentelor analizate în *subtema 1.6*, a – un număr variabil de linii de inducție ale câmpului magnetic intersectează suprafața mărginită de spirele bobinei. În acest scop, vom introduce o mărime fizică nouă numită **flux magnetic**.

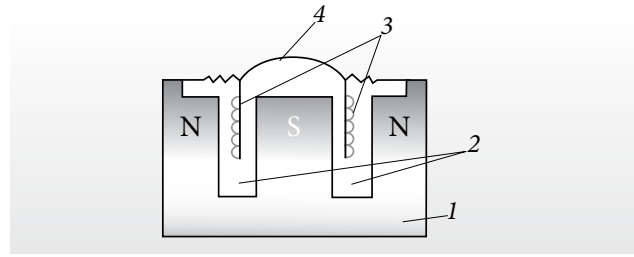


Fig. 1.19

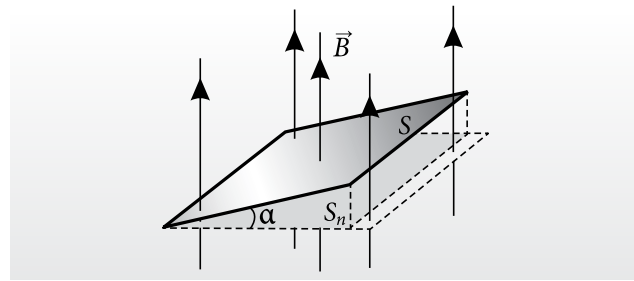


Fig. 1.20

Să examinăm o suprafață plană de arie S situată într-un câmp magnetic omogen de inducție \vec{B} . Este evident că numărul liniilor magnetice ce intersectează suprafața S depinde de poziția acesteia. Într-adevăr, numărul respectiv are valoarea maximă, dacă liniile de câmp sunt perpendiculare pe suprafața cercetată și este egal cu zero, când ele sunt paralele cu planul suprafeței S . Pentru o poziție arbitrară a suprafeței S , numărul liniilor magnetice ce o intersectează este egal cu cel ce intersectează proiecția ei S_n pe planul perpendicular liniilor (*fig. 1.20*). Dacă unghiul dintre suprafețele S și S_n este α , atunci:

$$S_n = S \cos \alpha.$$

Mărima fizică Φ egală cu produsul dintre modulul vectorului inducției magnetice B și aria proiecției S_n a suprafeței cercetate pe planul perpendicular vectorului \vec{B} se numește **flux magnetic:**

$$\Phi = BS_n \quad (1.13)$$

sau

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (1.14)$$

Unitatea de flux magnetic în SI a fost numită **weber (Wb)** în cinstea fizicianului german Wilhelm Weber (1804–1891). Un Wb este fluxul magnetic al unui câmp magnetic omogen cu inducția de 1 T printr-o suprafață plană cu aria de 1 m², situată perpendicular pe direcția câmpului magnetic:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2.$$

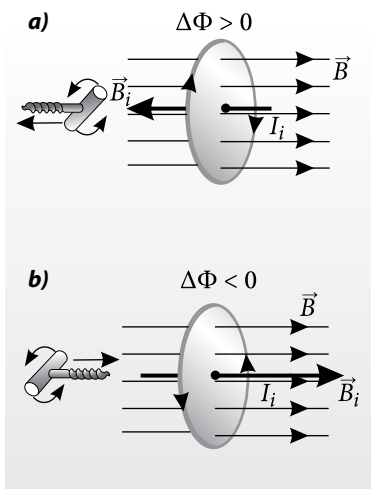


Fig. 1.21

Dacă într-un câmp magnetic omogen se află o bobină cu N spire identice cu aria S , atunci fluxul magnetic prin această bobină este de N ori mai mare decât cel printr-o spiră, adică

$$\Phi = NBS \cos \alpha. \quad (1.15)$$

În anul 1833, analizând experimentele efectuate de Faraday referitoare la inducția electromagnetică, Lenz a observat că variațiile fluxului câmpului magnetic inductor $\Delta\Phi$ și al celui indus $\Delta\Phi_i$, întotdeauna au semne opuse. De exemplu, la apropierea magnetului față de bobină (fig. 1.18), creșterea inducției câmpului magnetic inductor \vec{B} determină o variație pozitivă $\Delta\Phi > 0$ a fluxului său magnetic. Concomitent, curentul de inducție care ia naștere în bobină creează un câmp magnetic indus caracterizat de vectorul de inducție \vec{B}_i , orientat astfel încât fluxul lui se opune variației fluxului inductor: la apropierea magnetului $\Delta\Phi > 0$ și $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$, iar la îndepărtarea lui $\Delta\Phi < 0$ și $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$. Știind sensul vectorului \vec{B}_i și aplicând regula burghiului cu filet de dreapta, devine cunoscut sensul curentului de inducție.

Așadar, în baza observărilor sale asupra fenomenului inducției electromagnetice, Lenz formulează o regulă generală pentru determinarea sensului curentului de inducție ce-i poartă numele:

Curentul de inducție are un astfel de sens, încât fluxul magnetic indus se opune variației fluxului magnetic inductor.

Modul de aplicare a regulii lui Lenz este ilustrat în figura 1.21, a, b. În acest scop se realizează următoarele:

- se stabilește cauza apariției curentului de inducție și semnul variației fluxului magnetic inductor $\Delta\Phi$;
- se determină sensul vectorului \vec{B}_i : dacă $\Delta\Phi > 0$, atunci $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$, iar dacă $\Delta\Phi < 0$, atunci $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$;
- cu ajutorul regulii burghiului cu filet de dreapta aplicată vectorului \vec{B}_i se stabilește sensul curentului de inducție.

Regula lui Lenz exprimă o proprietate fundamentală a oricăror sisteme fizice:

O acțiune exterioară asupra oricărui sistem stimulează în interiorul lui procese care tind să atenueze rezultatele acestei acțiuni.

Într-adevăr, în experimentele ilustrate în figura 1.18, acțiunea exterioară (variația fluxului magnetic prin efectuarea unui lucru mecanic pentru deplasarea magnetului) asupra sistemului (a bobinei) stimulează apariția curentului de inducție care formează câmpul magnetic indus. Interacțiunea polilor acestui câmp cu cei ai magnetului întotdeauna împiedică mișcarea lui. La apropierea magnetului interacționează polii N-N și apare o forță de respingere (fig. 1.18, a), iar la îndepărtarea lui forța de interacțiune a polilor N-S (fig. 1.18, b) este de atracție.

Anume prin existența acestor forțe se explică următoarea experiență, care servește drept o confirmare a regulii lui Lenz. Un inel ușor din cupru sau aluminiu este suspendat de două fire subțiri. Dacă încercăm să introducem un magnet în interiorul inelului, acesta începe să se deplaseze în același sens cu magnetul (fig. 1.22, a), iar la îndepărtarea magnetului,

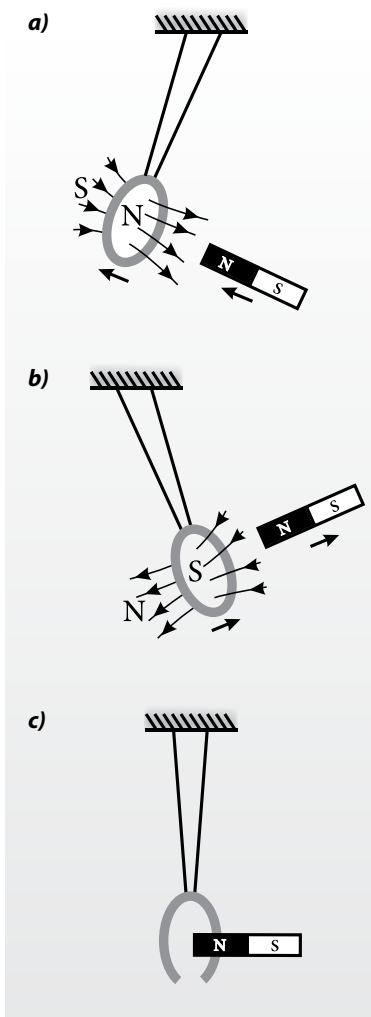


Fig. 1.22

inelul vine după el (fig. 1.22, b). Acest rezultat se explică simplu, considerând interacțiunea cu curentul de inducție care ia naștere în inel. Dacă inelul are o tăietură (fig. 1.22, c), atunci curentul de inducție nu circulă și mișcarea inelului nu se observă. Când prin inel circulă curentul de inducție, apare și un câmp magnetic indus. Inelul parcă ar deveni și el un magnet care interacționează cu cel aflat în mișcare.

c. Legea inducției electromagnetice. Tensiunea electromotoare de inducție

Existența curentului de inducție într-un circuit închis, ca și a oricărui alt curent electric, este determinată de prezența în acest circuit a unei tensiuni electromotoare.

În baza experiențelor descrise în subtema 1.6, a, Faraday a constatat că această tensiune electromotoare de inducție (*t.e.m.*) este cu atât mai mare cu cât fluxul magnetic care străbate circuitul închis variază mai rapid. Dacă în intervalul de timp Δt fluxul magnetic se modifică cu $\Delta\Phi$, atunci *t.e.m.* de inducție

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1.16)$$

Raportul $\Delta\Phi/\Delta t$ din această relație arată cât de repede variază fluxul magnetic și este numit **viteză de variație a fluxului magnetic**, iar semnul „minus” corespunde regulii lui Lenz. Tensiunea electromotoare de inducție dă naștere unui curent indus, al cărui câmp magnetic se opune variației fluxului magnetic inductor, adică pentru $\Delta\Phi/\Delta t > 0$ avem $\mathcal{E}_i < 0$ și invers, pentru $\Delta\Phi/\Delta t < 0$ avem $\mathcal{E}_i > 0$.

Relația (1.16) reprezintă o lege universală, numită **legea inducției electromagnetice (legea lui Faraday)**. Ea este valabilă întotdeauna, indiferent de forma circuitului străbătut de fluxul magnetic și de módul în care se produce variația lui.

Tensiunea electromotoare de inducție (\mathcal{E}_i) într-un circuit închis este egală cu viteza de variație a fluxului magnetic prin suprafața mărginită de acest circuit luată cu semnul opus.

Apariția *t.e.m.* de inducție și a curentului indus demonstrează existența unui câmp electric care pune purtătorii de sarcină în mișcare ordonată.

T.e.m. de inducție nu este localizată, adică nu este concentrată într-un anumit loc al circuitului. Ea poate fi detectată între oricare două puncte care de-

limitează o porțiune de conductor din circuitul străbătut de un flux magnetic variabil. Așadar,

variația fluxului magnetic printr-un circuit închis conduce la apariția unui câmp electric cu linii închise, adică turbionar.

Din legea lui Faraday avem:

$$\Delta\Phi = - \mathcal{E}_i \Delta t.$$

Această formulă permite definirea unității de flux magnetic în alt mod.

Un weber (Wb) este fluxul magnetic printr-un contur închis, la micșorarea căruia până la zero în timp de 1 s în acest contur ia naștere o *t.e.m.* de inducție de 1 V:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}.$$

Să analizăm mișcarea unui conductor rectiliniu de lungime l într-un plan perpendicular pe liniile câmpului magnetic omogen de inducție \vec{B} . Admitem că viteza \vec{v} este constantă și perpendiculară pe conductor (fig. 1.23). Împreună cu conductorul se vor deplasa cu viteza \vec{v} electronii liberi și ionii pozitivi ai acestuia. Fiecare purtător de sarcină se află sub acțiunea forței Lorentz $F_L = qvB \sin 90^\circ = qvB$, orientată spre capetele conductorului, după cum este indicat în figura 1.23. Ca rezultat, se produce separarea sarcinilor din conductor și în interiorul lui apare un câmp electric de intensitate \vec{E} , determinat de sarcinile acumulate la capete. Mișcarea purtătorilor de sarcină spre capetele conductorului are loc până când forța ce acționează asupra lor din partea câmpului electric $F_e = qE$ devine egală în módul cu forța Lorentz (fig. 1.23), adică $F_e = F_L$ sau $qE = qvB$, de unde rezultă

$$E = vB. \quad (1.17)$$

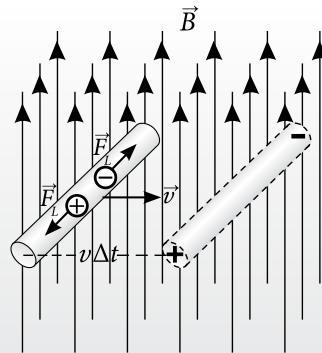


Fig. 1.23

Diferența de potențial la capetele conductorului, egală cu *t.e.m.* de inducție, se determină din relația $U = \mathcal{E}_i = E \cdot l$. Folosind expresia (1.17), obținem

$$\mathcal{E}_i = vBl. \quad (1.18)$$

Dacă însă conductorul perpendicular pe liniile de câmp magnetic se deplasează cu viteza \vec{v} orien-

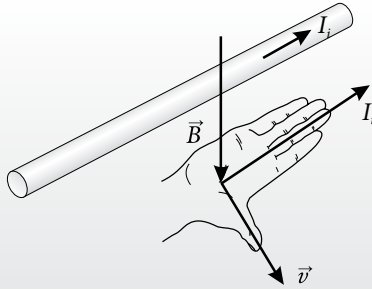


Fig. 1.24

tată sub un unghi α față de vectorul inducției magnetice \vec{B} , atunci valoarea *t.e.m.* de inducție se calculează cu ajutorul relației

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha. \quad (1.19)$$

Sensul curentului indus și al *t.e.m.* de inducție se stabilește cu ajutorul regulii lui Lenz, însă în cazul unui conductor rectiliniu este mai simplă și mai comodă utilizarea regulii mâinii drepte (fig. 1.24):

Mâna dreaptă se așază astfel ca vectorul inducției magnetice \vec{B} să intre în palmă, iar degetul mare întins lateral să indice sensul vectorului viteză \vec{v} de deplasare a conductorului. În acest caz celelalte patru degete întinse vor indica sensul curentului indus I_i în conductor.

Problemă rezolvată

O bobină de forma unui cadru pătrat cu latura $a = 10$ cm este confecționată dintr-un conductor de lungime $l = 100$ m și rezistență $R = 10 \Omega$, ale cărui capete sunt unite între ele. Bobina este așezată pe masă, astfel încât componenta verticală a câmpului magnetic terestru de inducție $B_{\perp} = 50 \mu\text{T}$ este perpendiculară pe planul ei. Ce sarcină va trece prin bobină la rotirea ei până la poziția în care liniile de câmp vor fi paralele cu planul bobinei?

Se dă:

$a = 0,1$ m,
 $l = 100$ m,
 $R = 10 \Omega$,
 $B_{\perp} = 5 \cdot 10^{-5}$ T
 $\Delta q = ?$

Rezolvare:

Din legea lui Ohm și (1.16) rezultă:

$$I_i = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}.$$

În intervalul de timp Δt prin circuitul bobinei trece sarcina $\Delta q = I_i \Delta t$, prin urmare:

$$\Delta q = \frac{|\Delta\Phi|}{R}. \quad (1.20)$$

Observăm că sarcina Δq depinde numai de variația fluxului magnetic, indiferent de rapiditatea acestui proces.

Fluxul magnetic prin fiecare spirală a bobinei este același, determinat de relația (1.14). Rezultă că fluxul total prin bobină are valoarea $\Phi_{tot} = NB_{\perp}S \cos \alpha$, unde $N = l/(4a)$ este numărul de spire, iar $S = a^2$ este aria suprafeței secțiunii pătrate a bobinei. În poziția inițială, unghiul dintre perpendiculara pe suprafața S și direcția liniilor de inducție este egal cu zero, iar fluxul magnetic

$$\Phi_{tot.1} = NB_{\perp}S \cos 0^\circ = \frac{l}{4a} B_{\perp} a^2 = \frac{1}{4} B_{\perp} la.$$

După rotirea bobinei, unghiul respectiv devine egal cu 90° , iar fluxul magnetic

$$\Phi_{tot.2} = NB_{\perp}S \cos 90^\circ = 0.$$

Introducând aceste rezultate în (1.20), obținem:

$$\Delta q = \frac{|\Phi_{tot.2} - \Phi_{tot.1}|}{R} = \frac{\Phi_{tot.1}}{R} = \frac{B_{\perp} la}{4R} = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ C} = 12,5 \mu\text{C}.$$

Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă fenomenul inducției electromagnetice?
2. Care este construcția microfonului electrodinamic? Cum funcționează el?
3. Ce reprezintă cuptorul de inducție? Care este principiul de funcționare al acestuia?
4. Ce se numește flux magnetic și care este unitatea lui în SI?
5. Formulați regula lui Lenz. Care este modul de aplicare a acestei reguli?
6. Enunțați legea inducției electromagnetice. Care este expresia matematică a acesteia?
7. Determinați fluxul magnetic printr-o suprafață plană de arie $S = 100 \text{ cm}^2$, aflată într-un câmp magnetic de

inducție $B = 0,6$ T, ce formează un unghi de 30° cu suprafața.

- 8.* O spirală conductoare de arie $S = 50 \text{ cm}^2$, închisă printr-un condensator de capacitate $C = 200 \mu\text{F}$, se află într-un câmp magnetic omogen, perpendicular pe planul spirei. Determinați sarcina de pe armăturile condensatorului, dacă viteza de variație a inducției magnetice este de 1000 T/s.
- 9.* Un conductor de forma unui triunghi echilateral cu latura de 4 cm și rezistența $R = 0,5 \Omega$ este situat într-un câmp magnetic omogen de inducție $B = 0,05$ T. Liniile de inducție ale câmpului sunt perpendiculare pe planul conductorului. Ce sarcină va trece prin conductor la transformarea lui într-un cerc în același plan?

1.7. AUTOINDUCȚIA. INDUCTANȚA CIRCUITULUI

a. Fenomenul de autoinducție

Un caz particular foarte important al fenomenului inducției electromagnetice are loc la variația fluxului magnetic datorită curentului electric variabil din circuit. Într-adevăr, dacă prin spirele unei bobine circulă un curent variabil, atunci el produce în interiorul ei un câmp magnetic al cărui flux este, de asemenea, variabil. Astfel, în conformitate cu legea lui Faraday (1.16), în spirele bobinei ia naștere o *t.e.m.* proprie de inducție, determinată de variația curentului prin aceeași bobină. Acest fenomen a fost descoperit de către fizicianul american Joseph Henry (1797–1878) și se numește **autoinducție**.

Autoinducția este fenomenul apariției *t.e.m.* de inducție în circuite datorită curentului variabil din ele.

În *figura 1.25* sunt reprezentate simbolurile bobinelor folosite în schemele circuitelor electrice: a) fără miez; b) cu miez de fier.

Fenomenul de autoinducție se poate observa experimental cu ajutorul circuitului reprezentat în *figura 1.26*, alcătuit dintr-o sursă de curent continuu, la care sunt legate în paralel două ramuri. Una din ramuri conține bobina L și becul B_1 , legate în serie, iar a doua – un reostat R și becul B_2 identic cu B_1 . Cu ajutorul reostatului se reglează rezistența ramurii până la egalarea ei cu cea a ramurii LB_1 . Astfel, becurile B_1 și B_2 se vor afla în aceleași condiții de alimentare: prin ele vor circula curenți egali și vor lumina la fel.

La închiderea întrerupătorului K se observă că becul B_1 obține o strălucire normală cu o anumită întârziere față de cea a becului B_2 . Cauza acestei întârzieri este fenomenul de autoinducție. Într-adevăr, la închiderea întrerupătorului intensitatea curentului din circuit crește rapid de la zero până la valoarea sa constantă I . În același timp, crește și inducția câmpului magnetic creat de acest curent. Rezultă că bobina este străbătută de un **flux magnetic crescător** și, conform legii inducției electromagnetice, în spirele ei se generează o tensiune electromotoare, numită în acest caz ***t.e.m.* de autoinducție**.

Conform regulii lui Lenz, polaritatea *t.e.m.* de autoinducție la bornele bobinei este inversă celei de alimentare (*fig. 1.26*). În concluzie, acțiunea acestei *t.e.m.* frânează mișcarea ordonată a electronilor prin conductorul din care este confecționată bobina și intensitatea curentului se micșorează. Astfel, prin ramura LB_1 circulă un curent mai mic decât prin ramura RB_2 . Din această cauză strălucirea becului B_1 crește mai lent decât a becului B_2 . Însă îndată ce în circuit se stabilește valoarea constantă a curentului de alimentare, cel de autoinducție dispare și becurile au aceeași strălucire.

Este evident că fenomenul de autoinducție se va produce și la deconectarea circuitului, când intensitatea curentului de alimentare se micșorează rapid de la valoarea constantă până la zero. În acest caz, bobina este străbătută de un **flux magnetic descrescător**. La bornele ei apare o *t.e.m.* de autoinducție, cu aceeași polaritate ca și sursa de alimentare a circuitului. În consecință, micșorarea curentului din circuit se produce mai



Fig. 1.25

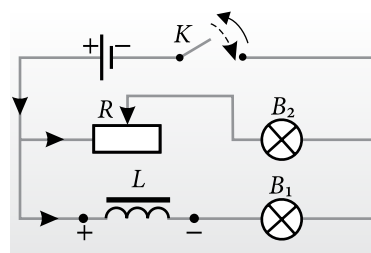


Fig. 1.26

lent și din acest motiv becurile B_1 și B_2 nu se vor stinge imediat după deconectarea circuitului, ci cu o anumită întârziere. Existența curentului de autoinducție poate fi observată mai simplu cu ajutorul circuitului din *figura 1.27*. La deschiderea întrerupătorului K , sursa de curent este înlăturată din circuit, însă becul B continuă pentru un timp scurt să lumineze destul de puternic.

Fenomenul de autoinducție în circuitele electrice este asemănător cu cel de inerție a corpurilor în mecanică. Tot așa cum viteza unui corp nu poate fi mărită (micșorată) instantaneu până la o anumită valoare, nici intensitatea curentului la închiderea circuitului nu poate lua momentan valoarea maximă (nulă), ci variază treptat.

Inerția unui corp se manifestă diferit în funcție de masa lui: cu cât masa este mai mare, cu atât inerția corpului este mai pronunțată. La fel, și în cazul circuitelor electrice trebuie să existe o mărime fizică ce le caracterizează și, prin urmare, este o măsură a autoinducției. Această mărime a fost numită **inductanță**.

b. Inductanța. *T.e.m.* de autoinducție

Fenomenul de autoinducție, fiind un caz particular al inducției electromagnetice, se manifestă cu atât mai intens cu cât este mai mare viteza de variație a fluxului magnetic propriu prin bobina circuitului cercetat. Fluxul magnetic ce străbate bobina este proporțional cu inducția câmpului magnetic din interiorul ei $\Phi \sim B$. În lipsa curentului în spirele bobinei ($I = 0$), câmpul magnetic nu există ($B = 0$).

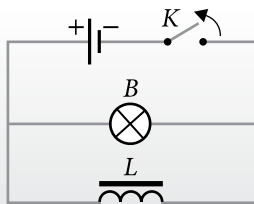


Fig. 1.27

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce reprezintă fenomenul de autoinducție?
2. Cum se poate observa experimental fenomenul de autoinducție?
3. Ce se numește inductanță a unei bobine și care este unitatea ei în SI?
4. Cu ce este egală *t.e.m.* de autoinducție și de care factori depinde ea?
5. O bobină cu inductanța de 50 mH este parcursă de un curent continuu cu intensitatea de 2 A. Ce *t.e.m.* de autoinducție ia naștere la bornele bobinei, dacă la întreruperea circuitului din care face parte curentul se micșorează uniform până la 0 în timp de 1 ms?

Conchidem că inducția B depinde de intensitatea curentului I . S-a stabilit că $B \sim I$. Drept rezultat,

$$\Phi = LI, \quad (1.21)$$

unde L este o constantă de proporționalitate specifică fiecărei bobine. Ea depinde de forma și dimensiunile bobinei, precum și de proprietățile magnetice ale miezului ei.

Mărimea fizică egală cu raportul dintre fluxul magnetic ce străbate o bobină și intensitatea curentului prin ea se numește *inductanță* a acestei bobine:

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Unitatea de inductanță în SI a fost numită **henry (H)**. O bobină are inductanța $L = 1$ H dacă la parcurgerea ei de un curent cu intensitatea de 1 A fluxul magnetic prin suprafața limitată de bobină este de 1 Wb:

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{A}}.$$

Dacă prin bobină circulă un curent I variabil, atunci fluxul magnetic de asemenea este variabil și din legea inducției electromagnetice avem:

$$\mathcal{E}_a = - \frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (1.22)$$

Tensiunea electromotoare (1.22) este numită ***t.e.m.* de autoinducție**, iar raportul $\Delta I/\Delta t$ reprezintă **viteza variației intensității curentului din circuit**. Așadar,

***t.e.m.* de autoinducție dintr-un circuit este direct proporțională cu viteza de variație a intensității curentului prin acest circuit, având coeficientul de proporționalitate egal cu inductanța bobinei din circuit.**

Din relația (1.22) se poate deduce încă o formulare a unității de inductanță. Un circuit sau un element al acestuia are inductanța de 1 H, dacă la variația uniformă a intensității curentului cu viteza de 1 A/s în acest circuit se generează o *t.e.m.* de autoinducție de 1 V, adică $1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$.

1.8. ENERGIA CÂMPULUI MAGNETIC

Să analizăm fenomenul autoinducției din punctul de vedere al transformărilor energetice care au loc, de exemplu, în circuitul din *figura 1.27*. S-a constatat deja că, la întreruperea circuitului, becul B mai luminează destul de puternic un timp scurt. Evident, energia necesară pentru aceasta nu este preluată de la sursa de curent, doar ea este înlăturată din circuit. Becul însă a rămas legat la bornele bobinei. Rezultă că bobina se comportă ca o nouă sursă de energie, care nu este altceva decât energia câmpului magnetic. Într-adevăr, la închiderea circuitului, o parte din energia furnizată de către sursa de curent este consumată pentru crearea câmpului magnetic în bobină, fiind înmagazinată în interiorul ei. Această energie poate fi restituită în circuit numai la dispariția câmpului magnetic, adică la întreruperea circuitului, când intensitatea curentului prin spirele bobinei scade până la zero.

Să calculăm energia câmpului magnetic dintr-o bobină caracterizată de inductanța L . Pentru aceasta, vom observa că, după înlăturarea sursei de curent, lucrul mecanic necesar pentru deplasarea sarcinii electrice q prin circuitul închis, format din becul B și bobina L , este efectuat pe seama energiei câmpului magnetic, care se micșorează până la zero. Întrucât lucrul mecanic efectuat în acest caz este egal cu produsul dintre *t.e.m.* de autoinducție \mathcal{E}_a și sarcina transportată q , pentru energia câmpului magnetic al bobinei avem:

$$W_m = \mathcal{E}_a q. \quad (1.23)$$

Pentru simplitate vom considera că intensitatea curentului se micșorează uniform, adică este o funcție liniară în raport cu timpul. Atunci în intervalul de timp Δt , în decursul căruia intensitatea curentului se micșorează de la valoarea inițială I până la cea finală egală cu zero, prin circuit este transportată sarcina

$$q = I_{med} \Delta t = \frac{I+0}{2} \Delta t = \frac{1}{2} I \Delta t, \quad (1.24)$$

iar *t.e.m.* de autoinducție, după cum rezultă din (1.22), are o valoare constantă

$$\mathcal{E}_a = -L \frac{0-I}{\Delta t} = \frac{LI}{\Delta t}. \quad (1.25)$$

Introducând (1.24) și (1.25) în (1.23) pentru energia câmpului magnetic al bobinei, obținem

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (1.26)$$

Expresia (1.26) pentru energia câmpului magnetic este foarte asemănătoare cu cea pentru energia cinetică cunoscută din mecanică: $E_c = mv^2/2$. Din comparația lor, rezultă că inductanța L a unui circuit electric este analogică cu masa m a unui corp în mișcare, iar intensitatea curentului de inducție (viteza de variație a sarcinii electrice în circuit) – cu viteza v a acestui corp.

Ținând seama de relația (1.21), energia câmpului magnetic al bobinei se mai poate exprima și prin fluxul magnetic care o străbate:

$$W_m = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}. \quad (1.27)$$

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se explică fenomenul autoinducției din punct de vedere energetic?
2. Cu ce este egală energia câmpului magnetic al unei bobine?
3. Determinați energia câmpului magnetic al unei bobine cu inductanța de 80 mH, dacă prin ea circulă un curent continuu de 0,5 A.
4. Câmpul magnetic al unei bobine de inductanță 8 mH posedă o energie de 1 mJ. Determinați: a) intensitatea curentului prin spirele bobinei; b) fluxul magnetic care străbate bobina.



CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV

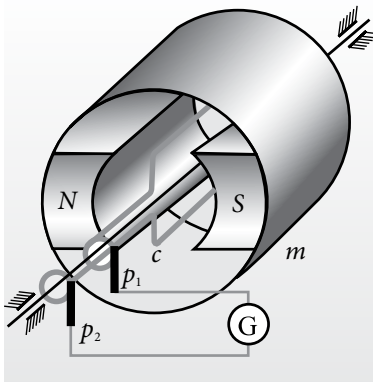


Fig. 2.1

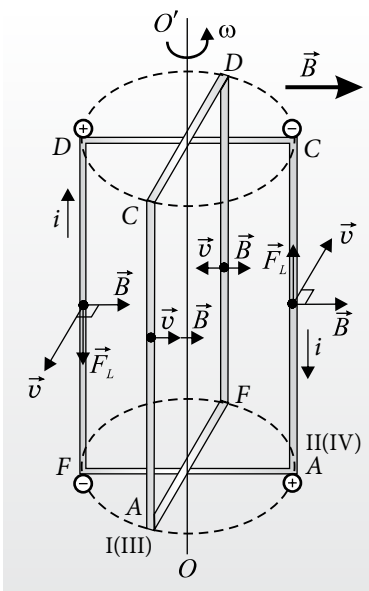


Fig. 2.2

2.1. GENERAREA TENSIUNII ELECTROMOTOARE ALTERNATIVE

Să ne amintim

Cunoaștem că ecuația mișcării oscilatorii armonice (sinusoidale) este

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2.1)$$

În această ecuație, mărimea $\omega t + \varphi_0$ este numită fază a oscilației. φ_0 este faza inițială, iar ω – pulsația oscilației. A este amplitudinea oscilațiilor (abaterea maximă de la poziția de echilibru), iar x – elongația (abaterea de la poziția de echilibru la momentul de timp t). Deoarece mișcarea oscilatorie este periodică, adică $x(t + T) = x(t)$, rezultă că $A \sin[\omega(t + T) + \varphi_0] = A \sin(\omega t + \varphi_0)$. Funcția „sinus” are perioada 2π și în intervalul de timp de la t până la $t + T$ egal cu o perioadă faza oscilației se modifică cu 2π . Adică $\omega(t + T) + \varphi_0 = \omega t + \varphi_0 + 2\pi$, de unde reiese relația dintre pulsația ω și perioada T :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad (2.2)$$

unde ν este frecvența oscilațiilor – mărime egală numeric cu numărul de oscilații complete efectuate într-o unitate de timp.

În clasa a XI-a ați studiat legile curentului electric continuu, ale curentului care circulă doar într-un singur sens. Există însă curenți care, după intervale de timp strict determinate, își schimbă sensul în opus.

Curent alternativ se numește curentul care se modifică în timp după o lege armonică

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2.3)$$

Aici I_m constituie valoarea maximă sau amplitudinea intensității curentului, i – valoarea lui instantanee, φ_0 – faza inițială a intensității curentului, mărimea ce se află sub semnul funcției „sinus” reprezintă **faza** intensității curentului, iar ω este pulsația lui.

Din comparația relațiilor (2.1) și (2.3) rezultă că intensitatea curentului alternativ are un caracter oscilatoriu.

Intervalul de timp în care intensitatea curentului i efectuează o oscilație completă, adică obține consecutiv aceeași valoare numerică, se numește *perioadă*, iar numărul oscilațiilor complete efectuate într-o secundă – *frecvență* a curentului alternativ.

Pulsția curentului alternativ se exprimă prin *frecvența* ν și *perioada* T ale acestuia cu ajutorul relației (2.2).

Frecvența curentului alternativ în SI se exprimă în **hertzi (Hz)**. Valoarea standard a acesteia, numită **frecvență industrială**, în majoritatea țărilor este de 50 Hz (în SUA și Canada, de exemplu, frecvența industrială este de 60 Hz).

Cea mai simplă metodă de obținere a curentului electric alternativ constă în crearea unui flux magnetic variabil în timp, care străbate suprafața unui cadru metalic (fig. 2.1). O astfel de variație se poate realiza în două moduri: fie prin rotirea cadrului metalic c în câmp magnetic staționar, fie prin rotirea câmpului magnetic, adică a cilindrului m pe pereții căruia sunt prinși magneții cu polii N și S, în jurul cadrului metalic fix. Conform legii inducției electromagnetice, în ambele cazuri, în cadrul metalic se generează un curent de inducție cu atât mai mare, cu cât viteza de variație a fluxului magnetic este mai mare. Dacă capetele cadrului se vor suda la două inele, atunci periutele alunecătoare p_1 și p_2 vor colecta tensiunea electromotoare (*t.e.m.*) indusă, măsurată de galvanometrul G . În cele ce urmează vom nota toate mărimile electrice variabile cu litere mici (i, u, e), iar valorile maxime ale lor, respectiv, cu litere mari (I_m, U_m, \mathcal{E}_m).

Să analizăm mai amănunțit procesul de generare a tensiunii electromotoare alternative. În acest scop, cercetăm mișcarea de rotație cu viteza unghiulară ω a cadrului $ACDF$ într-un câmp magnetic staționar de inducție \vec{B} (fig. 2.2). Observăm că laturile AC și DF de lungime l se deplasează cu viteza liniară \vec{v} , descriind un cilindru de rază egală cu jumătate din lungimea laturilor AF și CD ale cadrului. Electronii liberi din laturile AC și DF , mișcându-se cu aceeași viteză \vec{v} în câmpul magnetic de inducție \vec{B} , vor fi acționați de forța Lorentz din partea acestui câmp și de aceea devine posibilă separarea sarcinilor electrice pozitive și negative, adică apariția unei diferențe

de potențial. Întrucât mișcarea de rotație este periodică, vom examina acest proces în decursul unei perioade, adică al unei rotații complete.

La momentul de timp $t = 0$, când liniile câmpului magnetic sunt perpendiculare pe planul cadrului (poziția I în fig. 2.2), vectorii \vec{v} și \vec{B} sunt coliniari și forța Lorentz $F_L = |e|vB \sin \alpha$ este nulă. Datorită mișcării de rotație a cadrului, unghiul $\alpha = \omega t$ dintre \vec{v} și \vec{B} crește. Iar odată cu el se mărește și forța Lorentz, ce acționează asupra electronilor liberi, devenind maximă la momentul $t = \pi/2\omega$, pentru care $\alpha = \pi/2$. Sensul acestei forțe se stabilește cu ajutorul regulii mâinii stângi. Astfel, la capetele C și F (poziția II în fig. 2.2) se acumulează sarcina negativă, iar la A și D – pozitivă. Din această cauză prin laturile AC și DF circulă un curent de intensitate i , având sensul prin fiecare din ele indicat în figura 2.2. La creșterea unghiului α în intervalul $\pi/2 < \alpha < \pi$, forța Lorentz, ce acționează asupra electronilor liberi din cadru, se micșorează. La momentul de timp $t = \pi/\omega$, când $\alpha = \pi$ (poziția III în fig. 2.2), la capetele laturilor AC și, respectiv, DF diferența de potențial devine nulă, de aceea prin cadru nu circulă curent. Rotirea în continuare a cadrului ($\pi < \alpha < 2\pi$) conduce la apariția în laturile AC și DF a unui curent de sens opus celui care circula în ele când $0 < \alpha < \pi$. Acest curent are valoarea maximă în modul la momentul de timp $t = 3\pi/2\omega$ (poziția IV în fig. 2.2), când laturile AC și DF își schimbă reciproc pozițiile.

Conform relației (1.19), *t.e.m.* induse în laturile AC și DF la un moment de timp arbitrar sunt $e_{AC} = Bvl \sin \alpha$ și $e_{DF} = Bvl \sin (\pi - \alpha) = Bvl \sin \alpha$, care se adună asemenea *t.e.m.* a generatoarelor grupate în serie. Astfel, în cadrul metalic se induce o *t.e.m.*

$$e = e_{AC} + e_{DF} = 2Bvl \sin \alpha = \mathcal{E}_m \sin \omega t, \quad (2.4)$$

unde $\mathcal{E}_m = 2Bvl$ este valoarea maximă a *t.e.m.* indusă în cadru.

Luând în considerare relația dintre viteza liniară v și cea unghiulară ω (cunoscută din clasa a X-a), $v = 2\pi vr = \omega r = \omega d/2$ (d este lungimea laturilor AF și CD perpendiculare pe axa de rotație), pentru valoarea maximă a *t.e.m.* din cadru avem:

$$\mathcal{E}_m = 2Bl \cdot \omega \frac{d}{2} = \omega BS = \omega \Phi_m, \quad (2.5)$$

unde $S = ld$ este aria suprafeței cadrului, iar Φ_m este valoarea maximă a fluxului magnetic prin această

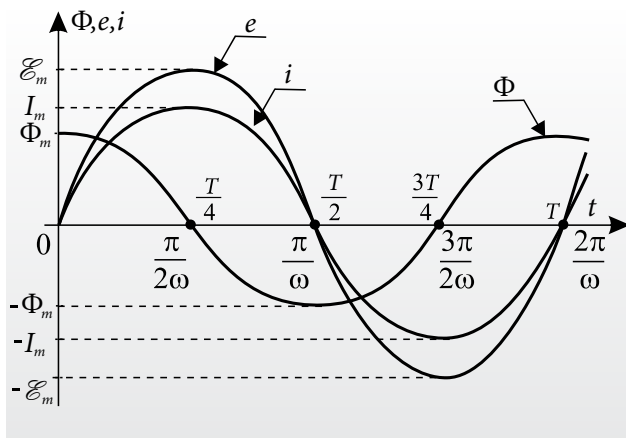


Fig. 2.3

suprafață. Vom menționa că valoarea *t.e.m.* maxime \mathcal{E}_m poate fi amplificată nu numai pe seama mărimilor ce intervin în (2.5), ci și confecționând un cadru cu mai multe spire. Dacă cadrul metalic conține N spire, atunci

$$\mathcal{E}_m = N\omega BS = N\omega\Phi_m.$$

Mișcarea uniformă de rotație a unui cadru metalic în jurul axei de simetrie perpendiculară pe liniile unui câmp magnetic omogen generează *t.e.m.* alternativă sinusoidală.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce reprezintă perioada și frecvența curentului alternativ sinusoidal?
2. Ce lege stă la baza obținerii curentului electric alternativ? Cum poate fi colectată *t.e.m.* alternativă?
3. Descrieți procesul de separare a sarcinilor pozitive și negative. Care este sensul curentului indus?
4. Cum poate fi amplificată *t.e.m.* maximă, obținută prin rotirea unui cadru metalic în câmp magnetic?
5. Explicați de ce *t.e.m.* e și curentul i capătă valori-limită când fluxul magnetic ce străbate cadrul metalic este nul?
6. Frecvența industrială a curentului alternativ este egală cu 50 Hz. De câte ori își schimbă sensul acest curent în decurs de o secundă?

2.2. VALORILE EFECTIVE ALE INTENSITĂȚII ȘI TENSIUNII ALTERNATIVE

Într-un circuit de curent alternativ sinusoidal valorile medii ale *t.e.m.* și intensității curentului în decurs de o perioadă sunt nule. Dacă însă în acest circuit se conectează un aparat de măsură a acestor mărimi pentru curentul alternativ, atunci el înregistrează anumite valori. Ce reprezintă, în acest caz, indicația aparatului de măsură și care este sensul ei fizic?

T.e.m. (2.4) indusă în cadru determină apariția unui curent sinusoidal indus, care poate fi pus în evidență cu un galvanometru G (fig. 2.1). Conform legii lui Ohm, intensitatea acestui curent $i = e/R_t$, unde R_t reprezintă rezistența totală a circuitului format. Obținem:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2.6)$$

unde

$$I_m = \mathcal{E}_m / R_t.$$

În figura 2.3 sunt prezentate graficele: *t.e.m.* e (2.4), al intensității curentului i (2.6) și al fluxului magnetic Φ (1.14) în funcție de timp. Se constată că *t.e.m.* e și intensitatea curentului i obțin valori-limită ($\pm \mathcal{E}_m$ și $\pm I_m$) pe când fluxul magnetic prin cadrul metalic este nul. Aceasta se realizează la momentele de timp $t = (2k + 1)\pi/2\omega = (2k + 1)T/4$ ($k \in \mathbb{N}$), când viteza de variație a fluxului magnetic este maximă. Altfel spus, atunci când laturile AC și DF , numite **active**, „taie” cele mai multe linii de câmp în unitatea de timp. Se mai observă că în decursul unei perioade semnul *t.e.m.* e și al curentului i alternează de două ori: sunt pozitive în intervalul $0 < t < T/2$ la descreșterea fluxului magnetic prin spiră și negative – în intervalul $T/2 < t < T$ la creșterea lui. Din acest motiv, modul de obținere a curentului electric alternativ descris mai sus este numit **principiul alternatorului**.

Studiul experimental al acțiunii termice a curentului electric demonstrează că într-un conductor de rezistență R cantitatea de căldură disipată prin efect Joule nu depinde de sensul curentului. Deci există o astfel de valoare a intensității curentului continuu, încât în același interval de timp valoarea medie a cantității de căldură $\overline{Q}_a = \overline{i^2} R \cdot \Delta t$ degajată în cazul curentului alternativ este egală cu cantitatea de căldură $Q_c = I^2 R \cdot \Delta t$ în cazul curentului continuu. Luând în considerare (2.6), pentru căldura disipată în conductor în intervalul de timp $\Delta t \ll T$ avem:

$$Q_a = I_m^2 R \Delta t \sin^2 \left(\frac{2\pi}{T} t \right).$$

Valoarea medie a acestei mărimi se poate calcula matematic, dar este mai simplu să folosim în acest scop metoda grafică. În figura 2.4 este reprezentată dependența căldurii disipate într-o unitate de timp $Q_a/\Delta t$ în conductorul de rezistență R în funcție de timpul t . Se observă că în intervalul de timp $\Delta t = T$ aria figurii mărginită de graficul $Q_a(t)$ este egală cu aria dreptunghiului $OMNT$ (părțile colorate situate mai sus de linia medie $I_m^2 R/2$ le completează pe cele necolorate dintre abscisă și această linie). Așadar, în decursul unei perioade, în conductorul parcurs de curent alternativ se degajă căldura $\overline{Q_a} = \frac{1}{2} I_m^2 RT$, iar în același conductor parcurs de curent continuu – căldura $Q_c = I^2 RT$. Din egalitatea acestor relații obținem:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.7)$$

Mărimea I definită de relația (2.7) se numește **intensitate efectivă** a curentului alternativ și este de $\sqrt{2}$ ori mai mică decât valoarea sa maximă.

Valoarea efectivă a intensității curentului alternativ i este egală cu intensitatea I a unui curent continuu, care în același interval de timp, de o perioadă, produce într-un conductor un efect termic echivalent cu cel produs de curentul alternativ.

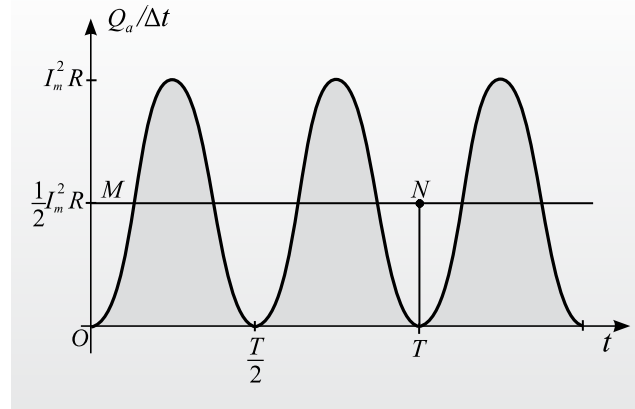


Fig. 2.4

Deoarece $U = IR$, rezultă că tensiunea curentului alternativ u de asemenea este caracterizată de o valoare efectivă, și anume:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.8)$$

Menționăm că aparatele de măsură folosite în circuitele de curent alternativ întotdeauna indică valorile efective ale mărimilor electrice măsurate.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se definește valoarea efectivă a intensității curentului alternativ?
2. Cum se exprimă valorile efective ale intensității și tensiunii alternative prin valorile maxime respective?
3. Determinați valoarea maximă a tensiunii din rețeaua de curent alternativ, dacă voltmetrul indică valoarea de 220 V.
4. La trecerea curentului alternativ de frecvență $\nu = 50$ Hz printr-un conductor cu rezistența de 400Ω , în fiecare perioadă se degajă o cantitate de căldură de 16 J. Care este valoarea maximă și cea efectivă a intensității curentului?

2.3.* CIRCUITE ÎN CURENT ALTERNATIV

Elementele de bază ale oricărui circuit electric sunt rezistorul, condensatorul și bobina, caracterizate, respectiv, de rezistența R , capacitatea C și inductanța L . În realitate, fiecare dintre aceste elemente întotdeauna este caracterizat de combinația acestor mărimi, însă de multe ori ele pot fi considerate ideale. În acest caz, fiecare element este definit exclusiv printr-o singură mărime R , L sau C . Pentru simplitate, în cele ce urmează, vom considera circuitele în curent alternativ compuse din elemente ideale.

a. Particularitățile circuitelor în curent alternativ

Spre deosebire de circuitele de curent continuu, în cele de curent alternativ se evidențiază anumite particularități importante specifice acestora. Vom menționa, în primul rând, că circuitele în curent alternativ reprezintă sisteme oscilatorii. Tensiunea sinusoidală

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (2.9)$$

aplicată la bornele circuitului, constituie sursa de energie care întreține oscilațiile de pulsație ω ale intensității curentului și tensiunii din circuit.

Cu toate că legea lui Ohm a fost stabilită pentru curentul continuu, ea este valabilă și pentru valorile instantanee ale tensiunii și intensității curentului alternativ. Pentru aceasta este necesar ca intensitatea curentului să rămână aproximativ aceeași în orice secțiune a conductorului. Curentul electric de frecvență industrială ($\nu = 50$ Hz) îndeplinește condiția dată cu un grad de precizie foarte înalt și de aceea se spune că este **cvasistaționar**.

Comportamentul condensatoarelor și al bobinelor în curent alternativ este calitativ diferit de cel în curent continuu. Dacă într-un circuit de curent continuu condensatorul are un rol simplu de întrerupere a circuitului, atunci în curent alternativ el suportă un proces de încărcare-descărcare cu atât mai intens, cu cât este mai mare frecvența ν . Din această cauză în circuit se stabilește un curent alternativ de aceeași frecvență. În curent continuu bobina se comportă ca un rezistor, în care se degajă prin efect Joule o cantitate de căldură proporțională cu rezistența ei, iar în curent alternativ ea determină apariția unei *t.e.m.* de autoinducție, care modifică intensitatea curentului din acest circuit.

Întrucât procesele și legile care au loc în circuitele de curent alternativ sunt mai complicate decât cele din curent continuu, vom începe cu analiza celor mai simple circuite, compuse din elemente individuale considerate ideale. Menționăm că în cazul circuitelor mai complicate este foarte comodă reprezentarea mărimilor fizice oscilatorii ale circuitului prin **fazori** în cadrul unor diagrame.

Să ne amintim

La studiul oscilațiilor mecanice (în clasa a X-a) s-a definit noțiunea de **fazor**. Acesta este un vector rotitor atribuit oscilației descrise de ecuația (2.1) și caracterizat de următoarele proprietăți: are modulul egal cu amplitudinea oscilației reprezentate A ; este orientat astfel încât unghiul format cu o direcție aleasă arbitrar (de exemplu, axa Ox), la momentul inițial de timp $t = 0$, este egal cu faza inițială a oscilației φ_0 (fig. 2.5). Deoarece unghiul dintre fazor și axa Ox crește liniar în timp, fazorul se rotește în planul xOy în sens trigonometric, având viteza unghiulară egală cu pulsația ω a oscilației reprezentate.

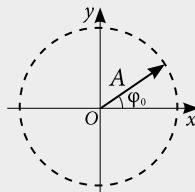


Fig. 2.5

b. Rezistor ideal în curent alternativ

Cel mai simplu circuit electric se obține la aplicarea unei tensiuni la bornele rezistorului de rezistență R (fig. 2.6, a). Dacă tensiunea aplicată este continuă, atunci în circuit se stabilește un curent staționar determinat de legea lui Ohm:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2.10)$$

iar în rezistor se degajă o anumită cantitate de căldură.

Dacă însă se aplică tensiunea alternativă de forma (2.9), atunci prin rezistor circulă un curent alternativ (cvasistaționar), valoarea instantanee a căruia se determină tot din legea lui Ohm:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

unde $I_m = U_m/R$. Folosind relațiile (2.7) și (2.8) pentru valorile efective, avem:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.11)$$

Relația (2.11) coincide după formă cu legea lui Ohm (2.10), însă tensiunea și intensitatea reprezintă valorile efective ale mărimilor alternative respective.

În figura 2.6, b sunt prezentate graficele tensiunii și intensității curentului alternativ în funcție de faza ωt . Se observă că aceste mărimi oscilează în aceeași fază, adică defazajul lor este nul. Atât intensitatea curentului, cât și tensiunea ating valorile lor maxime la aceleași momente.

Diagrama fazorială în acest caz este foarte simplă (fig. 2.6, c). Se alege o direcție arbitrară (linia întreruptă), de-a lungul căreia se depune vectorul intensității curentului de modül egal cu valoarea maximă I_m . Întrucât tensiunea u și intensitatea curentului i oscilează în fază (fig. 2.6, b), vectorul tensiunii de modül egal cu valoarea maximă $U_{m,R}$ trebuie orientat de-a lungul aceleiași direcții.

c. Bobină ideală în curent alternativ

Considerăm o bobină ideală de inductanță L , conectată la sursa de tensiune alternativă u de forma (2.9). Circuitul format (fig. 2.7, a) este parcurs de un curent i de asemenea alternativ, descris de relația (2.6). La trecerea acestui curent prin bobină se produce fenomenul de autoinducție. Astfel, de rând cu tensiunea de alimentare u , în circuit mai acționează și *t.e.m.* de autoinducție (1.22), adică:

$$e_a = -L \frac{di}{dt}.$$

Aici $\frac{di}{dt}$ este derivata intensității curentului i în raport cu timpul t . Menționăm că notația y' folosită la matematică este echivalentă cu $\frac{dy}{dx}$ și semnifică derivata funcției y în raport cu coordonata x .

După derivarea expresiei (2.6) în raport cu timpul și folosind relația matematică $\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, avem:

$$e_a = -I_m \omega L \cos \omega t = -I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.12)$$

Din relațiile (2.9) și (2.12) rezultă:

În circuitul de curent alternativ bobina se comportă ca un generator de tensiune, faza căreia este în avans cu $\pi/2$ față de cea de alimentare.

Prin analogie cu (2.10), legea lui Ohm pentru circuitul cercetat poate fi scrisă sub forma:

$$i = \frac{u + e_a}{R} \quad \text{sau} \quad u + e_a = iR.$$

Deoarece rezistența bobinei se neglijează (ea este considerată ideală), rezultă că

$$u + e_a = 0. \quad (2.13)$$

Introducând (2.12) în (2.13), obținem tensiunea instantanee din circuit și, totodată, de la bornele bobinei:

$$u = u_L = -e_a = I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.14)$$

unde

$$U_m = I_m \omega L$$

și semnifică valoarea maximă sau de amplitudine a tensiunii la bornele bobinei, care poate fi prezentată prin valorile efective sub forma:

$$\frac{U}{I} = \omega L. \quad (2.15)$$

Din comparația relației (2.15) cu legea lui Ohm pentru curentul continuu (2.10), rezultă că produsul dintre inductanță și pulsație are semnificația unei rezistențe. Într-adevăr, în SI avem:

$$[\omega L] = \text{s}^{-1} \cdot \text{H} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{A}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega.$$

Bobina introduce în circuitul de curent alternativ o rezistență aparentă X_L , numită *reactanță inductivă*:

$$X_L = \omega L. \quad (2.16)$$

Din (2.15) și (2.16) rezultă

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (2.17)$$

Aceasta este legea lui Ohm pentru circuitul compus dintr-o bobină ideală în curent alternativ.

Din relațiile (2.14), (2.6) și din reprezentarea lor grafică (fig. 2.7, b) se observă că faza tensiunii φ_u o avansează pe cea a intensității φ_i cu $\pi/2$. Deci

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \omega t + \frac{\pi}{2} - \omega t = \frac{\pi}{2}.$$

În circuitul de curent alternativ bobina creează un defazaj al tensiunii în avans cu $\pi/2$ față de intensitate.

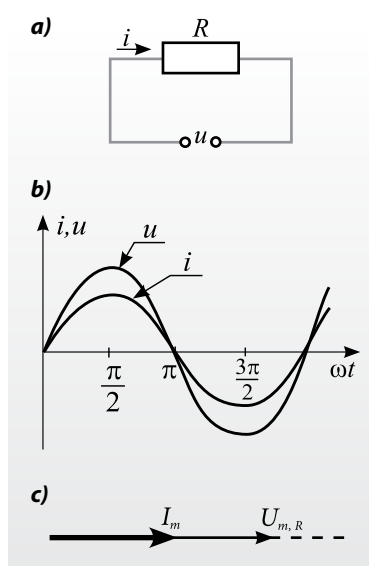


Fig. 2.6

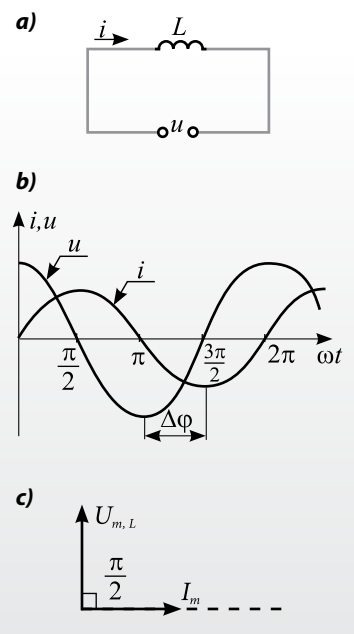


Fig. 2.7

În figura 2.7, c este reprezentată diagrama fazorială a acestui circuit. Pe direcția aleasă arbitrar (linia întreruptă) este depus fazorul intensității curentului I_m , iar fazorul tensiunii $U_{m,L}$ este orientat sub un unghi de 90° , luat în sens trigonometric față de intensitatea curentului.

d. Condensator ideal în curent alternativ

Să analizăm circuitul reprezentat în figura 2.8, a . S-a menționat deja că unicul efect al tensiunii continue aplicate la bornele condensatorului este încărcarea acestuia până la o diferență de potențial egală cu tensiunea sursei. Evident, în decursul încărcării (descărcării) condensatorului, în circuit există un curent de foarte scurtă durată care însă dispăre odată cu terminarea procesului de încărcare (descărcare). Rezultă că, pentru menținerea unui anumit curent în circuitul studiat, trebuie să asigurăm un proces continuu de încărcare-descărcare a condensatorului, adică de variație a sarcinii de pe armăturile lui. Cu cât acest proces se desfășoară mai rapid, cu atât intensitatea curentului din circuit este mai mare.

Fie q sarcina de pe armăturile condensatorului la un moment oarecare al procesului de încărcare (descărcare) a lui. Luând în considerare că sarcina ce se acumulează pe armăturile condensatorului este egală cu produsul dintre tensiunea de încărcare și capacitatea lui ($q = uC$), pentru intensitatea curentului obținem:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(uC)}{dt} = C \frac{du}{dt}. \quad (2.18)$$

Intensitatea curentului care parcurge circuitul format dintr-un condensator ideal este egală cu produsul dintre capacitatea lui și viteza de variație a tensiunii alternative aplicate.

Din (2.18) reiese că în cazul tensiunii constante la bornele condensatorului derivata este nulă, iar odată cu ea și intensitatea curentului $i = 0$, adică **condensatorul întrerupe circuitul de curent continuu**. Dacă însă circuitul este alimentat cu o tensiune variabilă în timp, de exemplu alternativă, de forma (2.9), atunci, după cum rezultă din (2.18), intensitatea curentului din circuit este:

$$\begin{aligned} i &= U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.19)$$

unde

$$I_m = U_m \omega C$$

și prezintă valoarea maximă sau de amplitudine a intensității curentului alternativ din circuit. Expri-mând valorile maxime prin cele efective, relația pre-cedentă se poate prezenta sub forma:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.20)$$

din care rezultă că mărimea inversă produsului dintre pulsația tensiunii alternative și capacitatea condensatorului are semnificația unei rezistențe. Într-adevăr, în SI avem:

$$\left[\frac{1}{\omega C} \right] = \frac{1}{s^{-1} \cdot F} = \frac{s \cdot V}{C} = \frac{V}{A} = \Omega.$$

Condensatorul introduce în circuitul de curent alternativ o rezistență aparentă X_C , numită *reac-tanță capacitivă*:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.21)$$

Legea lui Ohm pentru circuitul de curent alter-nativ care conține numai un condensator ideal are același aspect ca și în cazul curentului continuu (2.10), dar cu altă semnificație a mărimilor respective:

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (2.22)$$

Din relațiile (2.9), (2.19) și figura 2.8, b , unde ace-s-tea sunt reprezentate grafic, se observă că tensiunea și intensitatea curentului din circuitul cu conden-sator de asemenea sunt defazate una față de alta, și anume:

$$\Delta \varphi = \varphi_u - \varphi_i = \omega t - \omega t - \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}.$$

În circuitul de curent alternativ condensatorul creează un defazaj al tensiunii în devans cu $\pi/2$ față de intensitatea curentului.

Astfel, dacă în circuitul din figura 2.8, a circulă un curent $i = I_m \sin \omega t$, atunci tensiunea la bornele lui și, totodată, la bornele condensatorului, fiind de-fazată cu $\pi/2$ în urmă față de intensitate, va avea aspectul

$$u = u_c = U_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Diagrama fazorială, reprezentată în figura 2.8, c pentru circuitul cu condensator ideal, se deosebește de cea cu bobină ideală numai prin sensul fazorului tensiunii $U_{m,c}$. În acest caz el se construiește tot sub un unghi de 90° față de fazorul intensității curen-tului I_m , dar în sens opus celui trigonometric.

e. Circuite RLC serie în curent alternativ. Legea lui Ohm

Elementele de circuit, analizate anterior, în mod individual pot forma diferite combinații prin legarea lor în serie, în paralel sau mixt. Considerăm circuitul serie în curent alternativ reprezentat în figura 2.9, care este format din rezistorul de rezistență R , bobina de inductanță L și condensatorul de capacitate C . Dacă la bornele acestui circuit se aplică o tensiune alternativă de pulsație ω , atunci prin elementele circuitului se stabilește un curent alternativ de aceeași pulsație $i = I_m \sin \omega t$.

Pe fiecare element al circuitului se produce o cădere de tensiune proporțională cu rezistența sau reactanța lor. În circuitul serie, suma acestora trebuie să fie egală cu tensiunea de la bornele lui. Astfel, la orice moment de timp, pentru valorile instantanee ale tensiunilor are loc relația

$$u_R + u_L + u_C = u, \quad (2.23)$$

unde u_R , u_L și u_C sunt tensiunile pe elemente respective de circuit, care, după cum reiese din temele precedente, au valorile:

$$\begin{aligned} u_R &= I_m R \sin \omega t, \\ u_L &= I_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \\ u_C &= \frac{I_m}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.24)$$

reprezentate grafic, respectiv, în figurile 2.6, b, 2.7, b și 2.8, b. Deoarece fazele acestor tensiuni sunt diferite, între tensiunea de la bornele circuitului și intensitatea curentului stabilit prin el va exista un defazaj φ , care poate lua valori atât pozitive și negative, cât și zero. Dacă faza intensității curentului se ia ca referință, atunci tensiunea este caracterizată de faza $\omega t + \varphi$, adică

$$u = U_m \sin (\omega t + \varphi). \quad (2.25)$$

Folosind definițiile reactanțelor inductivă și capacitivă, după introducerea relațiilor (2.24) și (2.25) în (2.23) obținem:

$$U_m \sin (\omega t + \varphi) = R I_m \sin \omega t + X_L I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + X_C I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.26)$$

sau

$$U_m \sin (\omega t + \varphi) = U_{m,R} \sin \omega t + U_{m,L} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + U_{m,C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.27)$$

unde

$$U_{m,R} = R I_m, \quad U_{m,L} = X_L I_m = \omega L I_m, \quad U_{m,C} = X_C I_m = I_m / \omega C \quad (2.28)$$

sunt, respectiv, tensiunile maxime pe rezistor, bobină și condensator.

Pentru adunarea termenilor din partea dreaptă a ecuației (2.26) sau (2.27) se poate folosi metoda analitică, însă mult mai simplă este metoda diagramelor fazoriale.

De-a lungul direcției de referință, aleasă arbitrar (linia întreruptă), se depune fazorul intensității curentului I_m și cel al tensiunii pe rezistor $U_{m,R}$. Fazorii $U_{m,L}$ și $U_{m,C}$ se depun din aceeași origine pe direcția luată sub un unghi de $\pi/2$ față de cea de referință în sens trigonometric și, respectiv,

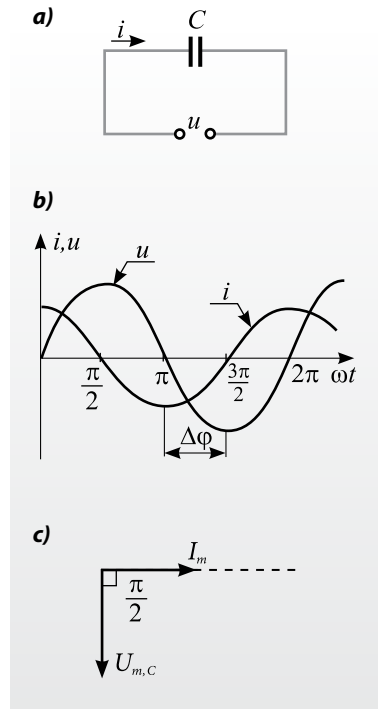


Fig. 2.8

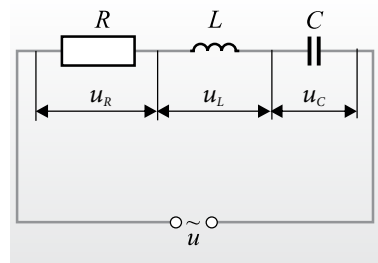


Fig. 2.9

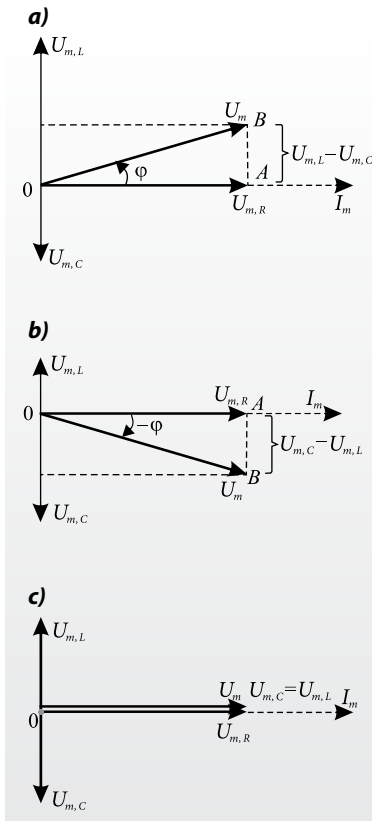


Fig. 2.10

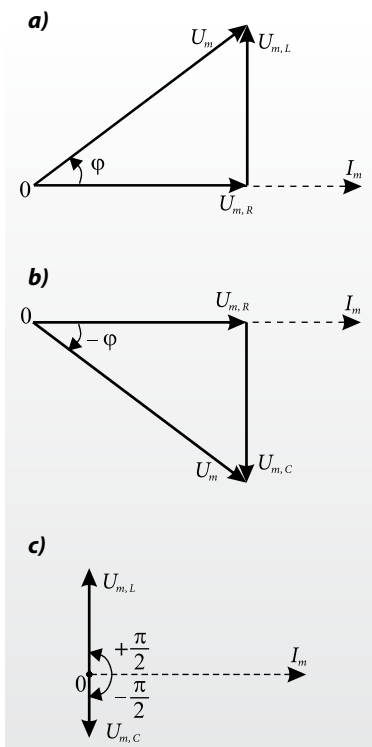


Fig. 2.11

în sens opus (fig. 2.10). Întrucât fazorii $U_{m,L}$ și $U_{m,C}$ au faze opuse, modulele lor reprezintă doi termeni concurenți, care determină aspectul diagramei fazoriale. Sunt posibile trei situații:

1) $U_{m,L} > U_{m,C}$, adică $\omega L > 1/\omega C$. În acest caz se spune că circuitul este **preponderent inductiv**. Pe diagrama fazorială, din figura 2.10, a, se observă că tensiunea U_m , care reprezintă fazorul rezultat, este în avans de fază cu unghiul φ față de intensitatea curentului I_m , adică $\varphi > 0$.

2) $U_{m,C} > U_{m,L}$, adică $1/\omega C > \omega L$ – circuitul este **preponderent capacitiv**. Diagrama fazorială este reprezentată în figura 2.10, b. În acest caz, tensiunea U_m este în devans de fază cu unghiul φ față de intensitatea curentului I , adică $\varphi < 0$.

Din $\triangle AOB$ al diagramelor fazoriale reprezentate în figura 2.10, numit și triunghiul tensiunilor, rezultă:

$$U_m = \sqrt{U_{m,R}^2 + (U_{m,L} - U_{m,C})^2}.$$

Folosind relațiile (2.28) și trecând la valorile efective ale intensității curentului I (2.7) și tensiunii U (2.8), avem:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \text{ sau } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (2.29)$$

Relațiile (2.29) reprezintă legea lui Ohm pentru circuitul de curent alternativ RLC serie. Expresia din numitorul acestor relații constituie rezistența totală a circuitului în curent alternativ și este numită **impedanță**. Notând impedanța cu

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \text{ sau } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (2.30)$$

legea lui Ohm astfel capătă un aspect simplu:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (2.31)$$

Defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului din circuit se determină ușor din același triunghi al tensiunilor (fig. 2.10):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{m,L} - U_{m,C}}{U_{m,R}}$$

sau, înlocuind tensiunile din (2.28), obținem:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (2.32)$$

3) $U_L = U_C$, adică $\omega L = 1/\omega C$. În această situație efectele inductiv și capacitiv se compensează reciproc, iar defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului $\varphi = 0$ (fig. 2.10, c).

Prin eliminarea sau adăugarea (vezi problema rezolvată nr. 3, p. 34) de elemente în circuitul din figura 2.9 se obțin și alte circuite serie. Astfel, din (2.29) și (2.32) obținem următoarele cazuri particulare:

pentru circuitul RL ($X_C = 0$):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}, \quad (2.33)$$

pentru circuitul RC ($X_L = 0$):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}, \quad \text{tg} \varphi = -\frac{X_C}{R}, \quad (2.34)$$

pentru circuitul LC ($R = 0$):

$$I = \frac{U}{|X_L - X_C|}, \quad X_L \neq X_C, \quad \text{tg} \varphi \rightarrow \pm \infty, \quad \varphi \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}. \quad (2.35)$$

Diagramele fazoriale pentru aceste circuite serie sunt reprezentate în *figura 2.11, a, b, c*, corespunzător. Dacă în diagramele din *figura 2.10* a fost folosită regula paralelogramului pentru adunarea vectorilor, atunci în cele din *figura 2.11* s-a aplicat regula triunghiului.

f. Rezonanța tensiunilor. Factorul de calitate

Să analizăm legea lui Ohm (2.29) din punctul de vedere al variației pulsației ω sau al frecvenței $\nu = \omega/2\pi$. Indiferent de valorile inductanței L și capacității C , întotdeauna se poate găsi o astfel de pulsație (frecvență), pentru care reactanțele inductivă și capacitivă vor fi egale. În *figura 2.12* este reprezentată intensitatea curentului I (2.29) în funcție de pulsația ω . Se observă că în vecinătatea unei pulsații ω_r , intensitatea curentului crește brusc și pentru $\omega = \omega_r$ devine maximă. Acest fenomen este numit **rezonanță**, iar frecvența la care acesta se produce este numită **frecvență de rezonanță**.

Din egalitatea reactanțelor capacitivă și inductivă $X_L = X_C$ rezultă că $\omega^2 = 1/LC$, de unde pentru pulsația și frecvența de rezonanță obținem:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{sau} \quad \nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.36)$$

Înlocuind în legea lui Ohm (2.29) pulsația ω cu cea de rezonanță ω_r din relația (2.36), obținem valoarea curentului de rezonanță:

$$I_r = \frac{U}{R}. \quad (2.37)$$

Astfel, cu cât este mai mică rezistența circuitului R , numită și rezistență activă, cu atât curba de rezonanță este mai ascuțită, iar intensitatea curentului la rezonanță – mai mare.

Din *figura 2.10, c* se observă că pentru realizarea rezonanței este necesară egalitatea tensiunilor pe bobină și condensator, oricare ar fi valorile lor. Să determinăm aceste tensiuni în condiții de rezonanță. Introduscând (2.36) și (2.37) în (2.28) pentru cele două tensiuni, obținem:

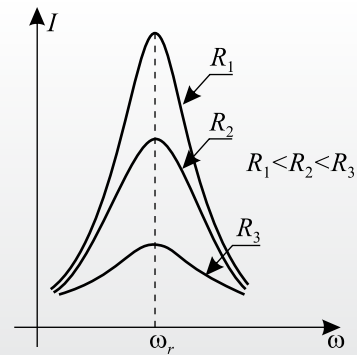


Fig. 2.12

$$U_{L,r} = \omega_r L I_r = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U, \quad (2.38)$$

$$U_{C,r} = \frac{I_r}{\omega_r C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U.$$

Observăm că tensiunile de la bornele bobinei și de la cele ale condensatorului devin maxime, iar valorile lor sunt cu atât mai mari, cu cât rezistența circuitului este mai mică. Din această cauză, rezonanța în circuitele serie mai este numită **rezonanța tensiunilor**.

Raportul

$$Q = \frac{U_{L,r}}{U} = \frac{U_{C,r}}{U} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.39)$$

arată de câte ori tensiunea de la bornele bobinei sau condensatorului este mai mare decât tensiunea de alimentare a unui circuit serie în regim de rezonanță și se numește **factor de calitate** sau **factor de supratensiune**.

Fenomenul de rezonanță în circuitele RLC serie are o importanță deosebită în radiotehnică. Dacă în circuit se utilizează un condensator de capacitate variabilă sau/și o bobină de inductanță variabilă, atunci din (2.36) rezultă că circuitul poate fi acordat la diferite frecvențe de rezonanță. Astfel, de exemplu, se realizează acordarea aparatelor de radio și a televizoarelor la frecvența stației preferate.

Există însă și situații când sunt necesare măsuri pentru înlăturarea rezonanței. De exemplu, în instalațiile pentru transportarea și utilizarea curentului electric alternativ, apariția supratensiunilor poate genera descărcări electrice între spirele bobinelor din transformatoare sau între armăturile condensatoarelor și, prin urmare, defectarea acestora.

Probleme rezolvate

❶ La o sursă de tensiune alternativă $u = 60 \sin 100\pi t$ (V) este conectată o bobină. Intensitatea curentului prin circuitul format este $i = 5 \sin 2\pi(50t + 1/8)$ (A). Determinați: a) frecvența și defazajul dintre curent și tensiune, precum și valorile efective ale curentului și tensiunii din circuit; b) rezistența și inductanța bobinei.

Se dă:

$$u = 60 \sin 100\pi t \text{ (V)}, \\ i = 5 \sin 2\pi(50t + 1/8) \text{ (A)}$$

a) $v - ?$, $\varphi - ?$, $I - ?$, $U - ?$;
b) $R - ?$, $L - ?$

$$U_m = 60 \text{ V}, I_m = 5 \text{ A}, \omega = 100\pi \text{ (s}^{-1}\text{)}, \varphi = \pi/4.$$

Valorile maxime U_m și I_m se exprimă prin cele efective conform relațiilor (2.7) și (2.8), iar $\omega = 2\pi v$. Așadar,

$$v = 50 \text{ Hz}, \varphi = \frac{\pi}{4}, U = \frac{60}{\sqrt{2}} \approx 42,4 \text{ (V)}, I = \frac{5}{\sqrt{2}} \approx 3,5 \text{ (A)}.$$

❷ Din diagrama fazorială a circuitului cu rezistor și bobină (fig. 2.11, a) rezultă

$$U_R = U \cos \varphi \text{ și } U_L = U \sin \varphi.$$

Întrucât $U_R = IR$, iar $U_L = I\omega L$, din relația precedentă avem:

$$R = \frac{U}{I} \cos \varphi \text{ și } L = \frac{U}{\omega I} \sin \varphi.$$

Înlocuind valorile numerice, se obține $R \approx 8,6 \Omega$ și $L \approx 27,3 \text{ mH}$.

❸ Un circuit serie, alcătuit dintr-un rezistor R și un condensator de capacitate egală cu $100 \mu\text{F}$, este alimentat cu un curent alternativ de frecvență $v = 50 \text{ Hz}$ și este caracterizat de un defazaj $\varphi = -60^\circ$. Determinați: a) reactanța capacitivă; b) valoarea rezistenței R ; c) valoarea inductanței unei bobine ce trebuie introdusă în serie pentru a înlătura defazajul existent.

Se dă:

$$C = 10^{-4} \text{ F}, \\ v = 50 \text{ Hz}, \\ \varphi = -60^\circ$$

a) $X_C - ?$;
b) $R - ?$;
c) $L - ?$

Rezolvare:

a) Deoarece $\omega = 2\pi v$, din definiția reactanței capacitivă obținem:

$$X_C = \frac{1}{2\pi v C}; X_C \approx 31,8 \Omega.$$

b) Pentru circuitul RC serie, defazajul dintre tensiune și curent este determinat de relația (2.34), din care avem:

$$R = -\frac{X_C}{\text{tg} \varphi} = \frac{31,8}{\sqrt{3}} \approx 18,4 \text{ (}\Omega\text{)}.$$

c) La introducerea bobinei în circuit, defazajul dintre tensiunea de alimentare și intensitatea curentului se modifică. Deoarece circuitul devine de tipul RLC serie, defazajul este determinat de relația (2.32). Întrucât după introducerea în circuit a bobinei defazajul trebuie să fie egal cu zero, din (2.32) reiese că $X_L = X_C$ sau $2\pi v L = X_C$.

Din această relație obținem:

$$L = \frac{X_C}{2\pi v} = \frac{31,8}{100\pi} \approx 0,1 \text{ (H)}.$$

❹ În figura 2.13, a este reprezentată schema unui circuit serie în curent alternativ. Reactanțele și rezistențele elementelor de circuit sunt: $X_L = 60 \Omega$, $X_{C1} = 30 \Omega$, $R_1 = 120 \Omega$, $X_{C2} = 90 \Omega$, $R_2 = 60 \Omega$, iar tensiunea pe rezistorul R_2 este de 90 V . Construiți diagrama fazorială a circuitului și determinați: a) impedanța circuitului; b) intensitatea curentului și tensiunea de alimentare; c) defazajul dintre intensitate și tensiune.

Se dă:

$$X_L = 60 \Omega, \\ X_{C1} = 30 \Omega, \\ R_1 = 120 \Omega, \\ X_{C2} = 90 \Omega, \\ R_2 = 60 \Omega, \\ U_{R2} = 90 \text{ V}$$

a) $Z - ?$;
b) $I - ?$, $U - ?$;
c) $\varphi - ?$

Rezolvare:

Pentru construirea diagramei fazoriale se ia o direcție arbitrară, de-a lungul căreia din originea O este depus fazorul intensității curentului. Din aceeași origine (fig. 2.13, b) se depun mai întâi fazorii corespunzători fiecărui element individual de circuit, luând în considerare și defazajul introdus de bobină (în avans cu $\pi/2$) și condensator (în devans cu $\pi/2$). Însușind vectorial fazorii situați de-a lungul aceluiași direcții, obținem diagrama fazorială a circuitului analizat.

a) Din diagrama fazorială (fig. 2.13, b) rezultă:

$$U = \sqrt{(U_{R1} + U_{R2})^2 + (U_L - U_{C1} - U_{C2})^2}.$$

Întrucât circuitul este în serie, intensitatea curentului este aceeași prin toate elementele. Atunci din relația precedentă obținem:

$$U = I \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_{C1} - X_{C2})^2} = IZ.$$

Așadar

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_{C1} - X_{C2})^2} \approx 190 \Omega.$$

b) Tensiunea pe rezistorul R_2 este cunoscută. Atunci intensitatea curentului prin acest rezistor și deci prin întreg circuitul este:

$$I = \frac{U_{R2}}{R_2} = 1,5 \text{ A},$$

iar tensiunea de alimentare $U = IZ \approx 285 \text{ V}$.

c) Tot din diagrama fazorială avem:

$$\text{tg} \varphi = \frac{U_L - U_{C1} - U_{C2}}{U_{R1} + U_{R2}} = \frac{X_L - X_{C1} - X_{C2}}{R_1 + R_2} = -\frac{1}{3}.$$

Atunci $\varphi = -\arctg\left(\frac{1}{3}\right) \approx -0,32 \text{ rad}$.

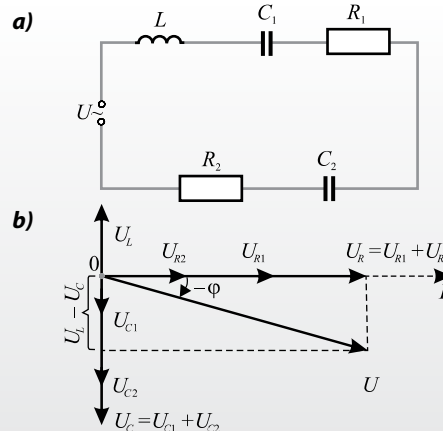


Fig. 2.13

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce condiție trebuie să îndeplinească curentul alternativ pentru ca legea lui Ohm să fie valabilă?
2. Care sunt particularitățile comportamentului elementelor de circuit în curent alternativ față de cele în curent continuu?
3. Care este defazajul introdus în circuitul de curent alternativ de către fiecare element individual al acestuia?
4. Ce se numește *reactanță inductivă* și care este semnificația ei?
5. Explicați diagrama fazorială a circuitului compus dintr-o bobină ideală.
6. Ce reprezintă reactanța capacitivă? Explicați diagrama fazorială în acest caz.
7. Cum se construiește diagrama fazorială în cazul circuitului *RLC* serie? Evidențiați cazurile circuitelor preponderent inductiv sau capacitiv.
8. Care este expresia legii lui Ohm în cazul circuitului de curent alternativ?
9. Ce se numește *impedanță a circuitului* și care este semnificația ei?
10. Care este expresia defazajului dintre tensiunea de alimentare și intensitatea curentului stabilit în circuitul *RLC* serie?
11. Ce reprezintă fenomenul de rezonanță în circuitul *RLC* serie și în ce condiții se manifestă? Cu ce este egal defazajul în regim de rezonanță?
12. Care este expresia frecvenței de rezonanță? De ce parametri depinde ea?
13. Care este intensitatea curentului la rezonanță? Cum se comportă în acest caz tensiunile la bornele bobinei și condensatorului din circuit?
14. Ce se numește *factor de calitate* și ce arată el?
15. La o sursă de curent alternativ cu valoarea efectivă a tensiunii de 220 V este conectat un rezistor cu rezistența de 11 k Ω . Care sunt valorile efectivă și de amplitudine ale intensității curentului?
16. Determinați reactanța inductivă a unei bobine cu inductanța de 20 mH la parcurgerea ei de către un curent alternativ de frecvență $\nu = 50$ Hz.
17. Care este frecvența curentului alternativ printr-un condensator de capacitate $C = 250$ μ F, dacă el este caracterizat de o reactanță capacitivă de 40 Ω ?
18. Un circuit *RL* serie cu rezistorul de rezistență $R = 10$ Ω și o bobină ideală este conectat la o sursă de curent alternativ cu tensiunea de 36 V și frecvența $\nu = 50$ Hz. Tensiunea efectivă la bornele rezistorului este de 20 V. Determinați impedanța circuitului, inductanța bobinei și defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului.
19. Într-un circuit *RC* serie în curent alternativ de frecvență $\nu = 50$ Hz, tensiunile efective la bornele rezistorului și condensatorului sunt, respectiv, de 90 și 120 V. Știind că intensitatea efectivă a curentului din circuit este de 0,5 A, determinați: capacitatea condensatorului, defazajul din circuit și tensiunea de alimentare.
20. Un circuit *RLC* serie caracterizat de valorile $R = 100$ Ω , $L = 25$ mH și $C = 50$ μ F este conectat la o sursă de curent alternativ, având tensiunea efectivă de 220 V și frecvența $\nu = 50$ Hz. Care este intensitatea curentului prin acest circuit?

2.4.* PUTEREA ÎN CIRCUIT DE CURENT ALTERNATIV

Considerăm un circuit *RLC* arbitrar, la bornele căruia se aplică tensiunea alternativă $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Prin circuit se stabilește curentul de intensitate $i = I_m \sin \omega t$. Menționăm că defazajul φ dintre intensitatea curentului și tensiune poate lua valori atât pozitive, cât și negative.

Puterea instantanee din circuit se exprimă, conform definiției, prin produsul dintre intensitatea curentului și tensiune, adică

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Folosind relația trigonometrică

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)],$$

pentru puterea instantanee obținem:

$$p = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi - \frac{1}{2} I_m U_m \cos(2\omega t + \varphi). \quad (2.40)$$

Din (2.40) se observă că puterea instantanee este caracterizată de doi termeni: unul constant în timp și altul alternativ cu o pulsație dublă față de cea a curentului. Datorită termenului alternativ, puterea instantanee poate lua valori atât pozitive, cât și negative. Însă, într-un interval oarecare de timp, în circuit se va debita o anumită putere medie. Cu alte cuvinte, puterea instantanee într-un circuit

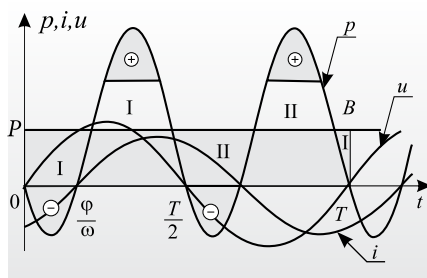


Fig. 2.14

de curent alternativ reprezintă o variație periodică a valorii sale numerice în jurul unei valori medii. Aceasta se observă ușor din figura 2.14, unde sunt reprezentate intensitatea, tensiunea și puterea curentului alternativ în funcție de timp. Pentru intervalul de timp egal cu o perioadă, ariile suprafețelor I și II situate deasupra liniei $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$ le completează pe cele dintre abscisă și această linie, iar ariile notate cu semnul „+” le anulează pe cele cu semnul „-” de sub axa absciselor (fig. 2.14). Astfel, aria dreptunghiului OPBT reprezintă energia medie absorbită în circuitul de curent alternativ în decursul unei perioade:

$$W = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi \cdot T.$$

Așadar, valoarea medie a puterii dintr-un circuit de curent alternativ, numită și **putere activă**, este:

$$P_a \equiv \bar{P} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$$

sau, în valori efective ale curentului și tensiunii:

$$P_a = UI \cos \varphi. \quad (2.41)$$

Mărimea $\cos \varphi$ din (2.41) este numită **factor de putere**. Întrucât $0 \leq |\varphi| \leq \pi/2$, factorul de putere este întotdeauna pozitiv și subunitar.

Cu cât defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului este mai mic, cu atât mai mare este puterea activă. Valoarea maximă a factorului de putere egală cu unitatea se obține când defazajul din circuit este nul, adică la rezonanță.

Factorul de putere reprezintă o caracteristică a eficacității transferului de putere de la sursa de alimentare către circuit.

După cum rezultă din (2.41) și din figura 2.15, a, puterea activă este maximă și pentru circuitele pur rezistive (fără bobine și condensatoare). Într-adevăr, deoarece $\varphi = 0$, pentru puterea activă avem:

$$P_a = \frac{1}{2} P_m = \frac{1}{2} I_m U_m = \frac{1}{2} I_m^2 R = I^2 R.$$

În cazul unui circuit ideal ce conține numai o bobină de inductanță L ($\varphi = \pi/2$) sau numai un condensator de capacitate C ($\varphi = -\pi/2$), pentru puterea instantanee disipată, din (2.40) obținem, respectiv:

$$p_L = -\frac{1}{2} I_m U_{m,L} \cos \left(2\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} I_m U_{m,L} \sin 2\omega t = I^2 X_L \sin 2\omega t;$$

$$p_C = -\frac{1}{2} I_m U_{m,C} \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{1}{2} I_m U_{m,C} \sin 2\omega t = -I^2 X_C \sin 2\omega t.$$

Valorile medii ale acestor mărimi în decurs de o perioadă sunt nule, adică în astfel de circuite puterea activă este egală cu zero. Acest rezultat se observă ușor din figura 2.15, b, c. Defazajul de $\pi/2$ dintre intensitatea curentului și tensiune determină o alternare a sferturilor de perioadă în decursul cărora energia primită de bobină sau de condensator în timpul unei alternanțe pozitive este complet restituită generatorului în decursul alternanței negative. Evident că în circuitele reale (orice bobină sau condensator posedă și o rezistență oare-

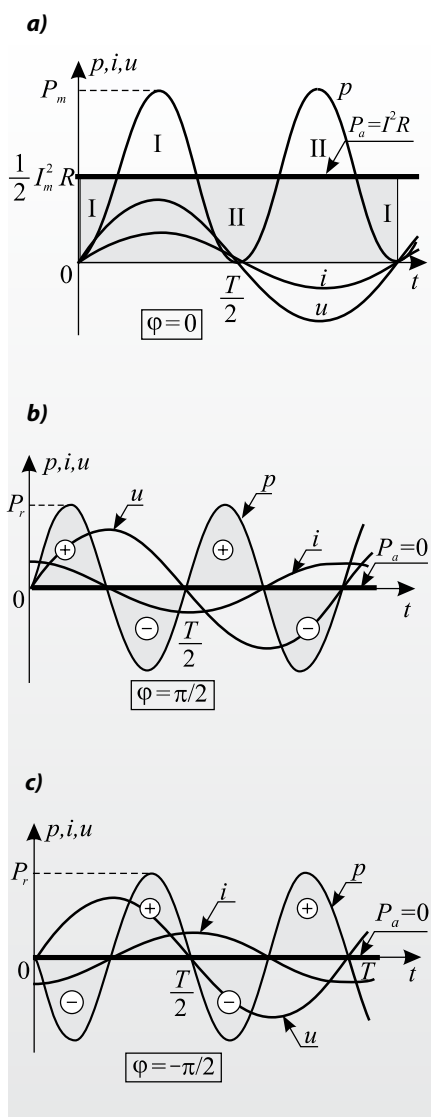


Fig. 2.15

care) energia nu este restituită complet sursei de alimentare, ci numai parțial, în funcție de valoarea rezistenței active din circuit.

Valoarea de amplitudine a puterii transferată alternativ între generator și elementele reactive (condensatorul și bobina) ale circuitului se numește putere reactivă.

În diagramele fazoriale pentru circuitul RLC serie (fig. 2.10) se evidențiază triunghiul dreptunghic al tensiunilor ce conține defazajul φ . Dacă laturile acestui triunghi se înmulțesc cu I , atunci triunghiul obținut este numit **triunghiul puterilor**. În figura 2.16 este reprezentat triunghiul puterilor pentru circuitul RLC serie preponderent inductiv. Din acest triunghi rezultă că puterea reactivă este dată de relația

$$P_r = UI \sin\varphi, \quad (2.42)$$

iar puterea maximă posibilă debitată de sursa de alimentare a circuitului, numită **putere aparentă**, – de relația

$$P = UI. \quad (2.43)$$

Puterile aparentă, activă și reactivă se exprimă între ele prin intermediul relațiilor ce se obțin ușor din triunghiul puterilor (fig. 2.16):

$$P^2 = P_a^2 + P_r^2; \quad P_r = P_a \operatorname{tg}\varphi; \quad P_a = P \cos\varphi; \quad P_r = P \sin\varphi. \quad (2.44)$$

Din (2.41)–(2.43) se observă că dimensiunile puterilor activă, reactivă și aparentă sunt aceleași – $[U] \cdot [I] = V \cdot A$, însă pentru evitarea neclarităților la indicarea valorilor acestora pentru ele au fost adoptate unități diferite. Astfel, în SI pentru puterea activă se folosește unitatea tradițională – **wattul (W)**: $[P_a] = [U] \cdot [I] = V \cdot A \equiv W$. Unitatea de putere reactivă a fost numită **volt-ampere-reactiv (VAR)**: $[P_r] = [U] \cdot [I] = V \cdot A \equiv \text{VAR}$, iar a puterii aparente – **volt-ampere (VA)**: $[P] = [U] \cdot [I] = V \cdot A \equiv \text{VA}$.

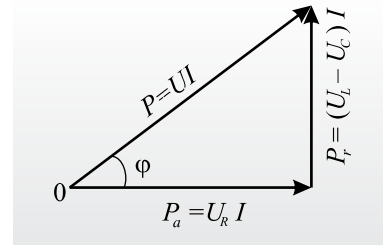


Fig. 2.16

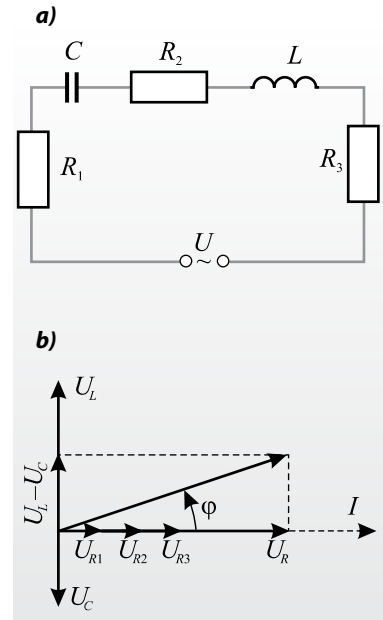


Fig. 2.17

Problemă rezolvată

Circuitul serie reprezentat în figura 2.17, a este parcurs de un curent alternativ de intensitate efectivă $I = 10 \text{ A}$ și frecvența de 50 Hz . Cunoscând că $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $L = (0,3/2\pi) \text{ H}$ și $C = (1/\pi) \cdot 10^{-3} \text{ F}$, determinați: a) factorul de putere al circuitului; b) puterile activă, reactivă și aparentă din circuitul menționat.

Se dă:

$I = 10 \text{ A}$,
 $\nu = 50 \text{ Hz}$,
 $R_1 = 2 \Omega$,
 $R_2 = 4 \Omega$,
 $R_3 = 6 \Omega$,
 $L = (0,3/2\pi) \text{ H}$,
 $C = (1/\pi) \cdot 10^{-3} \text{ F}$

a) $\cos\varphi$ – ?;
 b) P_a – ?, P_r – ?,
 P – ?

Rezolvare:

a) Luând în considerare relațiile de definiție ale reactanțelor inductive (2.16) și capacitive (2.21), precum și legătura dintre pulsație și frecvență $\omega = 2\pi\nu$, avem:

$$X_L = 2\pi\nu L = 15 \Omega \quad \text{și} \\ X_C = 1/(2\pi\nu C) = 10 \Omega.$$

Rezultă că circuitul studiat este preponderent inductiv și diagrama lui fazorială are aspectul reprezentat în figura 2.17, b. Din

această diagramă, pentru factorul de putere, reiese următoarea relație:

$$\cos\varphi = \frac{U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3}}{U}.$$

Întrucât $U_{R_1} = IR_1$, $U_{R_2} = IR_2$, $U_{R_3} = IR_3$ și $U = IZ$, unde

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

este impedanța circuitului, pentru factorul de putere obținem:

$$\cos\varphi = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{Z} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 5^2}} \approx 0,92.$$

b) Tensiunea la bornele sursei de alimentare este $U = IZ = 130 \text{ V}$. Înlocuind valorile numerice în relațiile (2.41) și (2.43) pentru puterile activă și aparentă, obținem: $P_a \approx 1,2 \text{ kW}$ și $P = 1 \text{ 300 VA}$. Puterea reactivă se determină ușor, din (2.44), și anume:

$$P_r = \sqrt{P^2 - P_a^2} \approx 500 \text{ VAR}.$$

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care este semnificația puterii active a unui circuit de curent alternativ și cu ce este egală ea?
2. Ce reprezintă factorul de putere și care sunt valorile posibile ale acestuia?
3. De ce în circuitele compuse numai din elemente reactive puterea activă este egală cu zero?
4. Ce reprezintă puterea reactivă a circuitului de curent alternativ și cu ce este egală ea?
5. Cum se obține triunghiul puterilor?
6. Ce reprezintă puterea aparentă în circuitele de curent alternativ?
7. Care sunt unitățile adoptate în SI pentru puterea activă, reactivă și aparentă?
8. Un circuit serie format dintr-un condensator de capacitate $C = (5/9\pi) \cdot 10^{-3}$ F și o bobină de inductanță $L = (0,3/\pi)$ H și rezistență $R = 16 \Omega$ este alimentat la un generator cu tensiunea $U = 120$ V și frecvența $\nu = 50$ Hz. Calculați: a) impedanța circuitului; b) intensitatea curentului din circuit; c) factorul de putere al circuitului; d) puterile activă, reactivă și aparentă.
9. Un circuit serie este format dintr-un rezistor și o bobină cu rezistență neglijabilă. Dacă acest circuit este alimentat la o tensiune alternativă, având valoarea efectivă $U = 240$ V, defazajul dintre tensiune și curent este $\varphi_1 = \pi/3$. Dacă însă în circuit se conectează în serie și un condensator cu reactanța $X_C = 8\sqrt{3} \Omega$, defazajul devine $\varphi_2 = \pi/6$. Determinați: a) rezistența rezistorului; b) reactanța bobinei; c) puterile activă, reactivă și aparentă pentru circuitul care conține și condensator, dacă se cunoaște că acesta este preponderent inductiv.

2.5. TRANSPORTUL ENERGIEI ELECTRICE LA DISTANȚE MARI

a. Generatorul de curent alternativ

Generatorul de curent alternativ sau alternatorul reprezintă un dispozitiv care transformă energia mecanică în energie electrică.

Elementele de bază ale oricărui alternator (*fig. 2.18, a*) sunt: 1) sursa de câmp magnetic (magneți permanenți sau electromagneți), numită **inductor**; 2) cadrul metalic (o bobină în care se induce *t.e.m.*), numit **indus**; 3) **inelele** metalice de contact și periutele alunecătoare pe ele. Partea mobilă a generatorului este numită **rotor**, iar cea fixă – **stator**.

Inductorul și indusul reprezintă niște miezuri confecționate din oțel, pe care sunt înfășurate bobinele cu numărul necesar de spire. Pentru asigurarea unui flux magnetic maxim, indusul și inductorul se construiesc de o asemenea formă geometrică, încât distanța dintre ele să fie cât mai mică (*fig. 2.18, a*). În acest caz, vectorul inducției magnetice \vec{B} este mereu aproximativ perpendicular pe vectorul vitezei liniare \vec{v} a punctelor de pe suprafața indusului, asigurând, astfel, variația sinusoidală a *t.e.m.* Miezurile de oțel au și ele o construcție specială. Pentru micșorarea intensității curenților turbionari și, respectiv, a pierderilor de energie, miezurile sunt confecționate din plăci subțiri (tole) de oțel, izolate între ele.

Frecvența *t.e.m.* generată de alternator depinde de viteza de rotație a rotorului. Pentru obținerea curentului alternativ de frecvență industrială ($\nu = 50$ Hz), rotorul (un electromagnet cu doi poli) trebuie să efectueze 50 rot/s, adică 3 000 rot/min. Asemenea turații mari însă nu pot fi întotdeauna realizate. Această dificultate este înlăturată prin utilizarea electromagneților cu mai mulți poli magnetici 4, 6, 8, ... (În *figura 2.18, b* este reprezentat schematic alternatorul cu 4 poli.) Perioada curentului alternativ generat în fiecare caz va fi egală cu timpul necesar pentru rotirea rotorului cu $1/2, 1/3, 1/4, \dots$ din lungimea cercului. Atunci, pentru obținerea curentului alternativ de aceeași frecvență, viteza de rotație a rotorului va fi de 2, 3, 4, ... ori mai mică.

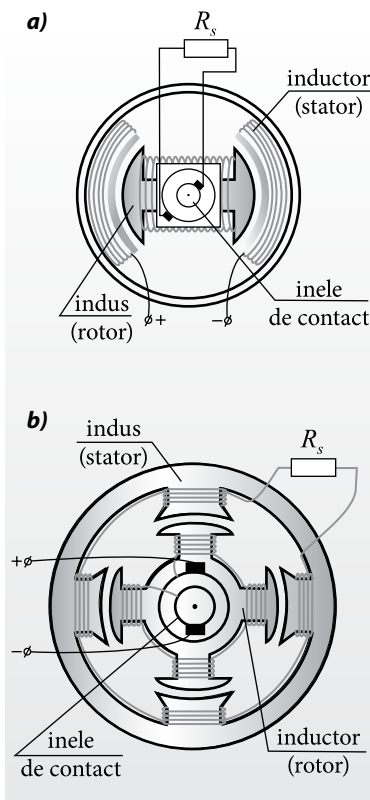


Fig. 2.18

b. Randamentul liniei de transport. Impactul asupra organismelor vii

Energia electrică este produsă cu ajutorul generatoarelor la centrale electrice mari, amplasate, de obicei, în apropierea resurselor energetice naturale, iar consumatorii se află la anumite distanțe de la ele. Astfel, utilizarea energiei electrice necesită construcția unor **linii de transport** al acesteia.

Orice linie de transport este caracterizată de pierderi de energie din cauza efectului termic al curentului electric: $Q = I^2 R t$. Aceste pierderi pot fi reduse prin micșorarea rezistenței conductoarelor din care este alcătuită linia de transport sau a intensității curentului. Dacă l este lungimea liniei, iar S este aria secțiunii transversale a conductoarelor folosite, atunci $R = \rho (2l/S)$ și pierderile de putere prin efect termic într-o linie cu două conductoare sunt caracterizate de relația:

$$\Delta P = \frac{Q}{t} = \rho \frac{2l}{S} I^2,$$

unde ρ este rezistivitatea conductoarelor. Întrucât lungimea liniei de transport este impusă de distanța dintre consumator și generator, rezistența liniei poate fi micșorată numai datorită măririi ariei secțiunii transversale a conductoarelor, adică majorării masei de metal folosit. Aceasta însă nu este rentabil din punct de vedere tehnic și economic. Rezultă că unica modalitate de reducere a pierderilor este micșorarea intensității curentului.

Puterea curentului electric este egală cu produsul dintre intensitate și tensiune și, pentru a menține constantă puterea curentului electric din linia de transport, este necesar să mărim tensiunea de atâtea ori, de câte ori micșorăm intensitatea curentului.

Tensiunile înalte, necesare în cazul transportului energiei electrice, nu pot fi obținute direct la generatoarele de curent alternativ, dar nici nu sunt necesare pentru consumatori, aceștia folosind tensiuni mult mai joase. Din această cauză un element important al liniei de transport este dispozitivul de ridicare (coborâre) a tensiunii, numit **transformator**. În figura 2.20 este reprezentată schematic o linie de tensiune înaltă. În fiecare caz tensiunea din linia de transport este determinată de puterea transmisă și de distanța la care trebuie transportată energia electrică, dar întotdeauna ea este de ordinul sutelor de mii de volți.

Deoarece necesitățile consumatorilor sunt diferite, stațiunile de micșorare a tensiunii funcționează în trepte. Astfel, pentru consumatorii mari se construiesc linii de transport cu tensiuni de ordinul zecilor de mii de volți, iar consumatorii mici se alimentează de la linii cu tensiunea de 220 V.

Generatorul de curent continuu se deosebește de alternator numai prin construcția colectorului (fig. 2.19). Cele două inele pe care alunecă periutele p_1 și p_2 (v. fig. 2.1) se înlocuiesc cu două semiinele, numite **lamele** (fig. 2.19, a), fiecare dintre ele conectându-se la capetele cadrului metallic. Lamelele se rotesc împreună cu cadrul, iar periutele rămân fixe. După un timp egal cu o jumătate de perioadă, sensul curentului prin laturile active ale cadrului se modifică, dar în același timp și semiinele își schimbă locurile. Astfel, la periuta p_1 , tot timpul va fi un potențial negativ, iar la periuta p_2 – pozitiv. Cu toate că prin circuitul exterior curentul are permanent același sens (continuu), după fiecare jumătate de perioadă $t.e.m.$ și intensitatea curentului au valori nule (fig. 2.19, a). Cu alte cuvinte, variația alternativă a $t.e.m.$ și a intensității curentului este transformată de către colector într-o variație, numită **pulsatorie**. Pentru obținerea unui curent continuu de pulsații mici se iau mai multe bobine (cadre metalice) așezate sub unghiuri egale una față de alta. În acest caz, colectorul reprezintă un inel secționat, numărul de lamele fiind egal cu numărul bobinelor. În figura 2.19, b este reprezentat colectorul cu patru lamele. Un generator cu asemenea colector, la care se conectează patru bobine, va genera un curent continuu de intensitate minimă diferită de zero și pulsații evident mai mici.

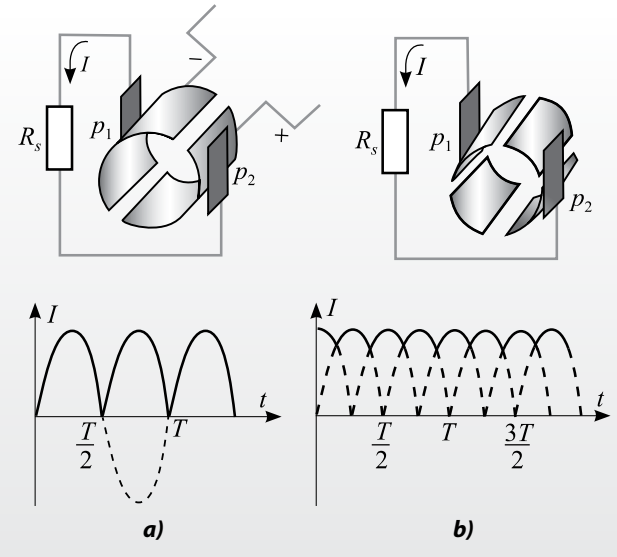


Fig. 2.19

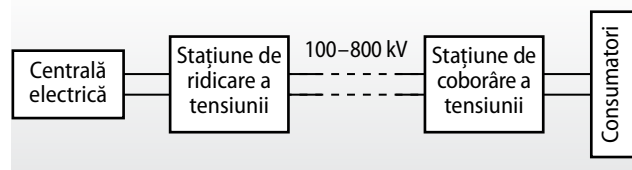


Fig. 2.20

De rând cu problemele tehnice analizate mai sus este necesar să menționăm și problemele legate de impactul liniilor de transport al energiei electrice asupra mediului înconjurător și, în special, asupra organismelor vii. Principalele tipuri de poluări ale mediului înconjurător sunt: *poluarea sonoră* (zgomote produse de conductoarele liniei electrice și, în special, de transformatoare, de descărcarea în coroană pe liniile de înaltă tensiune); *poluarea electromagnetică* (perturbații radio și ale emisiunilor de televiziune, influența câmpurilor electric și magnetic asupra organismelor vii); *poluarea ecologică* (ocuparea terenurilor, defrișarea pădurilor ș.a.).

Problemele legate de influența câmpurilor electric și magnetic asupra organismelor vii formează obiectul unor cercetări speciale începute relativ nu de mult. Studiile efectuate în cazul influenței câmpurilor electrice intense asupra organismului uman au scos în evidență simptome de oboseală, slăbiciune, scăderea atenției, senzații de amețeală și insomnii. În prezent se consideră că pentru om nu există pericole doar în cazul câmpurilor electrice cu intensități de până la 5 kV/m. Acțiunea câmpului magnetic asupra organismelor vii încă nu este studiată complet, de aceea nu sunt stabilite nici limitele admise și nici efectele concrete ale acestuia.

c. Transformatorul

O aplicație practică foarte importantă a fenomenului inducției electromagnetice este transformatorul. În *figura 2.21* sunt reprezentate: a) construcția transformatorului; b) simbolul lui în schemele electrice. Cel mai simplu transformator constă din două bobine cu numărul de spire diferit N_1 și N_2 , înfășurate pe același miez de fier ce formează un circuit magnetic închis. Circuitul format din sursa de alimentare și una din bobinele transformatorului este numit **primar**, iar cel format de a doua bobină și consumator – **secundar**. În funcție de necesități, pe același miez pot fi înfășurate mai multe bobine. În

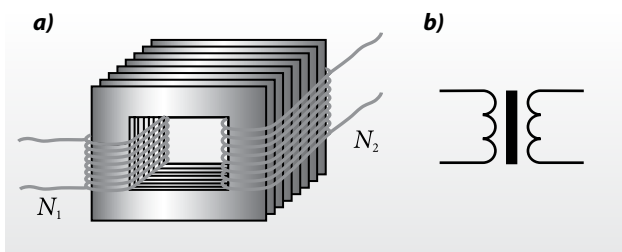


Fig. 2.21

asemenea cazuri transformatorul conține un singur circuit primar și mai multe secundare. Dacă la transformator nu este conectat niciun consumator, adică circuitul secundar este întrerupt, atunci se spune că transformatorul funcționează în gol.

Să presupunem că bobina cu N_1 spire este conectată la o sursă de tensiune alternativă u_1 și transformatorul funcționează în gol. În circuitul primar apare curentul de intensitate i_1 care generează un flux magnetic variabil $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$. Acest flux străbate spirele ambelor bobine indiferent de existența miezului de fier. Rolul acestuia este de a mări valoarea de amplitudine a fluxului magnetic și, în același timp, de a concentra liniile de inducție magnetică ale câmpului. Astfel, atât bobina circuitului primar, cât și a celui secundar vor fi străbătute practic de același flux și cuplajul magnetic dintre bobine devine mai eficient. Conform legii inducției electromagnetice, în bobinele primară și secundară ale transformatorului apar, respectiv, *t.e.m.* de autoinducție e_1 și de inducție e_2 :

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ și } e_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

unde $\Delta\Phi$ este variația fluxului magnetic printr-o spirală, aceeași pentru ambele bobine.

Din împărțirea acestor relații rezultă că raportul *t.e.m.* de autoinducție din bobina primară și cea de inducție din bobina secundară este egal cu raportul numerelor corespunzătoare de spire:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (2.45)$$

La funcționarea transformatorului în gol, curentul prin bobina secundară $i_2 = 0$, de aceea *t.e.m.* e_2 este egală cu tensiunea u_2 de la bornele ei. Prin bobina primară însă circulă curentul (numit de funcționare în gol) de intensitate i_1 mică. Întrucât rezistența ei R_1 este, de obicei, foarte mică, căderea de tensiune $i_1 R_1 = e_1 + u_1 \approx 0$. Din acest motiv, valoarea *t.e.m.* e_1 este aproximativ egală cu cea a tensiunii de alimentare u_1 , adică:

$$e_1 \approx -u_1. \quad (2.46)$$

Semnul „-” arată că *t.e.m.* e_1 și tensiunea de alimentare u_1 sunt în opoziție de fază. Folosind relația (2.45), obținem:

$$\frac{u_1}{u_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

sau pentru valorile efective:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = K. \quad (2.47)$$

Raportul K al tensiunilor de la bornele bobinelor transformatorului la funcționarea lui în gol este numit *coeficient de transformare*.

Pentru valoarea $K < 1$ din (2.47) rezultă că $U_2 > U_1$ și transformatorul este numit **ridicător de tensiune**, iar pentru $K > 1$ rezultă $U_2 < U_1$ și este numit **coborător de tensiune**. Transformatoarele caracterizate de raportul $K \approx 1$ sunt folosite pentru separarea electrică a circuitelor, cuplajul realizându-se doar prin inducție electromagnetică. Asemenea transformatoare, de obicei, sunt folosite pentru acordarea circuitelor în radiotehnică.

Dacă la bornele bobinei secundare se conectează un consumator de rezistență R_2 , prin circuitul secundar apare un curent de intensitate i_2 , care generează un flux magnetic variabil Φ_2 . Acest flux modifică valoarea fluxului magnetic total din miezul transformatorului și egalitatea aproximativă (2.46) nu are loc. Din această cauză valoarea efectivă I_1 a intensității curentului din circuitul primar crește, generând un flux magnetic Φ_1 prin spirele bobinei primare care, conform regulii lui Lentz, este în opoziție de fază față de fluxul Φ_2 . Cu cât rezistența R_2 a consumatorului este mai mică (curentul I_2 este mai mare), cu atât curentul I_1 din circuitul primar devine mai mare. În timpul funcționării transformatorului, în miezul lui se stabilește o stare de echilibru dintre fluxurile magnetice Φ_1 și Φ_2 , astfel încât:

$$\Phi_1 \approx \Phi_2. \quad (2.48)$$

În conformitate cu (1.21), fluxul magnetic este proporțional cu intensitatea curentului din bobină și cu numărul ei de spire, adică $\Phi_1 \sim N_1 I_1$ și $\Phi_2 \sim N_2 I_2$.

Înlocuind aceste relații în (2.48) pentru coeficientul de transformare (2.47), obținem:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K. \quad (2.49)$$

Din (2.49) rezultă că dacă $U_2 \ll U_1$, atunci în bobina secundară a transformatorului (coborător de tensiune) se obțin curenți de intensitate foarte mare. Asemenea transformatoare se folosesc în dispozitivele destinate pentru sudură electrică.

Întrucât produsul dintre tensiune și intensitatea curentului semnifică puterea electrică, din (2.49) mai rezultă că puterea din circuitul primar este aproximativ egală cu puterea din cel secundar $P_1 \approx P_2$. Conchidem că energia furnizată consumatorului la bornele bobinei secundare este aproximativ egală cu cea din bobina primară. Evident, egalitatea aproximativă a puterilor din circuitele primar și secundar este determinată de pierderile $\Delta P = P_1 - P_2$, care au loc în transformator. Cu cât pierderile în transformator sunt mai mici, cu atât randamentul lui η este mai mare:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}.$$

În scopul reducerii pierderilor descrise mai sus, la construirea transformatoarelor se întreprind anumite măsuri de prevenire a acestora. Bobinele de tensiune joasă prin care circulă curenți de intensitate înaltă se confecționează din sârmă de cupru cu diametru mare, astfel micșorându-se pierderile prin efect termic. Miezul transformatorului se construiește dintr-un aliaj special, numit **ferosiliciu**, sub formă de plăci subțiri (tole) izolate între ele, de obicei, cu lac. Funcționând în condiții nominale, transformatoarele au un randament foarte înalt, atingând valori de până la 98%.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce reprezintă generatorul de curent alternativ? Care sunt elementele lui de bază?
2. Cum se poate obține curent alternativ de frecvență industrială la turații mici ale rotorului?
3. De ce nu este rentabilă reducerea pierderilor de energie în liniile de transport prin micșorarea rezistenței conductoarelor?
4. De ce transportul energiei electrice la distanțe mari se realizează la tensiuni înalte?
5. Care sunt elementele de bază ale unei linii de transport a energiei de la centrala electrică până la consumator?
6. Ce reprezintă transformatorul și care este construcția lui? Care este principiul de funcționare a transformatorului?
7. Ce se numește coeficient de transformare și cum se clasifică transformatoarele în funcție de valoarea lui?
8. Cum se definește randamentul transformatorului?
9. Bobina primară a unui transformator conține 1 000 de spire și este conectată la o sursă de alimentare de 220 V. Determinați coeficientul de transformare și numărul de spire din bobina secundară, dacă la bornele ei tensiunea este de 1,1 kV.
10. Un transformator coborător de tensiune este conectat la o sursă de alimentare cu tensiunea de 220 V. Care este intensitatea curentului în circuitul primar, dacă în cel secundar circulă un curent de 22 A la o tensiune de 36 V?
11. Puterea consumată de un transformator este de 45 W. Determinați intensitatea curentului din circuitul bobinei secundare, dacă la bornele ei este o tensiune de 9 V, iar transformatorul funcționează cu un randament de 95%.



OSCILAȚII ȘI UNDE ELECTROMAGNETICE

3.1. OSCILAȚII ELECTROMAGNETICE

a. Circuitul oscilant ideal

Studiind oscilațiile mecanice, s-a constatat că ele sunt însoțite de un continuu proces de transformare a energiei potențiale a oscilatorului în energie cinetică și invers. După cum vom vedea în continuare, circuitul închis compus dintr-un condensator și o bobină, numit **circuit oscilant**, de asemenea reprezintă o sursă de oscilații, dar însoțite de transformarea energiei câmpului electric în cea a câmpului magnetic și invers. De aceea asemenea oscilații au fost numite **oscilații electromagnetice libere**.

Menționăm că în realitate toate circuitele oscilante posedă și o anumită rezistență electrică.

Pentru simplitate vom cerceta cazul unui circuit oscilant ideal, elementele cărui au rezistențe foarte mici și acestea pot fi neglijate.

Să urmărim procesul de apariție a oscilațiilor electromagnetice într-un circuit oscilant ideal, comparându-l cu cel de apariție a oscilațiilor mecanice în cazul unui pendul elastic (fig. 3.1). Dacă în circuitul oscilant condensatorul nu este încărcat, atunci sistemul se află în stare de echilibru.

Admitem că, la momentul de timp $t = 0$, condensatorul de capacitate C , încărcat prealabil până la o tensiune U_m , are pe armături o sarcină $q_m = CU_m$ și este legat la bornele unei bobine de inductanță L . Astfel, circuitului oscilant i s-a transmis o energie egală cu energia câmpului electric dintre armăturile condensatorului $q_m^2/(2C)$. Această stare a circuitului oscilant este echivalentă cu cea a pendulului elastic, scos din

poziția de echilibru la distanța $-x_m$, fiindu-i transmisă energia potențială $kx_m^2/2$, unde k este constanta de elasticitate a resortului (fig. 3.1, a). Odată cu începerea descărcării condensatorului (micșorării sarcinii de pe armăturile lui), prin bobină circulă un curent, a cărui intensitate crește treptat, precum în cazul pendulului elastic se mărește viteza corpului. Micșorarea sarcinii și, respectiv, creșterea curentului nu se produce instantaneu din cauza fenomenului de autoinducție provocat de variația în timp a curentului prin bobină. Într-adevăr, creșterea curentului prin bobină determină apariția unui câmp magnetic variabil în timp. La rândul său, acest câmp magnetic generează un curent indus și, respectiv, un câmp electric. Conform regulii lui Lenz, curentul indus are un astfel de sens, încât fluxul magnetic produs de acesta se opune creșterii fluxului magnetic inductor, ceea ce împiedică descărcarea instantanee a condensatorului.

La momentul $t = T/4$ (fig. 3.1, b) pendulul elastic revine la poziția de echilibru, unde viteza corpului este maximă, iar energia potențială a resortului se transformă complet în energie cinetică $mv_m^2/2$. Analogic, în același moment, condensatorul este complet descărcat (sarcina de pe armături și tensiunea sunt nule), intensitatea curentului în bobină este maximă $i = I_m$, iar energia câmpului electric al condensatorului se transformă complet în energia câmpului magnetic al bobinei $LI_m^2/2$.

Continuând analogia cu pendulul elastic, observăm că în intervalul de timp de la $T/4$ până la $T/2$ corpul pendulului, mișcându-se după inerție, comprimă resortul până la o deformație egală cu cea inițială, dar în sens opus, adică cu x_m . Respectiv, energia

cinetică a pendulului se transformă în energie potențială. În circuitul oscilant, micșorarea intensității curentului în acest interval de timp, conduce la apariția unui curent indus, al cărui flux magnetic, conform regulii lui Lenz, se opune micșorării fluxului magnetic indus. În consecință, tensiunea electromotoare de autoinducție $e_a = -L\Delta i/\Delta t$ de la bornele bobinei încarcă condensatorul cu sarcini de semne opuse față de cum a fost încărcat inițial. La momentul $t = T/2$, în circuitul oscilant tensiunea atinge valoarea maximă negativă $-U_m$, iar intensitatea curentului $i = 0$ (fig. 3.1, c).

În intervalul $(T/2, T)$ atât în cazul pendulului elastic, cât și în circuitul oscilant se produc în aceeași ordine fenomene ce au avut loc în intervalul $(0, T/2)$, însă în sens contrar. Începând cu momentul $t = T/2$, condensatorul se descarcă și energia câmpului electric din circuitul oscilant egală cu $q_m^2/(2C)$ descrește. Tensiunea și, respectiv, sarcina de pe armăturile condensatorului se micșorează, iar intensitatea curentului prin bobină crește. La momentul $t = 3T/4$ sarcina și tensiunea sunt nule, iar $i = -I_m$, adică curentul este maxim, dar de sens opus celui care circula prin circuit în primul sfert de perioadă. Energia circuitului oscilant este egală cu cea a câmpului magnetic $LI_m^2/2$ (fig. 3.1, d). După reîncărcarea condensatorului în intervalul de timp $(3T/4, T)$, energia câmpului magnetic iarăși se transformă complet în energia câmpului electric și circuitul oscilant revine la starea inițială (fig. 3.1, e), reluându-se apoi aceeași succesiune de fenomene.

Din analiza făcută mai sus rezultă că procesul de încărcare-descărcare a condensatorului este periodic, iar mărimile q, i, u ce caracterizează acest proces sunt oscilatorii. Din figura 3.1 observăm că dependențele de timp ale tensiunii u și intensității curentului i din circuitul oscilant ideal se descriu cu funcțiile „sinus” sau „cosinus”, adică sunt funcții armonice. Aceasta ne permite să afirmăm că în acest circuit, ca și în cazul pendulului elastic, se produc oscilații armonice libere. Așadar,

circuitul oscilant ideal reprezintă echivalentul electromagnetic al oscilatorului liniar armonic.

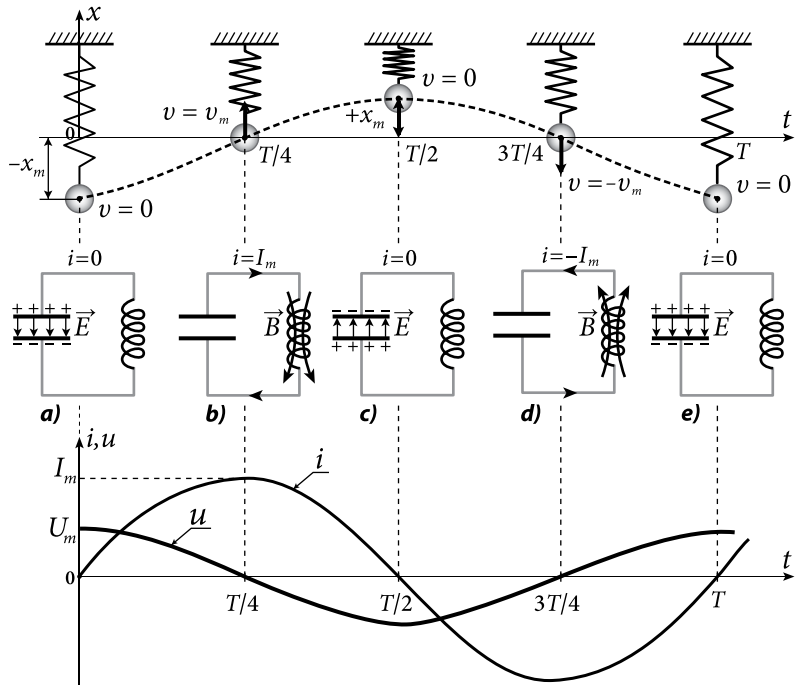


Fig. 3.1

b.* Analogia dintre oscilațiile mecanice și electromagnetice. Perioada și frecvența oscilațiilor electromagnetice

Asemănarea dintre oscilațiile electromagnetice și cele mecanice constă în caracterul unic al modului de variație a mărimilor ce le caracterizează și se explică prin analogia condițiilor ce le provoacă. Revenirea la poziția de echilibru în cazul pendulului elastic este determinată de forța de elasticitate $F_x = -kx$ dependentă liniar de deplasarea x de la această poziție. În circuitul oscilant revenirea la starea de echilibru corespunde procesului de descărcare a condensatorului determinat de tensiunea $u = q/C$, dependentă liniar de sarcina q .

Așadar, coeficientului de elasticitate k , în cazul oscilațiilor mecanice, îi corespunde mărimea inversă a capacității condensatorului $1/C$ în cazul oscilațiilor electromagnetice. Precum inerția corpului de masă m a pendulului elastic împiedică creșterea bruscă a vitezei acestuia, curentul electric în circuitul oscilant se mărește treptat datorită fenomenului de autoinducție din bobina de inductanță L . Rezultă că inductanța L în cazul oscilațiilor electromagnetice are același rol ca și masa m în cazul celor mecanice. Asemenea analogie poate fi stabilită și pentru alte mărimi fizice. În tabelul 1 sunt prezentate mărimile fizice mecanice și electrice, precum și corespondența dintre ele la studiul oscilațiilor.

Tabelul 1

Oscilații mecanice		Oscilații electromagnetice
Elongația $x = A \cos \omega t$	\longleftrightarrow	Sarcina $q = q_m \cos \omega t$
Viteza $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$	\longleftrightarrow	Intensitatea curentului $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
Accelerația $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	\longleftrightarrow	Viteza de variație a intensității curentului $\frac{\Delta i}{\Delta t}$
Forța F	\longleftrightarrow	Tensiunea U
Masa m	\longleftrightarrow	Inductanța L
Constanta de elasticitate k	\longleftrightarrow	Mărima inversă capacității $1/C$
Energia potențială $kx^2/2$	\longleftrightarrow	Energia câmpului electric $q^2/(2C)$
Energia cinetică $mv^2/2$	\longleftrightarrow	Energia câmpului magnetic $Li^2/2$

Folosind tabelul 1, orice relație (obținută la studiul oscilațiilor mecanice) poate fi scrisă în limbajul oscilațiilor electromagnetice. De exemplu, relația care exprimă legea conservării energiei mecanice în cazul oscilatorului liniar armonic:

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2},$$

pentru circuitul oscilant ideal are aspectul:

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}. \quad (3.1)$$

Întrucât în circuitul oscilant ideal nu există pierderi de energie, oscilațiile electromagnetice se produc numai în baza transformărilor energetice reciproce din interiorul lui și sunt numite **proprii**. Relația pentru pulsația proprie a acestor oscilații se poate demonstra teoretic, însă este mai simplu să folosim tabelul 1 și formula $\omega = \sqrt{k/m}$ pentru pulsația proprie a pendulului elastic. Așadar, pentru pulsația proprie a oscilațiilor electromagnetice avem:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3.2)$$

iar pentru valorile perioadei și frecvenței proprii obținem:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{LC} \quad (3.3)$$

și

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \quad (3.4)$$

Relația (3.3) a fost demonstrată pentru prima dată în anul 1853 de către fizicianul englez William Thomson (1824–1907) și este numită **formula lui Thomson**.

Frecvența (perioada) proprie a oscilațiilor din circuitul oscilant depinde numai de parametrii acestuia și pentru valori mici ale capacității și inductanței se pot realiza oscilații de frecvență foarte înaltă.

c.* Oscilații electromagnetice amortizate și forțate

Studiul circuitului oscilant ideal demonstrează că procesul de transformare a energiei câmpului electric al condensatorului în cea a câmpului magnetic al bobinei și invers poate continua la nesfârșit. Deoarece elementele circuitului ideal nu posedă rezistență, nu există nici pierderi de energie prin efect Joule. De regulă însă, orice circuit oscilant real întotdeauna este caracterizat și de o anumită rezistență. Din această cauză energia acumulată inițial în condensator se transformă parțial în energia câmpului magnetic și parțial, datorită efectului termic al curentului, – în energie internă, ce se degajă sub formă de căldură. După fiecare perioadă, sarcina de pe armăturile condensatorului devine mai mică decât în cea precedentă, adică amplitudinea oscilațiilor electromagnetice se micșorează și în decursul unui număr oarecare de perioade ele se sting. Astfel de oscilații sunt numite **amortizate** (fig. 3.2). Prin urmare,

într-un circuit oscilant real sunt posibile doar oscilații electromagnetice amortizate.

Pentru menținerea procesului oscilatoriu al mărimilor electrice în circuitul oscilant este nevoie să compensăm pierderile de energie prin alimentarea lui la o sursă exterioară. Dacă compensarea se face periodic, atunci în circuit se stabilesc oscilații ale curentului și tensiunii, caracterizate de amplitudine constantă și frecvență egală cu cea a sursei de alimentare. Astfel, periodic se realizează un transfer de energie din exterior spre circuitul oscilant. În asemenea cazuri oscilațiile sunt numite **oscilații electromagnetice forțate**.

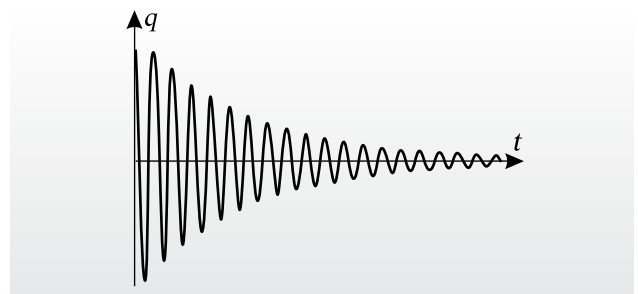


Fig. 3.2

Problemă rezolvată

Intensitatea curentului din circuitul oscilant ideal, alcătuit dintr-o bobină de inductanță $L = 10 \text{ H}$ și un condensator, variază în timp conform legii: $i = 0,1 \sin 100 \pi t \text{ (A)}$.

Determinați: a) perioada oscilațiilor electromagnetice; b) capacitatea electrică a condensatorului; c) energiile maxime ale câmpurilor electric și magnetic.

Se dă:

$$L = 10 \text{ H}, \\ i = 0,1 \sin 100 \pi t \text{ (A)}$$

- a) $T - ?$;
- b) $C - ?$;
- c) $W_{m,E} - ?$, $W_{m,B} - ?$

Rezolvare:

a) Din comparația legii de variație a curentului, dată în condițiile problemei, cu forma generală a legii armonice $i = I_m \sin \omega t$, rezultă $I_m = 0,1 \text{ A}$ și $\omega = 2\pi\nu = 100\pi$, deci frecvența $\nu = 50 \text{ Hz}$. Atunci $T = 1/\nu = 0,02 \text{ s}$.

b) Capacitatea electrică a condensatorului se determină ușor din formula lui Thomson (3.3). Avem:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} \approx 10^{-6} \text{ F} = 1 \text{ }\mu\text{F}.$$

c) Deoarece circuitul oscilant este ideal, conform legii conservării energiei (3.1), valorile maxime ale energiilor câmpurilor electric și magnetic sunt egale. Într-adevăr,

$$W_{m,E} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{1}{2C} \cdot \frac{I_m^2}{\omega^2} = \frac{I_m^2}{2C} \cdot LC = \frac{LI_m^2}{2} = W_{m,B},$$

iar numeric se obține $W_{m,E} = W_{m,B} = 0,05 \text{ J}$.

Verificați-vă cunoștințele

1. Ce se numește circuit oscilant?
2. Care sunt transformările energetice posibile într-un circuit oscilant și ce reprezintă oscilațiile electromagnetice?
3. În baza cărui fenomen este posibilă reîncărcarea condensatorului din circuitul oscilant? Descrieți procesele care au loc în acest circuit, comparându-le cu cele ce se produc în cazul pendulului elastic.
- 4.* Care este corespondența dintre mărimile fizice ce descriu oscilațiile mecanice și cele electromagnetice?
- 5.* Care este formula lui Thomson pentru perioada proprie a oscilațiilor electromagnetice?
- 6.* Cum se numesc oscilațiile electromagnetice care se produc într-un circuit oscilant real?
- 7.* Când oscilațiile dintr-un circuit oscilant sunt numite oscilații forțate?
- 8.* Determinați capacitatea condensatorului dintr-un circuit oscilant ideal, dacă bobina lui are inductanța $L = 10 \text{ mH}$, iar perioada oscilațiilor electromagnetice este de 4 ms .
- 9.* Cum și de câte ori se modifică frecvența oscilațiilor electromagnetice dintr-un circuit oscilant, dacă bobina lui este înlocuită cu alta, având inductanța de 16 ori mai mare?
- 10.* O bobină de inductanță $L = 5 \text{ mH}$ și un condensator plan cu aer, având armăturile de arie $S = 100 \text{ cm}^2$, formează un circuit oscilant. Determinați distanța dintre armăturile condensatorului, dacă perioada oscilațiilor electromagnetice este de $3 \text{ }\mu\text{s}$.

3.2.* CÂMPUL ELECTROMAGNETIC

Analiza fenomenelor electrice și magnetice studiate în capitolele precedente sugerează ideea existenței unei legături între ele. Într-adevăr, conform experiențelor lui Oersted, în jurul oricărui conductor parcurs de curent electric întotdeauna există un câmp magnetic cu linii închise. Totodată, studiul fenomenului de inducție electromagnetică demonstrează că variația inducției câmpului magnetic determină apariția unui câmp electric turbionar, adică tot cu linii închise, datorită căruia apare curentul indus în spirele bobinei.

Generalizând rezultatele experimentale referitoare la fenomenele electrice și magnetice, cunoscut la acel timp, fizicianul englez J.C. Maxwell a elaborat teoria **câmpului electromagnetic** și a **undelor electromagnetice**.

Această teorie are la bază două ipoteze foarte importante. Din legea inducției electromagnetice descoperită experimental de către Faraday rezultă că într-o spirală conductoare curentul indus, apărut în urma variației inducției câmpului magnetic, este determinat de existența unui câmp electric turbionar

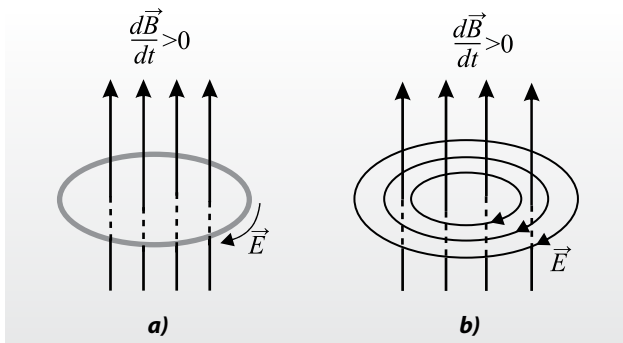


Fig. 3.3

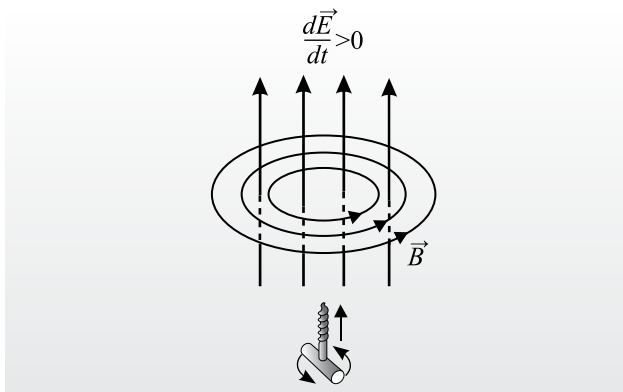


Fig. 3.4



JAMES CLERK MAXWELL
(1831–1879)

fizician englez

Alături de Newton și Einstein, este considerat unul dintre cei mai de văză fizicieni din toate timpurile. Este cunoscut prin lucrările sale în diferite domenii ale fizicii: electrodinamică, fizică moleculară, fizică statistică, optică, mecanică, teoria elasticității. Se consideră unul dintre fondatorii teoriei cinetico-moleculare a gazelor.

Cele mai importante realizări însă au fost obținute în electrodinamică. În anii 1860–1865 a elaborat teoria câmpului electromagnetic, care conține toate legăturile proceselor electromagnetice. A introdus noțiunea de curent de deplasare și a demonstrat teoretic existența undelor electromagnetice care se propagă în spațiul liber cu viteza luminii. A înaintat ipoteza despre natura electromagnetică a luminii.

(fig. 3.3, a). Maxwell generalizează această lege, presupunând apariția câmpului electric chiar și în lipsa spirei conductoare (fig. 3.3, b), adică a substanței. Așadar,

orice câmp magnetic variabil în timp generează un câmp electric turbionar.

Intensitatea câmpului electric este cu atât mai mare cu cât variația câmpului magnetic este mai rapidă, iar sensul vectorului \vec{E} se determină în baza regulii lui Lenz (fig. 3.3, b).

Analizând procesul de încărcare-descărcare a condensatorului din circuitul oscilant, Maxwell înaintează a doua ipoteză:

orice câmp electric variabil în timp generează un câmp magnetic turbionar.

Inducția magnetică a acestui câmp este cu atât mai mare cu cât intensitatea câmpului electric variază mai rapid, iar sensul vectorului \vec{B} este determinat de regula burghiului de dreapta (fig. 3.4). Conform acestei ipoteze, într-un circuit de curent alternativ, de exemplu, de încărcare a condensatorului, câmpul magnetic este creat nu numai de conductoarele parcurse de curent, dar și de câmpul electric variabil dintre armăturile condensatorului. Rezultă că într-o regiune a spațiului unde se manifestă câmpul electric variabil concomitent există și câmp magnetic variabil, deoarece aceste câmpuri nu pot fi separate. Generându-se reciproc, ele formează un câmp unic, numit **câmp electromagnetic**.

Câmpul electromagnetic reprezintă o formă deosebită de existență a materiei. Acesta este caracterizat de vectorii intensității câmpului electric \vec{E} și inducției celui magnetic \vec{B} , care variază simultan în plane reciproc perpendiculare.

Câmpurile electric și magnetic staționare analizate în capitolele precedente reprezintă, după cum rezultă din teoria lui Maxwell, cazuri particulare ale câmpului electromagnetic unic.

➡ Verificați-vă cunoștințele

1. Care sunt ipotezele lui Maxwell? Explicați esența lor.
2. Cum se determină sensul vectorilor intensității câmpului electric și inducției celui magnetic care apar la variația câmpului magnetic și, respectiv, a celui electric?
3. În ce constă interdependența câmpurilor electric și magnetic?
4. Ce reprezintă câmpul electromagnetic?

3.3. UNDELE ELECTROMAGNETICE

a.* Existența undelor electromagnetice

Din teoria lui Maxwell despre câmpul electromagnetic și propagarea lui în spațiu rezultă câteva proprietăți importante ale undelor electromagnetice, pe care le formulăm fără a le demonstra:

Vectorii \vec{E} și \vec{B} din unda electromagnetică sunt întotdeauna reciproc perpendiculari: $\vec{E} \perp \vec{B}$ (fig. 3.5). Direcția și sensul de propagare a undei electromagnetice sunt determinate de regula burghiului de dreapta. Unda se propagă în sensul înaintării burghiului, atunci când el este rotit de la vectorul \vec{E} spre vectorul \vec{B} (fig. 3.5). Chiar dacă sensul vectorilor \vec{E} și \vec{B} se modifică continuu, unda electromagnetică are întotdeauna unul și același sens de propagare.

Undele electromagnetice reprezintă unde transversale. Din figura 3.5 se observă că vectorii \vec{E} și \vec{B} întotdeauna sunt perpendiculari pe direcția de propagare.

Viteza de propagare a undelor electromagnetice este finită. Maxwell a demonstrat că în medii omogene această viteză se determină din relația

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}, \quad (3.5)$$

unde $\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \frac{F}{m}$ și $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ sunt, respectiv, constantele electrică și magnetică ale vidului, iar ϵ_r și μ_r sunt permitivitatea și permeabilitatea relative ale mediului. Din (3.5) rezultă că în vid unda electromagnetică se propagă cu viteza

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ m}^2}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ F} \cdot \text{H}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \equiv c. \quad (3.6)$$

Prin urmare, în vid viteza undei electromagnetice este egală cu viteza luminii. Acest rezultat l-a determinat pe Maxwell să înainteze ipoteza despre natura electromagnetică a luminii.

Din (3.5) și (3.6) rezultă că viteza de propagare a undei electromagnetice într-un mediu este:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}. \quad (3.7)$$

Undele electromagnetice transportă energie. Această energie se conține în câmpurile electric și magnetic ale undei electromagnetice și este transportată în direcția și sensul de propagare al acesteia.

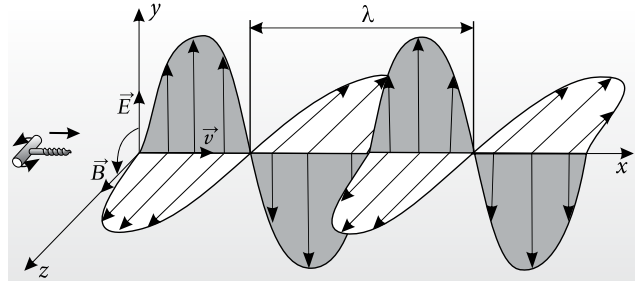


Fig. 3.5

b. Propagarea undelor electromagnetice

Interdependența câmpurilor variabile electric și magnetic determină nu numai existența câmpului electromagnetic, dar și o proprietate fundamentală a acestuia de a se propaga în spațiu și timp. Într-adevăr, un câmp electric variabil generează în spațiul înconjurător un câmp magnetic, de asemenea, variabil. Acesta, la rândul său, produce în regiunea imediat următoare alt câmp electric variabil ș.a.m.d. Așadar, o perturbație a câmpului electromagnetic se propagă în spațiu din aproape în aproape prin intermediul unui proces oscilatoriu.

Perturbația câmpului electromagnetic ce se propagă în spațiu se numește undă electromagnetică.

Distanța la care se propagă unda electromagnetică în timp de o perioadă (T), este numită lungime de undă (λ).

Dacă viteza de propagare a undei este v , atunci

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}, \quad (3.8)$$

unde $\nu = 1/T$ este frecvența oscilațiilor. Este important să menționăm că viteza de propagare a undelor electromagnetice este foarte mare. În aer ea este practic egală cu viteza luminii în vid c . În acest caz, lungimea de undă este determinată de relația

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \quad (3.9)$$

Concluzia principală din teoria lui Maxwell despre existența undelor electromagnetice a fost confirmată experimental în anul 1888, după aproape zece ani de la moartea lui, de către fizicianul german H. Hertz (1857–1894).

Pentru obținerea undelor electromagnetice Hertz a folosit dispozitivul inventat de el numit **oscilator**. Acesta constă din două tije, între capetele cărora se produce o descărcare electrică, adică se creează un câmp electric variabil. Se poate considera că oscilatorul lui Hertz este un **circuit oscilant deschis**.

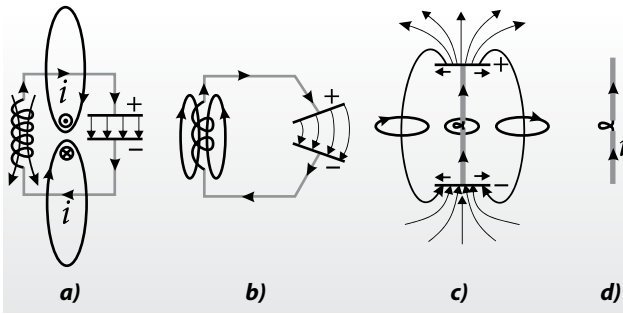


Fig. 3.6

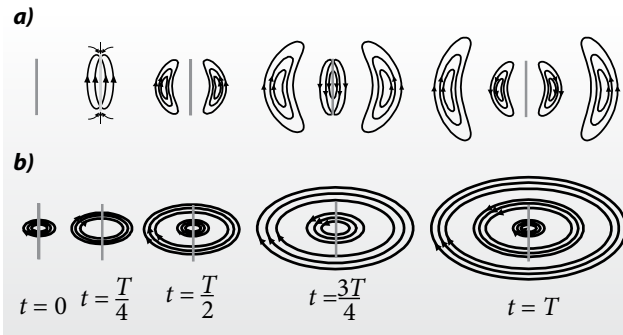


Fig. 3.7

Într-adevăr, în circuitul oscilant studiat anterior (fig. 3.6, a), câmpurile electric și magnetic variabile nu se propagă în spațiu, deoarece sunt practic localizate între armăturile condensatorului și, respectiv, în interiorul bobinei. Mai mult ca atât, în acest circuit curentii prin ramurile lui au sensuri opuse și câmpurile magnetic și electric generate de diferite porțiuni ale circuitului se compensează reciproc. Asemenea circuit mai este numit **circuit oscilant închis**. Dacă însă armăturile condensatorului se îndepărtează una de alta, iar spirele bobinei se întind, atunci liniile de câmp ocupă regiuni tot mai mari ale spațiului, iar porțiunile de circuit în care sensul curentului este opus rămân tot mai puține (fig. 3.6, b, c). Astfel, se obține circuitul oscilant deschis, numit și **dipol**, care reprezintă un conductor rectiliniu, parcurs de curent doar într-o singură direcție (fig. 3.6, d).

Pentru excitarea oscilațiilor, Hertz a tăiat conductorul lăsând la mijloc un spațiu mic. La cele două părți ale conductorului se aplică o diferență de potențial înaltă, astfel încât în spațiul mic să apară scânteia de descărcare, datorită căreia în dipol iau naștere oscilații ale curentului electric, deci și unde electromagnetice.

Dipolul folosit pentru emisia în spațiu a undelor electromagnetice de o anumită frecvență sau pentru recepția lor este numit **antena**.

Procesul de propagare a câmpului electromagnetic de la antenna de emisie până la cea de recepție este ilustrat în figura 3.7. Liniile de câmp electric (fig. 3.7, a) și cel magnetic (fig. 3.7, b) sunt prezentate separat la diferite momente de timp în decursul unei perioade T . Evident, configurația liniilor de câmp în unda electromagnetică se obține prin suprapunerea figurilor 3.7, a și b.

Admitem că la momentul de timp $t = 0$ curentul în dipol este maxim. În jurul lui există un câmp magnetic de inducție maximă. În decursul primului sfert de perioadă intensitatea curentului în dipol se micșorează până la zero, iar variația în timp a câmpului magnetic determină apariția unui câmp electric turbionar. La momentul $t = T/4$ câmpul electric are intensitatea maximă, fiind înconjurat de câmpul magnetic generat de variația lui. După cum se observă și din figura 3.7, la acest moment câmpul magnetic se desprinde complet de dipol și începe propagarea sa în spațiu.

În următorul sfert de perioadă intensitatea câmpului electric legat de dipol se micșorează până la zero, concomitent producând un câmp magnetic de inducție crescătoare, dar de sens opus celui inițial. Acesta, la rândul său, generează un câmp electric cu linii închise. Astfel, la momentul $t = T/2$ are loc desprinderea câmpului electric de dipol. În decursul celei de a doua semiperioade procesul descris se repetă, însă câmpurile electric și magnetic au sensuri inversate.

➔ Verificați-vă cunoștințele

- 1.* Ce proprietăți ale undelor electromagnetice rezultă din teoria lui Maxwell?
2. Ce se numește undă electromagnetică?
3. Care este relația dintre lungimea de undă, frecvența și viteza de propagare?
4. Ce reprezintă oscilatorul lui Hertz? Cum se obține circuitul oscilant deschis?
5. Cum se explică propagarea unei undei electromagnetice?
- 6.* Un circuit oscilant deschis are capacitatea de 5 nF și inductanța de 0,2 mH. Determinați lungimea de undă emisă de acest circuit.

3.4. CLASIFICAREA UNDELOR ELECTROMAGNETICE

În baza experiențelor lui Hertz au fost obținute unde electromagnetice de frecvențe din ce în ce mai mari și mai mici. S-a constatat că din punctul de vedere al legilor fizicii nu există nicio restricție care ar limita valoarea frecvenței undelor electromagnetice.

Diapazonul undelor electromagnetice este foarte larg, din care cauză este necesară și o clasificare a lor. Această clasificare se poate face după diferite criterii, însă cea mai uzuală este gruparea radiațiilor electromagnetice după frecvență și lungimea de undă în vid. Spectrul undelor electromagnetice reprezentat în figura 3.8 este împărțit convențional în opt grupe, intervalul de frecvențe (lungimi de undă) al cărora nu este strict delimitat.

1. Undele de frecvență sonoră. Sunt undele de cea mai joasă frecvență: de la câțiva herți până la $2 \cdot 10^4$ Hz (cele mai mari lungimi de undă $\lambda \in [1,5 \cdot 10^4 \text{ m}; \infty]$). Sursa acestor unde este curentul alternativ de frecvențe corespunzătoare.

2. Undele radio. Intervalul de frecvențe este cuprins între $2 \cdot 10^4$ Hz și 10^9 Hz ($\lambda \in [0,3 \text{ m}; 1,5 \cdot 10^4 \text{ m}]$). Sursa undelor radio, de asemenea, este curentul alternativ, dar de frecvență mai mare, ceea ce face posibilă emisia lor în spațiul înconjurător, fiind folosite pentru transmiterea informației la distanțe mari (comunicații radio și TV).

3. Microundele. Au frecvența $\nu \in [10^9 \text{ Hz}; 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}]$ sau lungimea de undă $\lambda \in [1 \text{ mm}; 30 \text{ cm}]$. Sunt generate în circuite electronice speciale și datorită direcționării foarte bune cu ajutorul antenelor parabolice se folosesc în comunicațiile prin satelit și radar.

4. Radiația infraroșie (IR). $\nu \in [3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}; 3,85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [780 \text{ nm}; 1 \text{ mm}]$). Aceste radiații sunt produse de oscilațiile atomilor și moleculelor, iar frecvența lor depinde de temperatura corpurilor. De aceea radiația IR mai este numită deseori și **radiație termică**.

Dependența intensității radiației infraroșii de temperatură face posibilă utilizarea acesteia la măsurarea temperaturii diferitor obiecte. De exemplu, în medicină cu ajutorul unui aparat special (termograf) se pot identifica țesuturile bolnave, care au o temperatură mai înaltă decât cele sănătoase. Tot cu ajutorul radiației IR se realizează și dirijarea la distanță a diferitor aparate electronice (aparate radio, TV, videomagnetofone ș.a.).

5. Radiația vizibilă. Ocupă un interval foarte îngust de frecvențe $\nu \in [3,85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}; 7,89 \cdot 10^{14} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [380 \text{ nm}; 780 \text{ nm}]$). Acesta este unicul interval al undelor electromagnetice perceput de ochiul uman și este cel mai important canal de obținere a informației despre lumea înconjurătoare. Radiația vizibilă este emisă în urma tranzițiilor electronilor din învelișul electronic al atomilor. În funcție de frecvența acestor tranziții, radiațiile respective sunt percepute ca având diferite culori: roșu (780–620 nm); oranj (620–590 nm); galben (590–560 nm); verde (560–500 nm); albastru (500–480 nm); indigo (480–450 nm); violet (450–380 nm).

6. Radiația ultravioletă (UV). $\nu \in [8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}; 3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [10 \text{ nm}; 380 \text{ nm}]$). Este produsă prin tranzițiile electronilor din atomi de pe niveluri cu energii mari pe niveluri cu energii mici (de exemplu, la descărcările electrice în gaze). Soarele este o sursă foarte puternică de radiații UV, însă ele sunt considerabil absorbite în stratul superior de ozon al atmosferei. Radiația UV de intensitate înaltă este extrem de periculoasă pentru organismele vii, cauzând arsuri și chiar cancerul pielii. Totodată, dozele mici de radiație UV acționează benefic asupra sănătății omului prin activizarea anumitor procese din organism și prin pigmentarea pielii (bronzarea).

7. Radiația X (Röntgen). $\nu \in [3 \cdot 10^{16} \text{ Hz}; 3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}]$ ($\lambda \in [1 \text{ pm}; 10 \text{ nm}]$). Este produsă prin frânarea electronilor accelerați la tensiuni foarte înalte, care bombardează un metal. Au o capacitate mare de penetrare, de aceea se utilizează la studiul structurii

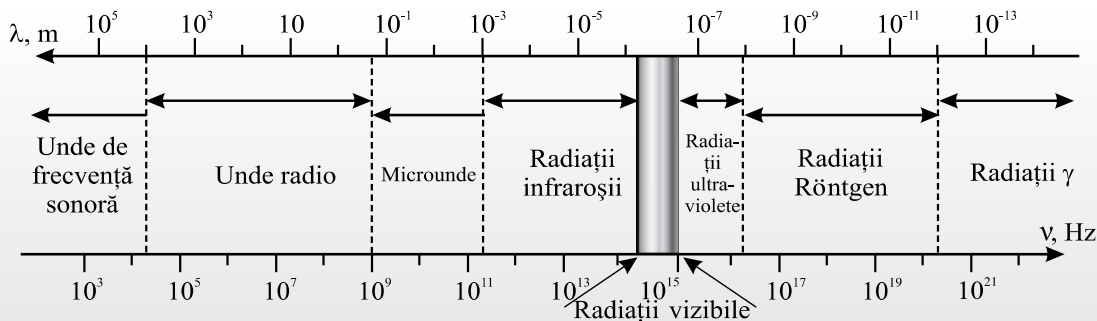


Fig. 3.8

rețelor cristaline, în medicină (radiografia, fluorografia, tratarea anumitor forme de cancer) și în alte domenii.

8. Radiația γ . $\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Hz ($\lambda < 1$ pm). Reprezintă radiația de cea mai înaltă frecvență (cele mai mici

lungimi de undă) și este emisă în procesele de dezintegrare a nucleelor și în urma reacțiilor nucleare. Radiația γ are o capacitate de penetrare și mai mare decât a radiațiilor Röntgen fiind, de asemenea, foarte periculoasă.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Numiți grupele convenționale în care se împarte spectrul undelor electromagnetice.
2. Care sunt sursele de radiație ale undelor de frecvență sonoră, radio, ale microundelor și ale celor infra-roșii? Cum sunt utilizate aceste radiații?
3. Poate oare omul să audă undele electromagnetice de frecvență sonoră?
4. Cum se împarte domeniul radiațiilor vizibile și care sunt limitele lungimilor de undă ce corespund anumitor culori?
5. Care sunt sursele radiațiilor ultraviolete, Röntgen și γ ? Caracterizați acțiunea acestora asupra țesuturilor vii.

3.5. COMUNICAȚII PRIN UNDE ELECTROMAGNETICE

Experiențele lui Hertz referitoare la emisia și recepția undelor electromagnetice au condus la ideea despre posibilitatea folosirii lor la codificarea și transmiterea informației. După aproximativ opt ani de la efectuarea acestor experimente cu ajutorul undelor electromagnetice au fost realizate primele comunicații la distanță.

Astfel, în anul 1896, fizicianul și inginerul italian Guglielmo Marconi (1874–1937) a obținut brevetul de invenție pentru metoda de semnalizare la distanță cu ajutorul emițătorului și receptorului radio și a realizat o comunicare la distanța de 3 km. Perfecționând aparatele de emisie–recepție în anul 1901, el a stabilit prima comunicare fără conductoare de conexiune peste Oceanul Atlantic. Pentru activitatea sa în dezvoltarea tehnicii radio și pentru propagarea radioului în calitate de mijloc de comunicare, în anul 1909 lui G. Marconi i s-a decernat Premiul Nobel.

În același timp, independent de Marconi, aparate de emisie–recepție au fost inventate de fizicianul și inginerul rus Alexandr Popov (1859–1906). Cu regret însă, prima transmisiune radio la o distanță de 250 m demonstrată de Popov nu a fost înregistrată documentar, iar afirmațiile martorilor oculari despre acest eveniment erau contradictorii.

a. Principiile radiocomunicației

În funcție de procedeul folosit la codificarea semnalului transmis, se deosebesc câteva tipuri de comunicații radio: **radiotelegrafia**, **radiotelefonie** și **radiodifuziunea**, **televiziunea**, **radiolocația**.

Primele aparate de emisie–recepție funcționau în regim telegrafic. Codificarea semnalului în acest caz este foarte simplă: emițătorul, prin conectare și deconectare, transmite semnale de durată diferită corespunzătoare alfabetului Morse (fiecare literă sau cifră reprezintă o combinație de puncte și liniuțe, adică semnale scurte și lungi).

Următoarea etapă în dezvoltarea radiocomunicației a fost transmiterea semnalelor audio (radiotelefonie și radiodifuziunea) și video (televiziunea). Întrucât aceste semnale reprezintă oscilații de frecvență joasă, iar puterea de emisie a undelor electromagnetice depinde de frecvență, ele practic nu se propagă. De aceea este nevoie de un semnal de frecvență înaltă (din domeniul undelor radio), numit **semnal purtător**, care se compune cu cel de frecvență joasă ce trebuie transmis. Acest proces este numit **modulare** și reprezintă modificarea codificată a unui din parametrii semnalului purtător.

Cele mai simple tipuri de modulare sunt: **modularea în amplitudine (AM)** – din limba engleză *amplitude modulation*) și **modularea în frecvență (FM)** – *frequency modulation*). Ele reprezintă modificarea codificată a amplitudinii și, respectiv, a frecvenței semnalului purtător în funcție de legea de variație a celui transmis. În *figura 3.9* sunt reprezentate semnalele: purtător (*a*); de frecvență sonoră (*b*); AM (*c*) și FM (*d*). Principiile de transmitere atât a semnalelor audio, cât și a celor video sunt aceleași. Diferă doar dispozitivele electronice de transformare a acestor semnale în oscilații electrice de frecvență joasă.

Pentru recepționarea informației transmise de emițător, aceasta trebuie mai întâi decodificată, adică este nevoie de extragerea semnalului sonor din cel modulat.

Procesul de separare a oscilațiilor de frecvență joasă din oscilațiile modulate de frecvență înaltă se numește **demodulare** sau **detectare**, iar dispozitivul ce realizează acest proces – **demodulator** sau **detector**.

Radioreceptoarele contemporane sunt construite după același principiu, însă pentru recepționarea unui număr mai mare de stații cu o calitate mai înaltă a sunetului, ele sunt înzestrate cu diferite amplificatoare.

În funcție de particularitățile circuitelor electronice folosite pentru emisie–recepție și ale propagării undelor radio, ele se împart convențional în câteva benzi: unde **lungi** ($\lambda > 1$ km); **medii** ($100 \text{ m} < \lambda < 1$ km); **scurte** ($10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$) și **ultrascurte** ($\lambda < 10 \text{ m}$).

b. Radiolocația

Proprietatea de reflexie a undelor electromagnetice este folosită pe larg la determinarea existenței și poziției în spațiu a diferitor obiecte.

Localizarea în spațiu a unui obiect cu ajutorul undelor electromagnetice se numește radiolocație, iar dispozitivul electronic folosit în acest scop – radar sau radiolocator.

Orice dispozitiv de tip radar constă dintr-un emițător de unde electromagnetice, un receptor al acestora și o antenă direcțională. Emițătorul emite în spațiu grupuri de unde separate prin pauze și concentrate în fascicule cât mai înguste. De aceea antena de emisie este așezată în focarul unei oglinzi metalice concave, care asigură propagarea undei electromagnetice într-o singură direcție. În timpul pauzelor dispozitivul radar este trecut la funcționarea în regim de recepție, înregistrând undele reflectate de obiectul întâlnit eventual în calea lor. Cunoșcând intervalul de timp t de la momentul trimiterii semnalului până la momentul recepționării celui reflectat și viteza de propagare a undei electromagnetice egală cu cea de propagare a luminii în vid c , se determină ușor distanța d până la obiect. Deoarece semnalul emis și cel recepționat parcurg drumul de la stația radar până la obiect și înapoi până la stație, rezultă $2d = ct$, de unde obținem:

$$d = \frac{ct}{2}.$$

Întrucât undele electromagnetice de frecvențe mari pot fi ușor direcționate și, în același timp, fiind bine reflectate și de obiectele mici, în radiolocație se folosesc cu precădere undele ultrascurte $\nu \in [10^8; 10^{11}]$ Hz.

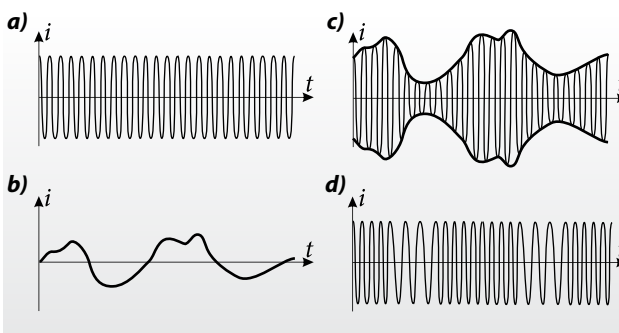


Fig. 3.9

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Elementul principal al oricărui demodulator este dioda semiconductoră sau alt element de conducție unilaterală (dioda cu vid sau trioda). Să analizăm funcționarea demodulatorului în baza celui mai simplu radioreceptor, a cărui schemă electrică de principiu este reprezentată în figura 3.10, a. Semnalul de frecvență înaltă modulat în amplitudine (fig. 3.9, c) este captat de antena de recepție cu ajutorul circuitului oscilant LC acordat în regim de rezonanță la frecvența purtătoare a stației de emisie. La trecerea semnalului recepționat prin dioda D are loc redresarea lui, obținându-se un curent alcătuit doar din pulsații pozitive (fig. 3.10, b). Aceste pulsații sunt însă tot de înaltă frecvență și de aceea următoarea etapă în realizarea demodulării este ondulara sau netezirea lor cu ajutorul unui filtru. Cel mai simplu filtru este condensatorul conectat în paralel cu sarcina inductivă (căștile audio). În intervalele de timp când dioda este deschisă impulsurile de curent se ramifică, astfel încât tensiunea la bornele condensatorului C_1 și ale căștilor audio este aceeași ($i_1 X_L = i_2 X_C$ sau $i_1 \omega L = i_2 / \omega C_1$). Rezultă că prin condensator circulă un curent de frecvență înaltă, iar prin căști – de frecvență joasă. Ramificarea curentului în i_1 și i_2 conduce, pe de o parte, la micșorarea intensității lui prin căștile audio, însă pe de altă parte, în intervalele de timp dintre impulsuri, când dioda este blocată, condensatorul se descarcă dând naștere unui curent i_3 ce trece prin căști în același sens cu i_1 (fig. 3.10, a). Astfel, prin căștile audio trece un curent de frecvență sonoră, ale cărui oscilații au forma aproape identică cu cea a semnalului de frecvență joasă transmis de emițător (fig. 3.10, c). Întrucât în căștile audio sunetul provine de la vibrațiile membranelor care oscilează cu frecvența curentului ce trece prin bobinele lor, pulsațiile mici rămase după filtru practic nu influențează asupra auzului.

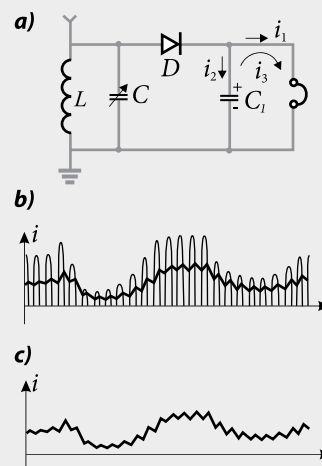


Fig. 3.10

Pentru a mări câmpul de observație a stației radar, antena ei se rotește atât în plan orizontal, cât și în cel vertical. Raza de acțiune a stațiilor radar este de ordinul sutelor de kilometri.

Odată cu perfecționarea dispozitivelor radar, aria de utilizare a lor devine tot mai variată. Cu ajutorul radarelor moderne se poate determina viteza, dimensiunile și forma obiectelor. Radarul este folosit în navigație la stabilirea poziției și vitezei navelor maritime și aeronavelor, în aeroporturi la dirijarea decolării și aterizării avioanelor în condiții de vizibilitate redusă, în securitatea rutieră la verificarea vitezei automobilelor. Navele maritime și aeronavele, de asemenea, sunt înzestrate cu dispozitive radar pentru asigurarea securității de navigație.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care sunt tipurile de comunicații radio? Ce reprezintă radiotelegrafia?
2. În ce constă procesul de modulare a semnalelor și care este deosebirea dintre modulările AM și FM?
3. Ce se numește demodulare și cum se realizează acest proces?
4. Ce se numește radiolocație și ce reprezintă radarul?
5. Cum se determină distanța până la un obiect cu ajutorul radarului?
6. Unde sunt folosite radarele? Ce reprezintă radioastronomia?

3.6. EVOLUȚIA CONCEPȚIILOR DESPRE NATURA LUMINII

Primele concepții despre natura luminii au apărut în Antichitate. În secolul VI î.Hr., Pitagora și discipolii săi considerau că din ochii omului pornește o emanație invizibilă care „pipăie” obiectul cercetat, astfel acesta fiind văzut. Democrit (sec. IV î.Hr.) însă considera că senzația vizuală este determinată de acțiunea atomilor emiși de corpurile luminoase care nimeresc pe retina ochiului. Aristotel, în sec. IV î.Hr., susținea că lumina reprezintă niște raze, numite „raze vizuale”, care ies din ochi. Abia spre sfârșitul sec. al XVII-lea s-au conturat două concepții referitoare la natura luminii, determinate, în mare măsură, de realizările în studiul legilor mecanicii: **corpulară**, elaborată de către Newton, și **ondulatorie**, formulată de către fizicianul olandez C. Huygens (1629–1695).

Concepția corpulară are la bază proprietatea de propagare rectilinie a luminii în mediile omogene, stabilită experimental. Potrivit acesteia, **lumina reprezintă un flux de particule (corpusculi de**

Radarele se folosesc pe larg și în meteorologie. Cu ajutorul lor se obțin informații atât despre poziția maselor de nori, cât și despre viteza acestora, ceea ce este foarte important pentru precizarea prognozelor meteo.

Un capitol apartine în dezvoltarea radiolocației îl constituie extinderea în astronomie. **Radioastronomia** studiază corpurile cerești cu ajutorul undelor radio și milimetrice emise de acestea, folosind receptori de tip radar. Astfel, au fost localizate corpuri cerești aflate la distanțe inaccesibile pentru telescoapele optice. Instalațiile moderne folosite în acest scop sunt numite **radiotelescoape**. Informațiile obținute cu ajutorul lor oferă posibilități excepționale pentru studiul structurii și evoluției Universului.

lumină), emise sau reflectate de corpuri care se propagă de-a lungul unor linii drepte cu o viteză enormă conform legilor mecanicii clasice. Se presupunea că există corpusculi de lumină de dimensiuni și mase diferite. Cei mai mari erau atribuiți luminii de culoare roșu-închis, iar cei mai mici – luminii de culoare violetă. Lumina solară era considerată de către Newton un amestec de corpusculi diferiți. La interfața dintre două medii diverse corpusculii se refractau cu atât mai mult, cu cât masa și dimensiunile lor erau mai mici.

Teoria despre natura ondulatorie a luminii a fost emisă de fizicianul olandez Huygens, contemporanul lui Newton, potrivit căruia, **lumina reprezintă un proces ondulatoriu, ce se desfășoară într-un mediu ipotetic elastic, numit eter, care umple tot spațiul și pătrunde în interiorul tuturor corpurilor.** Deși Huygens trata lumina drept o undă luminoasă, nu a observat caracterul de periodicitate a acesteia și nu a ținut seama de *lungimea de undă*, considerând că lumina se propagă rectiliniu chiar și la trecerea prin orificii foarte mici, adică nu a luat în seamă fenomenul de difracție.

Succesele remarcabile obținute în mecanică au determinat conținutul mecanicist al celor două concepții asupra naturii luminii. Deși ambele teorii erau contradictorii, niciuna dintre ele nu o excludea pe cealaltă și, doar datorită autorității enorme a lui Newton în lumea științifică, s-a dat prioritate teoriei corpusculare, care a persistat pe parcursul secolului XVIII.

La începutul secolului al XIX-lea s-a intensificat disputa referitoare la concepțiile corpusculară și ondulatorie. Cercetările efectuate de Th. Young (1773–1829) și A. Fresnel (1788–1827) au exclus definitiv concepția corpusculară, punând bazele **opticii ondulatorii**.

În a doua jumătate a secolului al XIX-lea, ilustrul fizician englez James Clerk Maxwell a demonstrat teoretic existența undelor electromagnetice și a formulat o concluzie foarte importantă:

Lumina are natură electromagnetică, adică se propagă în spațiu sub forma de unde electromagnetice.

Conform teoriei electromagnetice, undele de lumină sunt unde electromagnetice cu lungimi de undă (frecvențe) cuprinse într-un domeniu foarte îngust – de la $7,8 \cdot 10^{-7}$ m ($4 \cdot 10^{14}$ Hz) pentru lumina roșie până la $3,9 \cdot 10^{-7}$ m ($7,7 \cdot 10^{14}$ Hz) pentru lumina violetă –, numit domeniu **vizibil**. Într-o accepție mai vastă optica studiază și radiațiile electromagnetice cu lungimi de undă (frecvențe) învecinate domeniului vizibil. Radiațiile cuprinse aproximativ între $7,8 \cdot 10^{-7}$ m ($4 \cdot 10^{14}$ Hz) și 10^{-3} m ($3 \cdot 10^{11}$ Hz) constituie domeniul **infraroșu**, iar între $3,9 \cdot 10^{-7}$ m ($7,7 \cdot 10^{14}$ Hz) și $6 \cdot 10^{-10}$ m ($5 \cdot 10^{17}$ Hz) – domeniul **ultraviolet**.

Teoria electromagnetică a luminii, elaborată de Maxwell, a fost confirmată experimental de fizicianul german H. Hertz în anii 1887–1888, care a demonstrat existența undelor electromagnetice. De asemenea, au fost confirmate și alte concluzii, ce rezultă din teoria lui Maxwell. De exemplu, fizicianul rus Piotr Lebedev în anul 1899 a demonstrat experimental existența presiunii exercitate de lumină asupra corpurilor pe care cade.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce concepții aveau grecii antici despre natura luminii?
2. Ce reprezintă lumina conform concepției lui Newton?
3. Cum este tratată lumina după concepția ondulatorie a lui Huygens?
4. Ce concluzie a formulat Maxwell despre natura luminii?
5. Care sunt intervalele lungimilor de undă și ale frecvențelor în domeniile vizibil, infraroșu și ultraviolet?
6. Ce experimente au confirmat teoria electromagnetică a lui Maxwell?

3.7. INTERFERENȚA LUMINII

Să ne amintim

La propagarea luminii sub formă de unde electromagnetice, în anumite condiții, la suprapunerea lor se produc fenomene specifice mișcării ondulatorii, asemenea interferenței și difracției undelor elastice (studiate în clasa a X-a).

Să analizăm fenomenul de interferență a luminii, aducându-ne aminte, mai întâi, condițiile în care se produce acesta în cazul undelor mecanice.

Undele caracterizate de aceeași frecvență și diferența de fază constantă în timp sunt numite unde coerente.

La suprapunerea undelor coerente, energia lor se redistribuie, rezultând formarea unor maxime și minime ale amplitudinii undelor. Dacă diferența de drum Δx parcursă de cele două unde până la suprapunerea lor este un număr par de semilungimi de undă λ :

$$\Delta x = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.10)$$

unde $m = 0, 1, 2, \dots$, atunci în punctul de suprapunere undele sunt în fază și se obține maxim de interferență, iar dacă

$$\Delta x = \pm (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.11)$$

undele sunt în opoziție de fază și avem minim de interferență. Numărul întreg m este ordinul maximului sau minimului de interferență.

a. Coerența undelor luminoase. Condițiile de observare a interferenței luminii

Datorită frecvențelor joase ale undelor mecanice, întotdeauna se pot construi două surse identice de unde, condiția de coerență a lor fiind realizată relativ simplu. Satisfacerea aceleiași condiții în cazul undelor de lumină este mult mai complicată.

Pentru a înțelege cum se obțin undele coerente de lumină, vom analiza procesul de emisie a ei. Sursele de lumină, chiar și punctiforme, sunt constituite dintr-un număr foarte mare de atomi. Unii din ei, primind energie din exterior, au surplus de energie. Starea respectivă a atomului este numită **excitată** și este nestabilă. La un moment el emite o undă specifică, numită **tren de unde**. Procesul de emisie a luminii, în urma căruia atomul se transferă în starea cu energie minimă, numită **stare fundamentală**, durează aproximativ 10^{-8} s. Ulterior alt atom excitat emite alt tren de unde, dar cu altă fază ș.a.m.d. Atomii din starea fundamentală, primind energie, de exemplu de la o sursă de curent electric, se excită din nou și reiau procesul de emisie a undelor luminoase. Într-un punct oarecare al mediului fazele undelor luminoase provenite de la diferiți atomi sunt diverse. Aceeași proprietate vor poseda și undele sosite în punctul dat de la altă sursă. Atunci diferența de fază a undelor se va modifica continuu, deci undele nu vor fi coerente. Astfel, se explică imposibilitatea obținerii fenomenului de interferență de la două surse de lumină, fie chiar și identice. Din cele expuse rezultă:

undele de lumină pot fi coerente numai dacă provin de la aceiași atomi ce aparțin unei singure surse.

Pentru a realiza această condiție, trenurile de unde, provenite de la un grup de atomi, se divizează în două fascicule, care, parcurgând drumuri diferite până la un punct oarecare, se suprapun, fiind caracterizate de o anumită diferență de fază. În alt moment, când în punctul de suprapunere ajung fasciculele obținute prin divizarea altor trenuri de unde, fazele lor vor fi altele, însă diferența de fază nu se modifică, deoarece ea depinde de valoarea diferenței de drum, care rămâne aceeași. Astfel, se poate menține o diferență de fază constantă în timp.

Pentru aceasta însă trebuie realizată încă o condiție: timpul, numit **timp de coerență** τ_c , în care trenul de unde parcurge diferența de drum, trebuie să fie mai mic decât durată de emisie a acestuia, adică $\tau_c \leq 10^{-8}$ s. În caz contrar, în punctul cercetat se vor suprapune unde ce aparțin diferitor trenuri de unde și diferența de fază nu va mai fi constantă în timp. Deși timpul de coerență este foarte mic, această condiție se realizează datorită vitezei foarte mari de propagare a luminii și diferențelor de drum, de regulă, mici. În timpul de coerență τ_c trenul de unde se propagă la o distanță $l_c \approx c \cdot \tau_c \approx 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} \approx 3$ m, numită **distanță de coerență**. Rezultă că interferența undelor luminoase se realizează atunci când diferența lor de drum este mai mică decât distanța de coerență.

Condițiile (3.10) și (3.11) de formare a maximelor și, respectiv, a minimelor de interferență a undelor mecanice sunt valabile și în cazul undelor de lumină. Viteza luminii într-un mediu este de n ori mai mică decât în vid (n este indicele de refracție al mediului). Ca rezultat, în timpul în care lumina parcurge într-un mediu distanța x , în vid ea parcurge o distanță de n ori mai mare.

Produsul dintre distanța x parcursă de unda luminoasă printr-un mediu transparent (*drumul geometric*) și indicele de refracție n al acestuia se numește *drum optic*:

$$L = nx.$$

Se observă că în vid, unde $n = 1$, drumul optic coincide cu cel geometric. În medii transparente, condițiile de formare a maximelor și minimelor de interferență a undelor de lumină la fel sunt determinate de relațiile (3.10) și (3.11), însă **diferența de drum Δx se înlocuiește cu diferența de drum optic Δ** . Așadar, condiția de formare a maximelor de interferență a luminii este:

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.12)$$

iar a minimelor:

$$\Delta = \pm (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (3.13)$$

În aceste expresii, numărul întreg m este numit **ordin** al maximelor sau minimelor de interferență, λ este lungimea de undă a luminii utilizate, iar diferența de drum optic se calculează din relația:

$$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 x_2 - n_1 x_1. \quad (3.14)$$

Despre două medii cu indicii de refracție n_1 și $n_2 > n_1$, se spune că primul este *mai puțin dens din punct de vedere optic*, iar al doilea – *mai dens din punct de vedere optic*.

Fenomenul de interferență a luminii a fost observat încă în timpul lui Newton, însă explicația corectă a acestuia a făcut-o Thomas Young (1773–1829) în anul 1802. Înțelegerea mecanismului de formare a undelor coerente a permis construirea mai multor dispozitive interferențiale, principalele dintre care vor fi descrise în continuare.

b.* Dispozitivul lui Young

Schema instalației, folosită de Young pentru obținerea undelor de lumină coerente și a interferenței lor, este reprezentată în *figura 3.11, a*. Un flux puternic de lumină, provenit de la sursa S , nimereste pe un filtru F , care permite trecerea luminii de o anumită frecvență, adică *monocromatică*, și ajunge la ecranul E_1 , prevăzut cu o fantă de dimensiuni mici S . De la sursa S se propagă unde sferice, frontul de undă al cărora ajunge la ecranul E_2 , prevăzut cu două fante S_1 și S_2 de dimensiuni cât mai mici, dispuse la distanță mică una de alta și simetric față de fanta S . Fantele S_1 și S_2 sunt și ele surse de unde secundare, dar de aceeași frecvență și fază, adică coerente. Undele coerente de la sursele S_1 și S_2 se propagă mai departe și în punctele de suprapunere se vor obține maxime sau minime de interferență, care se pot vedea pe ecranul E_3 amplasat paralel cu ecranul E_2 . Câmpul de interferență reprezintă un șir de franje alternativ luminoase și întunecate, cele luminoase având aceeași culoare ca lumina monocromatică utilizată (*fig. 1, planșa color, p. 162*). Câmpul de interferență se remarcă în orice regiune a spațiului de după ecranul E_2 unde se suprapun undele coerente. De aceea se spune că are loc *interferența cu franje nelocalizate în spațiu*.

Pentru determinarea poziției franjelor luminoase și întunecate de pe ecranul E_3 , vom analiza o schemă simplificată a instalației lui Young, prezentată în *figura 3.11, b*. La distanța $D \gg d$ se plasează un ecran, mijlocul cărui O se află pe aceeași dreaptă cu mijlocul O' al distanței d dintre sursele de lumină. Astfel, tabloul de interferență se va obține simetric de o parte și de alta a punctului O , care coincide cu originea axei Oy de-a lungul ecranului paralel cu planul surselor. În *figura 3.11, b* este reprezentată și dependența intensității luminii (energia luminoasă) I pe ecran de distanța y de la centrul lui.

Rezultatul interferenței în punctul $P(P')$ depinde de diferența de drum $\Delta = L_2 - L_1 = S_2M$ (*fig. 3.11, b*). Din ΔS_1MS_2 și $\Delta O'OP$ avem, respectiv, $\sin \alpha = \Delta/d$ și $\text{tg} \alpha = y_m/D$, unde y_m este coordonata punctului P . Întrucât $D \gg d$, unghiul α este mic și $\sin \alpha \approx \text{tg} \alpha$. Rezultă că $\frac{\Delta}{d} = \frac{y_m}{D}$, de unde:

$$\Delta = \frac{y_m d}{D} \text{ sau } y_m = \frac{D}{d} \Delta. \quad (3.15)$$

Dacă în punctul $P(P')$ se realizează condiția unui maxim de interferență, atunci substituind (3.12) în (3.15), se obține valoarea coordonatei lui:

$$y_m^{\max} = \pm \frac{mD\lambda}{d}, \quad (3.16)$$

iar dacă se satisface condiția unui minim, atunci din (3.13) și (3.15) avem:

$$y_m^{\min} = \pm (2m+1) \frac{D\lambda}{2d}. \quad (3.17)$$

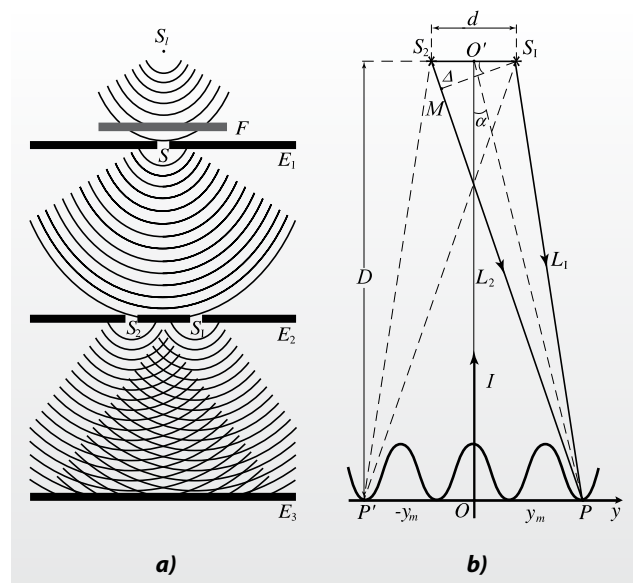


Fig. 3.11

Din (3.16) și (3.17) se observă că pentru $m = 0$ se formează un maxim în punctul O , numit **maxim central**, și două minime, dispuse simetric de o parte și de alta al acestuia. Pentru $m = 1$ se formează două maxime, numite **maxime de ordinul 1** și două minime simetrice față de același punct, pentru $m = 2$ – două **maxime de ordinul 2** ș.a.m.d. Aceste maxime și minime reprezintă **franțele de interferență**, respectiv, luminoase și întunecate (vezi *fig. 1*, planșa color, p. 162).

Mărimea (i) egală cu distanța dintre două franje luminoase sau întunecate consecutive se numește **interfranță:**

$$i = y_{m+1}^{\max} - y_m^{\max} = \frac{D\lambda}{d}. \quad (3.18)$$

Conform acestei relații, interfranja nu depinde de ordinul maximelor și pentru o anumită lungime de undă dată ea este cu atât mai mare, cu cât distanța d dintre sursele S_1 și S_2 este mai mică, iar distanța D mai mare. Faptul că i nu depinde de m înseamnă că franjele sunt echidistante (*fig. 1*, planșa color, p. 162).

Cunoașterea valorii interfranței permite determinarea lungimii de undă a luminii. Din (3.18) avem:

$$\lambda = \frac{d}{D} i. \quad (3.19)$$

Cu ajutorul dispozitivului lui Young se poate studia și interferența luminii albe, adică compuse (pentru aceasta se înlătură filtrul de lumină F (*fig. 3.11, a*)). Deoarece coordonata maximelor (3.16) este direct proporțională cu lungimea de undă, maximele ce corespund diferitor radiații monocromatice nu se vor suprapune, ci vor fi dispuse unul lângă altul în ordinea crescătoare a lungimilor de undă. Franjele luminoase din tabloul de interferență, cu excepția celei centrale, vor apărea colorate, sub formă de **spectre de interferență**. Franja centrală se obține pentru $m = 0$, într-un loc în care se compun toate radiațiile componente ale luminii albe și, ca rezultat, se obține, de asemenea, lumină albă. Culorile spectrului de interferență sunt dispuse în ordinea crescătoare a lungimilor de undă, de la violet spre roșu. La creșterea ordi-

nului maximelor culorile corespunzătoare diferitor lungimi de undă se suprapun.

c.* Lama cu fețe plan-paralele

Fenomenul de interferență a luminii apare și la reflexia și refracția parțială a razelor de lumină incidente pe straturi subțiri transparente. În urma reflexiei, pe ambele suprafețe ale stratului, se formează unde provenite de la aceeași sursă, adică coerente, care interferează. Asemenea situații se realizează atât în straturi de grosime constantă, cât și variabilă.

Se consideră o lamă transparentă subțire cu suprafețe plan-paralele de grosime d și indice de refracție n (*fig. 3.12, a*). O undă plană de lumină monocromatică, reprezentată prin raza I incidentă pe fața superioară sub un unghi i , parțial se reflectă (raza $1'$) și se refractă. Raza refractată ajunge la fața inferioară, unde iarăși parțial se refractă (raza $1''$) și se reflectă ș.a.m.d. În urma reflexiilor și refracțiilor repetate pe cele două suprafețe ale lamei se obțin razele paralele $1', 2'$, ce se propagă de la fața superioară, și $1'', 2''$ – de la cea inferioară. Alte raze, obținute în urma reflexiilor și refracțiilor repetate, vor avea o intensitate mult mai mică din cauza pierderilor și pot fi neglijate. Chiar și razele $1'', 2''$ sunt de intensitate mult mai redusă decât $1', 2'$ și se observă numai pentru grosimi foarte mici ale lamei. Razele menționate sunt coerente, deoarece provin de la aceeași sursă, parcurg distanțe diferite și posedă diferență de drum optic. Cu alte cuvinte, ele întrunesc condițiile necesare pentru interferență, dar tabloul respectiv nu se observă, întrucât razele sunt paralele. Acesta însă poate fi localizat cu ajutorul unei lentile convergente, amplasând ecranul în planul focal al lentilei (*fig. 3.12, a*). În asemenea situații are loc **interferența cu franje localizate în spațiu**.

Rezultatul interferenței într-un punct oarecare al ecranului depinde de valoarea diferenței de drum optic al razelor care se suprapun. Vom calcula diferența de drum optic într-un caz simplu, când unda de lumină este incidentă normal pe suprafața lamei. Din *figura 3.12, b* rezultă că

$$\Delta = (AB + BA) \cdot n - \left(-\frac{\lambda}{2}\right) = 2dn + \frac{\lambda}{2}. \quad (3.20)$$

Termenul $\lambda/2$ este introdus datorită reflexiei razei I' de la un mediu mai dens din punct de vedere optic. În acest caz raza reflectată este în opoziție de fază cu cea incidentă, ceea ce corespunde unei micșorări a drumului optic al acesteia cu o semilungime de undă.

Dacă lumina este incidentă pe lama subțire sub un unghi i (fig. 3.12, a), atunci pentru diferența de drum optic se poate obține relația

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}, \quad (3.21)$$

care pentru $i = 0$ trece în (3.20).

Astfel, pe ecranul E (fig. 3.12, a) se obțin franje luminoase când se realizează condiția:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (3.22)$$

iar franje întunecate când:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \pm(2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3.23)$$

Întrucât pentru fiecare unghi de incidență, adică pentru o anumită înclinare a razelor incidente, se obține propriul tablou de interferență, franjele acestuia sunt numite **franje de egală înclinare**.

Dacă lama cu fețe plan-paralele este iluminată cu lumină albă (compusă dintr-o serie de lungimi de undă din întreg diapazonul vizibil), atunci pentru un anumit unghi de incidență diferența de drum optic (3.21) îndeplinește condiția de maxim (3.22) numai pentru o singură valoare a lungimii de undă. Cu alte cuvinte, pentru observator lama pare de o anumită culoare, iar dacă se modifică unghiul de incidență, condiția de maxim se realizează pentru altă valoare a lungimii de undă și lama pare colorată altfel.

d.* Inelele lui Newton

Primele cercetări experimentale ale interferenței luminii au fost realizate de către Newton folosind dispozitivul, schema căruia este prezentată în figura 3.13. El este alcătuit dintr-o lentilă plan-convexă, așezată cu convexitatea pe suprafața plană a unei lame de sticlă. Dacă raza de curbură R a lentilei este mare, atunci între ea și lamă se formează un strat de aer de grosime variabilă numit și **pană optică** de aer. La iluminarea dispozitivului cu un flux de raze paralele de lumină monocromatică, incidente normal pe suprafața plană a lentilei, interferența se obține la suprapunerea razelor reflectate pe suprafețele de separație superioară și inferioară ale stratului de aer de grosime variabilă cu sticla. Deoarece punctele, cărora le corespunde aceeași grosime a penei optice de aer, sunt situate pe cercuri concentrice cu centrul în punctul de contact C al lentilei cu lama de sticlă (fig. 3.13), franjele luminoase și întunecate au forma unor inele, numite **inelele lui Newton**.

Razele inelelor lui Newton obținute în lumina reflectată se determină ușor din figura 3.13. Presupunem că inelul cu numărul m se formează în

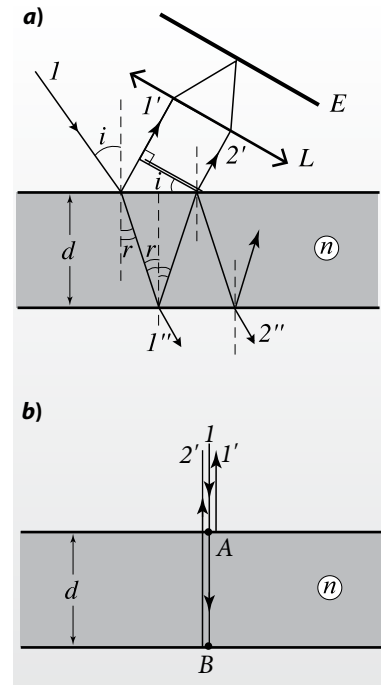


Fig. 3.12

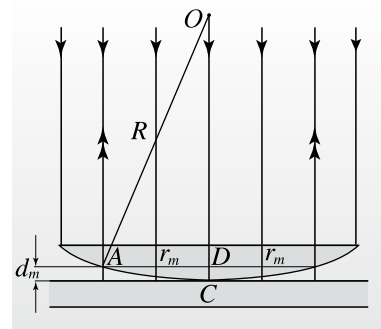


Fig. 3.13

punctele aflate la distanța r_m de punctul C, unde grosimea penei de aer este $d_m \ll R$. Din triunghiul dreptunghic ODA avem:

$$r_m^2 = R^2 - (R - d_m)^2 = 2Rd_m - d_m^2 \approx 2Rd_m,$$

de unde

$$r_m = \sqrt{2Rd_m}. \quad (3.24)$$

Diferența de drum optic în punctele unde grosimea penei de aer este d_m are tot forma (3.20), însă se consideră $n \approx 1$ (pentru aer).

Dacă această diferență de drum constituie un număr par de semilungimi de undă, adică:

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2},$$

atunci inelul este luminos. Dacă însă se realizează condiția de minim

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

– inelul este întunecat. Determinând din aceste condiții grosimea penei de aer d_m , pentru raza unui inel luminos, din (3.24) avem:

$$r_m^{\max} = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) R \lambda}, \quad (3.25)$$

iar pentru unul întunecat:

$$r_m^{\min} = \sqrt{m R \lambda}. \quad (3.26)$$

Se observă că raza primului inel luminos este $r_1^{\max} = \sqrt{R\lambda/2}$, în centrul inelelor formându-se o pată întunecată. Totodată, din aceste relații rezultă că la creșterea numărului m , razele inelelor vecine se măresc lent, adică interfranja se micșorează.

Aceste particularități se observă și în figura II (planșa color, p. 162). Deoarece $r_m \sim \sqrt{\lambda}$, inelele lui Newton în lumină roșie (fig. II, b) au razele mai mari decât cele în lumină verde (fig. II, a). Dacă însă instalația este iluminată cu lumină albă, inelele au o structură spectrală: partea interioară a fiecărui inel este violetă, iar cea exterioară – roșie. Imaginea observată are o structură complexă cauzată de suprapunerea spectrelor de ordine diferite.

e. Aplicații ale interferenței luminii

Fenomenul de interferență a luminii este larg răspândit datorită diferitor aplicații atât în tehnică, cât și în știință. Interferența se utilizează în măsurători de mare precizie ale diverselor mărimi fizice: lungimi, grosimi, alungiri (fenomene de dilatare), indici de refracție ș.a. În acest scop au fost construite dispozitive, care, având la bază fenomenul de interferență a undelor, au fost numite **interferometre**. Metodele de măsurare elaborate constituie o ramură aparte, denumită **interferometrie**. Cu ajutorul interferometrului, care îi poartă numele, Michelson a determinat lungimea metrului-etalon, exprimată în lungimi de undă a radiației roșii a cadmiului. Interferometrele sunt folosite pe larg în tehnică la controlul optic al calității prelucrării suprafețelor, la măsurarea exactă a unghiurilor, la determinarea coeficienților de dilatație, la păstrarea diferitor etaloane ale dimensiunilor, controlate prin metode interferometrice, la construcția aparatelor de înaltă precizie etc. În cercetările științifice interferometria este utilizată la studiul structurii atomilor, a nucleelor atomice, la analiza diferitor procese fizice din interiorul corpurilor.

Una dintre cele mai importante aplicații ale interferenței în lame subțiri o constituie așa-numitele **straturi antireflex**. Este cunoscut că la trecerea luminii prin ocularele și obiectivele dispozitivelor optice, care, deseori, sunt alcătuite din mai multe lentile, lumina parțial se reflectă, conducând la pierderi de intensitate. Pentru evitarea acestor pierderi, pe suprafețele lentilelor se aplică un strat subțire transparent, de grosime și indice de refracție astfel alese, încât razele reflectate pe ambele fețe ale stratului să se anuleze prin interferență, adică să fie în opoziție de fază. Întrucât în urma interferenței energia luminoasă se redistribuie în spațiu, această anulare a razelor reflectate conduce la creșterea intensității luminoase a razelor care pătrund în sistemul optic. Deoarece ochiul uman are o sensibilitate mai mare de percepere a radiațiilor din regiunea verde-galben a spectrului, parametrii straturilor antireflex sunt aleși astfel ca prin ele să treacă anume această radiație. Atunci în lumina reflectată vor predomină radiațiile din regiunile roșie și albastră ale spectrului, de aceea straturile respective par colorate într-o nuanță albastră-purpurie. Din acest motiv, asemenea straturi antireflex se mai numesc **optică albastră**.

Probleme rezolvate

1 Un tablou de interferență este obținut cu ajutorul unui dispozitiv Young, în care se folosește o radiație monocromatică cu lungimea de undă $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$. În calea uneia din raze, perpendicular ei, se așază o lamă de sticlă de grosime $d = 6 \mu\text{m}$ și indice de refracție $n = 1,5$. Determinați cu câte franje se deplasează tabloul de interferență după introducerea lamei de sticlă.

Se dă: $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$, $d = 6 \mu\text{m}$, $n = 1,5$	SI: $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	Rezolvare: Presupunem că în lipsa lamei de sticlă, într-un punct oarecare P al ecranului se obține un maxim de ordinul m_1 . Condiția de formare a acestuia, conform relației (3.12), este
$\Delta m - ?$		

$$\Delta_1 = m_1 \lambda,$$

unde $\Delta_1 = l_2 - l_1$ este diferența de drum optic, care, în acest caz, coincide cu cea geometrică, iar l_2 și l_1 sunt, respectiv, distanțele de la sursele S_2 și S_1 până la punctul de observație P (fig. 3.14). Introducerea lamei de sticlă conduce la creșterea diferenței de drum optic cu $d(n - 1)$. Într-adevăr:

$$\Delta_2 = [(l_2 - d) + nd] - l_1 = l_2 - l_1 + (n - 1)d = \Delta_1 + (n - 1)d.$$

Întrucât diferența de drum optic s-a mărit în punctul P , poate fi observat un maxim de ordin $m_2 > m_1$, dacă se realizează condiția:

$$\Delta_2 = m_2 \lambda.$$

Făcând diferența relațiilor pentru Δ_2 și Δ_1 , avem:

$$\Delta m = \frac{(n - 1)d}{\lambda} = 5,$$

adică tabloul de interferență s-a deplasat cu 5 franje.

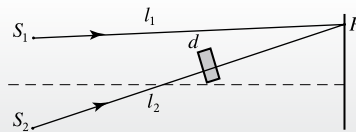


Fig. 3.14

2 Razele a două inele Newton luminoase, observate în tabloul de interferență, sunt, respectiv, egale cu 2 mm și 2,4 mm. Care este raza de curbură a lentilei plan-convexe folosită în experiență, dacă inelele menționate se observă în lumină reflectată ($\lambda = 0,5 \mu\text{m}$), iar între ele mai sunt încă 2 inele luminoase?

Se dă: $r_m = 2 \text{ mm}$, $r_{m+3} = 2,4 \text{ mm}$, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$	SI: $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$	Rezolvare: Întrucât între inelele luminoase de raze măsurate se află încă 2 inele de același tip, primul fiind de ordinul m , rezultă că celălalt este de ordinul $m + 3$. Conform relației (3.25), pentru razele inelelor luminoase măsurate avem:
$R - ?$		

$$r_m^2 = \left(m - \frac{1}{2}\right) R \lambda, \quad r_{m+3}^2 = \left(m + 3 - \frac{1}{2}\right) R \lambda.$$

Făcând diferența acestor relații, obținem:

$$r_{m+3}^2 - r_m^2 = 3R\lambda,$$

de unde

$$R = \frac{r_{m+3}^2 - r_m^2}{3\lambda}.$$

Introducând valorile numerice, pentru raza de curbură a lentilei se obține $R \approx 1,2 \text{ m}$.

Verificați-vă cunoștințele

- Care sunt particularitățile undelor coerente de lumină?
- Ce reprezintă timpul de coerență? Dar distanța de coerență?
- Ce se numește drum optic? Ce reprezintă diferența de drum optic?
- Care sunt condițiile de formare a maximelor și minimele de interferență a undelor luminoase și prin ce se deosebesc ele de cazul celor mecanice?
- * Care este construcția dispozitivului lui Young? Describeți tabloul de interferență obținut cu acest dispozitiv.
- * Ce se numește interferență și cum poate fi determinată cu ajutorul ei lungimea de undă a luminii?
- * Care sunt particularitățile tabloului de interferență obținut la compunerea undelor de lumină albă (compusă)?
- * Care este diferența de drum optic a razelor reflectate pe lamă? De ce franjele tabloului de interferență în acest caz sunt numite de egală înclinare?
- * Cum se explică culorile peliculelor subțiri?
- * Cum se explică formarea inelelor lui Newton?
- Unde se aplică interferența?
- * Pentru determinarea lungimii de undă a unei surse de lumină monocromatică, aceasta a fost folosită într-un dispozitiv Young, care avea distanța dintre fante de 1 mm, iar de la fante până la ecran – de 2 m. Care este lungimea de undă, dacă distanța dintre două maxime consecutive este de 1,2 mm?
- * O lentilă plan-convexă este așezată cu partea convexă pe o placă de sticlă. Sistemul este iluminat cu o radiație monocromatică de lungime de undă $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ incidentă normal. Determinați grosimea stratului de aer în punctul unde în lumina reflectată se observă al patrulea minim de interferență.

3.8. DIFRAȚIA LUMINII

a. Studiul calitativ al difracției luminii

Să ne amintim

Este cunoscut (din clasa a X-a) că fenomenul de difracție a undelor mecanice reprezintă pătrunderea lor în regiunea de umbră a diferitor obstacole întâlnite în calea de propagare. Vom descrie succint esența acestui fenomen în cazul undelor de pe suprafața apei.

Fenomenul de difracție se observă atunci când dimensiunile obstacolelor aflate în calea propagării undelor sunt comparabile sau mai mici decât lungimea de undă.

Propagarea undelor în apropierea obstacolelor se explică în baza principiului Huygens:

Orice punct al mediului până la care a ajuns unda la momentul dat devine sursă de unde sferice secundare, iar înfășurătoarea lor geometrică la un moment ulterior reprezintă noul front de undă.

În figura 3.15 este ilustrat fenomenul de difracție realizat de undele de pe suprafața apei dintr-o cuvă. Se observă că în cazul dimensiunilor fantei comparabile cu lungimea de undă, difracția începe chiar în imediata apropiere a fantei (fig. 3.15, a). Pentru obstacole de dimensiuni mari (fig. 3.15, b) efectele fenomenului de difracție se pot observa, dar numai la distanțe mari de la acestea. Cu cât obstacolul este mai departe de la punctul analizat, cu atât denaturarea frontului de undă devine mai evidentă.

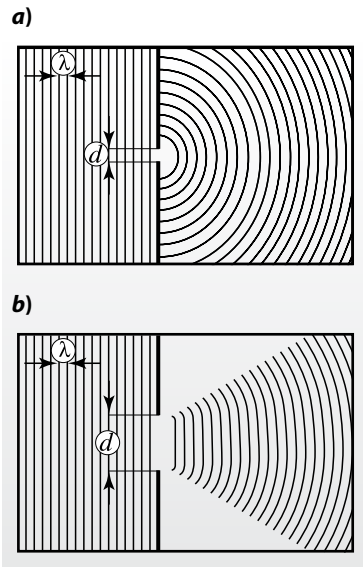


Fig. 3.15

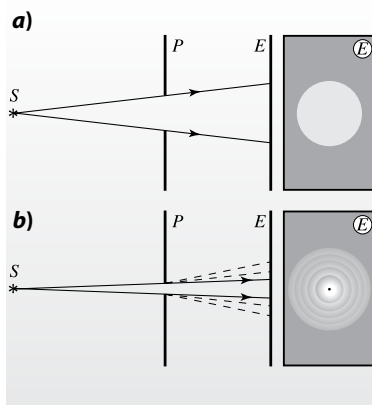


Fig. 3.16

Dacă lumina reprezintă un proces ondulatoriu, atunci trebuie să existe și fenomenul de difracție a ei, iar condițiile de observare a acestuia trebuie să fie similare cu cele din cazul undelor mecanice. Cu alte cuvinte, pentru observarea difracției luminii în apropierea obstacolului este nevoie ca acesta să fie de dimensiuni comparabile cu lungimea de undă a luminii, adică de ordinul micrometrilor (10^{-6} m).

Să analizăm procesul de propagare a luminii de la o sursă punctiformă când în calea ei este situat un paravan P , prevăzut cu o diafragmă, care limitează o deschidere circulară reglabilă (fig. 3.16). Dacă deschiderea diafragmei este mare, pe ecranul E se observă o pată luminoasă cu un contur distinct, urmată de regiunea de umbră (fig. 3.16, a). Dimensiunile petei luminoase se determină ușor prin metode geometrice, considerând razele de lumină niște linii drepte. Prin analogie cu undele de pe suprafața apei, dacă vom îndepărta ecranul de paravan la o distanță mult mai mare decât diametrul diafragmei, vom remarca o ușoară pătrundere a luminii în regiunea de umbră, adică dispariția conturului distinct al petei luminoase.

Efectul fenomenului de difracție este mai pronunțat în cazul obstacolelor de dimensiuni mult mai mici decât distanța până la ecran. La micșorarea considerabilă a diametrului diafragmei din paravanul P , pe ecranul E se formează o serie de inele alternativ luminoase și întunecate (fig. 3.16, b). Imaginea obținută pe ecran în asemenea situație este numită **tablou de difracție**. Acesta demonstrează că în apropierea obstacolelor lumina nu se propagă rectiliniu, ea poate pătrunde și în regiunea de um-

bră. Tabloul de difracție depinde de forma și dimensiunile obstacolului. Dacă vom varia dimensiunile diafragmei, menținându-le, totodată, comparabile cu lungimea de undă, vom observa că în tabloul de difracție inelele luminoase devin întunecate și, invers, cele întunecate – luminoase. Forma tabloului de difracție întotdeauna o repetă pe cea a obstacolului. Tabloul de difracție se observă uneori și în condiții obișnuite. De exemplu, inelele colorate care se observă în jurul surselor de lumină, privite în condiții de ceață sau prin geamuri aburite, apar din cauza difracției luminii pe particulele foarte mici de apă, care constituie obstacole de dimensiuni comparabile cu lungimea de undă.

Fenomenul difracției luminii a fost observat pentru prima dată de către savantul italian Francesco Grimaldi (1618–1663), însă a fost explicat abia în 1818 de către fizicianul francez A.J. Fresnel (1788–1827). Pentru aceasta, el a completat principiul lui Huygens cu noțiunea despre interferența undelor secundare (numit ulterior principiul Huygens–Fresnel).

Orice punct al mediului până la care ajunge unda luminoasă la momentul dat devine sursă de unde sferice secundare coerente, care apoi interferează, iar rezultatul interferenței reprezintă noul front de undă.

În baza acestui principiu, Fresnel a demonstrat, din punct de vedere teoretic, redistribuirea intensității luminoase sub formă de maxime și minime și propagarea rectilinie a luminii, chiar dacă aceasta este o undă. Astfel, teoria lui Fresnel a constituit cel mai convingător argument la confirmarea naturii ondulatorii a luminii.

b. Difracția luminii de la o fantă. Rețeaua de difracție

Principiul Huygens–Fresnel permite a înțelege cum are loc formarea tabloului de difracție. Admitem că sursa de lumină se află în focarul lentilei convergente L_1 (fig. 3.17). Atunci la paravanul P ajunge frontul unei unde plane, care nimereste pe o fantă îngustă de lățime comparabilă cu lungimea de undă. Conform principiului Huygens–Fresnel, fiecare punct de pe suprafața fantei devine sursă de unde sferice secundare coerente. (În figura 3.17, din infinitatea de puncte ale frontului de undă sunt indicate doar trei.) De la acestea se propagă unde coerente de-a lungul unor raze situate sub diferite unghiuri $\varphi \leq \pi/2$ față de normala la planul fantei.

Evident, de la fiecare punct-sursă de unde secundare, din multitudinea de direcții se va găsi câte o rază, situată sub unul și același unghi: de exemplu, razele (1) sub unghiul $\varphi = 0$ și razele (2) sub un unghi arbitrar φ . Întrucât undele luminoase ce se propagă de la fantă sunt coerente și parcurg distanțe diferite, ele sunt caracterizate de o anumită diferență de drum optic și, în funcție de condiția maximal sau minimal îndeplinită, în punctul de observație se va forma o franjă luminoasă sau întunecată. Deoarece razele cercetate sunt paralele, pentru observarea tabloului de difracție este utilizată lentila L_2 în focarul căreia este așezat ecranul E (fig. 3.17). În figura III (planșa color, p. 162) este reprezentat tabloul de difracție obținut la iluminarea unei fante înguste cu lumină roșie.

Observarea difracției luminii de la o singură fantă este însoțită de dificultăți legate de intensitatea luminoasă destul de redusă a franjelor. S-a constatat că pentru obținerea unui tablou de difracție mai pronunțat, lumina trebuie transmisă printr-un sistem de fante. Într-adevăr, cu cât numărul de fante este mai mare, cu atât mai multă lumină pătrunde prin ele. Totodată, o franjă luminoasă observată pe ecran este rezultatul nu numai al difracției, adică al interferenței undelor sferice secundare, dar și al interferenței undelor ce sosesc în acel punct al ecranului de la diferite fante. Cu alte cuvinte, intensitatea luminoasă a franjei obținute de la o fantă este amplificată de acțiunea celorlalte.

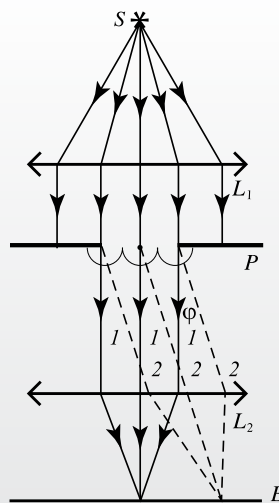


Fig. 3.17

Această metodă de amplificare a intensității luminoase a tabloului de difracție stă la baza dispozitivului numit **rețea de difracție**. Ea este alcătuită dintr-un număr mare de fante înguste paralele, rectilinii, egale, echidistante și foarte apropiate una de alta. Rețelele de difracție sunt confecționate din plăci transparente sau reflectătoare (oglinzi plane). În ambele cazuri pe suprafața materialului sunt trasate un număr N de linii (zgârieturi) echidistante. În prezent se confecționează rețele de difracție, care conțin mai mult de 1 000 de linii (zgârieturi) pe fiecare milimetru de lungime, numărul total N ajungând până la sute de mii. Liniile reprezintă suprafețe cu multe asperități, de aceea împrăștie lumina incidentă pe rețea, iar spațiile dintre ele, rămânând transparente sau reflectătoare, îndeplinesc rolul fanțelor rețelei.

O caracteristică importantă a rețelei de difracție este **constanta rețelei** sau **perioada** ei, care reprezintă suma dintre lățimile unei fante și a unui spațiu opac (fig. 3.18): $d = a + b$, unde a este lățimea unei fante, iar b – a unei zgârieturi. Dacă se cunoaște numărul de trăsături (fante) pe o unitate de lungime l , adică $n = N/l$, atunci pentru perioada rețelei putem scrie:

$$d = \frac{l}{N} = \frac{1}{n}. \quad (3.27)$$

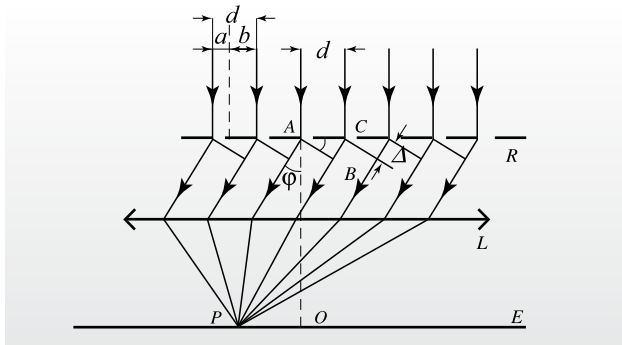


Fig. 3.18

Să cercetăm procesul de formare a tabloului de difracție. Presupunem că pe suprafața unei rețele de difracție cade normal un fascicul de raze paralele de lumină monocromatică, având lungimea de undă λ . După trecerea prin rețea, în urma fenomenului de difracție, lumina se propagă în toate direcțiile posi-

bile, de-a lungul unor raze sub formă de unde coerente, iar interferența lor amplifică intensitatea luminoasă numai pe anumite direcții. Aceste direcții se determină respectându-se condiția că diferența de drum optic dintre undele coerente provenite de la două fante consecutive trebuie să constituie un număr par de semilungimi de undă (condiția maximelor de interferență (3.12)), adică:

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Totodată, din figura 3.18 se observă că diferența de drum optic Δ se exprimă prin constanta rețelei d . Într-adevăr, din triunghiul dreptunghic ABC avem:

$$\Delta = d \sin \varphi$$

și din ultimele două relații obținem:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (3.28)$$

numită **formula rețelei de difracție**. Ea exprimă condiția de obținere a franjelor luminoase (**maximelor principale**) în urma transmiterii luminii printr-o rețea de difracție.

În formula (3.28) unghiul φ este numit **unghi de difracție**, iar $m = 1, 2, 3, \dots$. Pentru $m = 0$ se obține o franjă caracterizată de cea mai mare intensitate luminoasă. Acestei franje i se mai spune **maxim central** sau **maxim de ordinul zero**. Dacă $m \geq 1$, pe ecran se vor observa câte două maxime principale de aceeași intensitate dispuse simetric față de maximul central și numite **maxime de ordinul m** . În figura IV, a și b (planșa color, p. 162) sunt prezentate spectrele obținute cu o rețea de difracție iluminată cu lumină violetă și, respectiv, roșie. După cum se constată din experiențe, odată cu creșterea ordinului maximelor intensitatea lor luminoasă se micșorează, iar mărirea numărului de fante (micșorarea perioadei d) conduce la creșterea distanței dintre franjele luminoase.

Dacă rețeaua de difracție este iluminată cu lumină albă, atunci tabloul de difracție apare colorat, obținându-se câte un spectru pentru fiecare ordin al tabloului (fig. IV, c). Menționăm că în acest caz s-a folosit o rețea de difracție mai performantă decât cea utilizată la obținerea spectrelor din figura IV, a și b .

Problemă rezolvată

Un fascicul de lumină monocromatică de lungime de undă $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ cade normal pe suprafața unei rețele de difracție. Tabloul de difracție este proiectat pe un ecran, situat la distanța $D = 1 \text{ m}$ de la rețea. Se constată că distanța dintre maximele central și principal de ordinul $m = 1$ este $l = 15 \text{ cm}$. Determinați: a) perioada rețelei de difracție; b) numărul total de maxime principale, obținut cu această rețea; c) unghiul de difracție ce corespunde direcției în care se formează ultimul maxim principal.

Se dă:

$\lambda = 0,6 \mu\text{m}$,
 $D = 1 \text{ m}$,
 $m = 1$,
 $l = 15 \text{ cm}$

SI:

$6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

 $0,15 \text{ m}$

Rezolvare:

a) Perioada rețelei de difracție se determină din formula (3.28):

$$d = \frac{m\lambda}{\sin\varphi}$$

Din figura 3.19 se observă că $\text{tg}\varphi = l/D$. Deoarece $D \gg l$, unghiul φ este mic

și $\text{tg}\varphi \approx \sin\varphi$. Atunci pentru perioada rețelei obținem:

$$d = \frac{m\lambda D}{l} = 4 \mu\text{m}.$$

b) Întrucât maximele principale sunt dispuse simetric în stânga și în dreapta de la cel central, rezultă că numărul lor total este:

$$N = 2m_{\text{max}} + 1,$$

unde m_{max} este ordinul ultimului maxim, care poate fi observat cu această rețea. Lumina transmisă de o rețea de difracție se propagă de la aceasta sub unghiuri cuprinse între 0 și $\pm\pi/2$. Atunci din (3.28), când $\sin\varphi = 1$, avem:

$$m_{\text{max}} \leq \frac{d}{\lambda} \approx 6,67.$$

Așa cum ordinul maximelor trebuie să fie un număr întreg, rezultă că $m_{\text{max}} = 6$, iar numărul total de maxime $N = 13$.

c) Unghiul de difracție ce determină direcția în care se formează ultimul maxim se calculează tot din (3.28), dar scrisă pentru această direcție:

$$d \sin\varphi_m = m_{\text{max}}\lambda.$$

Exprimând unghiul φ_m din expresia de mai sus, obținem:

$$\varphi_m = \arcsin\left(\frac{m_{\text{max}}\lambda}{d}\right),$$

din care numeric avem $\varphi_m \approx 64^\circ$.

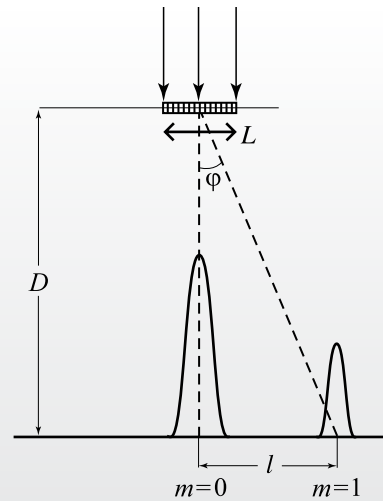


Fig. 3.19

Verificați-vă cunoștințele

1. Care este esența fenomenului de difracție a undelor mecanice?
2. Care trebuie să fie ordinul dimensiunilor obstacolelor întâlnite în calea undelor de lumină pentru a observa fenomenul de difracție? De ce?
3. Ce reprezintă tabloul de difracție a luminii? Explicați modul de formare a lui la difracția pe diferite obstacole.
4. Formulați principiul Huygens-Fresnel. Ce explică acest principiu?
5. Cum se explică, din punct de vedere calitativ, formarea tabloului de difracție pe o fantă îngustă?
6. Ce reprezintă o rețea de difracție? Cu ce este egală perioada ei?
7. Care este formula rețelei de difracție și ce exprimă ea?
8. Caracterizați tabloul de difracție, obținut cu o rețea. Cum se modifică acesta în funcție de valoarea perioadei rețelei de difracție?
9. Lumina cu lungimea de undă $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ cade normal pe o rețea de difracție transparentă. Determinați perioada rețelei și unghiul maxim de difracție, dacă se cunoaște că maximul de ordinul 4 se formează pentru unghiul de difracție de 30° , iar ordinul ultimului maxim este $m_{\text{max}} = 7$.
- 10.* Pe o rețea de difracție cade normal lumină monocromatică cu lungimea de undă $\lambda = 0,41 \mu\text{m}$. Unghiul $\Delta\varphi$ dintre direcțiile spre maximele principale de ordinele 1 și 2 este de $2,35^\circ$. Determinați numărul de fante pe milimetru al rețelei de difracție.

Determinarea lungimii de undă a luminii cu ajutorul rețelei de difracție

<i>Scopul lucrării:</i>	Determinarea limitelor lungimii de undă ale spectrului vizibil.
<i>Aparate și materiale necesare:</i>	Un stativ, o rețea de difracție, un dispozitiv pentru determinarea lungimii de undă a luminii, o sursă de lumină albă.

Considerații teoretice

Dispozitivul folosit în această lucrare de laborator pentru determinarea lungimii de undă a luminii reprezintă o riglă gradată în milimetri, având la unul din capete o ramă, în care se montează rețeaua de difracție. La celălalt capăt se află un ecran, situat perpendicular pe riglă, care se poate deplasa de-a lungul ei. Ecranul are o fantă îngustă la mijloc și este înzestrat cu o scală milimetrică cu zero la centrul fantei.

Privind la sursa de lumină prin rețea și fantă concomitent (fig. 3.20), observatorul va vedea pe ecran de ambele părți ale fantei spectrele colorate de difracție de ordinele 1, 2 ș.a.m.d. În figură este reprezentat schematic modul de formare a maximelor (spectrelor) cu ajutorul acestui dispozitiv. Fiecare maxim reprezintă un spectru, marginile căruia se află la distanțele l_v și l_r de la centrul fantei.

Poziția maximului principal de ordinul $m = 1$ se determină din relația (3.28), în care λ este lungimea de undă a luminii de culoarea cercetată a spectrului, d perioada rețelei de difracție, iar φ unghiul sub care este observat maximul respectiv. Întrucât pentru maximul principal de ordinul 1 unghiul φ este întotdeauna mic ($\varphi < 5^\circ$), atunci $\sin \varphi \approx \text{tg } \varphi = l/L$ (fig. 3.20). Așadar, pentru determinarea lungimii de undă a luminii, obținem relația:

$$\lambda = \frac{ld}{L}, \quad (3.29)$$

unde L este distanța dintre rețeaua de difracție și ecran.

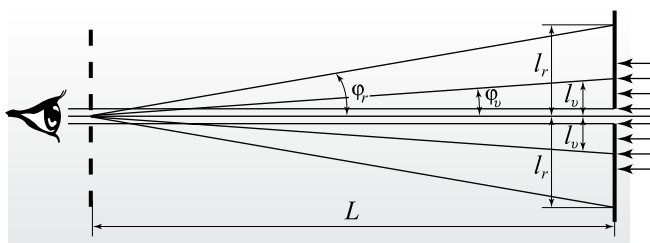


Fig. 3.20

Mod de lucru:

1. Montați rețeaua de difracție în rama dispozitivului și fixați-l de cleștele stativului (fig. 3.21).

2. Privind prin rețeaua de difracție, orientați dispozitivul spre sursa de lumină, astfel încât ea să fie văzută prin fanta îngustă a ecranului. Pe ecran, de o parte și de alta a fantei, veți observa spectrele de difracție de câteva ordine.

3. Citiți de pe scala ecranului, privit prin rețea, pozițiile marginilor roșie l_r și violetă l_v ale spectrului de ordinul 1 de pe ambele părți ale fantei. Determinați valorile medii ale distanțelor l_r și l_v pentru fiecare culoare și introduceți-le în tabelul de mai jos.

4. De pe rigla gradată în milimetri a dispozitivului notați distanța L dintre rețea și ecran, introducând-o, de asemenea, în tabel.

5. Repetați măsurătorile din sarcinile 3 și 4 pentru alte două poziții ale ecranului față de rețeaua de difracție și introduceți rezultatele în același tabel.

Nr.	d (10^{-5} m)	L (m)	l_r (cm)	l_v (cm)	λ_r (10^{-6} m)	λ_v (10^{-6} m)
1						
2						
3						
Valoarea medie						

6. În baza relației (3.29), calculați lungimile de undă λ_r și λ_v , ce constituie limitele spectrului vizibil, apoi valorile lor medii.

7. Estimați erorile absolută și relativă la determinarea lungimii de undă a luminii pentru cele două culori, folosind următoarele relații:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}, \quad \Delta \bar{\lambda} = \varepsilon \cdot \bar{\lambda}.$$

În calcule, pentru Δl și ΔL se va lua eroarea aparatului de măsură.

8. Prezentați rezultatul final sub forma:

$$\lambda_r = (\bar{\lambda}_r \pm \Delta \bar{\lambda}_r) \cdot 10^{-6} \text{ m}; \quad \varepsilon_r = \dots \%,$$

$$\lambda_v = (\bar{\lambda}_v \pm \Delta \bar{\lambda}_v) \cdot 10^{-6} \text{ m}; \quad \varepsilon_v = \dots \%.$$

9. Formulați concluziile referitoare la rezultatele obținute.



Fig. 3.21

3.9.* POLARIZAREA LUMINII

Fenomenele de interferență și de difracție demonstrează foarte clar caracterul ondulatoriu al luminii. Ele au fost explicate fără a utiliza cunoștințele despre caracterul undelor: transversale sau longitudinale. Există însă situații când procesele de propagare a luminii pot fi justificate doar dacă lumina este considerată o undă transversală.

Pentru a înțelege fenomenul de polarizare a luminii, vom analiza mai întâi starea de polarizare a undelor elastice.

Dacă direcția de oscilație a particulelor mediului variază în timp după o anumită lege, atunci unda se numește polarizată.

a. Modelul mecanic al stării de polarizare. Planul de polarizare

Se presupune că o coardă elastică este impusă să oscileze într-un plan numit **plan de oscilație**, adică prin coardă se propagă o undă transversală. Întrucât oscilațiile corzii se produc tot timpul în unul și același plan (planul xOy în figura 3.22), legea de variație a direcției elongației este liniară (dreapta AB), iar unda este numită **plan-polarizată** sau **liniar-polarizată**.

Planul format de direcția de oscilație și cea de propagare a undei este numit plan de polarizare.

Starea de polarizare a undei transversale depinde de natura obstacolelor întâlnite în timpul propagării. Dacă în calea undei este așezată o fantă, planul căreia coincide cu cel de polarizare, atunci unda își păstrează starea de polarizare (fig. 3.23, a). Când planul fantei se rotește, această stare se modifică. Din figură se observă că după trecerea prin fantă, unda se propagă în același plan de polarizare, însă cu cât unghiul φ este mai mare, cu atât amplitudinea ei este mai mică (fig. 3.23, b). Dacă planul fantei este perpendicular pe cel de polarizare ($\varphi = 90^\circ$), fanta reține complet unda incidentă pe ea (fig. 3.23, c).

Situația este total diferită când pe fantă cade o undă longitudinală. Întrucât oscilațiile se produc de-a lungul direcției de propagare, această undă traversează fanta întotdeauna, indiferent de orientarea acesteia. Rezultă:

starea de polarizare este proprie doar undelor transversale.

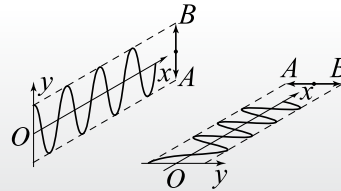


Fig. 3.22

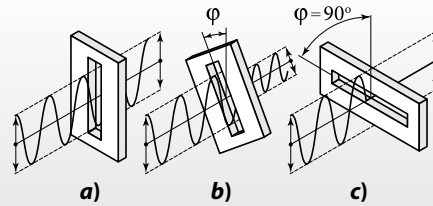


Fig. 3.23

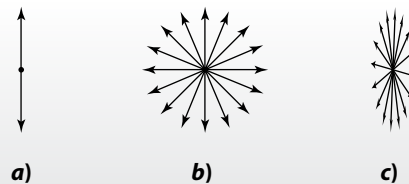


Fig. 3.24

b. Starea de polarizare a luminii. Transversalitatea undelor de lumină

Lumina emisă de un singur atom reprezintă o undă electromagnetică caracterizată de oscilațiile a doi vectori: ale vectorului intensității câmpului electric \vec{E} și ale vectorului inducției câmpului magnetic \vec{B} reciproc perpendiculari. Vectorii \vec{E} și \vec{B} sunt perpendiculari pe direcția de propagare a undei, numită **rază de lumină**. Este evident că în acest caz lumina este **plan-polarizată**, deoarece oscilațiile vectorilor \vec{E} și \vec{B} se produc în aceleași plane, reciproc perpendiculare.

Cercetările experimentale și cele teoretice demonstrează că acțiunea luminii asupra substanței este determinată în mod principal de vibrațiile vectorului \vec{E} , adică de componenta electrică a undei electromagnetice. Anume această componentă produce senzația de lumină asupra ochiului uman și acționează asupra peliculei fotografice. Vectorul intensității câmpului electric \vec{E} deseori mai este numit și **vector luminos**, iar raza de lumină polarizată este reprezentată schematic printr-o curbă descrisă de vârful vectorului \vec{E} pe planul de oscilație. Starea de polarizare a luminii emise de un singur atom este reprezentată în

figura 3.24, a, în care vectorii corespund valorilor de amplitudine ale intensității câmpului electric \vec{E} , iar raza de lumină este perpendiculară pe planul figurii.

Sursele reale de lumină sunt compuse dintr-un număr foarte mare de atomi care emit unde luminoase, în care vectorul \vec{E} se poate afla în orice planuri, adică vibrează haotic. În consecință, oricărei raze de lumină provenite de la sursele reale (naturale) îi corespunde o mulțime de planuri de oscilație orientate cu aceeași probabilitate în toate direcțiile (fig. 3.24, b). Astfel de lumină se numește **lumină naturală**.

Intensitatea radiației fiecărui atom al sursei de lumină este aproximativ aceeași, de aceea în cazul luminii naturale valorile de amplitudine ale vectorului \vec{E} în toate planurile de oscilație sunt practic egale. Uneori însă raza de lumină în anumite planuri de oscilație este caracterizată de valori maxime ale vectorului luminos. În asemenea cazuri se spune că lumina este **parțial polarizată**. În figura 3.24, c este reprezentată o rază de lumină parțial polarizată, în care oscilațiile vectorului luminos au loc preponderent în planul vertical.

Pentru descrierea cantitativă a stării de polarizare a luminii a fost introdusă noțiunea de **grad de polarizare**. Dacă I_{\max} și I_{\min} sunt valorile maximă și minimă ale intensității luminii ce corespund proiecțiilor vectorului luminos \vec{E} pe două direcții reciproce perpendiculare, atunci gradul de polarizare al luminii este:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (3.30)$$

Gradul de polarizare este o mărime adimensională și prezintă valori cuprinse între 0 și 1. În cazul luminii total polarizate $I_{\min} = 0$ și din (3.30) rezultă $P = 1$, iar pentru lumina naturală intensitatea căreia în toate direcțiile este aceeași, adică $I_{\min} = I_{\max}$, avem $P = 0$.

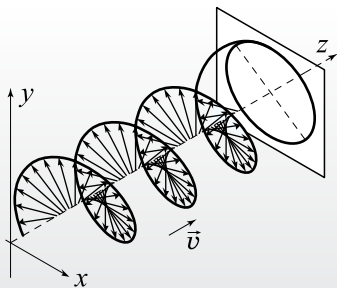


Fig. 3.25

Sunt cunoscute și alte stări de polarizare a luminii. De exemplu, dacă vectorul luminos \vec{E} descrie într-un plan perpendicular pe direcția de propagare o elipsă care se deplasează în timp odată cu unda (fig. 3.25), atunci lumina este **polarizată eliptic**. Evident, în anumite condiții elipsa descrisă de vârful vectorului \vec{E} poate degenera într-un cerc. În aceste cazuri se spune că lumina este **circular polarizată**.

Studierea stării de polarizare a luminii a devenit posibilă abia la începutul secolului al XIX-lea în urma cercetărilor efectuate independent de către fizicienii Th. Young și A.J.Fresnel care au înaintat ideea despre **transversalitatea undelor luminoase**. Existența undelor electromagnetice și transversalitatea lor a fost demonstrată teoretic de Maxwell cu jumătate de secol mai târziu, când deja era confirmat experimental faptul că undele de lumină sunt transversale. Din această cauză transversalitatea undelor electromagnetice a fost pentru Maxwell cel mai important argument în confirmarea justetei teoriei electromagnetice a luminii.

Dispozitivul care permite transformarea luminii naturale în lumină polarizată este numit **polarizator**.

În cazul polarizării liniare aceste dispozitive permit să treacă doar acele vibrații ale vectorului luminos, care se produc într-o singură direcție OO' (fig. 3.26). Acțiunea polarizatorului P este similară cu cea a fantei din figura 3.23. Ochiul uman nu poate deosebi lumina polarizată de cea naturală, observă doar o micșorare a intensității luminii emergente prin polarizator I_p în comparație cu intensitatea luminii naturale I_n incidentă pe polarizator, $I_p < I_n$.

Pentru a stabili starea de polarizare a luminii, se folosește un al doilea dispozitiv de polarizare, A , numit **analizor**, care facilitează trecerea oscilațiilor vectorului luminos numai după o anumită direcție BB' sub un unghi φ cu direcția OO' . Se constată că la rotirea analizorului cu 360° în jurul razei intensitatea luminii emergente prin analizor I_t variază, obținând de câte două ori valori maxime I_{\max} și valori minime I_{\min} , ceea ce permite calcularea gradului de polarizare P (3.30).

În calitate de dispozitive de polarizare sunt folosite diferite cristale naturale anizotrope, cum ar fi turmalina, spatul-de-Islanda, cuarțul ș.a. Anizotropia lor se manifestă prin absorbția puternică a luminii caracterizată de oscilațiile vectorului luminos de o anumită direcție, lăsând să treacă aproape fără

absorbție lumina caracterizată de vibrațiile perpendiculare pe această direcție. Există însă și polarizatoare artificiale. Ele reprezintă niște pelicule acoperite cu un strat de molecule lungi de structură complicată, așezate compact cu axele paralele. Astfel se obține o rețea de fante cu perioada extrem de mică care permite trecerea luminii caracterizată numai de o anumită direcție de vibrație a vectorului luminos. Aceste pelicule sunt numite **polaroizi** și au fost obținute pentru prima dată în anul 1928 de către savantul și inventatorul american Edwin Land (1909–1991), care ulterior a elaborat bazele fotografiei momentane.

c. Polarizarea luminii prin reflexie

Starea de polarizare a luminii poate fi realizată și prin alte metode. Una dintre acestea este reflexia luminii pe un mediu dielectric. Dacă lumina naturală de la Soare este incidentă sub un unghi i pe suprafața orizontală a șoselei sau a unui lac, atunci, în funcție de valoarea unghiului de incidență pe anumite regiuni ale suprafeței, vom observa licăriri de lumină. Aceste licăriri se datorează faptului că raza reflectată este polarizată. Într-adevăr, dacă privesc printr-un polaroid cu axă verticală, atunci licăririle dispar. Rezultă că lumina reflectată este parțial polarizată preponderent într-un plan paralel cu suprafața reflectătoare.

Gradul de polarizare a razei reflectate depinde de unghiul de incidență. S-a constatat că la incidența normală a luminii naturale pe o suprafață dielectrică ($i = 0$) raza reflectată nu este polarizată, dar pentru unghiuri de incidență cuprinse în intervalul $0 < i < \pi/2$ atât raza reflectată, cât și cea refractată sunt parțial polarizate în planuri reciproc perpendiculare (fig. 3.27). La unghiul de incidență i_B , pentru care raza reflectată este perpendiculară pe cea refractată, lumina reflectată este total polarizată, iar

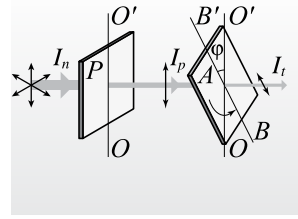


Fig. 3.26

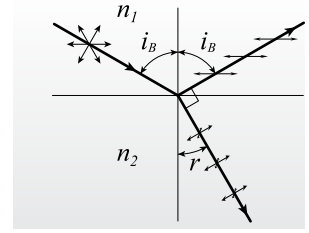


Fig. 3.27

cea refractată – maxim polarizată, dar nu total. Din clasa a IX-a cunoaștem legea refracției luminii

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1},$$

unde n_1 este indicele absolut de refracție al mediului în care se propagă raza incidentă, iar n_2 – al mediului de la care se produce reflexia.

După cum se observă din figura 3.27, în acest caz $r + i_B = 90^\circ$. Prin urmare

$$\frac{\sin i_B}{\sin(90^\circ - i_B)} = \frac{n_2}{n_1}$$

sau

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.31, a)$$

Așadar, **unghiul de polarizare totală** i_B se exprimă prin indicii absoluți de refracție ai mediilor de pe ambele părți ale suprafeței de separare. Raportul $n_2/n_1 = n_{21}$ este indicele relativ de refracție al mediului al doilea în raport cu primul. Astfel,

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}. \quad (3.31, b)$$

Unghiul de polarizare totală i_B mai este numit **unghiul Brewster**, în cinstea fizicianului scoțian David Brewster (1781–1868), iar relația (3.31, a sau b) exprimă legea lui Brewster stabilită experimental în anul 1815:

Unghiul de polarizare totală este determinat de indicele relativ de refracție al mediului al doilea în raport cu primul.

Problemă rezolvată

Sub ce unghi față de orizont trebuie să se aplece Soarele pentru ca razele de lumină reflectate pe suprafața unui lac să fie total polarizate? Indicele de refracție al apei este 1,33.

Se dă:
 $n = 1,33$
 $\alpha = ?$

Rezolvare:

Razele de lumină reflectate pe suprafața lacului vor fi total polarizate atunci când cele solare vor fi incidente sub unghiul Brewster care se determină ușor din relația (3.31, b):

$$i_B = \operatorname{arctg} n.$$

Întrucât unghiul de reflexie este egal cu cel de incidență i_B , pentru unghiul α pe care-l fac razele solare cu orizontul obținem:

$$\alpha = 90^\circ - i_B = 90^\circ - \operatorname{arctg} n \approx 36,93^\circ \approx 36^\circ 56'.$$

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care unde se numesc polarizate?
2. Ce reprezintă planul de polarizare?
3. Explicați modelul mecanic al stării de polarizare a undelor. De ce starea de polarizare este proprie doar undelor transversale?
4. Definiți noțiunea de grad de polarizare. Ce valori poate lua această mărime?
5. Cum se explică transversalitatea undelor de lumină cu ajutorul fenomenului de polarizare?
6. Ce reprezintă polarizatorul și analizorul? Este vreo deosebire constructivă între acestea?
7. Formulați legea lui Brewster. Ce condiție satisfac unghiul Brewster și cel de refracție?
8. Determinați unghiul de polarizare totală la reflexia luminii pe o placă de sticlă cu indicele de refracție $n_2 = 1,515$, dacă raza incidentă se propagă prin apă. Indicele de refracție al apei este $n_1 = 1,333$.

3.10.* ÎMPRĂȘTIEREA LUMINII

La interacțiunea undelor de lumină cu substanța, sarcinile electrice din atomii și moleculele acesteia vor efectua sub acțiunea câmpului electric variabil \vec{E} al unei electromagnetice oscilații forțate cu aceeași frecvență ca și vectorul \vec{E} . De aceea particulele încărcate ale substanței devin centre de unde sferice secundare care se propagă în direcții arbitrare. Astfel, o parte din energia undei de lumină este absorbită de către substanță, iar mai apoi emisă de către particulele ei, fiind împrăștiată în toate direcțiile posibile.

Împrăștierea luminii se mai produce și în cazul reflexiei și refracției luminii pe marginile particulelor de dimensiuni foarte mici (comparabile cu lungimea de undă) din mediul prin care ea se propagă. Dacă însă mediul transparent este omogen, fenomenul de împrăștiere a luminii practic nu se observă. Aceasta se explică prin faptul că undele secundare coerente emise de particulele încărcate ale mediului interferă, iar ca rezultat se neutralizează reciproc în toate direcțiile, în afară de direcția de propagare a luminii transmise.

Efectele împrăștierii luminii pot fi observate cu ajutorul unei experiențe simple. Într-o cuvă de sticlă de formă alungită plină cu apă introducem câteva picături de lapte și direcționăm prin acest mediu un flux îngust de lumină. Privind lateral, vom observa lumina împrăștiată de o culoare cu nuanță mai albăstrie decât a sursei de lumină, iar lumina care traversează cuva de-a lungul ei va avea o culoare de nuanță roșiatică.

Aceasta se explică prin faptul că undele de lumină cu diferite lungimi de undă sunt împrăștiate în mod diferit. După cum a demonstrat fizicianul și matematicianul englez John William Strutt (lordul Rayleigh) (1842–1919), intensitatea luminii împrăștiată este invers proporțională cu lungimea de undă la puterea a patra

$$I = \frac{C}{\lambda^4}. \quad (3.32)$$

Din (3.32) rezultă că undele de lumină din spectrul vizibil cu lungimi de undă mai mici sunt împrăștiate mai puternic decât cele cu lungimi de undă mai mari.

Împrăștierea Rayleigh are loc atunci când lumina trece prin medii solide sau lichide transparente, însă cel mai bine se observă în gaze. Datorită împrăștierii Rayleigh a luminii solare pe moleculele atmosferei terestre, cerul este văzut albastru. Într-adevăr, razele din partea roșie a spectrului luminii solare, fiind împrăștiate mai puțin, ajung la Pământ și sunt absorbite, iar cele din partea albastră se acumulează în atmosferă datorită împrăștierii puternice, dând cerului culoarea albastră.

Împrăștierea Rayleigh explică și culoarea discului solar. La amiază, lumina albă care vine de la Soare, datorită împrăștierii, pierde în atmosfera terestră o parte din razele ei violete și albastre, iar discul solar se vede de culoare galbenă-aurie. La răsăritul și apusul Soarelui, când drumul parcurs de razele solare prin atmosferă este mai mare, împrăștierea razelor albastre devine și mai puternică, astfel încât discul solar pare de culoare roșie-portocalie.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care este esența fenomenului de împrăștiere a luminii?
2. De ce în mediile transparente omogene nu se observă împrăștierea luminii?
3. Cum depinde intensitatea luminii împrăștiate de lungimea ei de undă?
4. Cum se explică culoarea albastră a cerului? Dar a discului solar în diferite perioade ale zilei?

ELEMENTE DE TEORIE A RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

4.1.* PRINCIPIUL RELATIVITĂȚII ÎN FIZICĂ. POSTULATELE LUI EINSTEIN

Să ne amintim

Pentru a descrie mișcarea mecanică a corpului – schimbarea poziției lui în raport cu alte corpuri –, este necesar un sistem de referință. Acesta reprezintă un sistem de coordonate, legat cu corpul de referință, în raport cu care este descrisă mișcarea. Sunt necesare, de asemenea, o riglă și un ceasornic, pentru a măsura distanțele și timpul.

Mișcarea corpului depinde de sistemul de referință ales, adică este **relativă** (v. manualul *Fizică, cl. X*). În cinematică este posibil de utilizat orice sistem de referință, în dinamică însă se dă preferință **sistemelor de referință inerțiale**.

Mișcarea mecanică a corpurilor decurge în spațiu și în timp. În mecanica clasică **spațiul și timpul sunt considerate absolute, independente unul față de altul și față de corpurile care se află și se mișcă în ele**. Distanța dintre două puncte (lungimea segmentului) și intervalul de timp dintre două evenimente în sisteme de referință diferite sunt aceleași.

Un rol deosebit în mecanica clasică revine **transformărilor lui Galilei și principiului relativității al lui Galilei** (v. manualul *Fizică, cl. X*).

Fie un **sistem de referință inerțial** S , considerat convențional imobil, a cărui parte componentă este sistemul de coordonate $Oxyz$ și un al doilea sistem de referință S' din care face parte sistemul de coordonate $O'x'y'z'$. Admitem că sistemul S' se mișcă, în raport cu sistemul S , având o **viteză constantă** \vec{u} paralelă cu axa Ox și că la momentul inițial de timp $t_0 = t'_0 = 0$, comun pentru ambele sisteme de referință, axele coordonatelor respective ale sistemelor coincid. La această mișcare axa $O'x'$ alunecă pe axa Ox , axa $O'y'$ rămânând paralelă cu Oy , iar $O'z'$ – paralelă cu Oz (fig. 4.1). Mișcarea sistemului S' este o mișcare de translație.

Se consideră punctul material M , care la momentul de timp t ocupă în sistemul de referință S poziția determinată de vectorul de poziție \vec{r} . Vectorul de poziție al punctului M în raport cu sistemul S' este \vec{r}' , iar momentul de timp – t' . Originea timpului în S și S' este aceeași: $t_0 = t'_0 = 0$.

Ținând seama de faptul că viteza \vec{u} este constantă și că la momentul $t = 0$ originile O' și O coincideau, distanța $OO' = ut$ sau sub formă vectorială $\vec{OO}' = \vec{u}t$, se obține (fig. 4.1):

$$x = x' + ut', y = y', z = z', t = t', \quad (4.1)$$

sau sub formă vectorială

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t', t = t'. \quad (4.2)$$

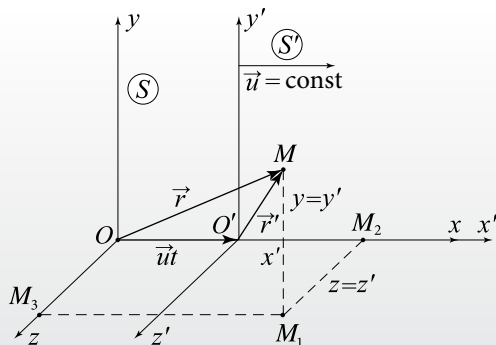


Fig. 4.1

Relațiile (4.1) sau (4.2) sunt numite *transformările lui Galilei*.

Din (4.2) obținem pentru vitezele \vec{v} și \vec{v}' în raport cu cele două sisteme de referință relațiile următoare:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u} \text{ sau } \vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}. \quad (4.3)$$

Aceasta reprezintă **legea clasică a compunerii vitezelor**, conform căreia **viteza este o mărime relativă**, diferită în sistemele S și S'.

Dacă $\vec{u} = \text{const.}$, din (4.3) rezultă:

$$\vec{a} = \vec{a}', \quad (4.4)$$

adică accelerațiile punctului material în raport cu sistemele de referință S și S' sunt egale între ele.

În baza relației (4.4) se demonstrează că orice sistem de referință aflat în mișcare de translație cu viteză constantă în raport cu un sistem inerțial este, de asemenea, un sistem de referință inerțial.

În conformitate cu relația (4.4), accelerația nu se modifică la trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul.

Mărimile fizice sau relațiile dintre ele care nu se modifică la trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul sunt numite invariante. Trecerea se efectuează conform transformărilor lui Galilei, de aceea se concretizează că aceste mărimi sunt **invariante în raport cu transformările lui Galilei**.

Ținând seama că masa corpului m este o mărime constantă, aceeași în S și S', rezultă că: **principiile mecanicii clasice (newtoniene) sunt invariante în raport cu transformările lui Galilei, adică se formulează la fel în toate sistemele de referință inerțiale. Cu alte cuvinte, mișcarea rectilinie uniformă a sistemului inerțial nu influențează fenomenele mecanice care se produc în el.**

Aceste afirmații prezintă formulări echivalente ale **principiului relativității al lui Galilei – principiul relativității în mecanica clasică.**

Conform acestui principiu, prin experimente mecanice nu se poate stabili dacă sistemul inerțial se mișcă, cu atât mai mult, nu poate fi determinată viteza acestuia.

Să examinăm problema relativității în electrodinamică. Un rezultat important în domeniul electromagnetismului îl constituie **teoria câmpului electromagnetic** – electrodinamica – elaborată de către Maxwell în anii 1860–1865. La temelia ei se află un sistem de patru ecuații, cunoscute în prezent sub denumirea de **ecuațiile lui Maxwell**.

Pe fizicienii a început să-i preocupe problema valabilității ecuațiilor electrodinamicii lui Maxwell pentru mediile aflate în mișcare, adică în sisteme inerțiale de referință mobile. S-a constatat că **ecuațiile lui Maxwell nu sunt invariante în raport cu transformările lui Galilei**, adică își modifică forma la trecerea de la sistemul de referință inerțial, considerat imobil, la cel care se mișcă cu viteză constantă în raport cu primul.

Astfel, în fizică s-a creat o situație de incertitudine: pe de o parte, legile mecanicii sunt aceleași în toate sistemele de referință inerțiale, iar pe de altă parte, legițile electrodinamicii sunt diferite în diverse sisteme inerțiale.

Această situație controversată a fost soluționată în 1905 de către A. Einstein în baza a două postulate.

Postulatul întâi vizează extinderea principiului relativității al lui Galilei asupra tuturor fenomenelor fizice, inclusiv asupra celor electromagnetice:

Legile fizicii se formulează la fel în toate sistemele de referință inerțiale.

Acesta este **principiul relativității al lui Einstein**.

Conform lui, prin niciun experiment fizic realizat în sistemul inerțial nu poate fi stabilit dacă el se mișcă rectiliniu și uniform, iar viteza acestei mișcări nu poate fi determinată.

Postulatul al doilea se referă la viteza luminii în vid:

Viteza luminii în vid are aceeași valoare în toate sistemele de referință inerțiale și nu depinde de viteza sursei de lumină sau a observatorului.

Acest postulat mai este numit **postulatul invariantei vitezei luminii** și relevă rolul deosebit al vitezei luminii în vid c , care este limita superioară a vitezei corpurilor, a semnalelor și a interacțiunilor în natură.

Un argument în favoarea postulatului al doilea au servit rezultatele experimentelor realizate în 1881 de către fizicianul și astronomul american Albert

Abraham Michelson (1852–1931), apoi în 1887, într-o variantă perfecționată, împreună cu Edward Williams Morley (1838–1923). În aceste experimente s-a demonstrat convingător că propagarea luminii nu este influențată de mișcarea Pământului, viteza luminii fiind aceeași în toate direcțiile în raport cu viteza Pământului.

Postulatul al doilea nu este în concordanță cu legea compunerii vitezelor din mecanica newtoniană – viteza sursei sau a observatorului nu se adună și nu se scade din viteza luminii în vid. Prin urmare, transformările lui Galilei nu corespund postulatului al doilea, necesitând a fi înlocuite cu altele. Deoarece ele au fost stabilite în baza concepției de spațiu și timp absolut, aceste concepte trebuie revizuite.

Teoria elaborată de Einstein, conform acestor două postulate, a fost numită **teoria relativității restrânse** și se aplică numai la sisteme de referință inerțiale. Viteza luminii în vid c este numită **constantă relativistă**. Teoria care studiază fenomenele fizice în sistemele de referință neinertiale, precum și fenomenele gravitaționale, se numește **teoria relativității generale** (Einstein, 1916).



ALBERT EINSTEIN
(1879–1955)
fizician german

A explicat efectul fotoelectric în baza teoriei cuantice, susținând existența unui purtător material al cuantei de energie – un corpuscul denumit ulterior „foton”. Este fondatorul teoriei cinetico-moleculare a mișcării browniene. În lucrarea *Asupra electrodinamicii corpurilor în mișcare* a expus teoria relativității restrânse.

A formulat teoria căldurilor specifice ale solidelor (a. 1907) și teoria relativității generale (a. 1916), care extinde teoria relativității pentru sistemele de referință neinertiale. A enunțat legile proceselor de emisie și de absorbție a luminii, a prezis existența emisie stimulate a luminii (a. 1917), în baza ideilor sale ulterior fiind construit laserul. În anul 1921 i s-a decernat Premiul Nobel pentru explicarea legilor efectului fotoelectric.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Cum veți stabili dacă un sistem de referință este inerțial sau nu?
2. Ce mărimi fizice invariante față de transformările lui Galilei cunoașteți?
3. În ce constă echivalența tuturor sistemelor de referință inerțiale conform principiului relativității al lui

Galilei? Dar conform principiului relativității al lui Einstein?

4. Concordați postulatul despre invarianta vitezei luminii în vid cu legea compunerii vitezelor din mecanica clasică. Argumentați răspunsul.

4.2.* SPAȚIUL ȘI TIMPUL ÎN TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

a. Relativitatea simultaneității

O noțiune importantă în teoria relativității este cea de *eveniment*. Orice fenomen fizic se produce într-o regiune a spațiului într-un anumit interval de timp. În cazul în care regiunea spațiului și intervalul de timp sunt foarte mici, fenomenul este numit **eveniment**. Acesta constituie un model ideal, care admite că fenomenul are loc într-un punct al spațiului și la un moment de timp.

Evenimentele care se produc în același timp se numesc simultane.

Să analizăm noțiunea de simultaneitate în cadrul teoriei relativității restrânse în baza unui experiment mental.

Se consideră două sisteme de coordonate: sistemul $Oxyz$, fiind imobil, și sistemul $O'x'y'z'$, care sunt părți componente ale sistemelor de referință inerțiale S și S' . Admitem că sistemul $O'x'y'z'$ se mișcă în raport cu sistemul $Oxyz$ cu viteza constantă \vec{u} , paralelă cu axa Ox și că la un moment inițial de timp, comun pentru ambele sisteme, axele acestora coincid. În timpul mișcării axa $O'x'$ alunecă pe axa Ox , axa $O'y'$ rămâne paralelă cu Oy

și $O'z'$ – paralelă cu Oz (fig. 4.2). Ulterior se vor avea în vedere anume asemenea sisteme de referință inerțiale.

Considerăm în sistemul S' o tijă AD paralelă cu axa $O'x'$, deci și cu Ox . În sistemul S' tija se află în repaus și se mișcă în raport cu sistemul S cu viteza constantă \vec{u} orientată de-a lungul ei. La mijlocul tije se află un becușor de incandescență B , care se mișcă împreună cu ea (fig. 4.2, a).

Se presupune că la un moment becușorul B se aprinde pentru un interval foarte scurt de timp și emite un impuls de lumină. Conform postulatului al doilea al lui Einstein, lumina se propagă în toate direcțiile cu aceeași viteză c în raport cu ambele sisteme de referință. În calitate de evenimente a și d se consideră ajungerea luminii la capetele A și D ale tije. Evenimentele a și d se produc în puncte diferite ale spațiului, adică sunt **separate spațial**.

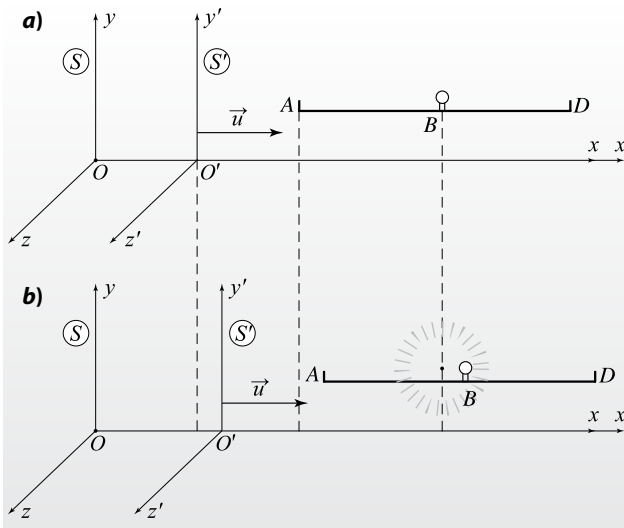


Fig. 4.2

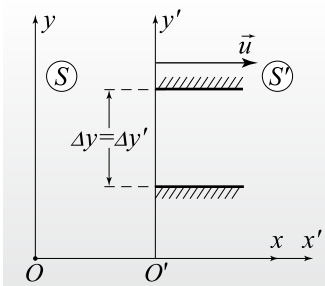


Fig. 4.3

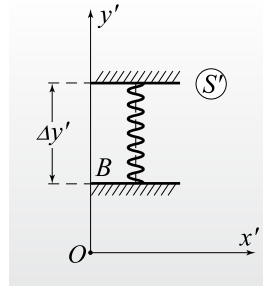


Fig. 4.4

Să analizăm evenimentele a și d din punctul de vedere al observatorului aflat în repaus în sistemul S' . Becușorul se află la mijlocul tije în repaus, iar lumina parcurge până la capetele ei distanțe egale. Viteza de propagare în ambele sensuri este aceeași, de aceea intervalele de timp în care lumina parcurge distanțele până la capetele tije sunt egale. Prin urmare, în sistemul de referință inerțial S' **evenimentele a și d se produc la același moment de timp, adică sunt simultane.**

Să considerăm evenimentele a și d din punctul de vedere al observatorului, care se află în repaus în sistemul inerțial S . În raport cu acest sistem tija se deplasează cu viteza \vec{u} , astfel încât capătul A se apropie de poziția în care becușorul a emis impulsul de lumină, iar capătul D se îndepărtează de această poziție (fig. 4.2, b). Deoarece viteza luminii în ambele sensuri este aceeași, intervalul de timp în care lumina ajunge la capătul A al tije este mai mic decât cel în care ea ajunge la capătul D . Deci pentru observatorul din sistemul inerțial S evenimentul a se produce înaintea evenimentului d și aceste **evenimente nu sunt simultane.** Exemplul respectiv demonstrează că:

evenimentele separate spațial și simultane într-un sistem de referință inerțial nu sunt simultane în alte sisteme inerțiale, adică simultaneitatea este relativă.

Concluzia privind caracterul relativ al **simultaneității** evenimentelor denotă că în teoria relativității **timpul nu este absolut.**

b. Relativitatea intervalului de timp

Pentru a stabili relația dintre intervalele de timp în diferite sisteme de referință inerțiale, se consideră cele două sisteme inerțiale S și S' , sistemul S fiind imobil, iar sistemul S' mișcându-se în raport cu sistemul S cu viteza constantă \vec{u} , paralelă cu axa Ox .

Admitem că în sistemul S' se află fixat un ceasornic de construcție specială: două oglinzi cu fețele reflectoare una spre alta, paralele atât între ele, cât și cu planul de coordonate $O'x'z'$ (fig. 4.3). În figură nu sunt reprezentate axele Oz și $O'z'$ perpendiculare pe planul ei. Printr-o modalitate anumită, dintr-un punct al feței unei oglinzi, este emis un impuls de lumină de scurtă durată.

Să analizăm funcționarea ceasornicului în sistemul S' , în care el se află în repaus. Impulsul de lumină, ce cade perpendicular pe oglinda superioară, se reflectă

spre oglinda inferioară, de la care se reflectă spre cea superioară etc. (fig. 4.4). Impulsul efectuează o mișcare periodică între oglinzi similară unui pendul. Notăm cu τ' perioada de „oscilație” a impulsului de lumină în raport cu observatorul din S' . În acest interval de timp, lumina parcurge cu viteza c distanța $\Delta y'$ dintre oglinzi de două ori. Prin urmare,

$$\tau' = \frac{2 \cdot \Delta y'}{c}, \text{ de unde rezultă că:} \quad (4.5)$$

$$\Delta y' = \frac{1}{2} c \tau'$$

Să cercetăm funcționarea acestui ceasornic din punctul de vedere al observatorului aflat în sistemul S , în raport cu care ceasornicul se mișcă cu viteza constantă \vec{u} , paralelă cu axa Ox și cu oglinzile. Notăm cu τ intervalul de timp în care lumina se propagă de la oglinda inferioară până la cea superioară și înapoi. Ținem seama de faptul că în timpul $\tau/2$ în care lumina se propagă de la oglinda inferioară până la cea superioară, ceasornicul se deplasează în direcția axei Ox la o distanță egală cu $u\tau/2$. În figura 4.5 sunt reprezentate trei poziții succesive ale ceasornicului corespunzătoare momentelor de timp în care lumina ajunge de fiecare dată la oglinda următoare, parcurgând în timpul $\tau/2$ distanța $c\tau/2$. După cum se vede din figură, pătratul distanței dintre oglinzi este:

$$(\Delta y)^2 = \left(c \frac{\tau}{2} \right)^2 - \left(u \frac{\tau}{2} \right)^2,$$

de unde rezultă:

$$\Delta y = \frac{1}{2} \tau \sqrt{c^2 - u^2}. \quad (4.6)$$

Dimensiunile transversale (în direcții perpendiculare pe viteza u) nu se modifică la trecerea de la un sistem inerțial la altul, adică $\Delta y = \Delta y'$. Egalând expresiile din partea dreaptă a relațiilor (4.5) și (4.6), obținem:

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.7)$$

Acest rezultat arată că **intervalul de timp dintre două evenimente este relativ**, luând valori diferite în sisteme inerțiale diverse. Evident, $\tau' < \tau$, adică intervalul de timp este minim în sistemul de referință S' , față de care locul unde se produc evenimentele este fix. Altfel spus, pentru observatorul față de care evenimentele se produc în același punct – după fiecare perioadă τ' impulsul de lumină se întoarce în punctul de la care a plecat. În raport cu sistemul de referință S , considerat fix, aceste două evenimente se produc însă în puncte diferite ale spațiului.

Astfel,

intervalul de timp dintre două evenimente este minim în sistemul de referință în raport cu care ele se produc în același punct.

Pentru observatorul față de care locul unde se produc evenimentele se mișcă, intervalul de timp τ dintre aceleași evenimente este mai mare, timpul decurge mai lent și are loc **dilatarea duratei**, adică **încetinirea timpului**. Această încetinire este proprie tuturor proceselor care au loc în sistemul S' , inclusiv celor din organismele vii.

c. Relativitatea dimensiunilor longitudinale

Mai sus s-a menționat că dimensiunile transversale ale corpurilor, adică perpendiculare pe viteza mișcării, rămân aceleași la trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul. Pentru a determina care este situația în cazul dimensiunilor longitudinale, să analizăm un alt experiment mental.

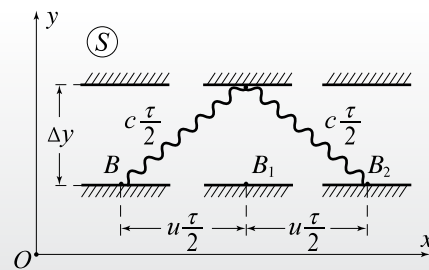


Fig. 4.5

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Existența reală a încetinirii timpului a fost confirmată experimental prin observări din lumea particulelor elementare. În natură există o particulă elementară numită *miuon*, a cărei masă este de aproximativ 207 ori mai mare decât cea a electronului. Ea este nestabilă și are, în sistemul de referință în raport cu care se află în repaus, un timp mediu de viață de circa $2,2 \cdot 10^{-6}$ s (după acest timp ea se transformă în alte particule elementare). Dacă miuonul s-ar fi mișcat cu viteză egală aproximativ cu viteza luminii în vid ($3 \cdot 10^8$ m/s), în acest timp ar fi parcurs o distanță de circa 660 m. S-a constatat că miuonii apar și în straturile superioare ale atmosferei sub acțiunea radiației cosmice, care permanent bombardează Pământul. Miuonii parcurg până la suprafața Pământului distanțe egale cu grosimea atmosferei, adică distanțe de zeci de kilometri, mult mai mari decât distanța calculată mai sus. Faptul în cauză poate fi explicat numai dacă luăm în considerare încetinirea timpului; durata medie de viață a miuonilor în sistemul de referință legat cu Pământul, în raport cu care ei se mișcă cu viteze mari, este mult mai mare decât $2,2 \cdot 10^{-6}$ s, în acest timp ei parcurgând distanțe de zeci de kilometri.

Să ne imaginăm din nou cele două sisteme de referință inerțiale, S și S' , unde sistemul S este considerat imobil, iar sistemul S' se mișcă în raport cu sistemul S cu viteza constantă \vec{u} , paralelă cu axele Ox și $O'x'$. Admitem că în sistemul S' este fixată o riglă rigidă BD , paralelă cu axa $O'x'$. La capătul B al riglei este fixat un becușor electric, iar la capătul D – o oglindă mică, planul reflector al căreia este perpendicular pe axa $O'x'$ și reflectă spre becul B lumina emisă de acesta (fig. 4.6).

Notăm cu l lungimea riglei măsurată de observatorul din sistemul imobil S și cu l' lungimea riglei măsurată de observatorul din sistemul S' , în raport cu care rigla este în repaus. Fie că la un anumit moment becușorul B emite un impuls de lumină de scurtă durată. Să determinăm intervalele de timp τ și τ' în care impulsul de lumină se propagă de la becușor până la oglinda D și înapoi, în raport cu sistemele S și S' . Vom ține seama de postulatul al doilea al lui Einstein.

În raport cu observatorul din S' rigla este în repaus și impulsul de lumină parcurge distanța $2l'$ în intervalul de timp:

$$\tau' = \frac{2l'}{c}. \quad (4.8)$$

Să calculăm intervalul de timp respectiv τ în raport cu sistemul de referință imobil S . Notăm cu τ_1 intervalul de timp în care impulsul de lumină par-

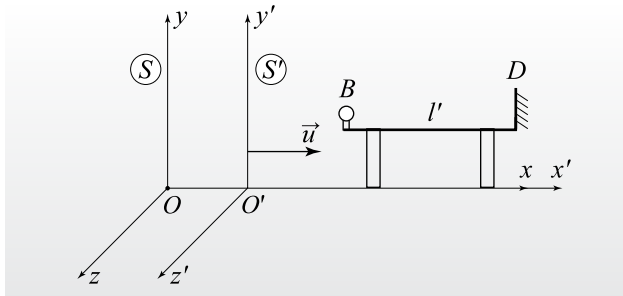


Fig. 4.6

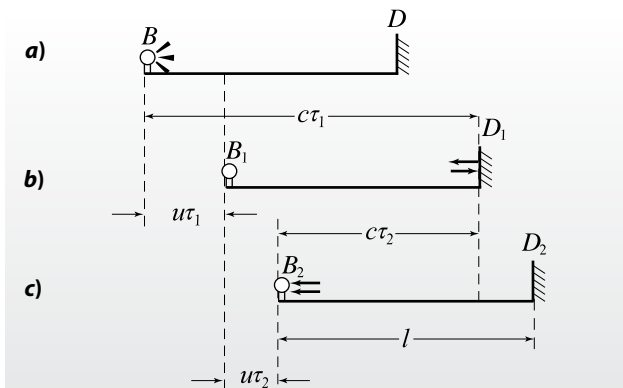


Fig. 4.7

curge distanța de la bec până la oglindă și cu τ_2 timpul în care impulsul parcurge distanța de la oglindă până la bec. Timpul căutat $\tau = \tau_1 + \tau_2$. În intervalul de timp τ_1 lumina parcurge distanța $c\tau_1$, egală cu lungimea riglei l plus distanța $u\tau_1$, pe care a parcurs-o rigla în acest interval de timp (în figura 4.7 sunt reprezentate pozițiile a și b ale riglei la începutul și la sfârșitul intervalului). Avem $c\tau_1 = l + u\tau_1$, deci

$$\tau_1 = \frac{l}{c-u}.$$

În intervalul τ_2 lumina parcurge distanța $c\tau_2$, egală cu lungimea riglei l minus distanța $u\tau_2$ parcursă de bec în întâmpinarea luminii (în figura 4.7 poziția b a riglei corespunde începutului acestui interval, iar poziția c momentului de timp la care lumina ajunge la bec). Prin urmare,

$$c\tau_2 = l - u\tau_2, \text{ deci } \tau_2 = \frac{l}{c+u}.$$

Pentru intervalul de timp τ obținem:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{l}{c-u} + \frac{l}{c+u} = \frac{2lc}{c^2 - u^2} = \frac{2l}{c(1 - u^2/c^2)}. \quad (4.9)$$

Intervalele de timp τ și τ' satisfac relația (4.7), din care rezultă relația dintre lungimile riglei l și l' în sistemele de referință inerțiale S și S' :

$$l = l' \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (4.10)$$

Acest rezultat denotă că **dimensiunile longitudinale sunt relative**, ele modificându-se la trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul.

Din relația (4.10) reiese că $l < l'$, adică lungimea riglei, deci orice dimensiune longitudinală, are valoarea cea mai mare în sistemul de referință în raport cu care ea se află în repaus. Această valoare l' este numită, de obicei, **lungime proprie**.

Dimensiunile longitudinale ale corpurilor în sistemele de referință, în raport cu care ele se mișcă, sunt mai mici decât dimensiunile proprii. Fenomenul dat se numește **contractia lungimilor**.

Acest rezultat, precum și cel referitor la intervalele de timp, se află în acord complet cu postulatul întâi al lui Einstein.

Rezumând cele expuse, conchidem că

în teoria relativității restrânse spațiul și timpul nu mai sunt absolute: intervalele de timp și dimensiunile corpurilor se modifică la trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul.

Relațiile cantitative (4.7) și (4.10) conțin expresia $\sqrt{1 - u^2/c^2}$, ceea ce indică faptul că relativitatea

menționată se manifestă la viteze u , care iau valori comparabile cu viteza luminii în vid c . Efectele care au loc la astfel de viteze sunt numite **relativiste**.

La viteze mici $u \ll c$ din relațiile (4.7) și (4.10) rezultă, cu un grad înalt de precizie, că $\tau = \tau'$ și $l = l'$, deci la viteze mici spațiul și timpul pot fi considerate absolute, adică sunt valabile legile mecanicii newtoniene.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care este semnificația fizică a noțiunii de *eveniment*?
2. În experimentul mental, reprezentat în *figura 4.2*, observatorul din sistemul de referință S constată că lumina emisă de becușorul B ajunge mai întâi la capătul A al tijei, apoi la capătul D . Considerăm că sistemul S' se mișcă în raport cu sistemul S cu viteza $(-\vec{u})$. Ce constată în acest caz observatorul din sistemul S' ?
3. În ce constă încetinirea timpului?
4. Care dimensiuni ale corpului sunt numite longitudinale și care transversale? Care din aceste dimensiuni sunt aceleași în diferite sisteme de referință inerțiale?
5. Lungimea unei tije în repaus este egală cu 25 cm. Ce lungime are tija în sistemul de referință, în raport cu care ea se mișcă cu viteza $u = 0,6c$, orientată de-a lungul său? (c este viteza luminii în vid.)
6. În sistemul de referință mobil, în raport cu care se află în repaus, un romb are diagonalele egale cu 15 și 9 cm. În ce direcție și cu ce viteză trebuie să se miște rombul astfel ca pentru observatorul aflat în repaus acesta să reprezinte un pătrat?

4.3.* TRANSFORMĂRILE LUI LORENTZ ȘI CONSECINȚELE ACESTORA

a. Transformările lui Lorentz

Rezultatele obținute în tema precedentă permit a stabili relațiile dintre coordonatele locului și timpul unui eveniment (x, y, z, t) în sistemul de referință inerțial S , cunoscând mărimile respective (x', y', z', t') ale aceluiași eveniment în sistemul inerțial S' (*fig. 4.8*). Sistemele S și S' sunt definite: sistemul S' se mișcă față de sistemul inerțial S , considerat imobil, cu viteză constantă \vec{u} , paralelă cu axa Ox , iar la momentul inițial de timp originea lui O' coincide cu originea O .

Coordonatele y' și z' sunt dimensiuni transversale, care, după cum s-a menționat, sunt aceleași în ambele sisteme de referință, adică $y = y'$ și $z = z'$.

Segmentul $O'M_2$ în sistemul de referință S' are lungimea x' . Lungimea acestui segment în sistemul S are, potrivit formulei (4.10), valoarea egală cu $x'\sqrt{1-u^2/c^2}$. Astfel, după cum se vede din *figura 4.8*, pentru coordonata x putem scrie:

$$x = ut + x'\sqrt{1-u^2/c^2}, \quad (4.11)$$

de unde rezultă:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (4.12)$$

Mărimile fizice, precum intervalul de timp și lungimea sunt mărimi reale, deci expresia de sub radicalul $\sqrt{1-u^2/c^2}$ nu poate fi negativă, adică viteza u poate lua doar valori care nu depășesc viteza luminii în vid c . Rezultă că **viteza c , este viteza limită de transmitere a interacțiunilor în natură și de mișcare a corpurilor**.

Această formulă permite a calcula coordonata x' în sistemul S' , fiind cunoscută coordonata x și timpul t în sistemul S .

Să obținem relația inversă, adică expresia pentru coordonata x . Dacă considerăm sistemul S' imobil, atunci sistemul S se mișcă în raport cu el cu viteza $(-\vec{u})$. Coordonata x se obține din formula (4.12), înlocuind mărimile x, t cu x', t' și invers, precum și schimbând în opus semnul vitezei u . Obținem:

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (4.13)$$

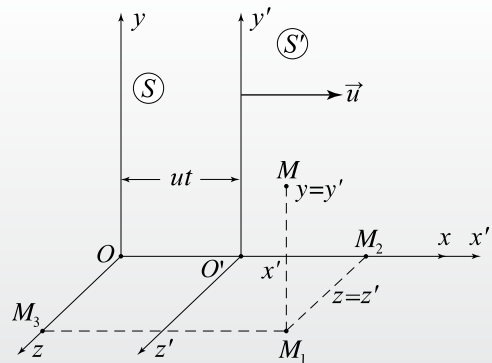


Fig. 4.8

Egalând expresiile din partea dreaptă a formulelor (4.11) și (4.13), pentru timpul t în sistemul imobil S avem:

$$t = \frac{t' + \frac{x'u}{c^2}}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (4.14)$$

Totalizăm rezultatele obținute:

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1-u^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + x'u/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (4.15)$$

Aceste relații au fost numite **transformările lui Lorentz**. Ele au fost deduse în anul 1904, înainte de publicarea lucrării lui Einstein, ca relații ce nu modifică ecuațiile electrodinamicii la trecerea de la un sistem de referință inerțial la alt sistem inerțial.

Ecuatiile fundamentale ale electrodinamicii (ecuațiile lui Maxwell) sunt invariante în raport cu transformările lui Lorentz.

Acest fapt este în conformitate cu primul postulat al lui Einstein. Din formulele (4.15) observăm că în teoria relativității restrânse spațiul și timpul nu sunt independente.

La viteze u mult mai mici decât viteza luminii în vid c , adică la $u \ll c$, termenii care conțin raportul u/c pot fi neglijați și transformările lui Lorentz (4.15) trec în transformările lui Galilei (4.1). Astfel, a fost stabilită limita aplicabilității transformărilor lui Galilei, a conceptelor și a legilor mecanicii clasice: viteze mult mai mici decât viteza luminii în vid.

Legea fundamentală a mecanicii clasice (newtoniene) este invariantă în raport cu transformările lui Galilei (4.1), deci nu este invariantă în raport cu transformările lui Lorentz. Rezultă că în domeniul relativist, când vitezele obiectelor devin comparabile cu viteza luminii în vid c , în mecanică sunt valabile alte legități, care la viteze $u \ll c$ trec în legitățile mecanicii clasice.

b. Compunerea relativistă a vitezelor

Să stabilim relația dintre vitezele punctului material în raport cu cele două sisteme de referință

inerțiale, S și S' . Vitezele se exprimă prin coordonatele și timpul din sistemele respective. Astfel, în sistemele S și S' proiecțiile vitezei pe axele Ox și $O'x'$ sunt:

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad \text{și} \quad v'_x = \frac{dx'}{dt'}.$$

Ținând seama de faptul că viteza u este constantă, din relațiile (4.15) avem:

$$dx = \frac{dx' + u dt'}{\sqrt{1-u^2/c^2}}, \quad dt = \frac{dt' + dx' \cdot u/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \quad (4.16)$$

Facem raportul respectiv:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + u dt'}{dt' + dx' \cdot u/c^2}.$$

Împărțind numărătorul și numitorul la dt' și având în vedere că $\frac{dx'}{dt'} = v'_x$, obținem relația căutată:

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + v'_x \cdot u/c^2}. \quad (4.17)$$

Aceasta este **legea relativistă a compunerii vitezelor**.

În mod similar pot fi obținute expresiile pentru v_y și v_z .

Să analizăm câteva exemple.

Fie că în sistemul S' o rază de lumină se propagă în sensul pozitiv al axei $O'x'$, adică viteza $v'_x = c$. Viteza de propagare a acestei raze de lumină în raport cu sistemul S este: $v_x = \frac{c + u}{1 + c \cdot u/c^2} = c$, ceea ce corespunde principiului al doilea al lui Einstein.

Admitem că o particulă elementară se propagă în raport cu sistemul S' cu viteza $v'_x = 0,9 c$, iar viteza sistemului S' în raport cu S este $u = 0,8 c$. Substituind aceste valori în legea (4.17), pentru viteza particulei în raport cu sistemul imobil S obținem $v_x \approx 0,988 c$. Înlocuind aceleași valori pentru v'_x și u în legea clasică a compunerii vitezelor (4.3), avem $v_x = v'_x + u = 1,7 c$, valoare ce depășește viteza luminii în vid.

La viteze mult mai mici decât viteza luminii în vid $u \ll c$ relațiile relativiste trec în relațiile mecanicii clasice. În acest caz din (4.17) obținem $v_x = v'_x + u$, adică legea clasică a compunerii vitezelor (4.3).

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Un eveniment s-a produs în sistemul mobil S' în punctul cu coordonatele $x' = 3 \cdot 10^4 \text{ m}$, $y' = 2 \cdot 10^4 \text{ m}$, $z' = 0$ la momentul de timp $t' = 7 \cdot 10^{-5} \text{ s}$. Viteza sistemului mobil în raport cu sistemul fix S este egală cu $0,8 c$, fiind orientată de-a lungul axei Ox . Determinați coordonatele evenimentului și timpul când acesta s-a produs în sistemul S .
2. Dintr-o navă cosmică, a cărei viteză este egală cu $0,6 c$ în raport cu o stațiune radar, sunt lansați electroni cu viteza de $0,9 c$ în raport cu nava, în direcția vitezei acesteia. Să se calculeze viteza electronilor în raport cu stațiunea radar după formulele: a) teoriei relativității restrânse; b) mecanicii clasice.

4.4.* NOȚIUNE DE DINAMICĂ RELATIVISTĂ

Majoritatea problemelor de dinamică clasică se rezolvă în baza principiului fundamental al dinamicii sub forma: $m\vec{a} = \vec{F}$. Această relație este în contradicție cu al doilea postulat al teoriei relativității restrânse. Într-adevăr, corpul de masă m , asupra căruia acționează forța constantă \vec{F} , se mișcă uniform accelerat cu accelerația $a = \text{const}$. Viteza corpului crește odată cu timpul și poate atinge valori mai mari decât viteza luminii în vid c , ceea ce nu concordă cu teoria relativității restrânse.

În mecanica clasică este cunoscută și o altă formă a principiului fundamental al dinamicii. Dacă se introduce noțiunea de impuls al corpului

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad (4.18)$$

se folosește definiția accelerației $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ și se ține seama de faptul că în mecanica clasică masa corpului este constantă, se obține legea variației impulsului:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (4.19)$$

În cadrul mecanicii clasice formulările $m\vec{a} = \vec{F}$ și (4.19) sunt echivalente, dar în teoria relativității restrânse prima dintre ele nu este valabilă.

Einstein a stabilit că legea de bază a dinamicii relativiste este exprimată de relația (4.19), în care impulsul corpului este definit prin formula (4.18), dar cu o deosebire esențială de cea din dinamica clasică:

Masa corpului nu mai este constantă, ci dependentă de viteză. Această dependență are forma:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (4.20)$$

unde m_0 este **masa de repaus** a corpului (masă în sistemul de referință în care corpul se află în repaus). Masa m este numită **masă relativistă**¹.

Substituind (4.20) în (4.18), obținem expresia pentru **impulsul relativist**:

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (4.21)$$

iar introducând (4.21) în (4.19), stabilim **legea fundamentală a dinamicii relativiste**:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \vec{F}. \quad (4.22)$$

În baza acestei legi se demonstrează că viteza particulei cu masa de repaus m_0 poate fi mărită până la valori destul de apropiate de viteza luminii în vid c , dar ea nu poate deveni egală cu c , masa m crescând nelimitat.

La viteze mici: $v \ll c$, neglijând termenul v^2/c^2 în comparație cu unitatea din (4.20), obținem $m = m_0$, adică la astfel de viteze masa corpului este constantă și legea relativistă (4.22) trece în expresia obișnuită a principiului fundamental al dinamicii clasice.

Einstein a stabilit, de asemenea, relația universală dintre energia totală a corpului E și masa lui m , **interdependența dintre masă și energie**:

$$E = mc^2. \quad (4.23)$$

În cazul corpului aflat în repaus, energia lui

$$E_0 = m_0c^2 \quad (4.24)$$

este numită **energie de repaus**.

Aceste relații denotă faptul că **variației masei Δm îi corespunde neapărat variația de energie ΔE , determinată de relația:**

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \quad (4.25)$$

Importanța deosebită a relației respective va fi ilustrată ulterior prin aplicări în fizica nucleului atomic și a particulelor elementare.

Din formulele (4.18) și (4.23), prin excluderea masei, obținem o relație importantă dintre impulsul relativist și energia totală:

$$\vec{p} = \frac{E}{c^2} \vec{v}. \quad (4.26)$$

Viteza corpului, energia totală și impulsul relativist sunt mărimi relative, se modifică la trecerea de la un sistem de referință inerțial la altul.

Să demonstrăm însă existența unei mărimi absolute (invariante), aceeași în toate sistemele de referință inerțiale.

Ridicând expresia (4.20) la pătrat, obținem:

$$m^2 (1 - v^2/c^2) = m_0^2.$$

După înmulțirea la c^4 , căpătăm:

$$m^2 c^4 - c^2 m^2 v^2 = m_0^2 c^4,$$

iar ținând seama de relațiile (4.23) și (4.18), obținem:

$$E^2 - c^2 p^2 = m_0^2 c^4. \quad (4.27)$$

¹ În prezent, în fizica teoretică se manifestă tendința de a nu se utiliza noțiunea de masă relativistă m , ci de a se numi masă a corpului masa lui de repaus m_0 , una și aceeași în toate sistemele de referință inerțiale.

Mărimea din partea dreaptă a egalității este o constantă, adică nu depinde de sistemul de referință ales. Deci mărimea din partea stângă a egalității este aceeași în orice sistem de referință inerțial și este o mărime invariantă:

$$E^2 - c^2 p^2 = \text{inv.} \quad (4.28)$$

Să analizăm următorul caz: mișcarea cu viteza $v = c$, adică având viteza egală cu viteza luminii în vid.

Din (4.26) avem $p = \frac{E}{c}$. Substituind această valoare în relația (4.27), obținem $m_0^2 c^4 = 0$, de unde rezultă $m_0 = 0$. Prin urmare, **cu viteză egală cu c se pot mișca doar particule având masa de repaus nulă**. Ulterior vom lua cunoștință de asemenea particule.

Să deducem **expresia relativistă pentru energia cinetică**. Particula aflată în repaus posedă energia de repaus $E_0 = m_0 c^2$, iar în mișcare – energia totală $E = m c^2$. Așadar, energia cinetică a ei este egală cu diferența acestor energii:

$$E_c = E - E_0 = (m - m_0) c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right). \quad (4.29)$$

Să demonstrăm că la viteze mici expresia pentru energia cinetică relativistă (4.29) trece în expresia bine cunoscută $E_c = \frac{m_0 v^2}{2}$. În acest scop vom folosi formule ale calculului aproximativ:

$$\sqrt{1 \pm x} \approx 1 \pm \frac{x}{2}$$

pentru $x \ll 1$.

De justețea acestei formule aproximative ne convingem ridicând la pătrat și neglijând termenul de ordinul x^2 , care este mult mai mic decât unitatea.

O altă formulă este

$$\frac{1}{1 \mp x} \approx 1 \pm x$$

pentru $x \ll 1$.

Aducând la numitor comun și neglijând termenul de ordinul x^2 , ne convingem de justețea formulei.

Folosind aceste formule de calcul aproximativ, obținem:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx \frac{1}{1 - \frac{v^2}{2c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}.$$

Substituind această valoare aproximativă în formula (4.29), avem $E_c = \frac{m_0 v^2}{2}$, ceea ce trebuia de demonstrat.

Astfel, am stabilit că la viteze $v \ll c$ formulele teoriei relativității restrânse, care sunt mai generale, trec în formulele respective ale mecanicii clasice. Cu alte cuvinte, mecanica clasică este un caz particular al mecanicii relativiste. Acest exemplu ilustrează **principiul de corespondență**, în conformitate cu care orice teorie nouă, considerată mai profundă, mai generală, cu un domeniu mai larg de aplicabilitate decât teoria veche, trebuie să o includă pe aceasta, ca un caz limită, particular.

În final menționăm o proprietate deosebită a sarcinii electrice: valoarea ei nu se modifică la trecerea de la un sistem de referință la altul, ea nu depinde de viteză. Astfel, **sarcina electrică este mărime invariantă**.

➔ Verificați-vă cunoștințele

- Principiul fundamental al dinamicii clasice este exprimat de două relații echivalente: $m\vec{a} = \vec{F}$ și $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$. Care dintre acestea nu corespunde postulatelor lui Einstein? Argumentați răspunsul.
- Impulsul relativist este mai mare sau mai mic decât impulsul aceleiași particule, calculat conform definiției din mecanica clasică? (În ambele cazuri viteza particulei ia una și aceeași valoare.)
- Care este relația universală dintre masă și energie?
- Cum se definește energia cinetică în cadrul teoriei relativității restrânse?
- Care este esența principiului de corespondență?
- Ce cantitate de cărbune, care are puterea calorică egală cu $2 \cdot 10^7$ J/kg, trebuie arsă pentru a obține o cantitate de căldură egală cu energia ce corespunde masei de repaus, egale cu 1 g?
- Ce cantitate de apă poate fi încălzită de la 20 până la 100 °C, consumând în acest scop cantitatea de căldură egală cu energia de repaus a corpului cu masa de 1 mg? Căldura specifică a apei este egală cu 4 200 J/(kg · K).
- La ce valoare a vitezei unei particule energia cinetică a ei este de două ori mai mare decât energia de repaus?

5.1. RADIAȚIA TERMICĂ. IPOTEZA CUANTELOR

Să precizăm două noțiuni esențiale. Prin **radiație electromagnetică** sau simplu **radiație** se subînțelege totalitatea undelor electromagnetice provenite de la anumite corpuri, iar prin **emisie** – fenomenul de „producere” a radiației.

Cunoașteți că **lumina este de natură electromagnetică** – undele de lumină sunt cele electromagnetice care, nimerind în ochiul uman, produc senzație vizuală.

Sursele de lumină sunt corpurile care produc lumină, adică emit unde electromagnetice. Corpurile, la rândul lor, sunt formate din atomi, deci ei de fapt emit aceste unde. Evidențiind trăsăturile generale ale fenomenului de emisie, se va ține seama de faptul că undele electromagnetice transportă energie. În calitate de exemplu servește transmiterea căldurii prin radiație (acest fenomen l-ați studiat în clasa a VIII-a) de la Soare spre Pământ etc. Prin urmare, atomul, emițând unde electromagnetice, le cedează energie, micșorându-și cu valoarea respectivă energia, conform legii conservării și transformării energiei.

În stare stabilă, numită, de regulă, **stare fundamentală**, energia atomului este minimă. Atomul poate să emită energie, dacă în prealabil a primit din exterior o cantitate de energie și a trecut din starea fundamentală într-o stare cu energie mai mare. Astfel de stări ale atomului sunt numite **stări excitate**, iar procesul de trecere în ele – **excitare a atomului**. Atomul excitat nu este stabil. El emite unde electromagnetice care transportă surplusul de energie primit de atom la excitare și trece în stare cu energie mai mică.

Există mai multe modalități de excitare a atomilor, deci și tipuri de radiații.

Radiația emisă de atomii excitați pe seama surselor exterioare de energie (cu excepția încălzirii) este numită radiație luminescentă.

Radiația emisă de corp pe seama energiei sale interne este numită radiație termică.

Să analizăm fenomenul de emisie a radiației termice pornind de la faptul că atomii (moleculele) corpului se află în mișcare termică continuă. Vitezele atomilor la temperatura dată au valori diferite: unii au viteze mai mari, alții – mai mici. În urma interacțiunilor (ciocnirilor), atomii în mișcare primesc unii de la alții energie suplimentară și trec în stare excitată. Astfel, excitarea atomilor se produce pe seama energiei interne a corpului. Trecerea atomilor excitați în stări cu energii mai mici este însoțită de emisia undelor electromagnetice cu diverse lungimi de undă. Ca rezultat, **spectrul radiației electromagnetice emise de corpurile încălzite este continuu.**

La ridicarea temperaturii mișcarea termică se intensifică, atomii posedă energii cinetice mai mari. În consecință, cresc energiile atomilor excitați, iar emisia radiației termice se amplifică. Concomitent, ridicarea temperaturii este însoțită de extinderea diapazonului de lungimi de undă ale radiației emise. Dacă la temperatura camerei corpurile emit radiație infraroșie, invizibilă ochiului uman, la temperaturi de circa 500–600 °C ele emit și radiație de culoare roșie, iar la ridicarea ulterioară a acesteia își modifică culoarea de la roșie la oranj, apoi la galbenă și tot așa până la cea albă.

Corpurile nu numai emit, dar și absorb radiația incidentă pe ele, gradul de absorbție fiind în funcție de natura substanței.

Corpul care absoarbe absolut toată radiația incidentă pe suprafața lui este numit *corp absolut negru*.

Radiația termică se deosebește esențial de cea luminescentă prin faptul că se poate afla în echilibru termic cu corpurile cu care interacționează.

Ne imaginăm o cavitate în interiorul unui corp A înconjurat cu un înveliș adiabatic (fig. 5.1). El nu face schimb de energie cu mediul înconjurător. Admitem că

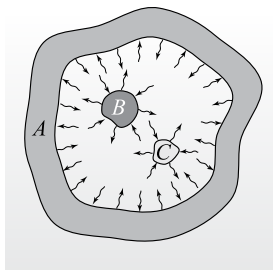


Fig. 5.1

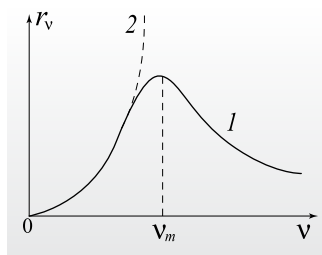
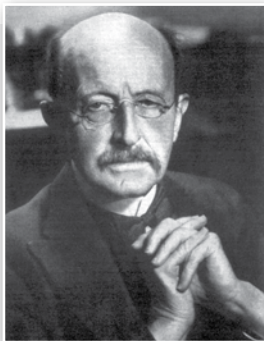


Fig. 5.2



MAX KARL ERNST
LUDWIG PLANCK
(1858–1947)

fizician teoretician german

A efectuat primele cercetări în domeniul termodinamicii, a studiat diferite aplicații ale principiului al doilea, indicând semnificația acestui principiu pentru procesele ireversibile. Cel mai important rezultat al său (a. 1900) se referă la teoria radiației termice de echilibru a corpului negru. A lansat ipoteza cuantelor, ceea ce i-a permis să deducă expresia corectă pentru densitatea spectrală a emitanței, iar în baza acesteia să deducă legile experimentale ale radiației termice stabilite anterior. Pentru aceste lucrări în anul 1918 a fost distins cu Premiul Nobel. Adept fidel al teoriei relativității (termen propus de Planck), a dedus ecuațiile dinamicii relativiste (a. 1906), a obținut expresia relativistă pentru energia și impulsul electronului. A efectuat cercetări în domeniul termodinamicii statistice relativiste, a introdus în circuitul științific două constante universale: constanta h numită ulterior *constantă lui Planck* și *constantă lui Boltzmann* (k). Este autor de cărți publicate în domeniul istoriei și metodologiei fizicii și al filosofiei. Max Planck este considerat unul dintre fondatorii fizicii moderne. Lucrările sale au fost înalt apreciate de Albert Einstein.

în interiorul cavității se află două corpuri, B și C , având temperaturi diferite, precum și de cea a corpului A . Toate acestea emit radiație termică în cavitate și absorb parțial radiația incidentă pe ele. Are loc un schimb continuu de energie: corpurile mai calde emit mai multă energie decât absorb, cele reci, invers, absorb mai mult decât emit. În consecință, primele corpuri se răcesc, iar celelalte se încălzesc. Acest schimb de căldură prin radiație durează până la egalarea temperaturii corpurilor. Ele trec în stare de echilibru termic atât între ele, cât și cu radiația termică din interiorul cavității. Temperatura radiației termice este egală cu cea a corpurilor.

După stabilirea echilibrului termic, procesele de emisie și de absorbție a radiației continuă, fiecare porțiune de suprafață a corpului emite o cantitate de energie egală cu cea absorbită în același interval de timp. Situația este similară celei ce are loc la echilibrul termic dintre lichid și vaporii săi saturați – numărul de molecule ce trec din starea lichidă a substanței în cea gazoasă este egal cu numărul de molecule ce trec în sens invers. În condiția de echilibru termic, corpul care emite multă energie, de asemenea, absoarbe mai multă energie. Această concluzie, formulată strict în termeni respectivi, este cunoscută ca **legea lui Kirchhoff pentru radiația termică**.

În urma numeroaselor experimente, în anul 1893 au fost formulate legile principale ale radiației termice de echilibru și ale comportării ei la variația temperaturii. A devenit necesară și explicarea teoretică a acestora. S-a constatat că mărimea fizică ce descrie detaliat radiația termică de echilibru este **densitatea spectrală a emitanței r_v** . Ea este numeric egală cu energia radiației emise de o suprafață de arie unitară a corpului într-o unitate de timp având frecvențele într-un interval unitar de frecvențe care conține valoarea ν . Această mărime este în funcție de frecvență și de temperatură, iar cunoașterea explicită a expresiei respective permite să fie deduse legile experimentale.

Experimental a fost obținut graficul ce reprezintă densitatea spectrală a emitanței corpului absolut negru în funcție de frecvență (curba 1 din figura 5.2). Existența maximului denotă faptul că corpul absolut negru aproape nu emite unde electromagnetice cu frecvențe foarte mici și foarte mari. Majoritatea undelor emise au frecvențele în vecinătatea frecvenței ν_m , ce corespunde maximului densității spectrale r_v .

S-au depus eforturi pentru a deduce teoretic, în baza concepțiilor și legităților fizicii clasice, formula

explicită pentru r_v , care ar corespunde curbei experimentale 1 din figura 5.2. Formula obținută este reprezentată grafic prin curba 2 (linia întreruptă). Aceasta este conformă curbei experimentale doar la frecvențe mici ale radiației termice.

Formula ce descrie corect densitatea spectrală a emitanței corpului negru în funcție de frecvență și de temperatură a fost obținută de către Planck. Acesta a lansat o ipoteză neordinară, numită ulterior **ipoteza cuantelor**.

Corpurile emit și absorb energia radiației nu în mod continuu, adică în orice cantități, ci în mod discret, în cantități multiple unei energii minime.

Această cantitate minimă, porțiune, de energie a fost numită **cuantă de energie** (lat. *quantum* „cantitate”). Planck a stabilit că valoarea cuantei de energie ε este direct proporțională cu frecvența radiației ν , anume:

$$\varepsilon = h\nu. \quad (5.1)$$

Aici $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ este o constantă universală, numită ulterior **constantă lui Planck**.

Planck a comunicat rezultatele obținute la ședința Societății Fizicienilor Germani ce a avut loc la Berlin, la 14 decembrie 1900. Această dată este considerată „zi de naștere” a fizicii cuantice, care a determinat dezvoltarea fizicii și a aplicațiilor ei pe întregul parcurs al secolului XX.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care stare a atomului este numită fundamentală? Dar care excitată?
2. Care este deosebirea dintre tipurile de excitare a atomilor în cazurile luminescenței și radiației termice?
3. În ce constă echilibrul dinamic dintre radiația termică de echilibru și corpurile cu care interacționează?
4. Care corp, la temperatura dată, emite mai multă energie în același interval de timp: cel negru sau cel alb?
5. În camera iluminată vedem o cană de faianță de culoare albă, ornată cu un trandafir negru. Încălzită până la o temperatură înaltă (de circa 1 000°C), cana este introdusă într-o cameră întunecată. Care este aspectul ei pentru observatorul din această cameră?
6. Care este caracterul variației energiei atomului din punctul de vedere al ipotezei cuantelor lui Planck?
7. Determinați energia cuantei ce corespunde luminii cu lungimea de undă de 693 nm.
- 8.* Stabiliți frecvența ce corespunde cuantei a cărei energie este egală cu energia cinetică medie a atomului de heliu la temperatura de 527 °C.

5.2. EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN

a. Efectul fotoelectric. Legi experimentale

În anul 1887, H. Hertz, studiind undele electromagnetice obținute în urma descărcării electrice prin scânteii între doi electrozi, a constatat că iluminarea electrodului negativ cu radiație ultravioletă înlesnește descărcarea – la aceeași tensiune electrică ea se produce la o distanță mai mare dintre electrozi decât în lipsa iluminării. În același an observația dată a fost expusă în lucrarea sa „Despre influența luminii ultraviolete asupra descărcării electrice”. În anul 1887, Wilhelm Hallwachs (1859–1922), la sugestia lui Hertz, a realizat un experiment în care a stabilit că în urma iluminării cu radiație ultravioletă a corpului metalic încărcat cu sarcină negativă acesta se descarcă.

Pentru a explica aceste experimente Hallwachs a emis (a. 1888) ipoteza: **radiația ultravioletă provoacă eliberarea din metal a unor particule încărcate**

cu sarcină electrică negativă, iar acestea înlesnesc descărcarea electrică. Pentru fenomenul cercetat a fost propusă denumirea de **efect fotoelectric extern**. În anul 1899, Philipp Lenard (1862–1947), fost asistent al lui Hertz, a stabilit că particulele negative sunt *electroni* (particule descoperite în 1897 de către J.J. Thomson).

Emisia electronilor de către corpurile solide și cele lichide sub acțiunea radiației electromagnetice a fost numită *efect fotoelectric extern*. Electronii emiși sunt numiți *fotoelectroni*, astfel indicându-se modalitatea obținerii lor.

Savanții germani menționați, precum și Augusto Righi (1850–1920) în Italia și Alexandr Stoletov (1839–1896) în Rusia, au studiat legăturile efectului fotoelectric extern. Schema de principiu a instalației utilizate în acest scop este reprezentată în figura 5.3. Tubul T are în interiorul său doi electrozi: catodul C și anodul A . Radiația electromagnetică cade pe catod

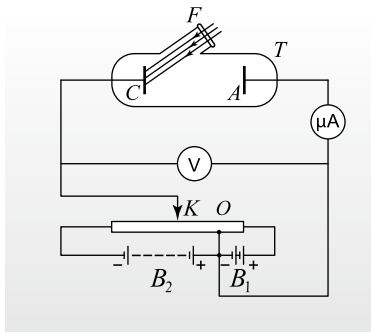


Fig. 5.3

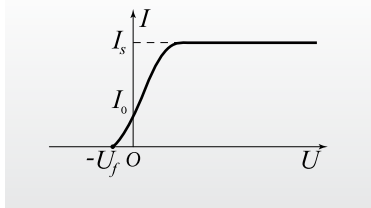


Fig. 5.4

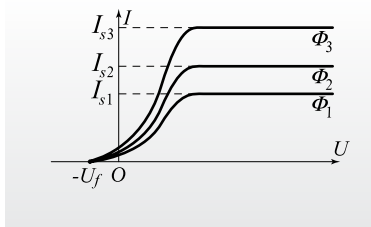


Fig. 5.5

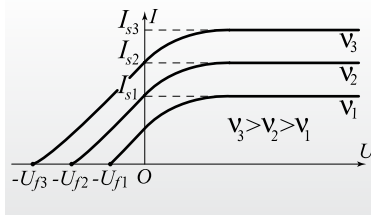


Fig. 5.6

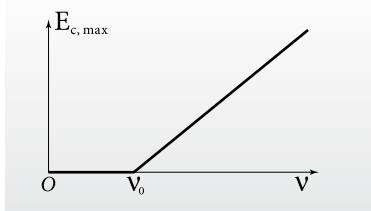


Fig. 5.7

trecând prin ferestraica de cuarț F (cuarțul este transparent pentru radiațiile ultraviolete, dar sticla obișnuită le reține). Aerul din tub este evacuat pentru a nu influența mișcarea fotoelectronilor.

Partea electrică a instalației permite modificarea atât a valorii tensiunii dintre electrozi, cât și a polarității ei. În poziția O a cursorului tensiunea electrică dintre catod și anod este nulă. La deplasarea cursorului K de la poziția O spre stânga, potențialul anodului A este mai mare decât al catodului C , câmpul electric din tub accelerează electronii. Tensiunea acceleratoare (pozitivă) se mărește pe măsură ce cursorul se îndepărtează tot mai mult de poziția O . Dacă însă cursorul K se deplasează spre dreapta de la poziția nulă O , potențialul anodului este mai mic decât cel al catodului și electronii ce se mișcă de la catod spre anod sunt frânați de câmpul electric. Tensiunea de frânare (negativă) U_f devine tot mai mare pe măsura îndepărtării cursorului spre dreapta.

Se modifică tensiunea U dintre catod și anod, măsurată cu voltmetrul V și se înregistrează valorile respective ale intensității curentului I , numit frecvent și **fotocurent**, indicate de microampermetrul μA . În timpul fiecărui experiment fasciculul de radiație monocromatică incidentă pe catod se menține invariabil. În baza datelor obținute a fost trasată caracteristica curent-tensiune (fig. 5.4).

Să analizăm detaliat caracterul dependenței intensității curentului electric prin tub de tensiunea dintre electrozi. Se observă că prin tub circulă curent electric și în lipsa tensiunii dintre catod și anod: la $U = 0$ avem $I = I_0$. Aceasta denotă faptul că electronii emiși de catod sub influența radiației electromagnetice incidente pe el posedă energii cinetice, ceea ce le permite să ajungă la anod nefiind atrași de acesta.

Creșterea tensiunii pozitive U (ramura din dreapta originii O) este însoțită inițial de creșterea lentă a intensității I , ceea ce se explică prin faptul că la mărirea tensiunii mai mulți fotoelectroni ajung la anod. Creșterea intensității însă este limitată de valoarea maximă I_s – **intensitatea curentului de saturație**. În aceste condiții toți electronii (N_f) emiși de catod într-o unitate de timp ajung la anod. Fiecare electron transportă o sarcină electrică egală în modül cu sarcina elementară e , deci în fiecare secundă prin tub este transportată sarcina electrică $N_f e$. Rezultă că intensitatea curentului de saturație

$$I_s = N_f e. \quad (5.2)$$

În domeniul tensiunilor negative potențialul catodului este mai mare decât cel al anodului. Prin urmare, fotoelectronii ce se deplasează spre anod sunt frânați de câmpul electric din tub. Un număr tot mai mic de electroni, cei cu energii cinetice mai mari, ajung la anod. Ca rezultat, intensitatea curentului se micșorează. La o valoare U_f a tensiunii inverse curentul devine nul: electronii cu energia cinetică maximă $E_{c, \max}$ sunt frânați și se opresc în vecinătatea nemijlocită a anodului. Tensiunea respectivă U_f este numită **tensiune de frânare sau de stopare**. În aceste condiții lucrul câmpului electric eU_f este egal cu energia cinetică maximă a fotoelectronilor:

$$E_{c, \max} = eU_f. \quad (5.3)$$

În figura 5.5. sunt reprezentate caracteristicile curent-tensiune pentru valori diferite ale fluxului de energie Φ al radiației incidente (al energiei incidente pe catod într-o unitate de timp) la una și aceeași frecvență ν . S-a constatat că intensitatea curentului de saturație I_s este direct proporțională cu fluxul de energie: $I_s \sim \Phi$. Acest rezultat este cunoscut ca

legea întâi a efectului fotoelectric: intensitatea curentului fotoelectric de saturație este direct proporțională cu fluxul de energie al radiației incidente pe catod când frecvența ei rămâne constantă.

Conform relației (5.2), această lege poate fi formulată, în același mod, și pentru numărul de fotoelectroni N_f emiși de catod într-o unitate de timp.

Caracteristicile curent-tensiune corespunzătoare diferitor frecvențe ν ale radiației incidente la aceeași valoare a fluxului de energie incident sunt reprezentate în figura 5.6. Determinând valorile tensiunii de frânare din figurile 5.5 și 5.6 și utilizând (5.3), se pot calcula valorile energiei cinetice maxime a fotoelectronilor. În baza valorilor obținute s-a construit graficul care exprimă energia cinetică maximă în funcție de frecvența radiației incidente (fig. 5.7). La frecvențe mai mici decât valoarea ν_0 efectul fotoelectric lipsește. Această valoare este numită **frecvență de prag** și depinde de natura substanței din care este confecționat catodul. Ea este numită, de asemenea, **prag roșu al efectului fotoelectric**.

Generalizând rezultatele menționate, pot fi formulate următoarele legi ale efectului fotoelectric (Lenard, a. 1902):

legea a doua a efectului fotoelectric: energia cinetică maximă a fotoelectronilor este în funcție liniară de frecvența radiației electromagnetice incidente și nu depinde de fluxul de energie al acesteia;

legea a treia a efectului fotoelectric: efectul fotoelectric extern se produce numai dacă frecvența radiației incidente nu este mai mică decât cea de prag ν_0 , specifică fiecărui metal.

O proprietate deosebită a acestui efect este faptul că fotocurentul începe a circula imediat după ce radiația electromagnetică cade pe catod. Electronul din metal primește momentan energia necesară pentru a ieși în afara metalului și nu o acumulează pe parcursul unui interval de timp. Aceasta permite să formulăm

legea a patra a efectului fotoelectric: efectul fotoelectric extern este lipsit de inerție.

Legile expuse sunt aparent legi simple. În cadrul fizicii clasice poate fi explicată doar prima din ele: cu cât energia radiației incidente ce provoacă efectul fotoelectric extern este mai intensă, cu atât mai mulți fotoelectroni părăsesc metalul. Celelalte legi însă nu sunt conforme cu legitățile fizicii clasice și nu pot fi explicate în cadrul ei.

b. Fotonii. Teoria cuantică a efectului fotoelectric extern

Pentru a explica legitățile efectului fotoelectric, A. Einstein a apelat la ipoteza cuantelor și a admis că proprietățile cuantice sunt proprii radiației (a. 1905). El scria: „...cred că fenomenele în care se manifestă emisia sau transformarea luminii se pot explica mai bine dacă presupunem că energia luminii se distribuie discret în spațiu... Energia fascicului de lumină ce se propagă dintr-un punct nu se distribuie în mod continuu într-un volum tot mai mare, ci se constituie dintr-un număr finit de cuante de energie care sunt localizate în spațiu și sunt indivizibile, fiind emise sau absorbite numai ca un tot întreg”.

Astfel, Einstein a ajuns la concluzia că există particule de lumină indivizibile, a căror energie este determinată de formula (5.1). Ulterior, în anul 1929, aceste particule au fost numite **fotoni** (gr. *photos* „lumină”). În procesele de emisie (absorbție) se emite (se absoarbe) un număr întreg de fotoni.

Să remarcăm caracteristicile fizice ale fotonului.

Energia fotonului este egală cu energia cuantei (5.1):

$$\varepsilon_f = h\nu. \quad (5.4)$$

Din formula (4.23), care reprezintă interdependența dintre masă și energie $E = mc^2$, exprimăm **masa fotonului**:

$$m_f = \frac{\varepsilon_f}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (5.5)$$

Viteza fotonului în vid este egală cu viteza luminii:

$$v_f = c. \quad (5.6)$$

Conform expresiei masei ca funcție de viteză $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$, exprimăm masa de repaus $m_0 = m\sqrt{1-v^2/c^2}$. Substituind viteza fotonului $v_f = c$, pentru **masa de repaus a fotonului** obținem:

$$m_{0f} = 0. \quad (5.7)$$

Fotonul există numai în mișcare cu viteza luminii, nu poate fi oprit și nu există în repaus.

Impulsul fotonului se exprimă prin relația:

$$p_f = m_f c = \frac{h\nu}{c}. \quad (5.8)$$

Din punct de vedere electric, fotonul este o particulă neutră. **Sarcina electrică a fotonului** este nulă:

$$q_f = 0. \quad (5.9)$$

Folosind relația dintre viteza de propagare a undei c , lungimea de undă λ și frecvența ν , anume $\nu = \frac{c}{\lambda}$, în continuare expunem expresiile pentru energia, masa și impulsul fotonului prin lungimea de undă:

$$\varepsilon_f = \frac{hc}{\lambda}, \quad m_f = \frac{h}{c\lambda}, \quad p_f = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.10)$$

Conform concepției lui Einstein, **lumina prezintă un flux de fotoni**. Aceasta permite să fie explicate, relativ simplu, legile efectului fotoelectric extern. Se consideră că **fiecare electron este emis în urma absorbției unui singur foton**.

La un flux mai mare de energie a radiației incidente pe catod, pe acesta cad mai mulți fotoni. Ca rezultat, catodul va emite mai mulți electroni într-o unitate de timp, intensitatea curentului fotoelectric de saturație se amplifică – **legea întâi**.

Fotonul, interacționând cu electronul substanței (din vecinătatea suprafeței acesteia), îi transmite momentan toată energia sa. Dacă electronul se mișcă spre suprafața corpului, acesta iese, practic, imediat din corp. Prin urmare, efectul fotoelectric este lipsit de inerție – **legea a patra** a efectului fotoelectric.

Pentru a părăsi corpul, electronul trebuie să efectueze un lucru mecanic L_e , învingând forțele electrice care acționează asupra lui din partea ionilor pozitivi ai substanței și-l rețin în corp. Acest lucru mecanic L_e este numit **lucru de extracție** sau **de ieșire**. Valoarea lui depinde de natura substanței și se exprimă, de regulă, în electron-volți (eV). Amintim că $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Lucrul de extracție pentru majoritatea metalelor este de ordinul a câțiva electron-volți. De exemplu, la potasiu este egal cu 2,2 eV, la litiu – cu 2,3 eV, la zinc – cu 4,0 eV, la argint – cu 4,3 eV, la platină – cu 5,3 eV. Valoarea lucrului de extracție depinde și de calitatea prelucrării suprafeței corpului.

În urma interacțiunii dintre fotonul incident și electronul substanței, fotonul dispare, iar electronul preia energia $h\nu$ a acestuia. În conformitate cu legea

conservării și transformării energiei, electronul ieșit în afara metalului posedă energie cinetică E_c mai mică decât energia sa în interiorul corpului cu valoarea lucrului de extracție L_e , adică:

$$E_c = h\nu - L_e. \quad (5.11)$$

Această energie o posedă fotoelectronii extrași de lângă suprafața corpului. Cei extrași din interiorul lui, în mișcarea spre suprafață, pot pierde o parte din energie în urma ciocnirilor cu alți electroni. Acești electroni au în afara corpului o energie cinetică mai mică decât valoarea determinată din (5.11). Conchidem că energia cinetică din (5.11) este **energie cinetică maximă** a fotoelectronilor.

Introducând în (5.11) expresia energiei cinetice $E_c = \frac{mv_{\max}^2}{2}$, transcriem relația dată sub forma

$$h\nu = L_e + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (5.12)$$

Ultima relație, precum și (5.11), se numește **ecuația lui Einstein pentru efectul fotoelectric extern**. Ea poate fi considerată expresie matematică a **legii a doua a acestui efect**. Energia cinetică maximă a fotoelectronilor depinde doar de frecvența radiației incidente și de natura substanței care emite electronii.

Energia cinetică este mărime pozitivă sau nulă pentru corpul aflat în repaus. Din (5.12) rezultă condiția pentru frecvența ν a radiației ce produce emisia fotoelectronilor: $h\nu - L_e \geq 0$, adică

$$\nu \geq \frac{L_e}{h} = \nu_0. \quad (5.13)$$

Astfel, s-a obținut cea de-**a treia lege a efectului fotoelectric**, precum și relația dintre frecvența de prag ν_0 și lucrul de extracție L_e .

Graficul care reprezintă energia cinetică maximă a fotoelectronilor (determinată experimental în baza relației (5.3)) în funcție de frecvență este, conform ecuației lui Einstein, o funcție liniară, în concordanță cu graficul obținut pe cale experimentală (fig. 5.7). Coeficientul de proporționalitate h este o constantă fundamentală. Prin urmare, graficele care exprimă relația dată pentru substanțe diferite sunt segmente de dreaptă paralele între ele.

Astfel, Einstein, dezvoltând și modificând interpretarea ipotezei cuantelor, a reușit să explice legitățile efectului fotoelectric extern. Acesta a fost al doilea succes al teoriei, având la bază ipoteza cuantelor. El a fost urmat de multe alte realizări ale fizicii cuantelor, care a dominat dezvoltarea fizicii în secolul XX.

c. Celule fotoelectrice

Aplicațiile efectului fotoelectric sunt determinate de faptul că acesta permite modificarea intensității curentului în circuit variind fluxul de radiație electromagnetică incidentă pe catod. Dispozitivele care funcționează în baza acestui efect sunt numite **celule fotoelectrice**.

Celula fotoelectrică cu vid reprezintă un balon de sticlă, pe o parte din suprafața interioară a căruia este depus un strat subțire de metal care conduce bine curentul electric (fig. 5.8). Acest strat este acoperit cu un alt strat fotosensibil din metal, oxid de bariu, compuși ai ceziului cu stibiu sau din altă substanță cu lucru de extracție mic pentru ca efectul să se producă și sub acțiunea radiației vizibile. Acest strat dublu este catodul (1). În centrul celulei este plasat anodul (2) de forma unui inel. Partea balonului din fața catodului este transparentă, prin această lumina cade din exterior pe catod.

Celula fotoelectrică este folosită în cuplu cu un releu electromagnetic, al cărui element principal este un electromagnet care închide sau deschide, în funcție de iluminarea catodului, un circuit electric. Astfel de circuite dirijează dispozitivele ce efectuează acțiuni prevăzute (fig. 5.9).

Celulele cu vid acționează, practic, fără inerție, ceea ce condiționează aplicarea lor în instalații care necesită o reacționare rapidă. De exemplu, la numărarea unor obiecte în mișcare, la suspendarea automată a funcționării unor instalații în cazul în care muncitorii ar pătrunde în zone interzise – cu pericol pentru viață, la aprinderea și stingerea automată a farurilor maritime și a luminii stradale etc. Un neajuns al celulelor fotoelectrice cu vid este valoarea mică a curentului electric, ceea ce necesită montarea unui amplificator între celulă și releu.

Intensitatea curentului este mai mare prin **celulele fotoelectrice cu gaz**, baloanele cărora au aceeași construcție ca cele cu vid, dar conțin gaze inerte, mai frecvent argon, la presiuni joase (de circa 10 Pa). Fotoelectronii în calea lor spre anod ionizează prin ciocnire atomii gazului. Astfel, numărul de electroni liberi crește, deci și intensitatea curentului se mărește. Aceste celule posedă o anumită inerție, condiționată de necesitatea unui interval de timp în care se produce ionizarea.

Din clasa a XI-a cunoașteți principiul de funcționare a **fotorezistoarelor** – dispozitive semiconductoare, a căror rezistivitate se micșorează când ele

se află sub influența radiației luminoase. Sub acțiunea radiației unui electroni părăsesc legăturile covalente dintre atomi, ca rezultat crește concentrația electronilor de conducție și a golurilor, ceea ce condiționează micșorarea rezistivității. Electronii de conducție rămân în interiorul semiconductorului și din acest motiv efectul de părăsire a legăturilor covalente de către electroni este numit **efect fotoelectric intern**. Dispozitivele în care este utilizat acest efect se numesc **celule fotoelectrice semiconductoare**. Celulele semiconductoare sunt mai sensibile la radiație decât cele cu vid. Ele funcționează atât în domeniul vizibil, cât și în cel infraroșu. Celulele fotoelectrice semiconductoare au aplicații similare celulelor cu vid.

Efectul fotoelectric intern este aplicat, de asemenea, în **celula fotovoltaică** – o sursă de curent electric. Aceasta reprezintă o joncțiune *p-n* semiconductoră asupra regiunii de contact a căreia este orientat un fascicul de lumină (fig. 5.10). Prin efect fotoelectric intern unii electroni părăsesc legăturile covalente dintre atomi, deci crește concentrația electronilor de conducție și a golurilor. Sub acțiunea câmpului electric existent în regiunea joncțiunii golurile din regiunea *n* trec în regiunea *p*, iar electronii de conducție – în sens invers. Ca rezultat, potențialul regiunii *p* devine mai mare decât cel al regiunii *n*, între ele stabilindu-se o diferență de potențial. Prin consumatorul conectat la regiunile joncțiunii circulă curent electric. Astfel, celula fotovoltaică reprezintă o sursă de curent electric. Ea transformă energia luminii direct în energie electrică. Din celulele fotovoltaice se montează baterii solare, care se utilizează atât în cazul navelor cosmice, cât și în condiții terestre.

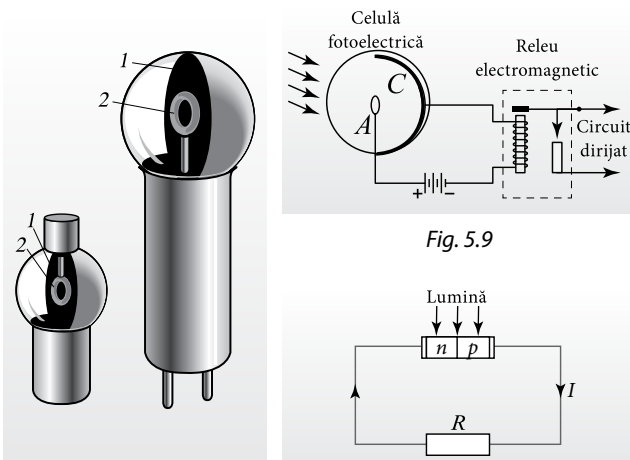


Fig. 5.8

Fig. 5.10

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă efectul fotoelectric extern?
2. Cum se explică existența, la tensiune nulă, a curentului fotoelectric dintre electrozi?
3. Care factor determină existența curentului de saturație? Cum poate fi modificată valoarea lui?
4. Cum poate fi determinată experimental energia cinetică maximă a fotoelectronilor?
5. Determinați energia fotonului ce corespunde luminii de culoare verde având lungimea de undă egală cu 550 nm.
6. Calculați impulsul fotonului cu energia de $2,85 \cdot 10^{-19}$ J. Ce culoare are lumina respectivă?
7. Determinați lungimea de undă ce corespunde pragului roșu pentru argint.
8. Catodul din potasiu este iluminat cu radiație electromagnetică având frecvența de $6,3 \cdot 10^{14}$ Hz. Determinați energia cinetică maximă a fotoelectronilor emiși.
9. Să se determine viteza maximă a fotoelectronilor emiși de catod sub acțiunea radiației electromagnetice cu lungimea de undă egală cu 0,475 μm , dacă lungimea de undă de prag roșu pentru materialul catodului este de 0,566 μm .
10. Care sunt avantajele și dezavantajele celulei fotoelectrice cu vid față de celula cu gaz inert?
11. Prin ce se deosebește efectul fotoelectric intern de cel extern?

5.3.* PRESIUNEA LUMINII

În lucrarea sa fundamentală, *Tratat despre electricitate și magnetism* (a. 1873), Maxwell a expus teoria câmpului electromagnetic, în cadrul căreia a prezis existența undelor electromagnetice și a descris proprietățile lor. Maxwell a demonstrat că aceste unde sunt transversale, vectorul electric \vec{E} și cel magnetic \vec{B} fiind perpendiculari atât între ei, cât și pe direcția vitezei \vec{v} de propagare a undei. Sensul vectorului \vec{v} coincide cu sensul înaintării burghiului cu filet de dreapta la rotirea mânerului său de la vectorul \vec{E} spre \vec{B} . Maxwell a demonstrat, de asemenea, că undele electromagnetice, deci și cele luminoase, produc presiune pe suprafața pe care cad.

Pentru a explica existența presiunii luminii, considerăm suprafața plană S a unui corp și o undă electromagnetică ce cade perpendicular pe ea (*fig. 5.11*). În figură vectorul \vec{E} are același sens cu axa Ox , vectorul \vec{B} – cu axa Oy și vectorul \vec{v} – cu axa Oz . După o semiperioadă, vectorii \vec{E} și \vec{B} au sens opus axelor respective, vectorul vitezei \vec{v} nu-și modifică însă sensul.

Câmpul electric al undei imprimă accelerație purtătorilor liberi de sarcină electrică din corp, mișcarea lor devenind ordonată. În sensul vectorului electric \vec{E} circulă curent electric I care variază periodic în timp, asemenea vectorului \vec{E} al undei. În *figura 5.11* curentul electric I are sensul axei Ox . Aplicând regula mâinii stângi, constatăm că forța electromagnetică \vec{F} , ce acționează asupra acestui curent din partea câmpului magnetic \vec{B} al undei, este orientată spre interiorul corpului, în

sensul axei Oz . După o semiperioadă, vectorii \vec{E} și \vec{B} își schimbă sensurile în opuse, dar se poate verifica ușor că sensul forței \vec{F} rămâne același. Astfel,

unda luminoasă ce cade perpendicular pe suprafața corpului produce presiune determinată de forța electromagnetică (F).

Pentru valoarea presiunii, Maxwell a obținut expresia:

$$p = (1 + R) w, \quad (5.14)$$

unde w este densitatea volumică a energiei undei electromagnetice (energia câmpului electromagnetic dintr-o unitate de volum), iar R este coeficientul de reflexie, egal cu partea de energie care se reflectă de la suprafața corpului.

În cazul corpului negru $R = 0$ și $p_n = w$, iar în cazul oglinzii $R = 1$ și $p_o = 2w$. În acest fel, presiunea produsă de undă asupra corpului reflector este de două ori mai mare decât cea produsă asupra corpului negru.

Primul studiu experimental al presiunii luminii a fost realizat de către fizicianul rus Piotr Lebedev (1866–1912), care a măsurat presiunea produsă asupra corpurilor solide (a. 1900). Partea principală a instalației era o balanță de torsiune cu fir subțire de care era suspendată o tijă având fixate simetric, lateral, perechi de aripioare ușoare (*fig. 5.12*). Aripioarele dintr-o parte a tijei erau negre, iar de cealaltă parte – strălucitoare. Firul de suspensie și tija se aflau într-un vas din care era evacuat aerul pentru a reduce la minim influența ciocnirilor moleculelor de aer cu aripioarele asupra experimentului.

Căzând pe aripioare, lumina exercită asupra aripioarelor strălucitoare o presiune de aproximativ de două ori mai mare decât asupra celor negre, conform formulei (5.14). Drept rezultat, tija se rotește și răsucea firul elastic de care era suspendată. Măsurând unghiul de rotație a tijei și cunoscând caracteristicile instalației (lungimea și diametrul firului, dimensiunile aripioarelor, distanța dintre centrele lor și axa de rotație etc.), Lebedev a calculat presiunea produsă de lumină. S-a constatat că rezultatele obținute coincid cu cele ale lui Maxwell cu o precizie de circa 10%.

Determinarea experimentală a presiunii luminii a fost un argument forte în favoarea teoriei câmpului electromagnetic a lui Maxwell și a consecințelor ei.

Existența presiunii luminii se explică și în cadrul teoriei fotonice. Calculele se efectuează ca în cazul presiunii produse de gaz asupra pereților vasului în care se află. Aici se iau în considerare ciocnirile dintre fotoni și corpurile pe care aceștia cad. În urma ciocnirilor impulsurile fotonilor variază, deci asupra lor acționează forțe din partea corpurilor pe care ei cad. În baza principiului acțiunii și reacțiunii, conchidem că fotonii acționează asupra corpurilor pe care cad și produc presiune.

Faptul că presiunea produsă de lumină asupra corpului reflector este de două ori mai mare decât cea produsă de aceeași lumină asupra corpului negru se explică relativ simplu: variația impulsului fotonului ce se reflectă de la suprafața pe care cade perpendicular este de două ori mai mare decât a fotonului absorbit, al cărui impuls final este zero. În cadrul teoriei fotonice pentru presiunea luminii se obține aceeași expresie (5.14) ca și în teoria câmpului electromagnetic.

Astfel, presiunea luminii poate fi explicată atât din punctul de vedere al teoriei câmpului electromagnetic, cât și din cel al teoriei fotonice.

În concluzie menționăm că unele fenomene ca radiația termică, efectul fotoelectric etc. pot fi expli-

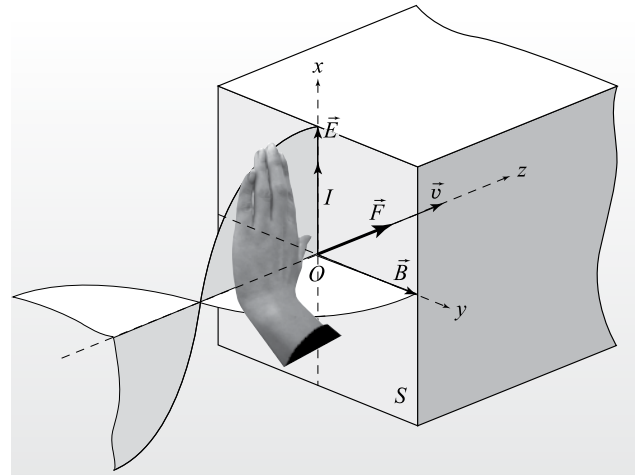


Fig. 5.11

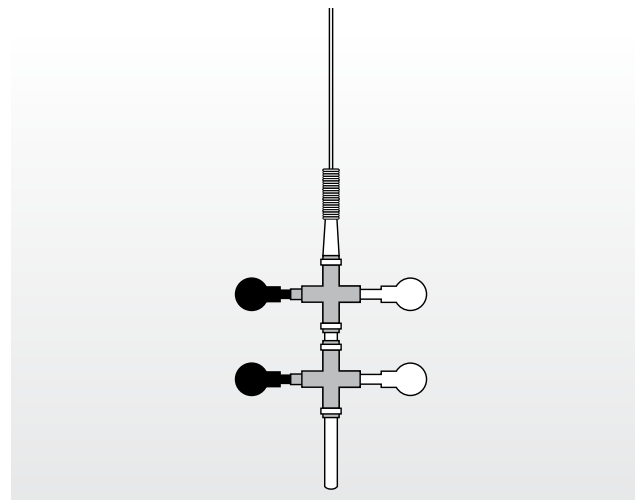


Fig. 5.12

cate numai în cadrul teoriei fotonice (corpulare) a luminii. Totodată, interferența, difracția și polarizarea luminii se explică doar în cadrul teoriei ondulatorii. Rezultă că lumina posedă atât proprietăți ondulatorii, cât și corpusculare. **Natura luminii s-a dovedit a fi complexă, purtând un caracter dual: undă-corpusul.**

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Cum se explică existența presiunii luminii în cadrul teoriei câmpului electromagnetic?
2. Care este explicația presiunii luminii din punctul de vedere al teoriei fotonice?
3. Cum explică teoria fonică faptul că presiunea asupra suprafeței strălucitoare este de două ori mai mare decât asupra celei negre?
4. Din ce cauză partea mobilă a instalației lui Lebedev se rotește la căderea luminii pe aripioarele ei?
5. Care ar fi explicația cu privire la forma cozii cometelor față de cea a nucleului lor?

5.4.* PROPRIETĂȚILE ONDULATORII ALE MICROPARTICULELOR. DUALISMUL UNDĂ-CORPUSCUL

a. Undele de Broglie. Difracția electronilor

Mai sus s-a demonstrat că lumina posedă atât proprietăți ondulatorii, cât și corpusculare, adică are un caracter dual: **undă-corpusul**. Relațiile dintre caracteristicile ondulatorii și cele corpusculare, adică dintre lungimea de undă λ și frecvența luminii ν , pe de o parte, și impulsul p_f și energia fotonului ε_f , pe de altă parte, sunt exprimate de formulele (5.4) și (5.10):

$$\varepsilon_f = h\nu, \quad p_f = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.15)$$

În anul 1923, tânărul fizician francez Louis de Broglie (1892–1987) a prezentat Academiei de Științe din Paris un memoriu, în care a expus o idee îndrăznească:

Particulele de substanță posedă proprietăți ondulatorii.

Anume particulei caracterizate de impulsul $p=mv$ și energia E i se asociază o undă, ulterior numită **undă de Broglie**, a cărei lungime de undă λ și frecvență ν se exprimă prin relațiile (5.15) stabilite pentru fotoni:

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad \nu = \frac{E}{h}. \quad (5.16)$$

Referitor la ipoteza lui Louis de Broglie, Einstein a menționat că aceasta este „o primă rază timidă de lumină orientată asupra uneia dintre cele mai întunecate enigme ale fizicii”.

Mai târziu, în legătură cu ipoteza sa, Louis de Broglie scria: „În optică pe parcursul unui secol a fost neglijat aspectul corpuscular în comparație cu cel ondulatoriu: nu s-a comis oare o eroare inversă în cazul substanței? Nu am greșit noi oare luând în considerare prea mult aspectul corpuscular și neglijându-l pe cel ondulatoriu? După multe cugetări și raționamente, deodată eu am înțeles (în anul 1923) că descoperirea efectuată de Einstein în 1905 trebuie generalizată și extinsă asupra tuturor particulelor materiale, în caz particular, a electronilor”.

O ipoteză devine adevăr științific doar dacă este confirmată experimental. În cazul ipotezei lui Louis de Broglie un astfel de experiment ar fi cel în care

s-ar observa un fenomen ce poate fi explicat doar în cadrul teoriei ondulatorii, de exemplu, difracția particulelor. Se știe că difracția luminii se observă numai în cazul în care dimensiunea obstacolului, de exemplu, lățimea fantei sau perioada rețelei de difracție, este de ordinul lungimii de undă.

Să estimăm lungimea de undă de Broglie pentru un electron care a parcurs o tensiune acceleratoare $U = 100$ V. Egalăm energia cinetică a electronului cu lucrul câmpului electric: $\frac{m_e v^2}{2} = eU$, unde masa electronului $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg și sarcina electrică elementară $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Viteza electronului $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$ și impulsul $p = m_e v = \sqrt{2em_e U}$.

Pentru lungimea de undă de Broglie din (5.16) se obține:

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}}. \quad (5.17)$$

În urma calculului numeric se obține valoarea $\lambda_B \approx 1,2 \cdot 10^{-10}$ m.

Rețele de difracție cu perioadă de acest ordin nu pot fi confecționate artificial, dar se întâlnesc în natură. Acestea sunt rețelele cristaline a căror perioadă este de ordinul diametrului atomului, adică de ordinul 10^{-10} m. În cazul particulelor de masă mai mare, după cum rezultă din (5.17), lungimea de undă de Broglie este și mai mică, deci difracția lor este și mai greu de observat. De aceea relatăm, de obicei, despre **proprietățile ondulatorii ale microparticulelor**. Numai la ele pot fi observate astfel de proprietăți.

În anul 1927, fizicienii americani Clinton Joseph Davisson (1881–1958) și Lester Halbert Germer (1896–1971) au realizat un experiment în care un fascicul de electroni era orientat pe suprafața unui monocristal de nichel și erau înregistrați electronii reflectați. Tensiunea la care aceștia erau accelerați avea ordinul de circa 50 V. Electronii nu puteau pătrunde adânc în interiorul metalului și se reflectau de la straturile de atomi de la suprafața lui.

Notăm cu θ unghiul dintre viteza electronilor incidenti și suprafața metalului, egal cu unghiul format de viteza electronilor reflectați și aceeași suprafață. În *figura 5.13* sunt reprezentate două straturi atomice de la suprafața metalului și doi electroni ce se reflectă de la atomii A și B care aparțin acestor straturi. În figură sunt expuse simbolic și undele de Broglie asociate acestor electroni.

Din figură observăm că electronul reflectat de la atomul B parcurge o distanță mai mare decât cel reflectat de la atomul A . Dacă d este distanța dintre straturile de atomi, atunci diferența distanțelor parcurse $\Delta = CB + BD = 2CB = 2AB \sin\theta = 2d \sin\theta$.

Din punct de vedere ondulatoriu, reflexia este maximă în direcțiile pentru care diferența Δ este egală cu un număr întreg de lungimi de undă, adică în direcțiile ce satisfac condiția

$$2d \sin\theta = m\lambda_B, \quad (5.18)$$

unde $m = 1, 2, 3, \dots$.

Această condiție a fost verificată în experimentul Davisson–Germer, a cărui schemă este prezentată în figura 5.14. Filamentul F , parcurs de curent electric, se încălzește și emite electroni, adică joacă rolul de catod. Anodul A are o astfel de construcție încât permite evidențierea unui fascicul îngust de electroni care sunt accelerați de câmpul electric creat între catod și anod. Partea instalației în care se obține fasciculul de electroni este denumită **tun electronic** și este similar celui din tuburile cu fascicul electronic utilizate în televizoare, în monitoarele calculatoarelor etc. Fasciculul de electroni este orientat pe suprafața cristalului de nichel B .

Electronii reflectați de cristal nimeresc în interiorul cilindrului C unit cu un galvanometru. Cilindrul se poate deplasa astfel încât să înregistreze electronii reflectați în diferite direcții.

Experimentele au confirmat condiția (5.18), în care lungimea de undă de Broglie era calculată în baza formulei (5.17). Pentru a demonstra că proprietățile ondulatorii nu sunt specifice numai electronilor, ulterior ele au fost observate și la particule încărcate cu mase mai mari – protoni, ioni de heliu etc., precum și la particule neutre – neutroni, atomi.

Rezumând cele expuse mai sus, conchidem

atât undele electromagnetice, cât și microparticulele posedă proprietăți ondulatorii și corpusculare.

În natură nu există nici unde, nici particule, ci obiecte care pot manifesta în unele condiții proprietăți ondulatorii, iar în altele – proprietăți corpusculare. Această proprietate universală a naturii este numită **dualism: undă–corpusul.**

Unul din creatorii mecanicii cuantice, fizicianul-teoretician austriac Erwin Schrödinger (1887–1961) a menționat: „**Proprietățile «ondulatorii» și «corpulare» nu se întâlnesc niciodată separat; ele reprezintă laturi diferite ale unora și acelorași fenomene**”.

b. Microscopul electronic

Microscopul este, după cum cunoaștem, un aparat optic folosit pentru observarea obiectelor de dimensiuni destul de mici încât nu pot fi văzute limpede cu ochiul liber. O caracteristică importantă a lui este **puterea de rezoluție (de separare)** – mărimea inversă a distanței minime dintre două puncte ale unui obiect plan care mai pot fi observate distinct. Această distanță minimă este proporțională cu lungimea de undă λ a luminii folosite la iluminarea obiectului. Deci puterea de rezoluție este invers proporțională cu lungimea de undă λ . Cu cât lungimea de undă este mai mică, cu atât puterea de rezoluție este mai mare.

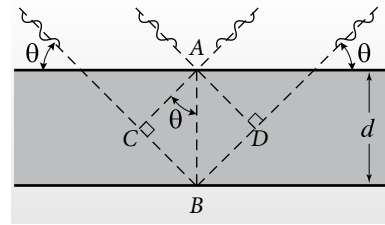


Fig. 5.13

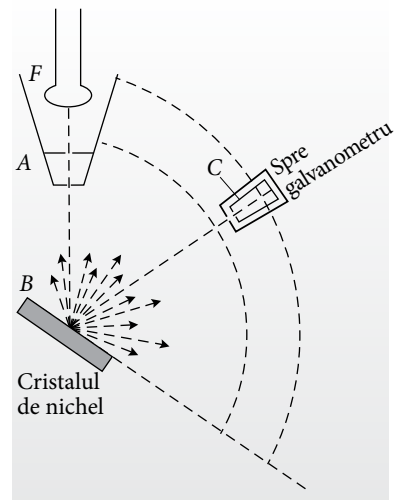


Fig. 5.14

Lungimea de undă a luminii are valori în intervalul de la circa $4 \cdot 10^{-7}$ până la $7,5 \cdot 10^{-7}$ m. Lungimea de undă de Broglie are valori considerabil mai mici. Conform formulei (5.17), pentru electronul accelerat la o ten-

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Chimistul, inginerul și inventatorul suedez Alfred Bernhard Nobel (1833–1896), cunoscut ca inventator al dinamitei și al altor substanțe explozibile, a donat cea mai mare parte din imensa lui avere înființării Premiilor Nobel. Acestea au devenit cele mai importante dintre toate premiile internaționale. Anual se acordă câte un Premiu Nobel și pentru realizări deosebite în domeniul fizicii.

În lista laureaților acestor premii se află și numele savanților care au pus bazele fizicii cuantice:

1918: *Max Planck* – „Pentru contribuția adusă la dezvoltarea fizicii prin descoperirea cuantei de energie”;

1921: *Albert Einstein* – „Pentru serviciile aduse fizicii teoretice și, mai cu seamă, pentru descoperirea legii efectului fotoelectric”;

1922: *Niels Bohr* – „Pentru cercetările sale asupra structurii atomilor și a radiației emise de aceștia”;

1929: *Louis de Broglie* – „Pentru descoperirea naturii ondulatorii a electronilor”;

1932: *Werner Heisenberg* – „Pentru crearea mecanicii cuantice, a cărei aplicare a condus la descoperirea formelor alotropice ale hidrogenului”;

1933: *Erwin Schrödinger*, *Paul Dirac* – „Pentru descoperirea de noi forme productive ale teoriei atomice”;

1937: *Clinton Davisson*, *George Thomson* – „Pentru descoperirea experimentală a difracției electronilor, produsă de către cristale”;

1945: *Wolfgang Pauli* – „Pentru descoperirea principiului de excludere ce-i poartă numele (principiul Pauli)”;

1954: *Max Born* – „Pentru cercetările sale fundamentale în mecanica cuantică, în special pentru interpretarea statistică a funcției de undă”.

Premii Nobel au fost acordate și pentru multe alte descoperiri în care se manifestă legitățile fizicii cuantice.

siune electrică de 100 V s-a obținut $\lambda_B \approx 1,2 \cdot 10^{-10}$ m, adică o valoare de câteva mii de ori mai mică decât lungimea de undă a luminii. Acest fapt a sugerat ideea construirii unui **microscop electronic** care ar funcționa utilizând proprietățile ondulatorii ale electronilor și care ar avea o putere de rezoluție de mii de ori mai mare decât cea a microscopelor optice.

Primul microscop electronic a fost construit în Germania, în anii 1928–1931, de către inginerii Ernst Ruska (1906–1988) și Max Knoll (1897–1969). În anul 1933, ei aveau deja un microscop electronic ce asigura o mărire de 12 000 de ori – performanță net superioară microscopelor optice.

După principiul de construcție, microscopul electronic sunt similare celor optice: un tun electronic ia locul sursei de lumină, iar lentilele optice sunt înlocuite de cele electromagnetice care dirijează mișcarea electronilor cu ajutorul câmpurilor electrice și magnetice de configurații speciale. Fasciculul de electroni traversează „ținta” – o foiță foarte subțire – a cărei imagine mult mărită este obținută în microscop.

Microscopul electronic moderne au permis obținerea imaginilor diferitor obiecte de dimensiuni foarte mici, inclusiv a unor molecule și atomi mai mari.

Au fost construite, de asemenea, microscopul ionice care măresc de zeci de ori mai mult decât microscopul electronic. Difracția neutronilor se utilizează la cercetările microstructurii aliajelor, a proprietăților magnetice ale diferitor substanțe, inclusiv a macromoleculilor biologice, a transformărilor de fază etc.

→ Verificați-vă cunoștințele

1. În baza cărui aspect al luminii poate fi explicat efectul fotoelectric? Dar interferența?
2. În ce constă ipoteza lui de Broglie?
3. Ce fel de experimente au confirmat faptul că electronul posedă proprietăți ondulatorii?
4. Care proprietăți ale electronului – ondulatorii sau corpusculare – au permis construirea microscopului electronic?
5. Determinați lungimea de undă de Broglie asociată unui electron a cărui viteză este egală cu 10^7 m/s.
6. Cum se modifică lungimea de undă de Broglie dacă tensiunea la care este accelerată microparticula încărcată se mărește de 4 ori?



6.1. FENOMENE ÎN CARE SE MANIFESTĂ STRUCTURA COMPUSĂ A ATOMULUI

Din cursul gimnazial de fizică cunoașteți că la trecerea razei de lumină monocromatică prin prisma triunghiulară transparentă, aflată în aer, raza se îndreaptă spre bază. Dacă însă pe prismă cade lumină albă, se produce **dispersia luminii** – lumina se descompune în raze colorate, corespunzătoare diferitor lungimi de undă. Pe ecranul pe care ele cad se obține un tablou colorat, numit **spectru**.

Deci prisma triunghiulară permite analizarea radiațiilor luminoase, determinarea lungimilor de undă prin descompunerea radiației incidente în spectru.

Aparatul destinat observării vizuale a spectrelor este numit *spectroscop*.

Schema optică de principiu a acestuia este prezentată în *figura 6.1*. Radiația emisă de sursa de lumină S pătrunde în colimatorul C_1 prin fanta îngustă F , aflată în planul focal al lentilei convergente L_1 . Ca rezultat, colimatorul formează un fascicul de raze paralele ce cade pe prisma P . În urma refracției și dispersiei prin prismă, se propagă o totalitate de fascicule de raze paralele. Ele cad pe lentila L_2 a camerei C_2 și, după refracția în lentilă, razele paralele se intersectează în planul focal al acesteia. Fasciculele ce corespund diferitor lungimi de undă (culori) după trecerea prin prismă se propagă în direcții diferite, din care cauză se intersectează în punctele respective ale planului focal al lentilei L_2 . Aici se și obține spectrul ce caracterizează radiația emisă de sursa S .

În *figura 6.1* sunt reprezentate razele și spectrul obținut în cazul a trei culori: roșu, verde și albastru.

Isaac Newton a orientat un fascicul de lumină solară asupra prisme și a observat pentru prima dată descompunerea lui în **spectru continuu** (*fig. V, a*, planșa color, p. 162), descoperind astfel **dispersia luminii**.

Spectrele radiațiilor emise de diferite corpuri au fost studiate detaliat în secolul XIX. Savanții germani – fizicianul Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) și chimistul Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) – au studiat amănunțit spectrele emise de unele substanțe introduse în flacăra spirtierei. La temperaturile respective substanțele cercetate se aflau în stare gazoasă, erau descompuse în atomi excitați în urma ciocnirilor dintre ei la viteze mari. Ca rezultat, s-a constatat că spectrele radiației emise de acești atomi sunt discontinue. Ele reprezintă un șir de linii colorate ce corespund anumitor valori ale lungimilor de undă.

Spectrele emise de atomii excitați sunt numite *spectre de linii*.

În *figura V* (planșa color, p. 162) sunt prezentate spectrele respective pentru sodiu (*b*), hidrogen (*d*) și heliu (*f*).

Kirchhoff și Bunsen au stabilit (a. 1859) că fiecărui tip de atomi îi corespunde un anumit spectru.

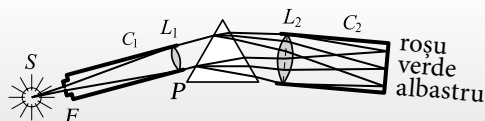


Fig. 6.1

După tabloul spectrului pot fi identificați atomii care l-au emis. Acest fapt stă la baza **analizei spectrale**. Dacă în spectrul obținut se înregistrează linii spectrale ce nu aparțin atomilor cunoscuți, substanța respectivă conține atomi ai unor elemente chimice necunoscute. Pe această cale, în anul 1868, în spectrul Soarelui a fost descoperit *heliul* (*helios* în l. greacă „soare”), care în 1895 a fost identificat în condiții terestre.

Spectrele emise de gazele moleculare reprezintă sisteme de linii spectrale grupate în benzi separate una de alta și sunt numite *spectre de bandă* (fig. V, i, planșa color, p. 162).

Spectrele descrise mai sus – continue, de linii și de benzi – se obțin în urma descompunerii radiației emise de corpurile respective la propagarea ei prin prismă și se numesc *spectre de emisie*.

Dacă radiația luminoasă emisă de un corp incandescent se propagă, înainte de a cădea pe prismă, printr-un gaz rece care nu emite lumină, atunci pe fondul spectrului continuu, observat în lipsa acestui gaz, apar linii întunecate (fig. V, spectrele *c*, *e*, *g*, *h*, planșa color, p. 162).

Totalitatea liniilor întunecate pe fondul spectrului continuu constituie *spectrul de absorbție*.

Apariția liniilor negre se explică prin absorbția radiațiilor cu anumite lungimi de undă de către atomii gazului traversat de radiația corpului incandescent. Kirchhoff a stabilit (a. 1860) că **gazele absorb radiații având lungimi de undă egale cu cele ale radiației pe care o emit**. La suprapunerea spectrului de absorbție pe cel de emisie ale aceluiași gaz se obține, evident, un spectru continuu. Rezultatul obținut de Kirchhoff este cunoscut ca **legea inversiei spectrului sau legea lui Kirchhoff**.

De menționat că linii întunecate pe fondul spectrului continuu au fost observate pentru prima dată în anul 1802 de către fizicianul englez William Hyde

Wollaston (1766–1828). În anii 1814–1815, fizicianul german Joseph von Fraunhofer (1787–1826) a studiat liniile întunecate din spectrul Soarelui (fig. V, *h*, planșa color, p. 162). Ulterior liniile întunecate din spectre au fost numite **linii Fraunhofer**.

Spectrele de linii sunt proprii substanțelor în stare gazoasă, adică substanțelor descompuse în atomi. Caracterul acestora, poziția liniilor spectrale pot fi explicate doar în baza structurii interioare a atomilor.

În anii 1858–1859, investigând descărcarea electrică în gaze rarefiate, fizicianul german Julius Plücker (1801–1868) a descoperit existența unei radiații emise de catod ce se propagă perpendicular de la suprafața lui. În anul 1876, fizicianul german Eugen Goldstein (1850–1930) a numit aceste radiații **raze catodice**, iar în anul 1895 fizicianul francez Jean-Baptiste Perrin (1870–1942) a stabilit că razele catodice sunt un flux de particule încărcate cu sarcină electrică negativă. Doi ani mai târziu, în 1897, fizicianul englez Joseph John Thomson (1856–1940) a studiat mișcarea particulelor catodice în câmpuri electrice și magnetice și a determinat sarcina specifică a lor, adică raportul dintre sarcina electrică q și masa lor m . Acest raport era de mii de ori mai mare decât respectivele rapoarte pentru ioni. Considerând sarcina electrică a particulei catodice egală în modul cu sarcina electrică elementară, $|q| = e$, conchidem că masa ei este mult mai mică decât masa atomului de hidrogen care este cel mai ușor atom. Particula descoperită a fost numită **electron**, denumire propusă în anul 1890 de către Stoney pentru sarcina electrică elementară. Astfel, a fost descoperit electronul – primul din lanțul particulelor elementare descoperite ulterior.

Electronul este o particulă din componența substanței, aceasta fiind formată din atomi cu mase mult mai mari decât a electronului. S-a concluzionat că electronii fac parte din structura atomilor, în baza căreia ar putea fi explicate spectrele de linii.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce fenomen optic se află la baza principiului de funcționare a spectroscopului?
2. Care este caracterul spectrelor emise de atomi? Dar al celor emise de molecule?
3. Cum se explică prezența liniilor întunecate în spectrele de absorbție?
4. Ce este comun pentru spectrul de emisie și pentru cel de absorbție al unuia și aceluiași element chimic?
5. Ce concluzie, care se referă la atomi, rezultă din faptul existenței electronului?

6.2. EXPERIMENTUL LUI RUTHERFORD. MODELUL PLANETAR AL ATOMULUI

După descoperirea electronului ca particulă de masă mult mai mică decât cea a atomului, fizicianul J.J. Thomson a admis că electronii intră în componența atomului și a propus un model al acestuia (a. 1903). Electronul are sarcină electrică negativă, iar atomul este neutru. De aceea a considerat că atomul este o sferă având distribuită uniform în interiorul ei masa atomului, precum și sarcina electrică pozitivă. În interiorul sferei se mai află un număr de electroni, considerați punctiformi, astfel încât atomul este neutru. Acest model, numit **modelul lui Thomson**, este cunoscut în istoria fizicii și sub numele de **puding** (sau chiflă) **cu stafide**. Încercările de a explica spectrele de linii pornind de la modelul lui Thomson nu s-au încununat de succes.

Având în vedere cele menționate, Rutherford a decis să verifice distribuția sarcinilor electrice în atom pentru a confirma sau infirma modelul lui Thomson. În acest scop și-a propus să bombardeze foițe subțiri de metal cu particule α emise de substanțe radioactive (*radioactivitatea este explicată în capitolul 7*). Aici vom indica doar parametrii ce caracterizează aceste particule: masa lor este de circa 7 300 de ori mai mare decât cea a electronului ($m_\alpha \approx 7\,300\,m_e$), iar sarcina electrică a lor este pozitivă și egală cu două sarcini electrice elementare ($q_\alpha = +2e$). În experiență au fost folosite particule α cu energii cinetice mari, deci cu viteze mari.

Schema instalației lui Rutherford este prezentată în *figura 6.2*. O sursă radioactivă (1) se află în interiorul unei incinte de plumb (2) având un canal îngust (3). Prin acesta iese un fascicul fin de particule α . Fasciculul cade pe o foiță de aur (4), foarte subțire (circa 0,4 μm). Particulele împrăștiate de foiță cad pe un ecran transparent (5), acoperit cu un strat de sulfură de zinc. În locul căderii particulei α pe sulfura de zinc se observă o **scintilație** – scânteiere de scurtă durată. Scintilația este observată prin microscop (6). Instalația permite semnalarea scintilațiilor produse de particulele care după interacțiunea cu foița de aur se mișcă în direcții ce formează diferite **unghiuri de împrăștiere** θ cu direcția vitezei particulelor incidente pe foiță.

În experiment a fost determinat numărul de particule α , ce au penetrat foița de aur, în funcție de unghiul de împrăștiere θ . În urma observărilor minuțioase s-au constatat următoarele:

- majoritatea particulelor α ies din foița de aur în direcții ce formează unghiuri destul de mici cu direcția inițială;
- există însă și particule pentru care unghiul de împrăștiere θ este mai mare de 90° , la unele din ele apropiindu-se de 180° . Numărul acestora este destul de mic față de numărul particulelor incidente pe foița de aur.

Devierea considerabilă poate avea loc numai în urma unei interacțiuni cu o particulă de masă mult mai mare decât cea a particulei incidente, care este încărcată cu sarcină electrică pozitivă și ocupă un volum mult mai mic decât cel al atomului. De aceea Rutherford a presupus că masa și sarcina electrică pozitivă a atomului sunt concentrate într-o regiune foarte mică din centrul atomului, în **nucleu**.

Raza nucleului a fost estimată ca distanța minimă de la centrul atomului, la care se oprește particula α ce se mișcă direct spre nucleu fiind frânată de forța de respingere din partea sarcinii electrice pozitive a nucleului. Cunoscând energia cinetică a particulei α la distanțe mari de nucleu, Rutherford a stabilit că diametrul nucleului este de ordinul 10^{-15} m, adică este de câteva zeci de mii de ori mai mic decât diametrul atomului (ultimul este de circa 10^{-10} m). Astfel, nucleul ocupă o părticică infimă din volumul atomului. În jurul nucleului se află electronii încărcăți cu sarcină electrică negativă. Numărul electronilor este egal cu numărul de sarcini elementare pozitive ale nucleului și astfel este asigurată neutralitatea atomului.

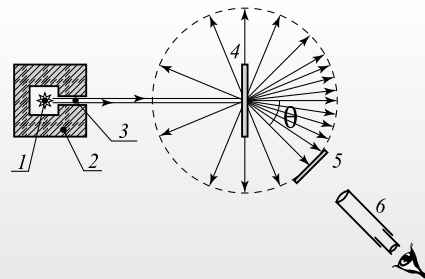


Fig. 6.2

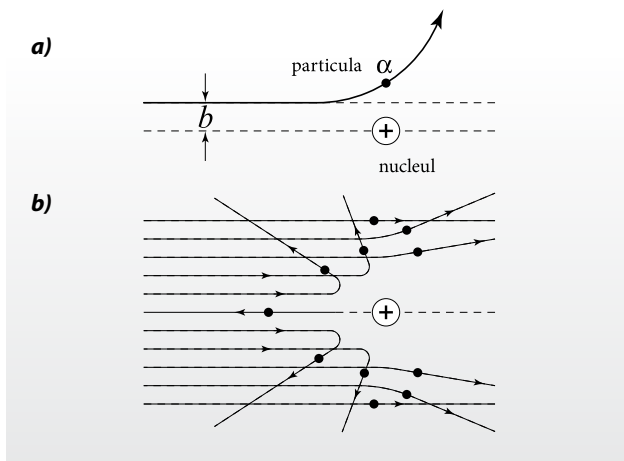


Fig. 6.3



ERNEST RUTHERFORD
(1871–1937)
fizician englez

A pus bazele teoriei moderne a radioactivității, a fondat fizica nucleului atomic.

În anul 1899 a scos în evidență două componente ale emisiei radioactive – particulele α și β . A descoperit radioactivitatea toriului și faptul că în rezultatul dezintegrării acestuia apare un element chimic nou, cu numărul de ordine 86 – radonul. În anul 1903, împreună cu Frederick Soddy (1877–1956), a pus bazele teoriei transformărilor radioactive ale elementelor și a stabilit legea dezintegrării radioactive. A stabilit că particulele α posedă sarcină electrică pozitivă, iar apoi (a. 1909) că acestea sunt atomi de heliu dublu ionizați.

În anul 1906 Rutherford a început cercetarea sistematică a împrăștierii particulelor α la traversarea peliculelor subțiri din metale diferite. Ca rezultat, a descoperit nucleul atomic (a. 1911). Descoperind protonul (a. 1919), a demonstrat existența protonilor în componența nucleului. Rutherford a realizat prima reacție nucleară artificială (a. 1919), transformând azotul în oxigen. A prezis existența neutronului (a. 1920), descoperit în anul 1932.

În anul 1908, pentru cercetările asupra transformării elementelor în domeniul chimiei substanțelor radioactive, i s-a conferit Premiul Nobel.

Evident, electronii atomului nu se pot afla în repaus, deoarece sub acțiunea forței de atracție din partea nucleului ei ar cădea pe acesta. Electronii se rotesc în jurul nucleului, accelerația centripetă fiindu-le imprimată de forța de atracție electrică spre nucleu. Situația este analogică celei din Sistemul Solar – accelerația centripetă este imprimată planetelor de forța de atracție gravitațională ce acționează asupra lor din partea Soarelui. Datorită acestei analogii dintre mișcarea electronilor în jurul nucleului și cea a planetelor în jurul Soarelui, modelul respectiv al atomului a fost numit **model planetar** sau **nuclear**. El este cunoscut și ca **modelul lui Rutherford**.

Să analizăm în baza acestui model împrăștierea particulelor α . Notăm cu b – **parametrul de ciocnire** – distanța minimă la care ar trece particula α pe lângă nucleu dacă ea s-ar mișca rectiliniu (fig. 6.3, a). Majoritatea particulelor α se deplasează pe lângă nucleu la distanțe mult mai mari decât diametrul lor. Acțiunea forțelor electrice asupra acestor particule este nesemnificativă; ele, practic, nu deviază de la mișcarea rectilinie. Devierile de la mișcarea rectilinie sunt considerabile pentru un număr mic de particule care trec prin vecinătatea nemijlocită a nucleului (fig. 6.3, b).

În baza modelului nuclear nu s-a reușit calcularea lungimilor de undă ce corespund liniilor observate în spectru. Problema explicării spectrelor de linii rămânea nesoluționată.

Esențială era însă o altă problemă. Existența modelului planetar al atomului se afla în contradicție cu legitățile fizicii clasice. În cadrul teoriei câmpului electromagnetic, elaborată de Maxwell, se demonstrează că particula încărcată electric, mișcându-se accelerat, emite unde electromagnetice, respectiv, și energie. Mișcarea electronului în jurul nucleului nu este rectilinie uniformă, deci el posedă accelerație. În consecință, electronul emite unde electromagnetice, pierde treptat din energia sa, se apropie tot mai mult de nucleu și, în final, cade pe el. Calculele au arătat că electronul, care se rotea în jurul nucleului, trebuia să cadă pe acesta în doar circa 10^{-8} s. În realitate însă atomii rămân stabili.

⇒ Verificați-vă cunoștințele

1. Pot oare electronii să modifice traiectoriile rectilini ale particulelor α ? Argumentați răspunsul.
2. Ce prezintă modelul atomului propus în baza studierii împrăstierii particulelor α la interacțiunea cu foițe metalice?
3. Care probleme n-au putut fi rezolvate în baza modelului planetar al atomului?

6.3. MODELUL ATOMULUI DUPĂ BOHR

a. Postulatele lui Bohr

Fizicianul danez Niels Bohr (1885–1962) a elaborat o teorie a atomului, punând la baza ei două postulate.

Postulatul întâi (postulatul stărilor staționare) – atomul poate exista numai în anumite stări staționare, în care nu emite și nu absoarbe unde electromagnetice.

Acest postulat este în contradicție cu electrodinamica clasică și contestă aplicarea acesteia la sisteme atomice – electronul din atom posedă accelerație, dar nu emite unde electromagnetice.

În fiecare stare staționară atomul posedă o energie bine determinată, numită, de regulă, **energie admisă**. Valorile acestor energii formează un șir discret: $E_1, E_2, \dots, E_n \dots$. Numărul întreg n care determină energia atomului este numit **număr cuantic principal**. S-a convenit a ordona valorile energiei admise, astfel încât ele să crească pe măsură ce valorile lui n devin tot mai mari: $E_1 < E_2 < E_3 < \dots$. Starea atomului în care energia lui are valoarea minimă E_1 este numită **stare fundamentală** sau **normală**, stările cu energii mai mari E_2, E_3, \dots sunt numite **stări excitate**. Starea fundamentală este stabilă, deci acest postulat constată stabilitatea modelului planetar al atomului. Astfel, pentru prima dată în fizică s-a admis că energia, în cazul de față a atomului, este o mărime discretă.

Postulatul al doilea (regula frecvențelor) – la trecerea dintr-o stare staționară în alta atomul emite sau absoarbe o cantă de energie egală cu diferența dintre energiile atomului în aceste stări:

$$h\nu = E_n - E_m. \quad (6.1)$$

În cazul dat E_n și E_m sunt energiile atomului în stările staționare. Dacă E_n este energia în starea inițială, mai mare decât energia E_m în starea finală, relația (6.1) determină energia (frecvența) fotonului (cuantei de energie) emis. În cazul în care însă E_n este energia atomului în stare finală, mai mare decât energia lui E_m în stare inițială, relația (6.1) exprimă energia fotonului absorbit.

Modelul atomului ce are la bază aceste postulate este numit **modelul cuantificat al lui Bohr** sau, simplu, **modelul Bohr**.

Pentru a imprima un caracter intuitiv celor expuse, se folosește **schema nivelurilor energetice**. S-a convenit a orienta axa energiilor vertical în sus și a marca pe ea valorile energiilor admise. În dreptul fiecărei valori se trasează o linie orizontală – **nivelul energetic**. Astfel, s-a obținut schema nivelurilor energetice (fig. 6.4). Nivelul inferior este **nivelul fundamental**, celelalte niveluri sunt **excitate**.

În schema menționată trecerea atomului dintr-o stare în alta, numită **tranziție cuantică**, este reprezentată printr-un segment vertical ce unește nivelurile respective, a cărui săgeată indică nivelul (starea) final(ă). De exemplu, săgeata *a* (fig. 6.4) indică tranziția de pe nivelul 2 pe nivelul 1 (din starea cu energia E_2 în cea cu energia E_1) cu emisia fotonului, a cărui energie $h\nu = E_2 - E_1$. Săgeata *b* corespunde tranziției de pe nivelul 2 pe nivelul 4 cu absorbția fotonului, a cărui energie $h\nu' = E_4 - E_2$. În figura 6.4 prin săgeți ondulate sunt prezentați și fotonii respectivi, care, de obicei, nu sunt indicați.

b.* Atomul de hidrogen în cadrul teoriei lui Bohr

Bohr a aplicat postulatele la elaborarea teoriei celui mai simplu atom – a celui de hidrogen. Pentru

aceasta a propus următorul model: în centrul atomului se află în repaus un nucleu masiv, încărcat cu sarcina electrică pozitivă (+e), în jurul căruia se roteste pe orbită circulară un electron cu sarcină negativă (-e). Notăm raza orbitei cu r , viteza electronului – cu v (fig. 6.5).

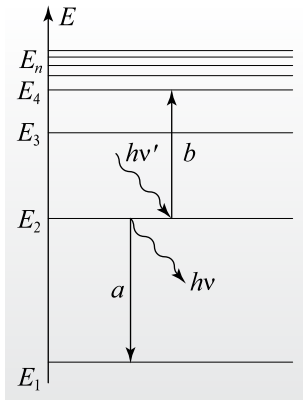


Fig. 6.4

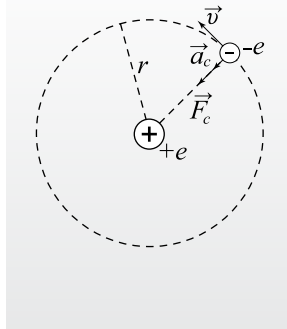
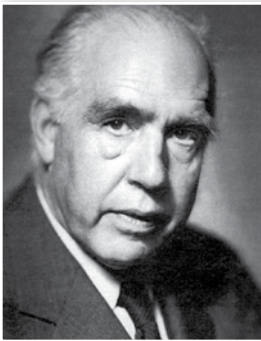


Fig. 6.5



NIELS HENRIK DAVID BOHR
(1885–1962)

ilustru fizician-teoretician danez, unul dintre fondatorii fizicii moderne

Primele cercetări au fost consacrate comportării electronilor în metale. După vizitarea în anii 1911–1912 a laboratoarelor lui J.J. Thomson și E. Rutherford și familiarizarea cu cercetările acestora în domeniul fizicii atomului, a formulat postulate în baza cărora a elaborat teoria atomului, ce i-a permis să explice spectrul de linii al hidrogenului atomic. În anul 1918 a expus principiul de corespondență, ce stabilește condițiile în care rezultatele cunoscute în fizica clasică pot fi obținute din formulele utilizate în fizica cuantică. Bohr a obținut rezultate importante în teoria nucleului atomic. Este autorul teoriei nucleului intermediar, numit și compus (a. 1933), a dezvoltat modelul „picătură” al nucleului atomic (a. 1936) propus de către George Anthony Gamow (1904–1968). În baza acestui model, împreună cu John Archibald Wheeler (1911–2008), a elaborat teoria fisiunii nucleare și a prezis fisiunea spontană a nucleelor de uraniu (a. 1939). I s-a decernat Premiul Nobel în domeniul fizicii (a. 1922) „pentru merite în studierea structurii atomului”.

Pornind de la acest model, Bohr trebuia să explice spectrul de linii al hidrogenului atomic. O importanță deosebită la soluționarea acestei probleme a avut familiarizarea lui cu formula empirică, stabilită de către savantul elvețian Johann Jakob Balmer (1825–1898). Cunoscând valorile experimentale ale lungimilor de undă ce corespund liniilor din regiunea vizibilă a spectrului hidrogenului atomic, Balmer a reușit să le unească într-o formulă (a. 1885). Formula pentru frecvențele respective este:

$$v = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ unde } n = 3, 4, 5, \dots, \quad (6.2)$$

și constanta R , numită constanta lui Rydberg:

$$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}. \quad (6.3)$$

Bohr a hotărât să deducă această formulă în cadrul teoriei atomului. După câțiva ani de la elaborarea teoriei, Bohr a recunoscut: „De cum am văzut formula lui Balmer, totul mi-a devenit clar”. El deja cunoștea rezultatul pe care trebuia să-l obțină.

Primul postulat al lui Bohr afirma existența în atom a stărilor staționare ale atomului. Pentru a elabora teoria unui atom concret, era necesară formularea unei reguli care ar pune în evidență aceste stări.

Regula respectivă conținea noțiunea de **moment cinetic**, numit și **moment al impulsului**. El se definește prin analogie cu momentul forței. Dacă F este forța și d brațul ei (distanța dintre dreapta-suport a forței și punctul față de care se calculează acest moment), momentul forței $M = F \cdot d$.

Momentul cinetic L este produsul dintre impulsul corpului $p = mv$ și brațul lui d_0 . Avem $L = pd_0 = mvd_0$. În cazul electronului din atomul de hidrogen brațul impulsului lui este egal cu raza orbitei. Astfel, momentul impulsului devine:

$$L = m_e v r, \quad (6.4)$$

unde m_e este masa electronului.

Pentru obținerea rezultatului scontat Bohr a admis că:

momentul impulsului electronului din atomul de hidrogen poate lua doar anumite valori discrete, egale cu un număr întreg n de constante ale lui Planck h împărțite la 2π .

Adică:

$$m_e v r = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.5)$$

Relația (6.5) este numită **regula de cuantificare a lui Bohr**. Ea pune în evidență orbitele staționare dintre toate orbitele imaginare ale electronului în atomul de hidrogen.

Existența proprietăților ondulatorii ale electronilor permite o altă interpretare a regulii (6.5). Exprimăm din (5.15) impulsul electronului $m_e v = h/\lambda$ și substituim această valoare în (6.5). Obținem $\frac{h}{\lambda} r = n \frac{h}{2\pi}$,

$$2\pi r = n\lambda, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.6)$$

Prin urmare, regula de cuantificare a lui Bohr poate fi reformulată astfel:

orbitele staționare ale electronului în atomul de hidrogen sunt orbitele circulare care au lungimi egale cu un număr întreg de lungimi de undă de Broglie (fig. 6.6).

Mișcându-se pe orbita circulară în jurul nucleului, electronul posedă accelerația centripetă $a_c = \frac{v^2}{r}$. Aceasta este imprimată de forța coulombiană de atracție a electronului spre nucleu: $F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$. În acord cu principiul fundamental al dinamicii, $m_e a_c = F_c$, obținem:

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (6.7)$$

Din relațiile (6.5) și (6.7) pentru razele orbitelor și vitezele electronului pe ele obținem expresiile:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e e^2}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \dots, \quad (6.8)$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.9)$$

Observăm că raza orbitei (6.8) și viteza electronului (6.9) capătă numai valori discrete, determinate de numărul întreg n , care marchează mărimile respective ca indice.

Raza primei orbite ($n = 1$) a electronului în atomul de hidrogen este numită **raza Bohr** și are valoarea:

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}. \quad (6.10)$$

Această valoare concordă cu valorile experimentale ale razelor atomilor.

Expresia (6.9) arată că viteza electronului este mai mică la mișcarea pe orbite mai îndepărtate de nucleu.

Să calculăm și energia electronului în atomul de hidrogen. Ea se compune din energia cinetică $E_c = \frac{m_e v^2}{2}$ și energia potențială E_p a electronului în câmpul electric al nucleului. Ultima este egală cu produsul dintre sarcina electronului ($-e$) și potențialul câmpului electric φ al nucleului la distanța r de la el. Considerând nucleul sarcină punctiformă, aplicăm pentru φ formula cunoscută din electrostatică $\varphi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r}$. Atunci $E_p = (-e) \varphi = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$.

Ținând seama de expresiile (6.8) și (6.9), pentru energia totală $E = E_c + E_p$ obținem

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.11)$$

Numărul întreg n determină valoarea energiei electronului în atomul de hidrogen și este numit **număr cuantic principal**. Acesta determină, de asemenea, după cum am văzut mai sus, momentul cinetic orbital al electronului în atom, raza orbitei și viteza lui pe orbită.

Expresia (6.11) arată că energia E_n este negativă. Aceasta reflectă faptul că electronul se află în atom în stare legată. Pentru a ioniza atomul, adică pentru a îndepărta electronul din el, trebuie consumată o anumită energie minimă. Electronul îndepărtat din atom nu mai interacționează cu acesta, energia

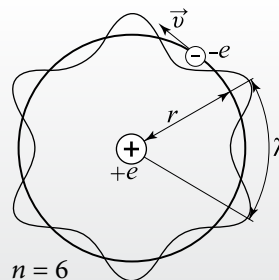


Fig. 6.6

potențială a lui devine nulă. Energia electronului în atom este mai mică, deci negativă.

În starea fundamentală ($n = 1$) energia atomului este minimă și egală cu:

$$E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = -2,17 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,5 \text{ eV}. \quad (6.12)$$

Energia de ionizare a atomului de hidrogen este egală cu energia minimă necesară pentru a îndepărta electronul din atom.

În afara atomului energia electronului este nulă, deci energia de ionizare $E_{ion} = 0 - E_1 = |E_1| = 13,5 \text{ eV}$, valoare ce concordă cu cea determinată experimental.

Substituind în regula frecvențelor (6.1) expresiile (6.11) pentru energiile E_n și E_m , unde $n > m$, obținem frecvența fotonului emis:

$$\nu_{nm} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6.13)$$

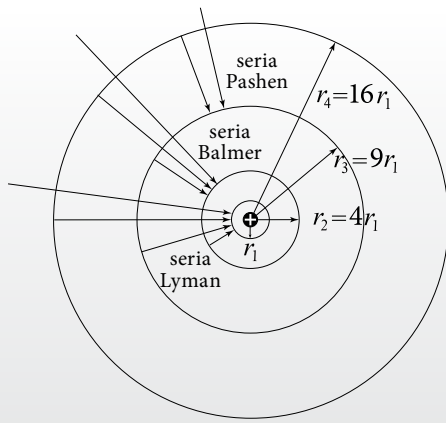


Fig. 6.7

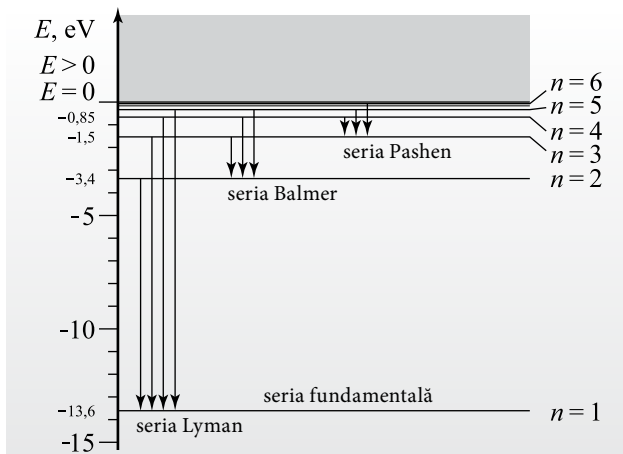


Fig. 6.8

Introducem constanta lui Rydberg:

$$R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}. \quad (6.14)$$

Valoarea ei calculată în baza teoriei lui Bohr coincide cu valoarea experimentală (6.3). Formula (6.13) capătă forma:

$$\nu_{nm} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6.15)$$

Aceasta este **formula generalizată a lui Balmer**. Pentru $m = 2$ ea coincide cu formula (6.2) stabilită de acesta pe cale experimentală.

Liniile spectrale ce corespund unei valori anumite a numărului cuantic m , adică tranzițiilor din stări cu energii mai mari E_n în starea cu energie E_m , formează o **serie spectrală**. Liniile seriei se obțin considerând pentru numărul n valorile $(m + 1)$, $(m + 2)$, ...

Pentru $m = 1$ obținem seria Lyman, situată în regiunea ultravioletă a spectrului, iar pentru $m = 2$ seria deja cunoscută a lui Balmer în regiunea vizibilă. Următoarele seriei se află în regiunile roșie și infraroșie și poartă numele savanților Pashen ($m = 3$), Bracket ($m = 4$), Pfund ($m = 5$), Humphry ($m = 6$). După cum rezultă din formula (6.15), frecvențele fiecărei seriei spectrale sunt mai mici decât ale celei precedente.

Să reprezentăm schematic rezultatele obținute. În figura 6.7 sunt indicate: orbita de rază r_1 (corespunde stării fundamentale) și orbitele ce corespund stărilor excitate ($n = 2, 3, 4$) în conformitate cu formula (6.8) pentru raze. Cu segmente orientate sunt indicate tranzițiile cuantice dintre orbitele stărilor staționare pentru primele linii din seriile Lyman, Balmer și Pashen.

În figura 6.8 sunt prezentate nivelul fundamental ($n = 1$) și câteva niveluri excitate, în acord cu formula (6.11). În această figură, prin segmente orientate, sunt indicate tranzițiile cuantice corespunzătoare seriilor din figura 6.7.

Astfel, Bohr a reușit nu numai să explice caracterul de linii al spectrului hidrogenului atomic, ci și să obțină gruparea lor în serii, să calculeze frecvențele respective. Rezultatele obținute în cadrul teoriei lui Bohr concordă perfect cu datele experimentale. Acesta a fost un succes al primei teorii cuantice a atomului.

Teoria lui Bohr a avut și unele deficiențe. Nu s-a reușit să se calculeze frecvențele liniilor spectrale ale heliului, atom cu doar doi electroni, nemaivorbind de cele ale atomilor cu mai mulți electroni. Chiar și în

cazul hidrogenului nu au fost calculate intensitățile liniilor spectrale, adică nu s-a explicat care linii spectrale sunt mai luminoase și care mai întunecate.

Toate acestea din cauză că teoria lui Bohr nu este consecventă în relația sa cu fizica clasică. Pe de o parte, este folosit principiul fundamental al dinamicii, expresiile pentru accelerația centripetă și energia cine-

tică, pe de altă parte, este contestată aplicabilitatea electrodinamicii lui Maxwell în lumea atomilor. Din această cauză teoria lui Bohr este considerată o teorie de tranziție: **semiclassică** sau **semicuantică**.

În anii '20 ai secolului trecut a fost elaborată mecnica cuantică modernă care explică toate problemele ce nu și-au găsit soluționarea în teoria lui Bohr.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care concluzie a electrodinamicii lui Maxwell se află în contradicție cu teoria lui Bohr?
2. Ce modificare importantă care se referă la energie rezultă din primul postulat al lui Bohr?
3. Care stare a atomului este numită fundamentală?
4. Care stări sunt numite excitate?
5. Cum explică teoria lui Bohr emisia radiației de către atomi?
6. Ce prezintă schema nivelurilor energetice?
7. Care tranziții cuantice sunt însoțite de absorbția fotonilor?
- 8.* Care mărimi ce caracterizează starea electronului în atomul de hidrogen au valori discrete?
- 9.* Ce prezintă seriile spectrale ale hidrogenului atomic? Prin ce diferă unele de altele?
10. Un atom trece din starea cu energia de $(-1,51)$ eV în starea cu energia egală cu $(-3,40)$ eV. Calculați frecvența și lungimea de undă a fotonului emis.
- 11.* Să se determine frecvența și lungimea de undă a fotonului emis de atomul de hidrogen la tranziția din starea cu numărul cuantic $n = 4$ în starea cu numărul cuantic $m = 2$.

6.4.* EMISIA STIMULATĂ A RADIAȚIEI. LASERUL

Cuvântul **laser** astăzi face parte din limbajul nostru uzual. Aceasta se datorează multiplelor sale aplicații, de la confecționarea compact-discurilor și citirea informației de pe ele la realizarea efectelor luminoase ce însoțesc concertele unor formații muzicale, la utilizarea în calitate de bisturiu pentru efectuarea unor intervenții chirurgicale ș.a.

Laserul este un dispozitiv din categoria generatoarelor cuantice de radiație electromagnetică. Primul generator cuantic a fost construit în anul 1954 de către Nikolai Basov (1922–2001) și Aleksandr Prohorov (1916–2002) în Uniunea Sovietică, independent și simultan cu Charles Hard Townes (1915–2015) în SUA. În 1964 toți au devenit laureați ai Premiului Nobel. Dispozitivul respectiv genera unde electromagnetice cu lungimea de undă egală cu 1,27 cm (domeniul microundelor) și a fost numit **maser** (cuvântul reprezintă o abreviere a expresiei din limba engleză *Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* – amplificarea microundelor prin emisia stimulată a radiației). În anul 1960, fizicianul american Theodore Harold Maiman (1927–2007) a inventat **laserul** cu rubin, care emite lumină roșie cu lungimea de undă egală cu 694,3 nm. Denumirea laser este formată din

primele litere ale expresiei *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation* – amplificarea luminii prin emisia stimulată a radiației.

Pentru a expune principiul de funcționare a generatoarelor cuantice, vom analiza, mai întâi, procesele de absorbție și de emisie a fotonilor (undelor electromagnetice) de către atomi. În conformitate cu postulatul al doilea al lui Bohr (*tema 6.3, a*), aceste procese se produc la trecerea electronului de pe un nivel energetic pe altul (*fig. 6.4*). Aici vom reprezenta în figuri starea sistemului până la tranziția dintr-o stare în alta și după aceasta (*fig. 6.9–6.11*, unde electronul este reprezentat printr-un punct negru).

Notăm cu E_1 energia nivelului fundamental și cu E_2 energia unui nivel excitat ($E_2 > E_1$). Tranziției cuantice, între aceste niveluri, îi corespunde fotonul cu energia $h\nu_{21} = E_2 - E_1$.

Dacă atomul se află în starea cu energia E_1 (electronul pe nivelul E_1) și asupra lui cade un foton cu energia $h\nu_{21}$ (*fig. 6.9, a*), atomul absoarbe fotonul și trece în starea cu energia E_2 (*fig. 6.9, b*).

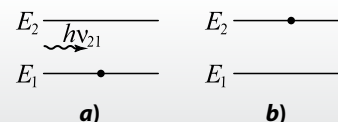


Fig. 6.9

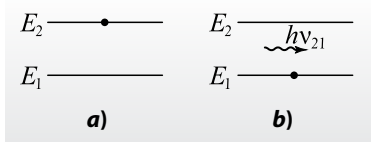


Fig. 6.10

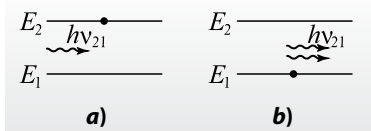


Fig. 6.11

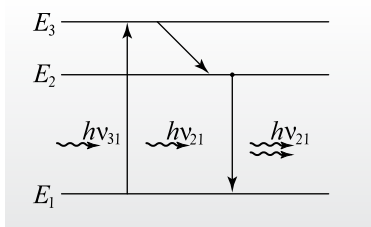


Fig. 6.12

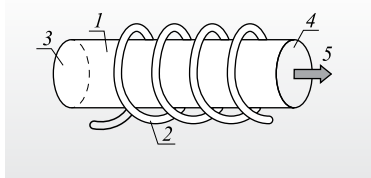


Fig. 6.13

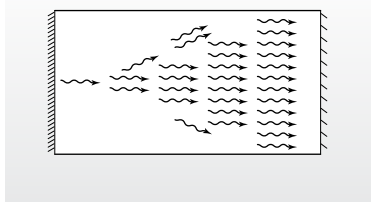


Fig. 6.14

Atomul în stare excitată (E_2) este instabil, are o viață medie de ordinul 10^{-8} s. El trece spontan, fără vreo influență din exterior, în starea fundamentală (E_1) și emite un foton cu energia $h\nu_{21}$ (fig. 6.10, a, b). Aceasta este **emisia spontană** a radiației.

Diferiți atomi excitați emit spontan, independent unul de altul, fotoni între care nu există nicio concordanță cât privește direcția de propagare, faza oscilațiilor sau polarizarea. Situația dată se realizează în sursele obișnuite de lumină necoerentă.

În anul 1917, Albert Einstein a argumentat existența unei alte modalități de emisie a radiației – **emisia stimulată (indusă)**.

Să analizăm un atom excitat (electronul pe nivelul E_2) și un foton cu energia $h\nu_{21}$ apropiindu-se de acest atom (fig. 6.11, a). Fotonul influențează electronul de pe nivelul excitat și stimulează trecerea lui pe nivelul fundamental (E_1) cu emisia unui foton al cărui energie este egală, de asemenea, cu $h\nu_{21}$ (fig. 6.11, b). S-a constatat că fotonul astfel emis este caracterizat de aceiași parametri ca și cel incident: direcție de propagare, frecvență, fază, polarizare. Putem spune că fotonul emis este „clonă” a celui incident.

În starea obișnuită a corpurilor majoritatea atomilor se află în stare fundamentală. Dacă pe corp cade un fascicul de fotoni, o parte din ei sunt absorbiți, atomii trec în stare excitată și, după un timp, emit spontan fotoni în direcții diverse și cu parametri diferiți. Are loc împrăștierea luminii, intensitatea fasciculului se micșorează pe măsură ce el parcurge o distanță mai mare în corp. Datorită duratei mici a vieții atomilor în stare excitată, emisia stimulată are loc la un număr nesemnificativ de atomi și nu compensează pierderile de fotoni din fascicul în urma absorbției.

Emisia stimulată ar prevala-o pe cea spontană, dacă atomii s-ar afla timp mai îndelungat în stare excitată. Astfel de stări excitate au fost descoperite, ele fiind numite **metastabile** și caracterizate de vieți medii de circa 10^{-3} s, adică de zeci și sute de mii de ori mai mari decât viața medie a atomilor în stări excitate obișnuite. În lasere se utilizează substanțe ale căror particule pot exista în stări de acest fel.

Să analizăm funcționarea **laserului cu rubin**. Rubinul reprezintă un cristal de oxid de aluminiu Al_2O_3 , în care o parte din atomii de aluminiu (circa 0,05%) sunt înlocuiți cu atomi de crom (ioni Cr^{3+}), una din stările excitate ale cărora este metastabilă. Notăm cu E_1 energia atomului de crom în stare fundamentală și cu E_2 și E_3 , unde $E_2 < E_3$, energiile atomului în două stări excitate, dintre care starea cu energia E_2 este metastabilă (fig. 6.12). Acest **sistem cu trei niveluri** se află la baza principiului de funcționare a unor lasere.

Pe un cilindru din rubin (1) este înfășurat un tub spiralat (2) de descărcare electrică în gaz (de obicei, xenon). Bazele cilindrului sunt perpendiculare pe axa lui, una din ele (3) reprezintă o oglindă, iar a doua (4) – o oglindă semitransparentă (fig. 6.13). Distanța dintre oglinzi este egală cu un număr întreg de semilungimi de undă, astfel încât între ele se formează unde staționare. Sistemul de oglinzi reprezintă un **rezonator optic**.

Descărcarea electrică a lămpii cu xenon este însoțită de un impuls puternic de lumină, astfel încât o parte din atomii de crom absorb fotoni cu energia $h\nu_{31}$ și trec în stare excitată, a cărei energie este egală cu E_3 (fig. 6.12). Această fază a funcționării laserului este numită **pompaj optic**.

Din starea nestabilă cu energia E_3 atomul de crom trece în cea cu energia mai mică E_2 , diferența dintre energii ($E_3 - E_2$) fiind transmisă

atomilor sub formă de energie cinetică. Ca rezultat, energia internă a cristalului se amplifică, el se încălzește, din care cauză laserele de intensitate mare sunt prevăzute cu sisteme de răcire.

După tranziția $E_3 \rightarrow E_2$ un număr mare de atomi se află în stare metastabilă și pot să treacă în stare fundamentală. Cristalul este pregătit pentru emisia stimulată și prezintă un **mediu activ**.

Întâmplător, un atom trece din starea metastabilă în cea fundamentală cu emisia unui foton de energie $h\nu_{21}$ (fig. 6.12). Deplasându-se prin cristal, acesta provoacă emisia stimulată a unui atom aflat în stare metastabilă. Prin urmare, prin cristal se deplasează doi fotoni cu proprietăți identice. Ei provoacă apoi emisia stimulată încă a doi fotoni etc. După fiecare etapă, numărul de fotoni se dublează, în cristal se produce o avalanșă de fotoni cu aceiași parametri (fig. 6.14). Dacă avalanșa formează un unghi cu axa cristalului, ea va ieși prin suprafața laterală a acestuia și se va întrerupe.

Altă situație este în cazul avalanșei ce se propagă paralel cu axa cristalului. Oglinzile de la capătul cristalului o reflectă de multe ori, ea parcurge o distanță mare, numărul de fotoni din avalanșă crescând permanent. Prin oglinda semitransparentă (4) iese un fascicul intens de fotoni (fig. 6.13) – fasciculul laser (5). Laserul cu rubin funcționează în regim de impulsuri, fiecare fiind inițiat de descărcarea electrică a lămpii cu xenon.

În anii ce au urmat după descoperirea laserului cu rubin au fost construite noi tipuri de lasere: **lasere cu gaz** care funcționează în regim continuu, **lasere cu semiconductoare** și **lasere cu coloranți organici**, o particularitate a ultimelor este posibilitatea de a modifica frecvența radiației emise.

Remarcăm proprietățile fasciculului laser:

– **monocromatismul**, condiționat de faptul că undele electromagnetice sunt emise în urma tranziției cuantice dintre două niveluri energetice bine determinate ale atomilor;

– **coerența**, care este o proprietate a emisieii stimulate;

– **direcționalitatea**, adică gradul înalt de paralelism al razelor ce formează fasciculul, este condițio-

nată de amplificarea numai a undelor de lumină ce se propagă perpendicular pe oglinzile rezonatorului optic. Gradul de paralelism poate fi ilustrat prin faptul că un fascicul laser transmis de pe Pământ spre Lună formează pe suprafața acesteia un spot luminos cu diametrul de circa 3 km (distanța Pământ–Lună este de aproximativ 380 000 km);

– **intensitatea foarte mare**. Laserele sunt surse artificiale de lumină cu cea mai mare putere. La unele tipuri de lasere se obțin (pe parcursul unor intervale mici de timp) puteri ale radiației de circa 10^{14} W/cm², mult mai mari decât puterea radiației Soarelui – $7 \cdot 10^3$ W/cm².

Aplicațiile laserelor sunt diverse, unele din ele fiind deja menționate la începutul temei. Fascicule laser de intensitate foarte mare se utilizează la tăierea, perforarea, sudarea și topirea metalelor, iar prin evaporarea lor în vid se obțin metale de o puritate deosebită. Aceste fascicule se folosesc la transmiterea informației prin fibre optice: printr-un cablu optic pot fi transmise simultan până la un miliard de convorbiri telefonice și emisiuni muzicale sau un milion de emisiuni televizate.

Laserele sunt folosite în geodezie, unde cu ajutorul lor se măsoară distanțe și unghiuri dintre anumite direcții, se trasează direcțiile în cazul construcțiilor subterane. Astfel, laserul a fost folosit la construirea canalului de sub strâmtoarea La Manche, canal ce unește Franța și Marea Britanie.

Folosirea laserelor a contribuit la lărgirea cunoștințelor despre atmosferă și structura suprafețelor unor planete, determinarea mai exactă a caracteristicilor mișcării lor. Locatoarele cu lasere permit să se stabilească distribuția impurităților în atmosferă în funcție de înălțime, vitezele curenților de aer și componența atmosferei.

Descoperirea laserelor a condus la apariția unor domenii noi ale fizicii, ca **holografia** și **optica neliniară**. Laserele se utilizează tot mai frecvent în cercetările din domeniul fizicii nucleare, inclusiv la realizarea reacției termonucleare dirijate, precum și în tehnică, în viața cotidiană.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă emisia stimulată a radiației? Prin ce se deosebește ea de emisia spontană?
2. Care stări excitate ale atomilor sunt numite metastabile? Prin ce diferă ele de alte stări excitate?
3. Ce reprezintă sistemul cu trei niveluri?
4. Prin ce este important pompajul optic?
5. Care sunt proprietățile fasciculului laser?
6. Ce proprietate a fasciculului este folosită în geodezie?
7. Scrieți un referat cu tema: „Aplicații practice ale laserelor în...” (domeniul concret – la alegere).

ELEMENTE DE FIZICĂ A NUCLEULUI ATOMIC. PARTICULE ELEMENTARE

7.1. NUCLEUL ATOMIC: CARACTERISTICILE FIZICE ȘI STRUCTURA

Descoperirea electronului de către J.J. Thomson în 1897 a spulberat mitul despre indivizibilitatea atomului. În 1911, E. Rutherford a descoperit nucleul atomic. Problema indivizibilității nucleului devenise una stringentă: este acesta un tot întreg, fără structură internă sau reprezintă un sistem compus din particule separate?

Să analizăm mărimile fizice ce caracterizează nucleul: **sarcina electrică, masa și raza lui**.

Cunoașteți deja (*tema 6.2*) că nucleul atomului este încărcat cu sarcină electrică pozitivă. Ea este egală cu produsul dintre numărul de ordine Z al elementului în tabelul periodic al elementelor chimice și sarcina electrică elementară e :

$$Q_{\text{nucl}} = +Ze. \quad (7.1)$$

Z este numit **număr atomic** (uneori și **număr de sarcină**).

Justețea acestei relații a fost confirmată convingător în 1913 de către fizicianul englez Henry Gwin Jeffreys Moseley (1887–1915). El bombarda substanța cercetată cu un fascicul de electroni accelerați până la viteze destul de mari, astfel încât aceștia să pătrundă în interiorul atomului până aproape de nucleul lui. În urma ciocnirilor cu electronii din vecinătatea nucleului, din atomi erau eliminați electronii de pe nivelurile energetice inferioare. Trecerea ulterioară a electronilor de pe nivelurile superioare pe cele inferioare, rămase libere, era însoțită de emisia radiației electromagnetice, a cărei frecvență depinde de sarcina electrică a

nucleului. Moseley a stabilit relația dintre frecvență și numărul atomic, cunoscută ca **legea lui Moseley**. În baza ei a fost confirmată relația (7.1), stabilindu-se sensul fizic al numărului de ordine Z al elementului în sistemul periodic. S-a constatat că Z este numărul de sarcini elementare ce formează sarcina nucleului.

Din cauza prezenței învelișurilor electronice, masele nucleelor nu pot fi determinate nemijlocit. De aceea se stabilesc experimental masele ionilor, iar apoi se calculează masele nucleelor, ținând seama de numerele de electroni din ionii respectivi. Pentru a determina masele ionilor, se utilizează, de obicei, **spectrografele de masă** (principiul funcționării lor a fost expus în *capitolul 1, tema 1.4*).

Masele nucleelor se exprimă în unități atomice de masă (u), ca și masele atomilor și ale moleculelor. Această unitate este definită ca $1/12$ din masa atomului de carbon (ulterior definiția va fi precizată). Relația dintre unitatea atomică de masă și kilogram – unitatea fundamentală pentru masă în SI – este:

$$1 u = 1,66005656 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

În calcule se utilizează valoarea aproximativă $1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Numărul întreg apropiat de valoarea numerică a masei nucleului exprimată în unități atomice de masă se numește număr de masă (A).

Conform definiției, numărul de masă este adimensional, iar masa atomului – egală cu Au .

Diametrul nucleului atomic a fost estimat de către Rutherford în baza datelor obținute la studierea împrăstierii particulelor α (*tema 6.2*). Rutherford a stabilit că razele nucleelor sunt de ordinul 10^{-15} – 10^{-14} m.

Între raza nucleului și numărul lui de masă există o relație simplă. Dacă se consideră densitatea materiei nucleare constantă, atunci volumul nucleului este proporțional cu masa lui: $V \sim m$. Volumul $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, unde R este raza nucleului, considerat de formă sferică. Masa lui este direct proporțională cu numărul de masă A , adică $m \sim A$. Prin urmare, $\frac{4}{3}\pi R^3 \sim A$, deci $R \sim A^{1/3}$. Trecând la egalitate, avem:

$$R = aA^{1/3}. \quad (7.2)$$

Parametrul a are valori în intervalul $(1,2 - 1,4) \cdot 10^{-15}$ m.

Să estimăm și densitatea materiei nucleare. Masa nucleului este egală cu Au , volumul lui cu $\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^3 A^3$.

Pentru densitate obținem $\rho_{nuct} = \frac{Au}{\frac{4}{3}\pi a^3 A^3} = \frac{3u}{4\pi a^3}$.

Efectuând calculele, avem $\rho_{nuct} \approx 2 \cdot 10^{17}$ kg/m³. Aceasta este o valoare destul de mare. Pentru masa 1 cm³ de materie nucleară obținem valoarea: $2 \cdot 10^{17}$ kg/m³ · 10⁻⁶ m³ = 2 · 10¹¹ kg = 2 · 10⁸ tone!

În anii 1910–1911, savantul englez Frederick Soddy (1877–1956) a stabilit că nu toți atomii elementului chimic dat au mase egale. Ulterior ei au primit denumirea comună de **izotopi** (gr. *isos* „egal, la fel” + *topos* „loc”).

Izotopii sunt atomii aceluiși element chimic, au același număr atomic Z , dar nucleele lor au mase diferite, adică numerele de masă A sunt diferite. Proprietățile chimice ale izotopilor sunt aproximativ aceleași, ceea ce demonstrează că și învelișurile lor electronice sunt la fel. Ca rezultat, toți izotopii unui element ocupă în tabelul periodic al elementelor chimice același loc.

Pentru a deosebi izotopii între ei, simbolul chimic X al elementului respectiv este însoțit de doi indici, plasați în stânga: jos – numărul atomic Z , sus – numărul de masă A , adică simbolul izotopului are forma ${}^A_Z X$. Din numărul elementelor cu cei mai mulți izotopi fac parte uraniul, mercurul, stronțitul, staniul, carbonul etc. De exemplu, izotopii carbonului sunt: ${}^9_6 C$, ${}^{10}_6 C$, ${}^{11}_6 C$, ${}^{12}_6 C$, ${}^{13}_6 C$, ${}^{14}_6 C$, ${}^{15}_6 C$ și ${}^{16}_6 C$. În amestecurile de izotopi existente în natură izotopul ${}^{12}_6 C$ constituie 98,9%, izotopul ${}^{13}_6 C$ – doar 1,1%, procentul celorlalți izotopi fiind nesemnificativ.

În definiția unității atomice de masă se are în vedere izotopul ${}^{12}_6 C$.

Descoperirea izotopilor a demonstrat că nucleele nu mai sunt indivizibile, ele au o anumită structură

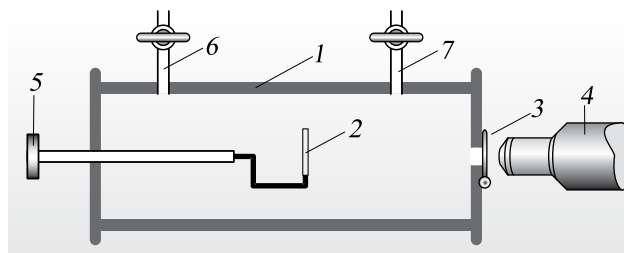


Fig. 7.1

interioară. Pentru a o stabili, era necesar să fie identificate particulele ce fac parte din componența nucleului. Prima particulă a fost descoperită în anul 1919 de către Rutherford. Schema instalației utilizate este prezentată în figura 7.1. În interiorul unui spațiu ermetic (1) se află o sursă (2) de particule α . Este necesar de subliniat că **particulele α sunt nuclele ale izotopului de heliu ${}^4_2 He$** . În calea particulelor α este plasat un ecran transparent (3), partea din față a lui fiind acoperită cu un strat de substanță fluorescentă. La incidența particulelor α pe acest strat, în locurile respective apar spoturi luminoase, observate prin tubul microscopic (4). Mânerul (5) permite apropierea sau îndepărtarea sursei (2) de ecran (3). Prin tuburile (6, 7) dotate cu robinete gazul din spațiul respectiv poate fi evacuat și înlocuit cu altul. În timpul experienței presiunea diferitor gaze era constantă.

Rutherford a constatat că în cazul în care spațiul conținea oxigen spoturile luminoase de pe ecranul fluorescent (3) dispăreau, dacă distanța dintre sursă (2) și ecran era mărită până la o anumită valoare minimă. Situația rămânea aceeași la înlocuirea oxigenului cu dioxidul de carbon. În aceste cazuri, particulele α în mișcarea lor se ciocneau cu moleculele acestor gaze, produceau ionizarea lor, pierdeau multă energie și nu ajungeau la ecran.

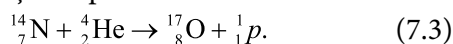
O altă situație se observa atunci când spațiul conținea aer sau azot. La aceeași distanță dintre sursă și ecran pe acesta apăreau uneori spoturi luminoase. Apariția lor poate fi explicată numai prin faptul că particulele α , ciocnind nucleele de azot, eliminau (dezbăteau) din ele o particulă masivă, care lovind stratul fluorescent al ecranului producea spoturi luminoase. Cercetările detaliate ale influenței câmpurilor electrice și magnetice asupra mișcării particulelor provenite din atomii de azot au demonstrat că masa lor este egală cu masa celui mai ușor izotop al hidrogenului ${}^1_1 H$, iar sarcina electrică este pozitivă și egală cu sarcina elementară. Aceste particule – nucleele izotopului ${}^1_1 H$ – au fost numite **protoni**.

Experiența a fost repetată și cu alte substanțe – bor, fluor, sodiu, aluminiu, neon etc. Rutherford a stabilit că în toate aceste cazuri particulele α dezbate din nucleele respective protoni. Astfel, s-a ajuns la concluzia că **protonii sunt particule ce fac parte din componența nucleelor**. Protonii se notează cu litera p .

Măsurătorile de mare precizie au stabilit că masa protonului $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,007276470 u și sarcina electrică $q_p = +e = +1,60217733 \cdot 10^{-19}$ C. Protonul este nucleul cu $Z = 1$ și $A = 1$. Simbolul său, conform regulii adoptate, este 1_1p .

Masa protonului este de 1 836 de ori mai mare decât masa electronului: $m_p = 1 836 m_e$. Numărul de masă al electronului este deci egal cu zero, sarcina electrică fiind $-e$. Pentru electron se folosește simbolul ${}^0_{-1}e$.

În experimentul în care a fost descoperit protonul, Rutherford a realizat **prima reacție nucleară artificială**. Ținând cont de faptul că particula α este izotopul ${}^4_2\text{He}$, reacția respectivă este:



Astfel, Rutherford a realizat transformarea azotului în oxigen.

Conștientizând faptul că prin existența numai a protonilor nu poate fi explicată diversitatea izotopilor în natură, Rutherford a admis existența încă a unei particule, neutre, ce face parte din componența nucleului (a. 1920). Descoperirea acesteia a durat 12 ani.

Primul pas a fost făcut în anul 1930 de către fizicianul german Walter Bothe (1891–1957) împreună cu colaboratorul său H. Becker. Bombardând beriliul cu particule α , ei au înregistrat apariția unor particule, de natură necunoscută, cu o putere de penetrație mare. În anul 1932, savanții francezi, soții Irène (1897–1956) și Frederick Jean Joliot-Curie (1900–1958) au orientat radiația necunoscută asupra unui strat de parafină. S-a constatat că radiația necunoscută dezbate protoni din parafină.

Pasul decisiv a fost făcut în același an, 1932, de către fizicianul englez James Chadwick (1891–1974).

El a stabilit că particulele emise de beriliu, ca rezultat al bombardării cu particule α , sunt particule neutre a căror masă este egală aproximativ cu masa protonului. Acestea au fost denumite **neutroni** și se notează cu n .

În urma unor măsurări de precizie înaltă s-a stabilit că masa neutronului $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$ kg = 1,008664902 u \approx 1 838 m_e . Masa neutronului este cu circa 0,15% mai mare decât masa protonului. Numărul de masă al neutronului este egal cu 1, iar cel de sarcină – cu 0. De aceea neutronul are simbolul 1_0n .

De menționat că neutronul în stare liberă este nestabil și are durata medie de viață de circa 15 min. El este stabil doar în componența nucleelor atomice. Astfel,

au fost identificate **particulele constituente ale nucleului atomic: protonul 1_1p și neutronul 1_0n** . Ele poartă un nume comun – **nucleoni**.

După descoperirea neutronului, în anul 1932, fizicianul german Werner Carl Heisenberg (1901–1976) și cel rus Dmitri Ivanenko (1904–1994), în mod independent, au propus **modelul protono-neutronic al nucleului**. Conform acestuia, nucleul atomului este compus din protoni și neutroni. Fiecare din ei are numărul de masă egal cu 1, deci numărul total al lor (numărul de nucleoni) este egal cu numărul de masă A . Numărul de protoni este egal cu numărul atomic Z de sarcini elementare ale nucleului, iar restul de nucleoni $N = A - Z$ sunt neutroni. Prin urmare,

nucleul elementului chimic A_ZX este compus din A nucleoni, dintre care Z sunt protoni și $N = A - Z$ sunt neutroni.

Modelul protono-neutronic al nucleului permite a explica existența izotopilor, care au numere atomice Z egale, dar numere de masă A diferite. Drept concluzie, nucleele respective conțin numere egale de protoni, însă numere diferite de neutroni.

Astfel, cercetările efectuate de diverși fizicieni pe parcursul a circa 20 de ani au permis stabilirea modelului nu numai al atomului, ci și al nucleului său.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce caracteristică fizică a nucleului este determinată de numărul atomic al elementului chimic?
2. Cum se definește numărul de masă al nucleului atomic?
3. Ce reprezintă izotopii unui element chimic?
4. Care din numerele ce caracterizează nucleul atomic este același pentru toți izotopii unui element chimic? Dar care ia valori diferite?
5. Estimați raza aproximativă a nucleului izotopului iodului ${}^{127}_{53}\text{I}$.
6. Câți protoni și câți neutroni conține nucleul izotopului toriului ${}^{232}_{90}\text{Th}$?

7.2.* FORȚELE NUCLEARE. ENERGIA DE LEGĂTURĂ A NUCLEULUI

Protonii din componența nucleului atomic sunt încărcăți cu sarcini electrice pozitive, deci între ei acționează forțe electrostatice de respingere. Dacă ținem seama că distanțele dintre protoni sunt foarte mici, conchidem că forțele menționate sunt mari. Dar protonii nu se împrăștie în spațiu, ci, împreună cu neutronii, formează o structură compactă și stabilă – nucleul. Această situație poate fi explicată doar dacă se presupune că între nucleoni (protonii și neutronii din nucleu) acționează și forțe de altă natură fizică ce depășesc forțele de respingere electrică și mențin împreună nucleonii.

Forțele care mențin nucleonii împreună în componența nucleului sunt numite *forțe nucleare*.

Cercetările detaliate au scos în evidență proprietățile forțelor nucleare, cele principale fiind:

1. Forțele nucleare sunt forțe de atracție. Astfel ele sunt similare forțelor de atracție gravitațională, dar diferă de forțele electrostatice, care pot fi atât de atracție, cât și de respingere, în funcție de semnele sarcinilor electrice care interacționează.

2. Forțele de atracție nucleară nu depind de sarcinile electrice ale nucleonilor. Atracția nucleară proton–proton, proton–neutron sau neutron–neutron este identică pentru aceleași poziții reciproce ale perechilor de nucleoni.

3. Forțele nucleare au rază de acțiune mică. La distanțe dintre nucleoni mai mari de circa $1,4 \cdot 10^{-15}$ m ele pot fi neglijate.

4. Forțele nucleare au caracter de saturație. Din cauza razei mici de acțiune fiecare nucleon interacționează doar cu nucleonii din vecinătate, atrăgând și fiind atras numai de către aceștia.

5. Forțele nucleare sunt cele mai puternice forțe cunoscute în natură. Ele sunt aproximativ de 100 de ori mai intense decât forțele de interacțiune electrică.

Interacțiunea dintre nucleoni s-a dovedit a fi atât de complexă, încât până în prezent n-a fost elaborată o teorie completă a forțelor nucleare.

Din mecanica clasică se cunoaște:

masa este o mărime fizică aditivă – masa sistemului de corpuri este egală cu suma maselor corpurilor ce fac parte din acest sistem.

Măsurările cu un grad înalt de precizie au demonstrat că în fizica nucleului proprietatea de aditivitate nu se manifestă.

Masa nucleului este mai mică decât suma maselor nucleonilor din care el este constituit.

Nucleul elementului ${}^A_Z X$ conține Z protoni și $N = A - Z$ neutroni. Dacă m_p este masa protonului și m_n – a neutronului, atunci suma maselor lor este $Zm_p + (A - Z)m_n$. Masa nucleului m_{nuc} este mai mică decât suma obținută:

$$m_{nuc} < Zm_p + (A - Z)m_n.$$

Diferența dintre suma maselor protonilor și ale neutronilor ce formează nucleul și masa acestuia se numește *defect de masă* (Δm):

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{nuc}. \quad (7.4)$$

În experimente se determină nu masele nucleelor, ci masele atomilor. De aceea vom trece expresia pentru defectul de masă (7.4) la masele atomilor, care sunt mai mari decât masele nucleelor cu masele electronilor din jurul lor. Ținând seama că masa atomului $m_{at} = m_{nuc} + Zm_e$, iar $m_p + m_e = m_H$ este masa atomului de hidrogen, transcriem (7.4) astfel:

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_{at}. \quad (7.5)$$

Defectul de masă se exprimă, de obicei, ca și masele atomilor, în unități atomice de masă (u).

Să calculăm, de exemplu, defectul de masă pentru izotopul de siliciu ${}^{31}_{14}\text{Si}$. Masa acestui atom este egală cu 30,9753 u, a celui de hidrogen – cu 1,00783 u, iar masa neutronului – cu 1,00866 u. Astfel, $\Delta m = 0,28154$ u. Defectul de masă pentru acest izotop constituie mai mult de un sfert din unitatea atomică de masă.

Cunoașterea defectului de masă permite să se determine o caracteristică energetică importantă a nucleului – energia de legătură.

Se numește *energie de legătură a nucleului* mărimea fizică egală cu lucrul minim ce trebuie consumat pentru descompunerea nucleului în protoni și neutroni separați.

Lucrul se efectuează pentru învingerea forțelor nucleare care mențin protonii și neutronii împreună în nucleu. Situația este analogică celei de descompunere în molecule a unei picături de apă adusă la temperatura de fierbere. Picăturii (în acest scop) i se transmite o cantitate de energie egală cu

căldura de vaporizare. În ambele cazuri, la desfacerea nucleului sau a picăturii, energia sistemului de particule se mărește.

Pentru a calcula creșterea energiei la descompunerea nucleului, pornim de la faptul că acest proces este însoțit de mărirea masei sistemului de particule cu valoarea defectului de masă Δm . Masei Δm îi corespunde, conform relației universale (4.25), energia $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$, unde c este viteza luminii în vid. În cazul dat aceasta este energia de legătură a nucleului $E_{leg} = \Delta E$, adică:

$$E_{leg} = \Delta m \cdot c^2, \quad (7.6)$$

unde Δm este defectul de masă.

Substituind expresia (7.5) în (7.6), obținem formula de calcul a energiei de legătură a nucleului:

$$E_{leg} = (Zm_H + (A - Z)m_n - m_{at})c^2. \quad (7.7)$$

La formarea nucleului din protoni și neutroni separați, masa sistemului de particule se micșorează cu Δm , iar energia E_{leg} este degajată.

Defectul de masă se exprimă în unități atomice de masă (u). Dacă se iau valorile cât mai exacte ale unității atomice de masă, ale vitezei luminii în vid și ale electron-voltului exprimat în Joule, atunci energia echivalentă acestei unități este:

$$1 \text{ u} \cdot c^2 \approx 9,315 \cdot 10^8 \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}.$$

Pentru energia de legătură a izotopului de siliciu $^{31}_{14}\text{Si}$, al cărui defect de masă a fost calculat mai sus, avem: $E_{leg} = 0,28154 \cdot 931,5 \text{ MeV} \approx 262,2 \text{ MeV}$.

Aceasta este o valoare destul de mare, mult mai mare decât energiile ce figurează în lumea atomilor. Pentru energia de ionizare a hidrogenului (vezi tema 6.3, b) am avut valoarea $E_{ion} = 13,5 \text{ eV}$,

de circa 20 mil. de ori mai mică decât energia de legătură a nucleului de siliciu.

Energia de legătură E_{leg} este mai mare la nucleele cu un număr de masă A mai mare. Pentru a caracteriza stabilitatea nucleele, se introduce mărimea fizică, numită **energie de legătură pe nucleon**:

$$\varepsilon = \frac{E_{leg}}{A}, \quad (7.8)$$

al cărei grafic în funcție de numărul de masă A , este prezentat în figura 7.2.

Nucleele sunt mai stabile dacă energia de legătură pe nucleon este mai mare. Cele mai stabile, după cum rezultă din grafic, sunt nucleele elementelor din partea centrală a tabelului periodic.

Ulterior acest grafic va fi utilizat pentru a indica modalitățile de obținere a energiei nucleare.

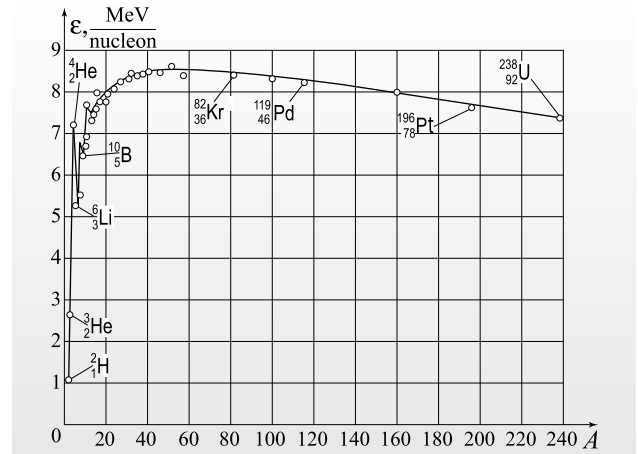


Fig. 7.2

➔ Verificați-vă cunoștințele

- Cum se explică faptul că, respingându-se electric între ei, protonii se mențin împreună în componența nucleului atomic?
- Depind forțele nucleare de sarcinile electrice ale nucleonilor?
- În ce constă caracterul de saturație al forțelor nucleare?
- Ce lege a mecanicii clasice nu se respectă la formarea nucleului atomic din nucleoni?
- Ce este defectul de masă al nucleului?
- Cum se definește energia de legătură a nucleului?
- Calculați defectul de masă al izotopului de azot $^{14}_7\text{N}$, știind că masa lui este egală cu 14,00307 u.
- Determinați energia minimă necesară pentru a diviza nucleul ^7_4Be în nucleoni separați. Masa atomului acestui izotop este egală cu 7,01693 u.
- Determinați defectul de masă al izotopului $^{62}_{28}\text{Ni}$, dacă energia de legătură pe nucleon pentru el este egală cu 8,795 MeV/nucleon.
- În baza graficului energiei de legătură pe nucleon, în funcție de numărul de masă A (fig. 7.2), estimați:
 - care din nucleele izotopilor $^{82}_{36}\text{Kr}$, $^{196}_{78}\text{Pt}$ și $^{238}_{92}\text{U}$ este mai puțin stabil;
 - energia de legătură a nucleului izotopului $^{119}_{46}\text{Pd}$;
 - defectul de masă al izotopului $^{238}_{92}\text{U}$;
 - masa atomului izotopului $^{196}_{78}\text{Pt}$.

7.3. RADIOACTIVITATEA

a. Descoperirea radioactivității. Transformări radioactive

În anul 1896, fizicianul francez Henri Antoine Becquerel (1852–1908) a observat că sărurile de **uraniu** (U) acționează (înnegresc) spontan placa fotografică învelită în hârtie neagră. Becquerel a stabilit că această acțiune nu este influențată de factori externi ca temperatura, presiunea, precum și de compoziția chimică a substanței, din componența căreia face parte uraniul. Astfel, a fost descoperită o radiație nouă cu proprietăți deosebite. Substanțele care o emit au fost numite **radioactive**.

În anii următori au fost obținute noi rezultate. În anul 1898, soții Maria Sklodowska-Curie (1867–1934) și Pierre Curie (1859–1906), îndrumați de către Becquerel, au stabilit că **toriul** (Th) este, de asemenea, radioactiv și au descoperit două elemente radioactive noi: **poloniul** (Po) și **radiul** (Ra), a căror radiație este mult mai intensă decât cea a uraniului.

În anul 1899, Rutherford a realizat un experiment a cărui schemă este prezentată în figura 7.3. În canalul din interiorul unui bloc de plumb (1) a fost introdusă o substanță radioactivă (2). Din canal ieșea un fascicul de radiație (3), ce cădea pe o placă fotografică (4). La dezvoltare, în centrul ei s-a observat o pată neagră. Tabloul se modifica dacă radiația trecea printr-un magnet (5). La dezvoltarea peliculei, pe ea se observa o pată (6) mai apropiată de centrul plăcii, corespunzând unor particule încărcate cu sarcină pozitivă și o fâșie (7) condiționată de particule cu sarcină electrică negativă. Fluxul de particule pozitive a fost numit **raze α**, al doilea flux – **raze β**. Astfel, Rutherford a stabilit existența a două componente ale radiației emise de substanțele radioactive. În același an Rutherford a descoperit încă un element radioactiv – **radonul** (Rn).

În anul 1900, fizicianul francez Paul Villard (1860–1934) a descoperit a treia componentă a radiației, care nu se abătea în câmpul magnetic, numită **raze γ**.

Cercetările au permis să fie stabilită natura razelor α, β și γ. Mai întâi Becquerel a demonstrat (a. 1900) că razele β reprezintă un fascicul de electroni ce posedă viteze foarte mari, care se apropie de viteza luminii în vid. În 1903, Rutherford a stabilit că particulele α sunt ioni de heliu He^{2+} (în acei ani nucleul

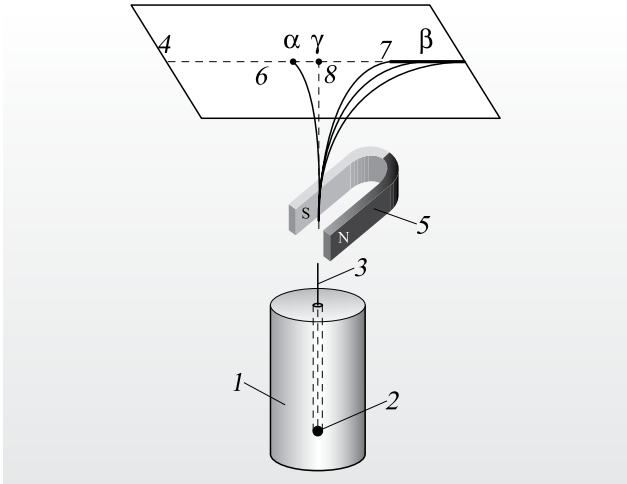


Fig. 7.3

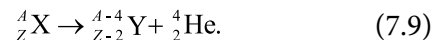
încă nu era descoperit), în termeni contemporani – nucleu ale izotopului de heliu ${}^4_2\text{He}$. În fine, s-a constatat că razele γ sunt unde electromagnetice de frecvență foarte înaltă, mai mare decât a razelor Röntgen.

În anul 1903, Rutherford și Soddy au demonstrat experimental că radioactivitatea este însoțită de transformarea unor elemente chimice în altele. De exemplu, a radiului (Ra) în radon (Rn), care este un gaz inert. Astfel, a fost stabilită esența fenomenului radioactivității.

Radioactivitatea este transformarea spontană a nucleelor unor elemente chimice în nucleu ale altor elemente cu emisia simultană a unor particule.

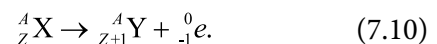
Radioactivitatea însoțită de emisia particulelor α mai este numită **dezintegrare α**, iar cea de emisie a particulelor β – **dezintegrare β**.

Să scriem regulile care reflectă transformările radioactive corespunzătoare. Se ține seama de respectarea legilor conservării sarcinii electrice și a masei. În cazul dezintegrării α, particula emisă de nucleul inițial ${}^A_Z\text{X}$ este un nucleu de heliu ${}^4_2\text{He}$. Prin urmare, nucleul Y obținut are numărul atomic egal cu $(Z - 2)$ și cel de masă egal cu $(A - 4)$. Regula respectivă este:



La dezintegrarea α elementul radioactiv se transformă într-un element situat cu două căsuțe mai la stânga, adică spre începutul sistemului periodic al elementelor.

Particula emisă la dezintegrarea β este electronul ${}^0_{-1}e$, iar regula transformării este:



Prin dezintegrare β elementul radioactiv se transformă în elementul situat în căsuța vecină din dreapta, adică se deplasează cu o căsuță spre sfârșitul sistemului periodic.

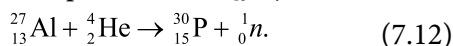
Aceste două reguli, numite **reguli de deplasare**, au fost stabilite în anul 1913, în mod independent, de către chimiștii fizicieni Frederick Soddy (1877–1956) și Kasimir Fajans (1887–1975).

În cazul dezintegrării α particulele componente – protonii și neutronii – fac parte din structura nucleului. În cazul dezintegrării β , electronii emiși nu intră în structura nucleului. Analizând regula de transformare (7.10), constatăm că numărul de masă A este același la ambele nuclee – primar și secundar. Prin urmare, ambele nuclee conțin același număr de nucleoni, dar în nucleul secundar numărul de protoni este cu unul mai mare decât în nucleul primar, în timp ce numărul de neutroni a devenit mai mic cu unu. Conchidem că în interiorul nucleului un neutron s-a transformat în proton și electron, ultimul fiind expulzat din nucleu:



Astfel se explică expulzarea electronului din nucleul care nu are electroni în componența sa. Situația este analogică emisiei fotonilor de către atomii care însă nu-i conțin. În ambele situații emisia particulelor are loc în urma unor transformări ce se produc în sistemele fizice considerate.

În anul 1934, soții Irène și Frederick Joliot-Curie au descoperit **radioactivitatea artificială**. Bombardând o folie de aluminiu cu particule α , au stabilit că după îndepărtarea sursei, folia pe parcursul unui anumit interval de timp era radioactivă. S-a constatat că în urma bombardării izotopul stabil de aluminiu ${}^{27}_{13}\text{Al}$ s-a transformat în izotopul fosforului ${}^{30}_{15}\text{P}$ și un neutron:



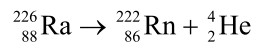
Acest izotop al fosforului, obținut pe cale artificială, nu este stabil. Fiind radioactiv, el se transformă în izotopul de siliciu ${}^{30}_{14}\text{Si}$ cu emisia unui **pozitron**. Pozitronul este o **antiparticulă** ce are masa egală cu masa electronului și sarcina electrică $+e$.

Ulterior s-a constatat că în urma bombardării nucleelor stabile cu particule α , protoni, neutroni și alte particule accelerate, se obțin artificial izotopi ai tuturor elementelor chimice. Pe cale artificială au fost obținute și **elementele transuraniene**, cu numărul atomic $Z > 92$.

În prezent sunt cunoscuți aproximativ 280 de izotopi stabili ai elementelor chimice și circa 2000 de izotopi nestabili (radioactivi), ultimii, circa 85%, fiind

obținuți în mod artificial. Izotopii stabili au numărul atomic $Z \leq 83$, iar toți izotopii cu numere atomice mai mari sunt nestabili. Izotopi nestabili are fiecare element chimic. De exemplu, izotopul hidrogenului, tritiul, ${}^3_1\text{H}$, este radioactiv.

Particulele α emise de un izotop radioactiv posedă anumite energii cinetice. De exemplu, în urma dezintegrării radiului:



particulele α emise posedă energii din șirul de valori: 4,8 MeV, 4,6 MeV și 4,3 MeV. Aceasta demonstrează că energia nucleului de radon obținut poate lua anumite valori discrete. Energia este minimă în cazul în care energia particulei α emise este maximă, egală cu 4,8 MeV. În acest caz nucleul radonului se află în stare fundamentală. Însă la emisia unei particule cu energie mai mică, de exemplu 4,6 MeV, nucleul radonului rămâne în stare excitată, având energia mai mare decât în stare fundamentală cu diferența de 0,2 MeV. Tranziția de la starea excitată la cea fundamentală este însoțită de emisia unei cuante γ cu energia respectivă de 0,2 MeV. Astfel,

razele γ se emit la tranzițiile nucleelor din stări excitate în cea fundamentală atât în cazul dezintegrărilor α , cât și în cel al dezintegrărilor β .

Spre deosebire de particulele α , electronii emiși de izotopii radioactivi nu au energii bine determinate. Energiile lor au valori într-un interval continuu, de la zero până la o energie maximă, caracteristică pentru izotopul dat. Aceasta se observă în experimentul reprezentat schematic în *figura 7.3*. Particulele β înnegresc pe placa fotografică o fâșie, ceea ce demonstrează că ele au viteze diferite. Faptul respectiv a creat o situație confuză în teoria dezintegrării β . Doar nucleele – cel primar și cel secundar – au energii bine determinate, iar diferența lor trebuie să fie egală cu o valoare anumită a energiei particulei β . Nu era clar cum poate fi respectată legea conservării energiei în cazul în care energia particulei β are valori într-un interval de energii.

În baza legii conservării energiei, în anul 1930, fizicianul austriac Wolfgang Pauli (1900–1958) a presupus că nucleul radioactiv emite simultan particula β și o particulă neutră cu masă neglijabilă, numită **neutrîn**. El preia o parte din energia degajată la dezintegrare.

b.* Legea dezintegrării radioactive

În urma dezintegrării numărul de nuclee radioactive se micșorează. În anul 1903, fizicienii

E. Rutherford și F. Soddy au formulat **legea dezintegrării radioactive** care exprimă acest număr în funcție de timp ținând cont de faptul că fenomenul studiat este aleatoriu. Este imposibil de prezis care anume nucleu și când se va dezintegra. Se poate prezice doar numărul de nucleu care se vor dezintegra într-un anumit interval de timp. Acest număr este cu atât mai exact, cu cât este mai mare numărul de nucleu radioactive. Despre legea menționată se spune că are un **caracter statistic**.

Notăm cu N_0 numărul de nucleu radioactive la momentul $t_0 = 0$ și determinăm numărul N de nucleu radioactive la momentul arbitrar de timp t . Fie dN variația numărului de nucleu în intervalul de timp dt . În urma dezintegrării, numărul de nucleu rămase radioactive se micșorează, deci variația dN este negativă, $dN < 0$. Numărul de nucleu care au dezintegrat în acest interval de timp dt , egal cu $|dN|$, este cu atât mai mare, cu cât intervalul este mai mare, adică $|dN| \sim dt$. Pe lângă aceasta, numărul de nucleu dezintegrate în intervale de timp egale este mai mare dacă numărul de nucleu N pasibile dezintegrării este mai mare: $|dN| \sim N$. În concluzie avem $|dN| \sim Ndt$. Trecând la egalitate și introducând un coeficient de proporționalitate λ , numit **constantă radioactivă** sau **constantă de dezintegrare**, avem:

$$|dN| = \lambda N dt. \quad (7.13)$$

Din această relație stabilim sensul fizic al constantei radioactive:

$$\lambda = \frac{|dN|}{N \cdot dt}. \quad (7.14)$$

Raportul dintre numărul $|dN|$ de nucleu care au dezintegrat în intervalul dt și numărul de nucleu radioactive N la începutul acestui interval este partea de nucleu care au dezintegrat. Prin urmare,

constantă radioactivă λ este egală cu raportul dintre partea de nucleu radioactive care au dezintegrat într-un interval de timp și mărimea acestui interval.

Variația numărului de nucleu radioactive $dN = -|dN|$, deci $dN = -\lambda N dt$.

Separăm variabilele și integrăm în limitele de la 0 până la t pentru timp și valorile respective N_0 și N ale numărului de nucleu. Ca rezultat, pentru numărul de nucleu radioactive N la momentul de timp t obținem:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (7.15)$$

Numărul de nucleu radioactive se micșorează exponențial cu timpul.

Pentru a caracteriza radioactivitatea izotopilor, se folosește, mai frecvent, o altă constantă – **timpul (perioada) de înjumătățire $T_{1/2}$** , egal(ă) cu intervalul de timp în care numărul de nucleu radioactive se micșorează de două ori.

Conform acestei definiții, la momentul de timp $t = T_{1/2}$ numărul de nucleu radioactive $N = N_0 / 2$. Substituind aceste valori în legea (7.15) și efectuând transformările respective, pentru constantă radioactivă λ obținem:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (7.16)$$

Substituind (7.16) în (7.15) și luând în considerare că $e^{\ln 2} = 2$, pentru legea dezintegrării radioactive obținem o altă expresie echivalentă:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (7.17)$$

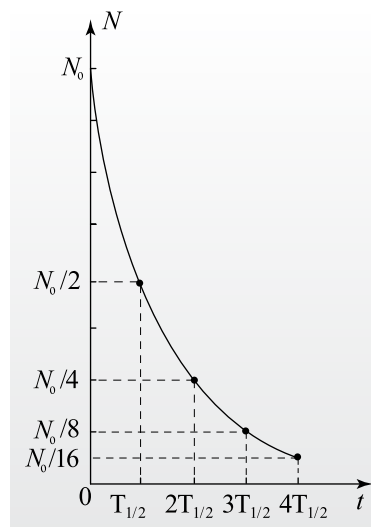


Fig. 7.4

Tabelul 1

Izotopul radioactiv	Modul de dezintegrare	Timpul de înjumătățire
$^{238}_{92}\text{U}$	α	$4,5 \cdot 10^9$ ani
$^{40}_{19}\text{K}$	β^-	$1,3 \cdot 10^9$ ani
$^{235}_{92}\text{U}$	α	$7 \cdot 10^8$ ani
$^{234}_{92}\text{U}$	α	$2,5 \cdot 10^5$ ani
^3_1H	β^-	12,3 ani
$^{131}_{53}\text{I}$	β^-	8 zile
$^{212}_{82}\text{Pb}$	β^-	10,6 ore
$^{239}_{92}\text{U}$	β^-	23 min.
$^{215}_{84}\text{Po}$	α	$1,8 \cdot 10^{-6}$ s

Graficul ce ilustrează numărul de nuclee radioactive în funcție de timp este prezentat în *figura 7.4* (p. 109). În *tabelul 1* (p. 109) sunt indicate valorile timpilor de înjumătățire pentru câțiva izotopi. Din tabel observăm că timpii de înjumătățire au valori într-un interval foarte mare: de la milionimi de secundă până la miliarde de ani. Diferiți izotopi ai aceluiași element dezintegrează diferit, α sau β , au și timpi diverși de înjumătățire (vezi izotopii uraniului).

Majoritatea izotopilor obținuți în urma dezintegrărilor sunt, de asemenea, radioactivi. Ei dezintegrează și acest proces continuă până se obține un izotop stabil. **Totalitatea izotopilor care dezintegrează până la izotopul stabil este numită serie sau familie radioactivă.** În natură se cunosc trei serii de acest fel. Ele încep cu izotopii uraniului ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$ și cel al toriului ${}^{232}_{90}\text{Th}$ și se termină cu diferiți izotopi stabili ai plumbului.

Probleme rezolvate

❶ Determinați numărul dezintegrărilor α și cel al dezintegrărilor β^- ce s-au produs la transformarea izotopului de uraniu ${}^{238}_{92}\text{U}$ în izotopul de radon ${}^{222}_{86}\text{Rn}$.

Se dă:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 92, \\ A_1 &= 238, \\ Z_2 &= 86, \\ A_2 &= 222 \end{aligned}$$

$$n_\alpha, n_\beta - ?$$

Rezolvare:

Numărul de masă variază doar la dezintegrările α , la fiecare din ele acesta micșorându-se cu 4. Deci numărul acestor dezintegrări $n_\alpha = (A_1 - A_2)/4$. Avem $n_\alpha = 4$. La fiecare dezintegrare α numărul atomic se micșorează cu 2, și după n_α dezintegrări se reduce cu $2n_\alpha = 8$. În transformarea considerată numărul atomic s-a micșorat numai cu $Z_1 - Z_2 = 6$. Ținând seama de faptul că la o dezintegrare β^- acest număr se mărește cu 1, conchidem că numărul de dezintegrări β^- este:

$$n_\beta = 2n_\alpha - (Z_1 - Z_2); n_\beta = 2.$$

În transformarea analizată numărul dezintegrărilor: $n_\alpha = 4$ și $n_\beta = 2$.

❷ Organismele vii absorb din atmosferă și, ca rezultat, conțin o cantitate anumită de carbon radioactiv ${}^{14}_6\text{C}$ cu timpul de înjumătățire egal cu 5 700 de ani. În urma ana-

lizei unor obiecte de lemn descoperite de către arheologi s-a constatat că ele conțin doar 25% din cantitatea de carbon conținută în prezent în lemnele proaspăt tăiate (la aceeași masă de lemn uscat). Cu câți ani în urmă au fost confecționate obiectele descoperite de arheologi?

Rezolvare:

După tăierea copacilor, lemnul lor nu mai absoarbe carbon radioactiv, acesta se dezintegrează, conținutul lui în lemn micșorându-se. În fiecare timp de înjumătățire el se reduce de două ori. În cazul obiectului descoperit de arheologi conținutul carbonului radioactiv a scăzut de 4 ori, adică de 2 câte 2 ori. Pentru aceasta erau necesari 2 timpi de înjumătățire. Prin urmare, obiectele descoperite de arheologi au fost confecționate cu $2 \cdot 5\,700$ de ani = 11 400 de ani în urmă.

Această metodă, ce are la bază determinarea conținutului de carbon radioactiv în resturile organice, este folosită la determinarea vechimii lor, în special în arheologie. Premiul Nobel pentru chimie (a. 1960) l-a obținut chimistul american William Franck Libby (1908–1980), care a propus această metodă.

Verificați-vă cunoștințele

1. În ce constă fenomenul de radioactivitate naturală?
2. Cum variază numărul atomic și cel de masă la dezintegrarea α ?
3. Care este numărul atomic și cel de masă al nucleului obținut în urma dezintegrării α a izotopului radioactiv de cupru ${}^{66}_{29}\text{Cu}$?
4. Este posibil ca în urma dezintegrărilor α și β^- ale unui izotop radioactiv să se obțină un alt izotop al aceluiași element? În cazul răspunsului afirmativ, explicați prin ce se vor deosebi acești izotopi.
5. Determinați numărul atomic Z și cel de masă A al izotopului care se obține din izotopul de toriu ${}^{234}_{90}\text{Th}$ după 2 dezintegrări β^- și 4 dezintegrări α .
6. Cum se explică expulzarea electronilor de către nuclee la dezintegrarea β^- dacă în nuclee nu există electroni?
7. Cum este spectrul de valori ale energiei particulelor α ?
8. Cum veți explica spectrul continuu al valorilor energiei particulelor β^- ?
9. În ce constă sensul fizic al constantei radioactive?
10. După ce lege variază în timp numărul de nuclee radioactive?
11. Cum se definește perioada (timpul) de înjumătățire?
12. Cantitatea de iod radioactiv ${}^{131}_{53}\text{I}$ s-a micșorat de 16 ori în 32 de zile. Care este perioada de înjumătățire a acestui izotop al iodului?
13. Ce procent din numărul inițial de nuclee radioactive dezintegrează într-un interval de timp egal cu 3 timpi de înjumătățire pentru acest izotop?
14. A câta parte din numărul de atomi ai izotopului ${}^3_1\text{H}$ mai rămân radioactivi după 37 de ani? Perioada de înjumătățire pentru acest izotop este egală cu 12,3 ani.

7.4.* REACȚIILE NUCLEARE

a. Reacțiile nucleare. Caracteristici generale

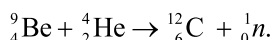
Reacțiile nucleare reprezintă transformările unor nuclee în altele ca rezultat al interacțiunii cu diferite particule sau nuclee.

Notăm cu X nucleul primar, numit și nucleu-țintă, care este ciocnit de particula-proiectil a . Produse ale interacțiunii respective sunt nucleul rezidual Y și particula (sau particulele) b rezultată(e) din reacție. Ecuația reacției se prezintă, de obicei, sub forma:



Reacția se produce dacă particula-proiectil pătrunde în regiunea în care acționează forțele nucleare ale nucleului-țintă, adică se apropie de acesta la distanțe de circa 10^{-15} m. Particulele-proiectil, încărcate cu sarcină electrică pozitivă, trebuie să posede energii cinetice suficiente pentru a învinge forțele de respingere electrică din partea sarcinii pozitive a nucleului și a se apropia la distanța menționată. Asupra particulelor-proiectil neutre nu acționează forțe electrice de respingere, de aceea ele pot pătrunde în nucleu chiar având viteze mici.

Prima reacție nucleară (7.3) în condiții de laborator a fost realizată, după cum s-a relevat mai sus (tema 7.1), de către Rutherford în anul 1919. O altă reacție nucleară a condus la descoperirea neutronului (a. 1932) de către fizicianul englez James Chadwick (1891–1974):



În anul 1934, soții Irène și Frederick Joliot-Curie au realizat reacția (7.12) care a avut ca rezultat descoperirea radioactivității artificiale.

În aceste trei reacții, particulele-proiectil sunt particule α emise de surse radioactive. În prezent se realizează reacții nucleare utilizându-se fascicule de particule accelerate în instalații construite special în acest scop.

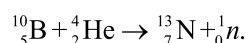
În reacțiile nucleare se respectă legile de conservare a sarcinii electrice, a numărului de nucleoni, a impulsului, a energiei, precum și unele legi de conservare specifice microcosmosului. Analizând ecuațiile reacțiilor nucleare, ne convingem ușor de conservarea sarcinii electrice prin însumarea indicilor de jos ai simbolurilor de ambele părți ale săgeții și de conservarea numărului de nucleoni însumând în mod similar indicii de sus.

Din punct de vedere energetic, reacțiile nucleare sunt caracterizate de **energia de reacție** care se exprimă prin diferența dintre suma maselor particulelor X și a care intră în reacție (7.18) și suma maselor particulelor Y și b ce rezultă din reacție. Pentru energia de reacție Q se obține o formulă similară expresiei (7.7) pentru energia de legătură a nucleului:

$$Q = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2. \quad (7.19)$$

Dacă energia de reacție este pozitivă, $Q > 0$, reacția decurge cu degajare de energie, fiind numită **exoenergetică**, iar dacă $Q < 0$, reacția necesită absorbție de energie și este numită **endoenergetică**. Situația este similară cu cea din cazul reacțiilor chimice.

Să analizăm un caz concret de reacție nucleară:



Masele izotopilor sunt $m_{{}^{10}_5\text{B}} = 10,01294$ u, $m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260$ u, $m_{{}^{13}_7\text{N}} = 13,00574$ u și masa neutronului $m_{{}^1_0n} = 1,00866$ u. Substituind în (7.19) și calculând, obținem $Q = 0,00114$ u $\cdot c^2 = 1,062$ MeV, unde s-a ținut seamă că 1 u $\cdot c^2 = 931,5$ MeV. Constatăm că energia de reacție nucleară este de milioane de ori mai mare decât cele degajate în reacțiile chimice care sunt de ordinul a câțiva electron-volți (eV). Observăm că $Q > 0$, adică reacția este exoenergetică.

b. Fisiunea nucleelor de uraniu

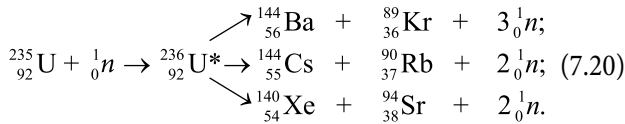
La finele anului 1938, savanții germani Otto Hahn (1879–1968) și Fritz Strassman (1902–1980) au descoperit că în urma bombardării cu un fascicul de neutroni lenți a eșantionului izotopului de uraniu ${}^{235}_{92}\text{U}$ în acesta apar nuclee de bariu, element ce se află în partea de mijloc a sistemului periodic.

Interpretarea corectă a acestor rezultate a fost propusă la începutul anului 1939 de către fiziciana austriacă Lise Meitner (1878–1968) și fizicianul englez Otto Robert Frish (1904–1979). Ei au presupus că **neutronii provoacă fisiunea nucleelor de uraniu** – divizarea lor în câte două fragmente ce prezintă nuclee ale unor elemente mai ușoare.

În același an, F. Joliot-Curie și colaboratorii săi L. Kowarski și H. von Halban au stabilit că la fisiune se emit 2-3 neutroni.

Prezentăm exemple concrete de reacții de fisiune. Nucleul primar ${}^{235}_{92}\text{U}$, absorbind un neutron lent, se transformă în izotopul în stare excitată ${}^{236}_{92}\text{U}^*$ (asteriscul denotă starea excitată a izotopului). Nucleul în această stare este nestabil și dezintegrează conform

uneia din ecuațiile de tipul prezentat (aducem doar 3 din mai multe ecuații posibile):



Pentru a ne imagina modul în care se produce fisiunea, vom ține seama de faptul că raza de acțiune a forțelor nucleare este mică, iar a celor de interacțiune electrică este mare. După absorbirea neutronului lent, nucleul rezultat ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ în stare excitată are un surplus de energie. În urma mișcării nucleonilor, forma nucleului devine alungită. Aria cercului de mijloc, în plan perpendicular pe direcția în care s-a produs alungirea, este mai mică decât cea din cazul formei sferice. Ca urmare, rezultantele forțelor nucleare care mențin împreună cele două părți ale nucleului se micșorează. Forțele de respingere electrică dintre protonii acestor părți le îndepărtează, între ele se formează o „gâtuitură”

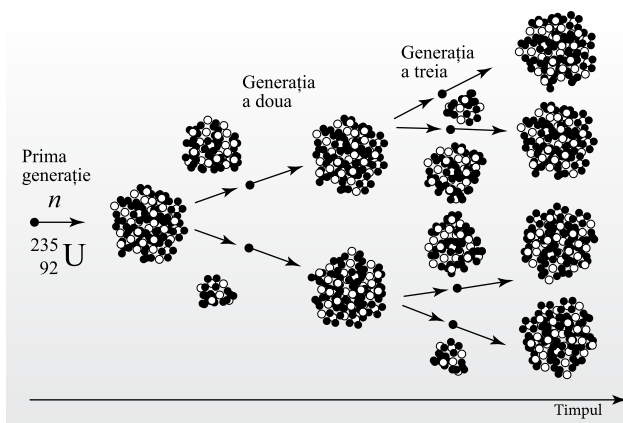


Fig. 7.5

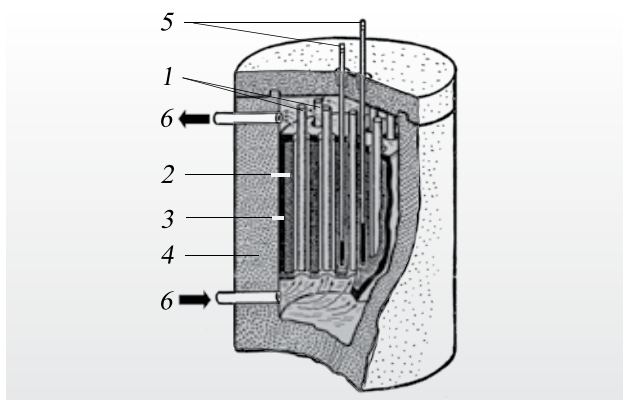


Fig. 7.6

care continuă să se subție și, în fine, se rupe. Nucleul primar s-a divizat în două și au fost emiși 2-3 neutroni. Nucleele obținute în urma fisiunii sunt radioactive și după o serie de dezintegrări se transformă în nuclee stabile.

Estimările arată că energia degajată la fisionarea unui nucleu de uraniu este de circa 210 MeV. Valoarea obținută este foarte mare, de zeci de milioane de ori mai mare decât cea degajată într-o reacție chimică (vezi problema rezolvată de la sfârșitul temei).

c. Reacția în lanț. Reactorul nuclear

Neutronii ce însoțesc fiecare act de fisiune a nucleelor pot produce, la rândul lor, scindarea altor nuclee. Dacă cei 2 neutroni emiși după primul act de fisiune vor produce următoarele 2 acte, se vor obține deja 4 neutroni. Dacă fiecare din ei va produce câte o fisiune, se vor obține 8 neutroni etc. Numărul de neutroni crește de la o generație la alta (fig. 7.5), producându-se o reacție în lanț.

Reacție în lanț este numită reacția în care neutronii rezultați din fisiunea nucleelor stimulează fisiunea altor nuclee.

Masa minimă de substanță la care are loc reacția în lanț se numește **masă critică**.

La mase mai mici decât aceasta crește partea de neutroni care trece pe lângă nuclee și iese în afara substanței radioactive fără a provoca fisiunea nucleelor. Evident, izotopul ${}_{92}^{235}\text{U}$ poate fi păstrat numai în cantități mai mici decât masa critică. Aceasta poate fi micșorată folosind învelișuri din substanțe care reflectă neutronii, de exemplu, din beriliu. Astfel, în cazul uraniului aceasta poate fi redusă până la câteva sute de grame.

Reacția neregulată de fisiune în lanț se produce în bomba atomică (denumirea corectă, bombă nucleară), în care două fragmente de uraniu ${}_{92}^{235}\text{U}$, având fiecare masa mai mică decât cea critică, dar suma maselor lor fiind mai mare decât aceasta, se află în interiorul unui înveliș metalic. La momentul respectiv, fragmentele de uraniu sunt suprapuse. Se obține un corp cu masa mai mare decât cea critică și are loc explozia nucleară.

Reacția dirijată de fisiune în lanț se realizează în reactorul nuclear, a cărui schemă este prezentată în figura 7.6. Regiunea în care se produce reacția în

lanț este numită **zonă activă**. Uraniul natural conține doar circa 0,7% de izotop fisionabil ${}^{235}_{92}\text{U}$, restul de 99,3% revenind izotopului ${}^{238}_{92}\text{U}$. Prin separarea izotopilor se obține uraniu bogat în izotopul fisionabil, numit **uraniu îmbogățit**. Fisiunea acestui izotop se produce mult mai eficient sub acțiunea neutronilor lenți cu viteze de circa $2 \cdot 10^3$ m/s. Neutronii emiși în urma fisiunii au viteze mult mai mari, de ordinul 10^7 m/s. Pentru reducerea vitezelor acestora se folosește **moderatorul** (apa, apa grea, grafitul sau un amestec al lor). La mișcarea prin moderator neutronii rapizi pierd din energie, devenind lenți. Ca rezultat, numărul de nuclee ce fisionează se mărește considerabil. Acești factori determină structura zonei active: ea reprezintă un sistem de blocuri sau bare de uraniu (1) plasate în spațiul cu moderator (2).

Zona activă este înconjurată de un **înveliș reflector** (3), mai frecvent din beriliu, care reflectă neutronii și îi întoarce în zona activă, intensificând astfel fisiunea nucleelor. În exteriorul acestuia se află **învelișul protector de radiație** (4) din beton armat.

Funcționarea reactorului este dirijată cu ajutorul **barelor de control** (5) din compuși ai cadmiului sau borului care absorb puternic neutronii lenți. Introduse complet, barele absorb un număr mare de neutroni, astfel încât reacția în lanț nu se produce. Pentru a o iniția, barele sunt scoase parțial până se produce reacția în regim staționar. În cazul în care accidental intensitatea reacției se mărește brusc, barele de control sunt introduse automat în zona activă și reacția este întreruptă.

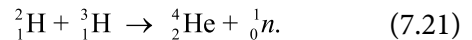
Energia degajată în zona activă este preluată de un **agent termic** (6), consumată apoi la producerea vaporilor de apă care pun în funcțiune turbinele stațiilor electrice. Reactoarele nucleare pun în funcțiune, de asemenea, spărgătoarele de gheață, submarinele etc.

Primul reactor nuclear în lume a fost construit la Chicago (SUA) sub conducerea lui Enrico Fermi (1901–1954), fiind pus în funcțiune la 2 decembrie 1942. În Europa, primul reactor nuclear a fost construit în anul 1946, în URSS, sub conducerea lui Igor Kurciatov (1903–1960). În prezent sunt construite și funcționează mai mult de o mie de reactoare, cele mai multe dintre ele fiind componente ale unor centrale nucleare electrice. Acestea produc circa 6% din energia electrică consumată în lume, iar în țări ca Franța și Suedia – mai mult de jumătate din energia consumată.

d. Fuziunea termonucleară

Cantități mari de energie se degajă la sinteza nucleelor situate la începutul sistemului periodic prin **fuziunea (contopirea) nucleelor** mai ușoare.

Să considerăm, de exemplu, fuziunea nucleelor de deuteriu ${}^2_1\text{H}$ și tritium ${}^3_1\text{H}$:



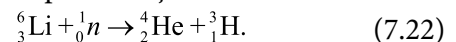
Calculăm energia degajată în această reacție (la ea participă 5 nucleoni) pornind de la formula (7.19) și ținând cont de faptul că $1 \text{ u} \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$. Masele particulelor participante sunt: $m_{{}^2_1\text{H}} = 2,01355 \text{ u}$,

$m_{{}^3_1\text{H}} = 3,01550 \text{ u}$, $m_{{}^4_2\text{H}} = 4,00150 \text{ u}$ și $m_{{}^1_0n} = 1,00866 \text{ u}$.

Efectuând calculele respective, obținem pentru energia ce revine la 5 nucleoni valoarea de 17,6 MeV. Astfel, în reacția de fuziune nucleară (7.21) energia de legătură pe nucleon variază cu 17,6 MeV: 5 nucleoni $\approx 3,5 \text{ MeV/nucleon}$. Această energie este degajată.

Comparând această valoare a energiei degajate pe nucleon (3,5 MeV/nucleon) în reacția de fuziune cu energia degajată pe nucleon în reacția de fisiune a uraniului 210 MeV: 235 nucleoni (0,9 MeV/nucleon), constatăm că în cazul reacției de fuziune se degajă pentru fiecare nucleon energie de circa 4 ori mai mare decât la fisiunea uraniului.

Acest rezultat demonstrează eficiența reacțiilor de fuziune nucleară ca surse de energie. Trebuie să se țină seama și de rezervele enorme de deuteriu în natură în apele mărilor și oceanelor. Ele satisfac necesitățile populației Terrei în energie pentru câteva sute de milioane de ani. Tritiumul nu există în natură, el poate fi obținut prin reacție nucleară:



Un avantaj mare al utilizării reacțiilor de fuziune nucleară este că în ele nu se obțin deșeuri radioactive.

Realizarea în practică a reacțiilor de fuziune este mult mai dificilă decât a celei de fisiune, deoarece nucleele izotopilor hidrogenului sunt încărcate cu sarcini electrice pozitive, deci ele se resping. Reacția de fuziune se va produce dacă nucleele vor fi apropiate unul de altul la distanțe de ordinul razei forțelor nucleare (circa 10^{-15} m). Rezultă că nucleele trebuie să posede energii cinetice suficiente pentru a învinge forțele de respingere electrostatică la apropierea lor. Aceste energii pot fi obținute prin încălzire până la temperaturi foarte înalte, de circa 10^7 K . Din această cauză reacțiile date sunt numite **reacții de fuziune termonucleară**.

În natură asemenea temperaturi posedă Soarele și stelele. Reacțiile de fuziune termonucleară produc energia radiației emise de ele. Masele nucleelor rezultate din reacție sunt mai mici decât ale celor care fuzionează. Prin urmare, masa Soarelui se micșorează în fiecare secundă cu circa 4 milioane de tone. Pe Soare se consumă în fiecare secundă circa 100 milioane de tone de hidrogen, rezervele respective fiind suficiente pentru a-i susține activitatea timp de 100 miliarde de ani.

Prioritatea reacțiilor de fuziune termonucleară față de reacțiile de fisiune menționate au plasat problema realizării practice a fuziunii termonucleare dirijate în centrul atenției savanților. Soluționarea ei este foarte dificilă. Pentru ca nucleele izotopilor de

hidrogen să poată fuziona, sunt necesare temperaturi foarte înalte. La aceste temperaturi substanța se află în stare ionizată, cunoscută sub numele de **plasmă**.

Problema fiind de o importanță deosebită pentru asigurarea omenirii cu energie, necesită concentrarea eforturilor savanților din diferite țări. În acest scop, la 28 iunie 2005, Uniunea Europeană, SUA, Rusia, China, Japonia și Coreea de Sud au luat decizia de a construi împreună (către anul 2015) un reactor experimental termonuclear internațional la Cadarache (Franța) pentru a cerceta și a realiza fuziunea termonucleară dirijată. În prezent lucrările de construcție a reactorului continuă, iar primele experimente de fuziune termonucleară sunt preconizate pentru anul 2025.

Problemă rezolvată

Calculați energia degajată în urma fisiunii nucleelor dintr-o cantitate de uraniu cu masa de 1 g. Determinați masa cărbunelui cu puterea calorică de 30 MJ/kg care trebuie arsă pentru a obține aceeași energie.

Se dă:

$$\begin{aligned} A &= 235, \\ 1 \text{ u} &= 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, \\ m &= 10^{-3} \text{ kg}, \\ q &= 3 \cdot 10^7 \text{ J/kg} \\ E - ?, m_c - ? \end{aligned}$$

Rezolvare:

Energia degajată la fisiunea unui nucleu de uraniu $Q = 210 \text{ MeV}$. Având în vedere că $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, obținem $Q = 210 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,36 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.

Masa unui nucleu de uraniu $m_0 = A \cdot u = 235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,90 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$.

Numărul nucleelor de uraniu în masa m este $N = \frac{m}{m_0}$. La fisiunea lor s-a degajat energia $E = NQ = \frac{m}{m_0} \cdot Q = 8,62 \cdot 10^{10} \text{ J}$.

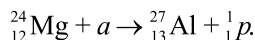
Masa de cărbune ce trebuie arsă pentru a obține aceeași cantitate de energie

$$m_c = \frac{E}{q} \approx 2,87 \cdot 10^3 \text{ kg} = 2,87 \text{ tone}.$$

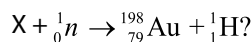
Comparați: 1 g de uraniu și 2,87 tone de cărbune!

Verificați-vă cunoștințele

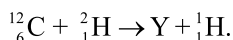
1. Folosind regulile de conservare, stabiliți natura particulei-proiectil a din următoarea reacție nucleară:



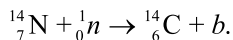
2. Din ce substanță X se obține aurul în următoarea reacție nucleară:



3. Determinați izotopul Y obținut ca rezultat al următoarei reacții:

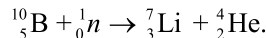


4. Stabiliți natura particulei b emise în reacția:



5. Cum se poate stabili dacă într-o reacție nucleară energia este degajată sau absorbită?

6. Calculați energia degajată în următoarea reacție nucleară:



Masele particulelor implicate în reacție sunt:

$$\begin{aligned} m_{{}_{5}^{10}\text{B}} &= 10,01294 \text{ u}, m_{{}_0^1n} = 1,00866 \text{ u}, m_{{}_3^7\text{Li}} = 7,01601 \text{ u} \text{ și} \\ m_{{}_2^4\text{He}} &= 4,00260 \text{ u}. \end{aligned}$$

7. Care reacție de fisiune este numită reacție în lanț?

8. Ce reprezintă masa critică? Cum veți explica necesitatea introducerii acestei noțiuni?

9. În ce constă necesitatea îmbogățirii uraniului folosit în reactoarele nucleare?

10. Care este rolul moderatorului în reactoarele nucleare?

11. În ce constă reacția de fuziune nucleară? Din ce cauză ea este numită termonucleară?

12. Care sunt avantajele reacțiilor de fuziune termonucleară față de cele de fisiune a uraniului?

7.5.* DETECTOARE DE RADIAȚII IONIZANTE

Pe parcursul anilor au fost elaborate și implementate mai multe metode de cercetare a radiațiilor nucleare. La baza metodelor respective se află proprietatea particulelor încărcate de a ioniza și a excita particulele din componența substanței.

Aici vom lua cunoștință de ideile fizice ale principalelor metode. Realizarea practică a unora din ele este destul de dificilă, fiindcă instalațiile respective sunt masive, sofisticate și costisitoare.

Metoda emulsiilor fotografice i-a permis lui Becquerel să descopere radioactivitatea naturală (a. 1896). Metoda aceasta se bazează pe acțiunea ionizantă a particulelor încărcate. Trecând prin pelicula fotografică, ele ionizează, asemenea luminii, cristalele microscopice de bromură de argint (AgBr). La dezvoltare argintul metallic formează mai multe linii punctate negre. Acestea marchează atât traseul particulei incidente, cât și locurile unde s-au produs reacții nucleare, precum și traseele particulelor rezultate. Grosimile liniilor sunt determinate de sarcinile și masele particulelor, iar lungimile – de energiile lor.

Contorul cu scintilații (scânteieri) a fost inventat în anul 1903 de către fizicianul englez William Crookes (1832–1919), după ce a fost descoperită fluorescența sulfurii de zinc provocată de ciocnirile particulelor α . Cu ajutorul lupei sau microscopului pot fi observate locurile unde s-au produs scintilațiile. E. Rutherford a utilizat această metodă la cercetarea împrăștierii particulelor α și a descoperit nucleul.

În prezent scintilațiile sunt înregistrate prin intermediul elementelor fotoelectrice care transformă semnalele luminoase în impulsuri electrice. După valorile acestor impulsuri se fac concluzii suplimentare privind energiile particulelor incidente.

Contorul cu descărcare electrică în gaze a fost inventat în anul 1908 de către fizicianul german Hans Wilhelm Geiger (1882–1945) în colaborare cu E. Rutherford. În anul 1928, H. Geiger și W. Müller au perfecționat contorul, care în prezent este cunoscut sub numele de **contorul Geiger-Müller**.

Reprezentarea schematică a contorului este redată în figura 7.7. Un tub cilindric de sticlă conține un anod (1) de forma unui fir subțire, întins de-a lungul tubului, și un catod (2) – o peliculă metalică depusă pe suprafața interioară a tubului sau un cilindru

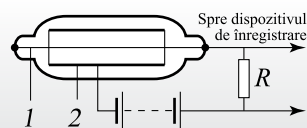


Fig. 7.7

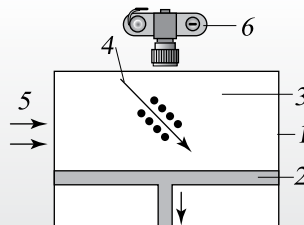


Fig. 7.8

metalic coaxial cu anodul. Tubul este umplut cu gaz, de exemplu, un amestec de argon cu vapori de spirit metilic, la o presiune de câteva zecimi din cea atmosferică. Între electrozi este aplicată o tensiune înaltă, dar insuficientă pentru a produce descărcări electrice în tub. Intensitatea câmpului electric în regiunea anodului este mult mai mare decât lângă catod (aproape de anod – liniile de intensitate sunt mult mai dense decât lângă catod).

Particula încărcată, pătrunzând cu viteză mare în interiorul tubului, ionizează gazul. Ioni pozitivi se deplasează spre catod, iar electronii – spre anod, unde intensitatea câmpului electric este mai mare. Obținând energii mari, ei ionizează prin ciocnire atomii neutri ai gazului. Se formează o avalanșă de electroni și în tub se produce o descărcare electrică. Ca rezultat, scade mult rezistența amestecului din tub și crește brusc intensitatea curentului în circuit. Între capetele rezistorului R se produce un impuls de tensiune ce este transmis la dispozitivul de înregistrare. După fiecare impuls de tensiune la rezistor descărcarea electrică încetează, contorul revine la starea inițială și poate să înregistreze particulele următoare.

Contorul Geiger-Müller se folosește pentru numărarea automată a particulelor încărcate și a fotonilor (cuantelor) γ . Acesta poate înregistra până la 1 000 de particule pe secundă.

Camera cu ceață a fost inventată în anul 1912 de către fizicianul englez Charles Thomas Rees Wilson (1869–1959) și este cunoscută mai mult sub numele de **camera Wilson**. Ea reprezintă (fig. 7.8) un vas din

sticlă (1) dotat cu un piston mobil (2). Camera conține vapori de apă sau de spirt etilic (3) cu densitatea apropiată de cea a vaporilor saturați.

La deplasarea bruscă a pistonului în jos vaporii se dilată adiabatic, temperatura lor se micșorează. Astfel, ei devin suprasaturați. Starea dată este nestabilă. Dacă în cameră pătrunde o particulă încărcată și ionizează moleculele, ionii formați devin centre de condensare și în jurul lor se formează picături de lichid. Traseul particulei încărcate este marcat de o urmă vizibilă (4) cu lățimea de până la 1 mm. Traseul este iluminat lateral (5) și fotografiat (6).

Fotografiile obținute cu ajutorul camerei Wilson reprezintă urme luminoase pe un fundal întunecat. După lățimea urmelor, se pot face concluzii referitor la natura particulei încărcate. Urmele lăsate de particulele α sunt mai late decât cele lăsate de electroni. Particulele cu energii mai mari lasă urme mai lungi.

O informație mai amplă se obține prin introducerea camerei Wilson într-un câmp magnetic omogen (v. *Lucrarea de laborator de mai jos*).

Camera cu bule. A fost inventată în anul 1952 de către fizicianul american Donald Arthur Glaser

(1926–2013). Ea reprezintă un alt dispozitiv care permite vizualizarea traseului particulei încărcate. Într-un vas se află un gaz lichefiat – hidrogen, deuteriu, xenon, propan etc. – la presiune înaltă. Substanța se află în stare lichidă, chiar dacă temperatura ei este mai mare decât temperatura de fierbere la presiune atmosferică normală. Prin micșorarea bruscă a presiunii (în anumite limite) substanța este adusă în stare de lichid supraîncălzit. Această stare este nestabilă, deoarece în condițiile date în vas ar trebui să se afle lichid și vapori saturați. Particula încărcată care pătrunde în vas formează un lanț de ioni. Aceștia servesc drept centre de vaporizare și în jurul lor se formează bule mici de vapori ai acestui lichid.

Lanțul acestor bule marchează traseul particulei în lichid și, fiind luminat lateral, poate fi fotografiat.

Pentru a obține o informație mai bogată despre particula studiată, camera cu bule se introduce, ca și cea cu ceață, într-un câmp magnetic.

Despre rolul important ce l-au jucat camerele cu ceață și cu bule în domeniul cercetărilor nucleare denotă faptul că inventatorii lor au devenit laureați ai Premiului Nobel (Wilson – în 1927 și Glaser – în 1960).

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce proprietăți fizice ale radiațiilor nucleare se află la baza metodelor de cercetare a acestora?
2. În ce constă metoda emulsiilor fotografice?
3. În baza cărui fenomen fizic funcționează contorul cu scintilații?
4. Cum funcționează contorul Geiger–Müller?
5. Care mărimi fizice ce caracterizează particulele încărcate pot fi determinate cu ajutorul camerei Wilson?
6. Ce informații suplimentare despre radiațiile nucleare pot fi obținute prin introducerea camerei Wilson și a celei cu bule într-un câmp magnetic?

➔ Lucrare de laborator

Studiul urmelor particulelor elementare încărcate

Scopul lucrării: Determinarea razei de curbură a traiectoriei particulelor elementare înregistrate în camera Wilson, calculul energiei lor cinetice și a sarcinii specifice.

Aparate și materiale necesare: Fotografia traseelor lăsate de particulele încărcate în camera Wilson, riglă milimetrică, hârtie de calc.

Considerații teoretice

O particulă încărcată, ce intră într-un câmp magnetic perpendicular pe liniile lui de inducție, se mișcă în acest câmp pe o traiectorie circulară cu raza (1.7):

$$r = \frac{mv}{qB}, \quad (7.23)$$

unde m , q și v sunt, respectiv, masa, sarcina electrică și viteza particulei încărcate, iar B este inducția câmpului magnetic.

La introducerea camerei Wilson într-un câmp magnetic orientat perpendicular pe direcția de mișcare a particulelor, traseele înregistrate vor prezenta niște

porțiuni de cerc. Având fotografia acestor trasee, raza de curbură a traiectoriei se poate măsura direct.

Fie O centrul arcului de cerc (fig. 7.9). Dacă trasăm coarda $AB = l$, atunci triunghiul AOB este isoscel, iar OD este înălțime și mediană. Notând înălțimea sectorului de cerc $CD = h$ din triunghiul dreptunghic ODB , avem:

$$r^2 = (r - h)^2 + \frac{l^2}{4},$$

din care rezultă:

$$r = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}. \quad (7.24)$$

Dacă se cunoaște traseul particulei înregistrate (sarcina și masa sunt cunoscute), atunci se poate determina și energia ei cinetică. Folosind relația (7.23), avem:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot \frac{(qBr)^2}{m^2} = \frac{(qBr)^2}{2m}. \quad (7.25)$$

Pentru determinarea sarcinii specifice a unei particule necunoscute, traseul acesteia se înregistrează în aceleași condiții ca și traseul unei particule cunoscute. În acest caz v și B sunt aceleași și pentru sarcina specifică necunoscută din (7.23) obținem:

$$\left(\frac{q}{m}\right)_x = \frac{r}{r_x} \cdot \left(\frac{q}{m}\right), \quad (7.26)$$

unde r și r_x sunt razele de curbură ale traiectoriilor particulei cunoscute și, respectiv, ale celei necunoscute.

În figura 7.10 este redată fotografia traseelor nucleului de heliu și ale nucleelor izotopilor de hidrogen înregistrate în camera Wilson, situată într-un câmp magnetic de inducție $B = 2,2$ T. Este cunoscut că toate particulele intră în acest câmp cu una și aceeași viteză, orientată perpendicular pe liniile de inducție, și traiectoria 1 aparține izotopului de hidrogen ${}^1_1\text{H}$, adică protonului.

Mod de lucru:

1. Așezați hârtia de calc pe fotografia din figura 7.10 și transferați pe ea urmele înregistrate în camera Wilson de două particule: a protonului cu numărul 1 și a doua la indicația profesorului.

2. Trasați câte o coardă la capetele traiectoriei protonului. Măsurați lungimile acestor coarde și înălțimile h respective, iar din relația (7.24) calculați raza de curbură a traiectoriei protonului $r_{1,i}$ la începutul și $r_{1,f}$ la sfârșitul mișcării lui.

3. Folosind relația (7.25), calculați energia cinetică a protonului în cele două poziții și determinați cu cât s-a micșorat energia lui în timpul parcurgerii acestei traiectorii.

4. Trasați o coardă la începutul traiectoriei particulei necunoscute. Măsurați lungimea ei l și înălțimea h a sectorului de cerc obținut. Calculați raza de curbură r_x .

5. Folosind relația (7.26), determinați sarcina specifică $(q/m)_x$ a particulei necunoscute. Stabiliți ce nucleu reprezintă această particulă.

6. Prezentați rezultatele obținute sub forma unui referat.

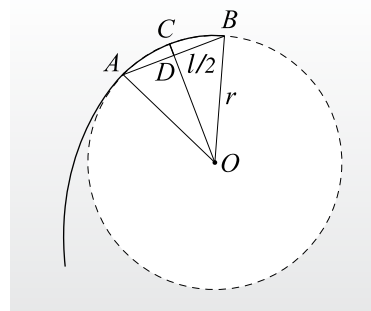


Fig. 7.9

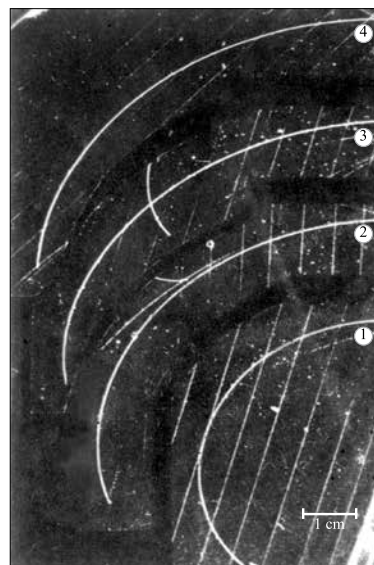


Fig. 7.10

7.6.* EFECTUL BIOLOGIC AL RADIAȚIILOR NUCLEARE

Noi ne aflăm, metaforic exprimându-ne, într-un ocean de radiație de natură diferită: particule α , protoni, neutroni, particule β (electroni), radiații γ etc.

Cea mai mare parte a surselor de radiație sunt naturale: razele cosmice – un flux de particule încărcate, în majoritate protoni, care bombardează Pământul și care generează alte particule în urma interacțiunilor cu nucleele din atmosferă; izotopii radioactivi din scoarța Pământului; radonul radioactiv din atmosferă, precum și izotopii ce se află în produsele alimentare și în apă. Printre sursele artificiale sunt aparatele folosite în medicină, îndeosebi instalațiile Röntgen, unele produse industriale, izotopii radioactivi utilizați în industrie și agricultură, industria de dobândire, prelucrare a uraniului și a deșeurilor radioactive etc.

Radiațiile nucleare au proprietatea de a excita și ioniza atomii și moleculele. Ca rezultat, se dereglează activitatea biochimică a celulelor iradiate, formându-se molecule noi, improprii acestor celule. După încetarea acțiunii radiației, schimbările respective nu dispar, unele consecințe pot să se manifeste după anumite intervale de timp.

Cele mai vulnerabile la radiație în organismele omului și animalelor sunt măduva oaselor (este dereglat procesul de formare a sângelui), glandele limfatice, splina, tractul digestiv ș.a. În celulele germinale apar efecte care conduc la mutații genetice în descendențe.

Cele menționate ne determină să avem unele cunoștințe despre radiațiile nucleare, mărimile ce le caracterizează, precum și modalitățile de protejare.

Este evident că efectele radiației nucleare depind nu numai de energia absorbită de corp, ci și de masa lui.

Se numește doză de radiație absorbită raportul dintre energia absorbită E_{abs} și masa m a corpului iradiat:

$$D = \frac{E_{abs}}{m}. \quad (7.27)$$

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Care proprietate a radiațiilor nucleare determină efectul lor biologic?
2. Cum este definită doza de radiație absorbită?
3. Care este unitatea de doză de radiație absorbită?
4. Cum trebuie de procedat în cazul accidentelor însoțite de emisii de radiații?
5. Pregătiți un referat cu tema: „Accidentele nucleare și impactul lor asupra naturii și a vieții pe Pământ”.

Unitatea dozei de radiație absorbită, adoptată la Conferința generală pentru măsuri și greutăți (1975), este numită **gray** (cu simbolul Gy), anume $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Un gray (Gy) este doza de radiație absorbită în cazul în care corpul cu masa de 1 kg absoarbe o energie de 1 J.

Unitatea respectivă poartă numele fizicianului englez L.H. Gray (1905–1965), care a obținut succese în utilizarea radiației pentru tratarea maladiilor canceroase.

Este important de menționat faptul că acțiunea biologică a radiației depinde, de asemenea, de tipul ei. De exemplu, la aceeași doză de radiație absorbită particulele α produc un efect biologic de 20 de ori mai mare decât razele γ .

Dozele mari sunt nocive pentru sănătate. De aceea în cazuri de accidente care pot fi însoțite de emisii ale substanțelor radioactive trebuie respectate unele reguli de protejare: să părăsim locul respectiv, să ne îndepărtăm cât mai mult de el; să folosim echipament special de protecție; în cazul necesității efectuării unor lucrări în zona iradiată să reducem timpul aflării în ea.

Pentru a stabili gradul de iradiere, sunt utilizate aparate speciale – **dozimetrele**. Măsurile de protecție se iau în funcție de acest grad.

În prezent se consideră că existența fondului natural de radiație a influențat benefic evoluția vieții pe Pământ. S-au efectuat experimente speciale cu o serie de plante crescute în încăperi în care radiația practic lipsește. S-a constatat că plantele respective erau mai slab dezvoltate și dădeau o recoltă mai mică decât cele crescute în prezența radiației naturale a Pământului. Prin urmare, în lipsa fondului radioactiv natural viața pe Pământ nu ar fi fost așa cum este în prezent.

7.7.* PARTICULE ELEMENTARE

O problemă de care au fost preocupați savanții tuturor timpurilor este cea despre constituții primari ai materiei.

Partea constitutivă a materiei care nu mai poate fi descompusă în unități mai simple se numește *particulă elementară*.

Un timp îndelungat atomul era considerat cel mai mic constituent indivizibil al materiei, adică o particulă elementară. Însă descoperirile electronului de către J.J. Thomson (1897), apoi a protonului de către E. Rutherford (1919) și a neutronului de către J. Chadwick (1932) au demonstrat că atomul prezintă o structură complicată. Astfel, până în anul 1932 erau cunoscute patru particule elementare – electronul, protonul și neutronul – ca părți componente ale atomului și fotonul – ca purtător al interacțiunii electromagnetice. Se considera că ele reprezintă acei constituenți primari din care poate fi construită întreaga lume materială. Protonii și neutronii legați în nuclee împreună cu electronii formează atomii. Aceștia, la rândul lor, asociindu-se în molecule, formează substanța.

Foarte curând însă s-a constatat că există și alte particule elementare.

a. Descoperirea particulelor elementare

În anul 1935, fizicianul nipon Hideki Yukawa (1907–1981) a prezis existența unei noi particule elementare. Conform teoriei sale, această particulă trebuia să joace rolul de purtător al interacțiunii tari de atracție dintre nucleoni, asemenea fotonului, purtător al interacțiunii electromagnetice între particulele încărcate. Din estimările lui Yukawa, pentru masa noii particule s-a obținut o valoare de aproximativ 250 de mase ale electronului, intermediară între masa electronului și cea a protonului. Din această cauză particula prezisă a căpătat denumirea de **mezon** (din gr. *mesos* „mijlociu, intermediar”).

Supoziția teoretică a existenței mezonului a impulsionat cercetările experimentale care ulterior au condus la descoperirea de noi particule elementare. În anul 1936, fizicianul american Carl David Anderson (1905–1991) și studentul său S. Neddermeyer (1907–1988) au descoperit în razele cosmice o particulă cu masa

de aproximativ 207 ori mai mare decât masa electronului m_e . Această valoare se deosebea de cea prezisă teoretic, însă, după cum s-a constatat, particula numită **mezon** μ sau **miuon** nu participă la interacțiunea dintre nucleoni, deci nu poate fi mezonul lui Yukawa. Miuonul poate avea atât sarcină negativă (μ^-), cât și pozitivă (μ^+). După proprietățile sale, el este un electron foarte greu, instabil, cu timpul mediu de viață de aproximativ $2,2 \cdot 10^{-6}$ s.

Mezonul lui Yukawa a fost descoperit abia în anul 1947 de către fizicianul englez Cecil Franck Powell (1903–1969) și colaboratorii săi tot în razele cosmice. El a fost numit **mezon** π sau **pion** și există în trei stări: cu sarcina pozitivă (π^+), negativă (π^-) și nulă (π^0). Pionii π^+ și π^- au masa de $\approx 273 m_e$, iar π^0 – de $\approx 264 m_e$.

Sub conducerea lui Powell a fost descoperit și **mezonul** K , numit și **kaon**, care are masa mai mare decât cea a pionului. Kaonul, de asemenea, este implicat în interacțiunea dintre nucleoni. Este important de remarcat că toți mezonii sunt particule elementare instabile, care se dezintegrează și se transformă în alte particule.

Pentru prezicerea teoretică a mezonilor și pentru descoperirea lor experimentală, Yukawa în anul 1949 și, respectiv, Powell în 1950 au fost distinși cu Premiul Nobel.

A fost confirmată experimental și ipoteza lui W. Pauli (vezi *subtema 7.3, a*) despre existența **neutrino**ului – particulă elementară neutră din punct de vedere electric, cu o putere de penetrare extrem de mare datorită masei sale foarte mici (poate chiar egală cu zero).

Odată cu dezvoltarea tehnicii de construcție a acceleratoarelor de particule cu energii mari, au avansat și posibilitățile experimentale de studiu ale particulelor elementare (vezi principiul de funcționare a acceleratoarelor de particule elementare în tema 1.4). Au fost descoperite particule masa cărora este mai mare decât cea a protonilor și neutronilor, numite **hiperoni**. De exemplu, masa hiperonului Ω^- este de $3 \cdot 273 m_e \approx 1,78 m_p$. Există mai multe tipuri de hiperoni, toți instabili, dezintegrându-se în nucleoni și particule mai ușoare (pioni, electroni, neutrini etc.).

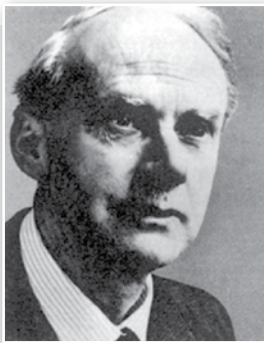
Cu ajutorul acceleratoarelor în anii 1960–1970 a fost descoperit un număr mare de particule elementare instabile, numite **rezonanțe**. Durata medie de viață a acestora este extrem de mică, de ordinul $10^{-24} \div 10^{-23}$ s.

În prezent sunt cunoscute circa 400 de particule elementare, dintre care cele mai multe sunt rezonanțele. Majoritatea particulelor elementare sunt instabile, particule stabile existând doar câteva: fotonul, electronul, neutrinul și protonul. Neutronul liber are durata medie de viață de aproximativ 10^3 s.

b. Particule și antiparticule

În anul 1928, fizicianul englez Paul Dirac a elaborat teoria relativistă a mișcării electronului în atom. Această teorie nu numai că a confirmat rezultatele experimentale cunoscute, dar și a demonstrat că există o particulă elementară, care posedă caracteristici identice cu cele ale electronului, însă cu sarcină opusă, pozitivă. Generalizând raționamentele, Dirac a ajuns la concluzia că trebuie să existe nu numai electroni pozitivi, dar și protoni cu sarcină negativă. Aceste particule au fost numite **antiparticule**. În teoria fizicii particulelor elementare se consideră că pentru toate particulele există și antiparticule corespunzătoare, chiar dacă în unele cazuri (de exemplu, fotonul) particulele și antiparticulele coincid.

Prima antiparticulă – electronul pozitiv prezis de Dirac – a fost observată pentru întâia oară în



PAUL ADRIEN
MAURICE DIRAC
(1902–1984)
fizician englez

Este unul dintre fondatorii mecanicii cuantice. A efectuat cercetări teoretice fundamentale în mecanica și electrodinamica cuantică, teoria cuantică a câmpului și a particulelor elementare. În anii 1926–1927 a elaborat aparatul matematic al mecanicii cuantice, propunând metoda de cuantificare secundară, utilizată și în prezent. A elaborat teoria relativistă a mișcării electronului, propunând ecuația de undă care îi poartă numele (ecuația lui Dirac). În baza acesteia, a prezis existența electronului încărcat pozitiv – a pozitronului, observat în razele cosmice. În anul 1931 a emis ipoteza despre existența antiparticulelor și despre crearea și anihilarea perechilor electron–pozitron, iar în 1933 – despre existența antimateriei.

Pentru cercetările care au pus bazele mecanicii cuantice P. Dirac împreună cu E. Schrödinger în anul 1933 au fost distinși cu Premiul Nobel.

anul 1932 de către C. Anderson. Studiind mii de fotografii ale traiectoriilor particulelor din razele cosmice înregistrate în camera Wilson, Anderson a observat câteva urme care se deosebeau de cele lăsate de electroni numai prin deviația de sens opus. Experiența a demonstrat că urma înregistrată în camera Wilson era traiectoria unui electron cu sarcină pozitivă, adică a unui antielectron, numit **pozitron** (de la lat. *positivus* „pozitiv”), notat cu simbolul e^+ .

Ulterior au fost descoperite și alte antiparticule: antimiuonul μ^+ (1936), antipionul π^- (1947) și antineutrino electronice $\bar{\nu}_e$ (1953), antiprotonul \bar{p} (1955) și antineutronul \bar{n} (1956). Deseori antiparticula se notează cu același simbol ca particula, dar cu tildă.

Procesul de interacțiune a unei particule elementare cu antiparticula sa, în urma căruia acestea se transformă în fotoni (radiație electromagnetică) sau în alte particule elementare se numește anihilare.

Procesul de anihilare la ciocnirea electronului cu pozitronul a fost enunțat mai întâi teoretic de către Dirac. După descoperirea pozitronului a fost observată experimental anihilarea electron–pozitron însoțită de apariția a doi fotoni (a două cuante γ):

$$e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma. \quad (7.28)$$

Energia minimă a fotonilor creați în urma anihilării: $E_{\min} = 2 m_e c^2 \approx 2 \cdot 0,51 \text{ MeV} = 1,02 \text{ MeV}$.

Studiul interacțiunii radiațiilor γ de anumite energii cu substanța a evidențiat un nou fenomen – **formarea de perechi**. De exemplu, perechea electron–pozitron se formează doar dacă radiația γ are energia minimă egală cu dublul energiei de repaus a electronului, adică cu 1,02 MeV. În acest caz are loc reacția:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+, \quad (7.29)$$

semnalată în anul 1933 de către soții Irène și Frederic Joliot-Curie.

Din relațiile (7.28) și (7.29) rezultă că procesul de formare a perechilor este invers celui de anihilare. Evident că pentru formarea altor perechi de particule este necesară o energie minimă mai mare, egală cu dublul energiei de repaus a particulei respective. În procesul de anihilare, aceeași energie va fi eliberată sub formă de radiație γ . De exemplu, în cazul perechii proton–antiproton această energie este de 1 867 MeV, adică aproape de 2 000 de ori mai mare decât în cazul perechii electron–pozitron.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ce se numește particulă elementară?
2. Existența cărei particule a fost prezisă de Yukawa? Care sunt proprietățile acesteia?
3. Care sunt proprietățile miunului și ale pionului? Prin ce se deosebesc aceste proprietăți?
4. Ce reprezintă kaonii?
5. Ce particularitate este comună tuturor mezonilor?
6. Ce reprezintă hiperonii?
7. Care particule au fost numite rezonanțe?
8. Care sunt particulele elementare stabile?
9. Ce reprezintă antiparticulele?
10. Care particulă a fost numită pozitron? Prin ce se deosebește ea de electron?
11. Ce se numește anihilare? Scrieți reacția de anihilare electron–pozitron.
12. În ce constă esența fenomenului formării de perechi? În ce condiții se formează perechea electron–pozitron? Scrieți reacția respectivă.

7.8.* INTERACȚIUNI FUNDAMENTALE. CLASIFICAREA PARTICULELOR ELEMENTARE

Proprietățile și comportamentul multitudinii de particule elementare pot fi cercetate numai în procesele de interacțiune. În natură se realizează patru tipuri de interacțiuni care nu se reduc la altele mai simple. Acestea sunt interacțiunile **tari** (nucleare), **electromagnetice**, **slabe** și **gravitaționale**. Ele au fost numite **interacțiuni fundamentale**.

Mai cunoscute prin efectele produse sunt interacțiunile gravitaționale și cele electromagnetice.

Interacțiunile gravitaționale au un caracter universal, se realizează cu participarea tuturor corpurilor din Univers și sunt descrise de legea atracției universale a lui Newton. Mărimea forțelor de interacțiune este în funcție de masele corpurilor ce interacționează. De aceea în lumea particulelor elementare de mase extrem de mici, forțele de interacțiune gravitațională sunt neglijabile. Ele au un rol decisiv doar la interacțiunea obiectelor masive – stele, planete, asteroizi etc.

Interacțiunile electromagnetice se produc între oricare particule încărcate electric într-un domeniu foarte extins de fenomene ale naturii. Datorită lor este posibilă existența atomilor și moleculelor, a forțelor de frecare și de elasticitate, a undelor electromagnetice, în particular, a luminii. Interacțiunile electromagnetice determină foarte multe proprietăți ale substanțelor aflate în stare solidă, lichidă sau gazoasă, cauzează procesele de absorbție și emisie a fotonilor de către atomi și molecule. Acțiunea forțelor coulombiene conduce la instabilitatea nucleelor cu numere de masă mari (datorită respingerii dintre protoni) și la apariția fotonilor, ca rezultat al anihilării perechii electron–pozitron.

Interacțiunile tari sunt cele mai puternice dintre toate cele cunoscute. Datorită lor se realizează legătura dintre protoni și neutroni în nucleele atomilor. Toate procesele în care sunt antrenate interacțiunile tari se realizează cu viteze foarte mari, adică se produc într-un interval de timp foarte mic, de ordinul 10^{-22} s. Se manifestă la distanțe de ordinul 10^{-15} m și mai mici, de aceea mai sunt numite **forțe cu rază mică de acțiune**. La asemenea distanțe interacțiunile tari sunt de sute de ori mai puternice decât cele electromagnetice.

Interacțiunile slabe sunt cele mai lente dintre toate interacțiunile care au loc în lumea particulelor elementare, se produc în intervale de timp de ordinul 10^{-10} s și mai mari. Ele au loc între orice particule elementare, cu excepția fotonilor. Raza de acțiune a forțelor interacțiunilor slabe este foarte mică, de ordinul 10^{-18} m. Interacțiunile slabe se produc în procesele cu participarea neutrinilor sau antineutrinilor, dar și în cele de dezintegrare a particulelor cu timpul mediu de viață mai mare de 10^{-10} s.

S-a constatat că toate interacțiunile fundamentale se realizează conform unuia și aceluiași mecanism – prin schimbul de anumite particule purtătoare ale interacțiunii cercetate. Din această cauză ele au fost numite **interacțiuni de schimb**. De exemplu, interacțiunea electromagnetică dintre particulele încărcate are loc prin intermediul schimbului de fotoni – cuante ale câmpului electromagnetic.

Teoria interacțiunii de schimb a fost confirmată prin descoperirea mezonilor π (pionilor), prin intermediul cărora se realizează interacțiunea dintre nucleonii nucleelor atomice. În anul 1957 a fost demonstrată teoretic existența unor particule grele, numite **bozoni vectoriali**, care aveau rolul de purtători ai interacțiunilor slabe, iar în 1983 ei au fost descoperiți experimental, astfel confirmându-se caracterul interacțiunii de schimb și pentru aceștia.

În teoria contemporană a gravitației se demonstrează că și interacțiunea gravitațională se manifestă ca o interacțiune de schimb, purtătorul acesteia fiind **gravitonul** – cuantă a câmpului gravitațional, care, asemenea fotonului, este o particulă fără masă. Din cauza intensității foarte mici a interacțiunii gravitaționale, până în prezent gravitonul încă nu a fost detectat experimental.

Cercetările teoretice și experimentale efectuate în domeniul particulelor elementare au pus în evidență posibilitatea clasificării lor într-un sistem ordonat în funcție de proprietățile pe care le posedă.

În funcție de interacțiunea fundamentală realizată, în procesele cu participarea particulelor elementare, ele se împart în trei clase: **fotoni**, **leptoni** și **hadroni**.

Din clasa fotonilor face parte o singură particulă elementară – **fotonul**. El nu are sarcină electrică, dar este purtătorul forțelor de interacțiune electromagnetică. Fotonul este stabil, are timpul de viață infinit de mare până la interacțiunea cu alte particule elementare. Prin intermediul fotonilor se obține cea mai mare parte din informația despre natură: de la stările energetice ale atomilor și moleculelor până la radiația emisă de obiectele din spațiul cosmic. În stare liberă fotonul poate fi considerat cea mai răspândită particulă elementară din Univers.

Particulele care nu participă la procesele de interacțiune tare se numesc **leptoni**.

Clasa leptonilor conține 12 particule elementare (6 particule și 6 antiparticule), care constituie 3 generații – electronul e^- cu neutrinul electronic ν_e , miuonul μ^- cu neutrinul miuonic ν_μ și taonul τ^- cu neutrinul taonic ν_τ . Atât miuonul, cât și taonul sunt particule instabile. Datorită energiilor de repaus mari, aceste particule se pot transforma în altele, de mase mai mici, caracterizate de anumite impulsuri și energii cinetice.

Cercetările experimentale și teoretice efectuate până în prezent demonstrează că leptonii nu au structură

internă. De aceea cei 12 leptoni, 6 particule (electronul, miuonul și taonul cu neutrinii lor) și 6 antiparticule respective, mai sunt numite **particule fundamentale**.

Cea mai numeroasă clasă a particulelor elementare (peste 300) o constituie **hadronii** (de la gr. *hadros* „tare, puternic”). Procesele de transformare a hadronilor se realizează prin intermediul tuturor interacțiunilor fundamentale, însă la distanțe mici predomină interacțiunile tari. Cu excepția protonului, care este o particulă stabilă, toți hadronii sunt instabili, se dezintegrează. Dacă dezintegrarea se produce datorită interacțiunilor electromagnetice sau slabe, timpul mediu de viață este mai mare de 10^{-20} s, iar dacă pe seama celor tari, atunci în urma dezintegrării apar particulele numite **rezonanțe** cu timpul mediu de viață de ordinul 10^{-23} s.

Hadronii se împart în **mezoni** (de la gr. *mesos* „mediu”) și **barioni** (de la gr. *barys* „greu”). La rândul lor, barionii se împart în **nucleoni** (protonul și neutronul) și **hiperoni** (particule mai grele decât nucleonii).

În anul 1963, fizicienii americani Murray Gell-Mann (n. 1929) și George Zweig (n. 1937) au emis ipoteza că hadronii sunt particule compuse. Conform acesteia, nucleonii, de exemplu, sunt compuși din trei particule mai mici încărcate electric, numite **quarkuri**. Existența lor a fost confirmată în anul 1969 în urma experimentului similar celui al lui Rutherford, care prin împrăștierea particulelor α a demonstrat existența nucleului. La bombardarea protonilor și a neutronilor cu electroni accelerați până la energii de 50 GeV, s-a constatat existența a trei sarcini punctiforme ce se deplasează liber în interiorul lor. Aceste sarcini punctiforme (particule) sunt quarkurile.

Una dintre particularitățile caracteristice ale quarkurilor este sarcina electrică fracționară.

Deși teoria quarkurilor a fost confirmată experimental, până în prezent încă nu s-a observat niciun quark în stare liberă.

⇒ Verificați-vă cunoștințele

1. Care interacțiuni sunt numite fundamentale? Numiți-le.
2. Caracterizați fiecare interacțiune fundamentală și indicați care particule iau parte la ele?
3. Ce reprezintă interacțiunea de schimb?
4. Care sunt particulele purtătoare ale fiecărei interacțiuni fundamentale?
5. Cum se clasifică particulele elementare în funcție de interacțiunea fundamentală realizată?
6. Care sunt caracteristicile fotonului?
7. Care particule sunt numite leptoni? Enumerați leptonii din cele trei generații.
8. Care particule elementare se numesc hadroni?
9. Cum se clasifică hadronii?
10. Ce reprezintă quarkurile? Care este esența experienței ce confirmă existența lor?

8.1. ASTRONOMIA ÎN CADRUL ȘTIINȚELOR FIZICE

a. Obiectul și problemele fundamentale ale astronomiei

Astronomia este una dintre cele mai vechi științe. Ea a luat naștere ca răspuns la nevoile practice ale păstorilor și agricultorilor din Antichitate. Primele cunoștințe astronomice s-au cristalizat acum patru-cinci mii de ani la popoarele din Babilon, Egipt (fig. 8.1, 8.2), China și se refereau la orientarea după aștrii cerești și la măsurarea timpului. În Europa s-au păstrat până în zilele noastre vestigiile unor construcții care, probabil, serveau și pentru observații astronomice, cum ar fi monumentul megalitic de la Stonehenge (Anglia) (fig. 8.3), sanctuarul de la Sarmizegetusa Regia (România) (fig. 8.4) ș.a. Termenul „astronomie” provine de la cuvintele grecești *astron* „astru, stea” și *nomos* „lege”.

Astronomia studiază mișcarea, structura, originea și evoluția corpurilor cerești și a sistemelor formate de ele.

Printre problemele fundamentale abordate de astronomie se numără: **determinarea poziției, mișcării în spațiu, a formei și dimensiunilor corpurilor cerești; studiul structurii, proprietăților fizice și al compoziției chimice a aștrilor; problema originii și evoluției corpurilor cerești, a Pământului, Universului.**

Este de menționat că astronomia a avut și continuă să aibă un rol esențial în dezvoltarea civilizației umane. Metodele de determinare a orei exacte, a coordonatelor geografice, a distanțelor la corpurile cerești și a vârstei acestora au fost elaborate în astronomie. Este incontestabil rolul primordial al astronomiei în cercetarea spațiului cosmic.

Astronomia are legături strânse cu multe alte științe: fizica, matematica, cibernetica, chimia, biologia, geografia, geologia. Odată cu aplicarea metodelor acestor științe în astronomie, a devenit posibilă studierea materiei în stări și condiții care nu ar putea fi realizate în laboratoarele terestre. Astfel, astronomii reușesc să cerceteze procesele fizice care se desfășoară în regiunile cele mai îndepărtate ale Universului. Alături de alte științe,



Fig. 8.1. Astrologi babilonieni



Fig. 8.2. Piramidele din Giza (Egipt) (sec. XXV î.Hr.)



Fig. 8.3. Monumentul preistoric Stonehenge (Anglia) (2400–2200 î.Hr.)



Fig. 8.4. Sanctuarul de la Sarmizegetusa Regia (România) (sec. III–II î.Hr.)

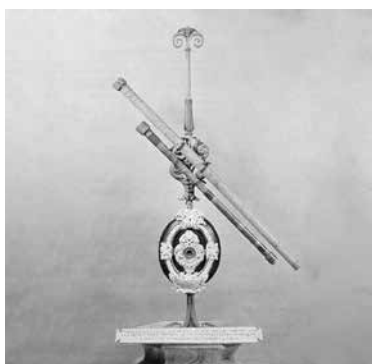


Fig. 8.5. Telescopul (luneta) lui Galileo Galilei (a. 1609)



Fig. 8.6. Telescop-reflector școlar

În Antichitate nu se făcea o distincție clară între astronomie și astrologie. Astrologia a atins apogeul dezvoltării sale în Babilonul antic (1900–538 î.Hr.), unde una și aceeași persoană avea rolul de astronom și de astrolog. Din punctul de vedere al științei contemporane, astrologia nu poate fi calificată ca o știință, pentru că ea nu se bazează pe legile naturii descoperite și verificate experimental.

astronomia ne oferă posibilitatea de a cunoaște natura și manifestările ei, contribuind astfel la formarea concepției științifice despre lume.

În funcție de problemele fundamentale pe care le abordează, astronomia modernă se împarte în mai multe ramuri strâns legate între ele: astrometrie, astronomie teoretică, mecanică cerească, astrofizică, astronomie stelară, cosmogonie, cosmologie.

b. Metodele de cercetare astrofizică

Astăzi una dintre cele mai importante ramuri ale astronomiei este **astrofizica**. S-a constituit ca ramură a astronomiei odată cu descoperirea în secolul XIX a analizei spectrale.

Astrofizica studiază structura, proprietățile fizice și compoziția chimică a corpurilor cerești, precum și procesele care au loc în ele.

În astrofizică se aplică legile și metodele de cercetare ale fizicii moderne, însă există și un șir de particularități. În primul rând, observatorul nu poate influența sau modifica condițiile fizice și fenomenele care se produc în corpurile cerești studiate. În al doilea rând, noi observăm poziția și mișcările corpurilor cerești de pe Pământ, care, la rândul său, este în mișcare de rotație în jurul axei și în mișcare de revoluție în jurul Soarelui, fapt care complică analiza fenomenelor astronomice studiate. În al treilea rând, obiectele cosmice observate se află la distanțe enorme de Pământ. De aceea radiațiile venite de la ele au intensitatea extrem de mică, ceea ce necesită utilizarea unor instrumente de înaltă precizie foarte sensibile. Aceste particularități ale astrofizicii impun noi metode de cercetare și instrumente speciale de observare.

Radiația (lumina) emisă de corpurile cerești este studiată cu ajutorul telescoapelor optice (fig. 8.5, 8.6, 8.7). Telescoapele moderne sunt dotate cu spectrometre și alte instrumente instalate atât la sol, cât și la bordul aparatelor spațiale. Observațiile și cercetările astrofizice se efectuează la observatoarele astronomice (fig. 8.8, 8.9).

În secolul XX, observațiile astrofizice s-au extins practic pe toate lungimile de undă, de la razele gama la undele radio. Au luat naștere noi ramuri ale astronomiei, cum ar fi **radioastronomia, astronomia în raze X (Röntgen) și gama, astronomia neutrinică, astronomia extraatmosferică bazată pe utilizarea sateliților artificiali și a sondelor spațiale.**

Energia radiată de corpurile cerești constituie unica sursă de informație despre proprietățile fizice și compoziția lor chimică. Datele științifice referitoare la corpurile cerești se obțin din analiza spectrală a acestei radiații. Prin metoda respectivă se poate determina *compoziția chimică, viteza radială, temperatura, câmpul magnetic, perioada de rotație a astrului etc.*

Pentru cercetarea undelor radio emise de sursele cosmice se folosesc instrumente speciale numite radiotelescoape (fig. 8.10). Cu ajutorul lor

a fost descoperită radiația radio emisă de Soare, au fost detectate unde radio emise de Jupiter, Venus și Marte. Prin metoda *radiolocației* se poate determina cu mare precizie distanța până la planete, asteroizi etc.

Aplicarea metodelor și instrumentelor moderne de observare și cercetare în astrofizică s-a soldat în ultimele decenii cu un șir de descoperiri științifice remarcabile, cum ar fi: *quasarii, pulsarii, radiația radio cosmică de fond* ș.a.

8.2. ELEMENTE DE ASTRONOMIE PRACTICĂ

a. Mișcarea aparentă a stelelor. Constelațiile

• **Mișcarea aparentă a stelelor.** Pământul se rotește în jurul axei proprii, în direcția de la vest la est, adică în sens opus mișcării ácelor de ceasornic, dacă este privit de la Polul Nord. Nouă însă ni se pare că cerul nocturn se rotește în sens contrar în jurul unei axe imaginare care trece prin ochiul observatorului. Această rotație aparentă a bolții cerești, împreună cu aștrii de pe ea, este numită **mișcare diurnă**. Ca rezultat al mișcării diurne, stelele și alte corpuri cerești își schimbă continuu poziția față de orizont.

Privind partea de nord a cerului, vom constata că unele stele răsar și apun, iar altele descriu cercuri închise, rotindu-se în jurul unui punct fix numit **polul nord al cerului**. Dreapta care trece prin polul nord al cerului și prin ochiul observatorului este numită **axa lumii**. Rotația diurnă a bolții cerești are loc în jurul axei lumii. Poziția polului nord ceresc coincide aproximativ cu poziția stelei α din constelația Ursa-Mică, numită și **Steaua Polară**. Punctul de pe cer diametral opus polului nord al cerului se numește **polul sud al cerului**.

Mișcarea diurnă aparentă a stelelor poate fi pusă în evidență fotografiind într-o noapte senină, fără lună, cerul din jurul Stelei Polare (fig. 8.11) cu un timp de expunere de câteva ore. Pe imaginea obținută vom vedea arce de cerc concentrice – urme ale deplasării stelelor (fig. 8.12). Centrul comun al acestor arce, adică punctul care a rămas fix în mișcarea diurnă a stelelor, este tocmai **polul nord al cerului**.

Ca și stelele, Soarele, Luna și planetele răsar în partea de est a orizontului, ating înălțimea maximă în partea de sud și apun în partea de vest



Fig. 8.7. Telescopul spațial Hubble



Fig. 8.8. Observatorul European de Sud, Cerro Paranal (Chile)



Fig. 8.9. Observatorul Universității de Stat din Moldova (foto Șt. Tiron)



Fig. 8.10. Radiotelescoape

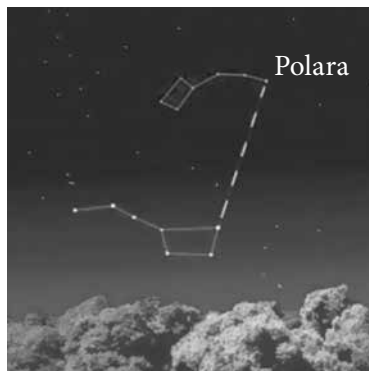


Fig. 8.11. Steaua Polară, constelațiile Ursa-Mare și Ursa-Mică



Fig. 8.12. Regiunea circumpolară a cerului

a orizontului. Urmărind însă zi de zi acești aștri, vom observa că, spre deosebire de stele, de la o zi la alta fiecare dintre ei răsare și apune în diferite puncte ale orizontului.

• **Constelațiile.** Cu ochiul liber pot fi observate aproximativ 6 mii de stele (în ambele emisfere). Când privim cerul înstelat, avem senzația că toți aștrii de pe *bolta cerească* se află la aceeași distanță de noi. Pozițiile relative ale stelelor pe cer se schimbă foarte lent, ele rămânând practic constante mii de ani. De aceea stelele par a fi fixe și aceasta ne

permite să le recunoaștem cu ușurință, deși, la prima vedere, ele sunt împrăștiate haotic pe cer.

În Antichitate, pentru a facilita orientarea pe cer, stelele mai strălucitoare erau reunite în grupuri, numite *constelații* (fig. 8.13).

În prezent, constelație este numită o porțiune a cerului înstelat cuprinsă în hotare bine determinate.

Sfera cerească este împărțită în 88 de constelații, aprobate de Congresul I al Uniunii Astronomice Internaționale (Roma, Italia, a. 1922).

Unele constelații au denumiri legate de mitologia greacă, cum ar fi, de exemplu, Andromeda, Perseu, Pegasus, Leul, Racul, Ursa-Mare etc. Există constelații care au nume sugerate de configurațiile stelelor componente (Triunghiul, Balanța, Coroana Boreală, Crucea-Sudului ș.a.) sau de instrumente științifice (Telescopul, Sextantul). Constelațiile pot fi ușor recunoscute pe *bolta cerească* după configurațiile specifice, formate de cele mai strălucitoare stele ale lor.

Începând din secolul XVII, stelele componente ale constelațiilor sunt notate cu literele alfabetului grecesc, în ordinea descrescției strălucirii. După atribuirea tuturor literelor acestui alfabet, se folosește alfabetul latin, apoi cifrele arabe. Cea mai strălucitoare stea este notată, de regulă, cu litera α , stelele următoare, mai puțin strălucitoare – cu literele β , γ etc. Stelele cele mai strălucitoare au și denumiri proprii. De exemplu, steaua α din constelația *Lira* e numită *Vega*; steaua α din constelația *Orion* – *Betelgeuse*. Stelele strălucitoare facilitează orientarea pe cer, dar și identificarea stelelor mai slabe sau a altor corpuri cerești.

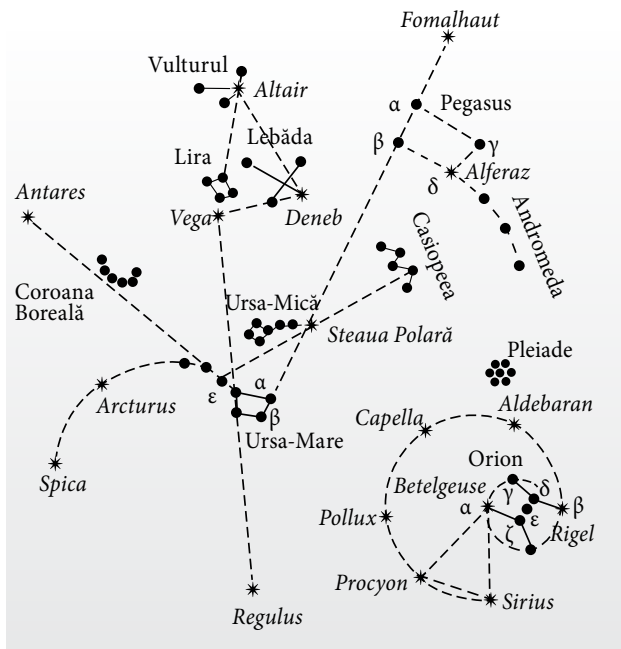


Fig. 8.13. Constelații și stele mai strălucitoare (Leviton E.P.)

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Constelațiile zodiacale. În mișcarea sa anuală aparentă pe ecliptică Soarele trece prin 13 constelații, dintre care 12 sunt numite *constelații zodiacale* (de la cuvântul grecesc *zoon* „animal”): Peștii, Berbecul, Taurul, Gemenii, Racul, Leul, Fecioara, Balanța, Scorpionul, Săgetătorul, Capricornul și Vărsătorul (fig. 8.14). Cea de-a 13-a constelație, Ophiucus, nu este considerată zodiacală.

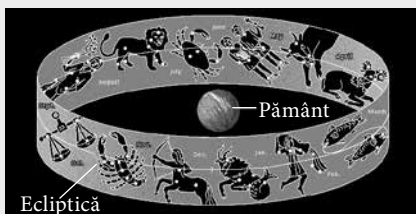


Fig. 8.14. Constelațiile zodiacale

Verificați-vă cunoștințele

1. Identificați pe cer constelațiile circumpolare folosind harta cerului înstelat (v. p. 161).
2. Folosind harta, identificați seara pe cer constelațiile și planetele vizibile la data respectivă. Notați ora observației. Repetați observările peste 2-4-6 săptămâni la aceeași oră. Comparați rezultatele obținute și trageți concluziile.
3. Știind că la distanța brațului întins pumnul strâns (de la degetul mare la cel mic) acoperă pe cer o porțiune unghiulară de aproximativ 10° , estimați dimensiunile unghiulare ale unor constelații.
4. Urmăriți și treceți pe caietul de observații constelațiile prin care Luna trece în lunile de primăvară. Ce ați constatat?

b. Sfera cerească și elementele ei

Pentru a studia mișcarea aparentă a astrilor, este necesar să se cunoască poziția lor la momentul observării. Toți astrii de pe cer se află aparent pe partea interioară a unei sfere de rază arbitrară, în centrul căreia este observatorul. Poziția unui astru este definită de raza dusă din locul de observație spre astrul respectiv.

Sfera imaginară de rază arbitrară având centrul într-un punct de pe suprafața (sau în centrul) Pământului, pe a cărei suprafață interioară se proiectează corpurile cerești la un moment dat, se numește *sferă cerească* (fig. 8.15).

Observatorul se află în centrul sferei cerești. Sfera cerească este utilizată încă din Antichitate pentru determinarea poziției și mișcării corpurilor cerești. În acest scop, pe suprafața ei se definesc mai multe linii, puncte și plane (fig. 8.15), față de care se determină coordonatele cerești și se efectuează măsurările necesare.

• **Elementele sferei cerești.** În figura 8.15 dreapta ZZ' care trece prin centrul O al sferei cerești în direcția forței de greutate se numește **verticala locului**. Ea intersectează sfera cerească în două puncte: **zenit**, Z , și punctul diametral opus, **nadir**, Z' .

Cercul mare al sferei cerești, $SWNES$, al cărui plan este perpendicular pe verticala ZZ' se numește **orizontul adevărat** sau **matematic**. Orizontul matematic împarte sfera cerească în emisfera vizibilă pentru observator, cu vârful în zenit, Z , și cea invizibilă, cu vârful în nadir, Z' . Orizontul matematic nu coincide cu orizontul aparent. Pe mare, orizontul aparent este un cerc mic, al cărui plan este paralel cu planul orizontului matematic.

Axa PP' în jurul căreia are loc mișcarea aparentă a sferei cerești este numită **axa lumii**. Aceasta este paralelă sau coliniară cu axa de rotație a Pământului. Ea intersectează suprafața sferei cerești în două puncte, numite **polul nord al cerului**, P , și **polul sud al cerului**, P' .

Cercul mare al sferei cerești, $QWQ'EQ$, al cărui plan este perpendicular pe axa lumii se numește **ecuatorul ceresc**. Ecuatorul ceresc împarte sfera cerească în două emisfere: emisfera de nord cu polul nord ceresc, P , și emisfera de sud cu polul sud ceresc, P' . Ecuatorul ceresc intersectează orizontul matematic în două puncte: **punctul cardinal est**, E , și **punctul cardinal vest**, W (fig. 8.15).

Cercul mic al sferei cerești, $bMb'b$, al cărui plan este paralel cu planul ecuatorului ceresc se numește **paralel diurn** al astrului M . Mișcarea diurnă aparentă a stelelor se produce pe paralele diurne.

Cercul mare al sferei cerești, $PZQSP'Z'Q'NP$, al cărui plan trece prin verticala locului și axa lumii se numește **meridian ceresc**. Meridianul ceresc împarte sfera cerească în două emisfere: emisfera de est, cu punctul cardinal est, E , și emisfera de vest, cu punctul cardinal vest, W .

Meridianul ceresc intersectează orizontul matematic în două puncte: **punctul cardinal nord**, N , și **punctul cardinal sud**, S . Planul meridianului ceresc intersectează planul orizontului matematic pe dreapta NS , numită **meridiana locului**.

c. Mișcarea anuală aparentă a Soarelui. Ecliptica

Spre deosebire de stele, Soarele și Luna, în locul dat de pe Pământ, își schimbă mereu momentul și punctele în care răsar și apun, precum și înălțimea maximă față de orizont. Poziția Soarelui și a Lunii pe bolta cerească variază datorită înclinației axei Pământului, mișcării de revoluție a Pământului în jurul Soarelui și, respectiv, a Lunii în jurul Pământului.

Ca urmare a mișcării orbitale a Pământului, în decursul anului, Soarele se deplasează aparent pe fondul cerului înstelat cu circa 1° pe zi, de la vest la est (adică în sens opus rotației diurne a bolții cerești).

Drumul anual aparent al Soarelui pe sfera cerească este numit *ecliptică*.

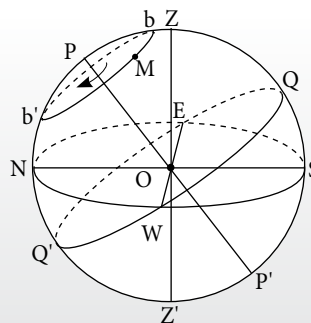


Fig. 8.15. Sfera cerească

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Dreapta perpendiculară pe planul eclipticei care trece prin centrul sferei cerești se numește **axa eclipticei** (fig. 8.16). Ea intersectează sfera cerească în două puncte: **polul nord al eclipticei** și **polul sud al eclipticei**. Ecliptica intersectează ecuatorul ceresc în două puncte numite **echinoctiale**: **punctul vernal** (punctul echinoctiului de primăvară) și **punctul autumnal** (punctul echinoctiului de toamnă).

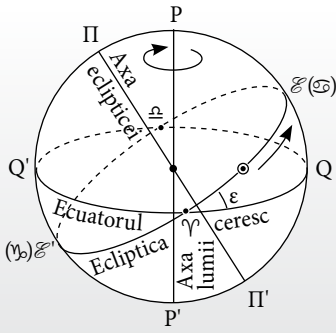


Fig. 8.16. Ecliptica și ecuatorul cereesc

Axa de rotație a Pământului nu este perpendiculară pe planul orbitei sale, ci e înclinată cu un unghi de $66^{\circ}34'$. În consecință, planul eclipticei formează un unghi $\varepsilon = 23^{\circ}26'$ cu planul ecuatorului cereesc (fig. 8.16).

d. Sistemele de coordonate cerești. Culminația astrilor. Echinocțiile și solstițiile

Poziția astrilor pe cer poate fi determinată în diferite sisteme de coordonate cerești. Printre sistemele principale de coordonate cerești care se aplică pe larg în astronomia practică se numără coordonatele cerești orizontale și cele ecuatoriale.

Coordonatele cerești orizontale. Coordonatele orizontale sunt *înălțimea* astrului deasupra orizontului, h , și *azimutul*, A (fig. 8.17).

Cercul mare al sferei cerești, ZMZ' , care trece prin zenit, Z , prin astrul M și nadir, Z' , se numește *cercul vertical* al astrului M .

Înălțimea, h , a astrului M este unghiul mOM dintre planul orizontului matematic și direcția spre astru, OM .

Înălțimea h poate lua valori între 0° și $+90^{\circ}$, dacă astrul se află deasupra orizontului, sau între 0° și -90° , dacă astrul este sub orizont.

Uneori în locul înălțimii este utilizată o altă coordonată numită *distanța zenitală*, z , a astrului M , care este unghiul ZOM între verticala locului ZZ' și direcția spre astru, OM . Distanța zenitală, z , ia valori de la 0° la 180° . Între coordonatele z și h ale unui astru există o relație simplă:

$$z + h = 90^{\circ}.$$

Azimutul astrului M este unghiul SOM între planul meridianului cereesc și planul cercului vertical al astrului.

Azimutul se măsoară de la punctul cardinal sud, S , spre vest în direcția rotației diurne a sferei cerești și poate lua valori între 0° și 360° .

Coordonatele orizontale determină poziția aparentă a astrului și variază în timp datorită rotației diurne a sferei cerești. În practică, ele se măsoară cu ajutorul instrumentului universal sau al teodolitului.

Coordonatele cerești ecuatoriale. În astronomie sunt utilizate două sisteme de coordonate cerești ecuatoriale, ambele având drept plan fundamental planul ecuatorului cereesc: coordonatele orare și coordonatele ecuatoriale.

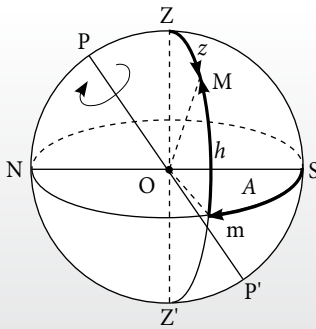


Fig. 8.17. Coordonatele orizontale

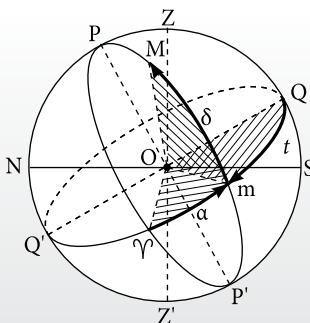


Fig. 8.18. Coordonatele orare și coordonatele ecuatoriale

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Hărțile stelare cuprind toate stelele de până la o anumită strălucire din emisfera nordică și cea sudică a sferei cerești. De aceea astronomii amatori trebuie să consulte hărțile și anuarele astronomice (accesibile și pe Internet).

Coordonatele cerești orare. Coordonatele acestui sistem sunt *declinația*, δ , și *unghiul orar*, t (fig. 8.18).

Cercul mare al sferei cerești, PMP', care trece prin poliul lumii și prin astrul M se numește **ceroul orar** sau **ceroul de declinație** al astrului M.

Declinația, δ , a unui astru este unghiul dintre planul ecuatorului ceresc și direcția spre astru.

Declinația măsurată la nord de ecuatorul ceresc este considerată pozitivă, iar la sud de ecuator – negativă. Așadar, valorile declinației sunt cuprinse între 0° și $\pm 90^\circ$. Declinația e similară cu latitudinea geografică.

Poziția cercului orar al astrului este determinată de cea de a doua coordonată – *unghiul orar*, t .

Unghiul orar, t , este unghiul diedru între planul meridianului ceresc și planul cercului orar al astrului.

Unghiul orar ia valori în limitele 0° – 360° sau 0^h – 24^h .

Sistemul de coordonate cerești orare se folosește la măsurarea timpului.

Sistemul de coordonate cerești ecuatoriale. Prima coordonată în acest sistem este aceeași *declinație*, δ . Cea de a doua coordonată este *ascensia dreaptă*, notată cu α , care e similară cu longitudinea geografică.

Ascensia dreaptă, α , a unui astru M este unghiul dintre direcția spre punctul vernal, Υ , și planul cercului orar al astrului.

Această coordonată se măsoară de la punctul vernal, Υ , până la cercul orar al astrului dat, în sens opus rotației diurne a sferei cerești. Ascensia dreaptă mai frecvent se exprimă în unități de timp și poate lua valori cuprinse între 0^h și 24^h (fig. 8.18).

Corespondența dintre unitățile de timp și cele unghiulare se stabilește ușor având în vedere că Pământul (și, aparent, sfera cerească cu stelele de pe ea) efectuează o rotație completă (360°) în 24 de ore. Deci în decurs de o oră sfera cerească se rotește cu 15° , în 4 min. – cu 1° ș.a.m.d.

Sistemul de coordonate ecuatoriale este utilizat în astrometrie la întocmirea cataloagelor și a hărților stelare. Ascensia dreaptă exprimată în unități de timp este indicată pe rețeaua de coordonate a hărților stelare.

• **Culminația astrilor.** Fenomenul de trecere a unui astru prin meridianul ceresc se numește **culminația astrului**. Culminația este *superioară* atunci când astrul intersectează partea superioară a meridianului ceresc PZQSP' (fig. 8.15). Culminația este *inferioară* când astrul intersectează partea inferioară a meridianului ceresc, PNQ'Z'P'.

În cazul astrilor care nu apun, ambele culminații sunt vizibile. Dacă astrul răsare și apune, e vizibilă numai culminația superioară, cea inferioară având loc sub orizont. Culminațiile astrilor care nu răsare au loc sub orizont și deci nu sunt vizibile.

Momentul culminației superioare a Soarelui se numește **amiază adevărată**, iar momentul culminației inferioare – **miezul nopții adevărat**.

• **Echinoxurile și solstițiile.** În mișcarea sa anuală aparentă pe ecliptică Soarele trece, la 21 martie, din emisfera de sud a sferei cerești în cea de nord, prin **punctul vernal**, Υ (fig. 8.16). Aceasta este ziua *echinoxului de primăvară*, când durata zilei este egală cu cea a nopții. În ziua echinoxului de toamnă, la 23 septembrie, Soarele trece din emisfera de nord în cea de sud a cerului prin **punctul autumnal**, Ω .

Punctele ecliptice, situate la 90° de punctele echinoxiale, se numesc **puncte solstițiale**, \mathcal{E} și \mathcal{E}' . În emisfera de nord a Pământului, Soarele este în punctul *solstițiului de vară* în jurul datei de 22 iunie, iar în punctul *solstițiului de iarnă* – în jurul datei de 21 decembrie.

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Măsurând înălțimea Soarelui la amiază, adică în momentul culminației superioare, pe parcursul unui an, se poate constata că aceasta variază între anumite limite.

În zilele de echinox, traiectoria diurnă a Soarelui este chiar ecuatorul ceresc. Deoarece planul orizontului împarte ecuatorul ceresc în jumătate, în aceste zile porțiunea de drum parcursă de Soare deasupra orizontului este egală cu cea de sub orizont și, ca urmare, ziua și noaptea au duratele egale.

În zilele de echinox, în locul cu latitudinea geografică φ înălțimea Soarelui la amiază este $h_\circ = 90^\circ - \varphi$.

În ziua solstițiului de vară, în locul cu latitudinea geografică φ înălțimea Soarelui la amiază atinge valoarea maximă:

$$h_{\max} = 90^\circ - \varphi + 23^\circ 26'.$$

Aproximativ la 22 decembrie, Soarele, mișcându-se pe ecliptică, coboară sub ecuatorul ceresc cu $23^\circ 26'$. În ziua *solstițiului de iarnă*, în emisfera de nord a Pământului, cea mai mare parte a drumului diurn aparent al Soarelui se află sub orizont și de aceea ziua aceasta este cea mai scurtă, iar noaptea – cea mai lungă din an.

În locul cu latitudinea geografică φ , în ziua solstițiului de iarnă înălțimea Soarelui la amiază este minimă:

$$h_{\min} = 90^\circ - \varphi - 23^\circ 26'.$$

În celelalte zile ale anului înălțimea Soarelui variază între valorile h_{\min} și h_{\max} .

⇒ Verificați-vă cunoștințele

1. Calculați înălțimea Soarelui la amiaza adevărată în zilele de echinocții și solstiții la Chișinău.
2. Exprimați unghiul $28^{\circ}54'37''$ în unități de timp.
3. Latitudinea geografică a orașului Chișinău este $\varphi = 47^{\circ}05'$. Determinați distanța unghiulară dintre zenit și polul nord al cerului la Chișinău.
4. Orașul Rio de Janeiro (Brazilia) are latitudinea geografică $\varphi = -23^{\circ}03'$. Care este unghiul dintre planul ecuatorului ceresc și planul orizontului în acest oraș?
5. Azimutul unui astru este egal cu 45° , iar înălțimea – cu 60° . În ce parte a cerului trebuie căutat astrul?
6. În ce locuri de pe Pământ înălțimea astrilor față de orizont nu variază în decursul zilei?
7. Cum se poate dovedi că axa de rotație a Pământului nu-și schimbă direcția în spațiu în decursul mișcării lui anuale?
8. În care zile ale anului Soarele se află pe ecuatorul ceresc?
9. Soarele este la $128^{\circ}34'50''$ de punctul vernal. Cât este ascensia dreaptă a Soarelui, exprimată în unități de timp?
10. Un elev s-a născut la miezul nopții când steaua θ din constelația Capricorn era în culminația superioară. În ce constelație se afla atunci Soarele?

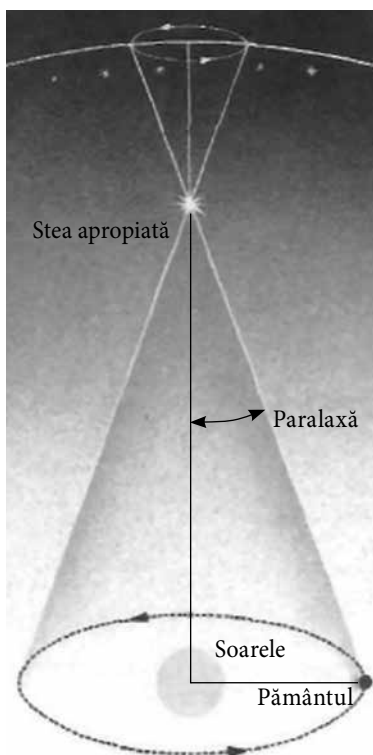


Fig. 8.19. Paralaxa anuală



Fig. 8.20. Pendulul lui Foucault (Paris, Franța, a. 1851)

e. Mișcarea periodică a Pământului și a Lunii. Fazele Lunii. Eclipsele de Soare și de Lună

• **Mișcarea de revoluție a Pământului în jurul Soarelui.** Pământul se mișcă în jurul Soarelui pe o orbită eliptică efectuând o rotație completă într-un an. Ca urmare, direcția spre o stea apropiată se schimbă, astfel încât observatorului i se pare că steaua descrie în decursul anului o elipsă pe sfera cerească (fig. 8.19). Acest fenomen este numit **paralaxă anuală**.

Paralaxa anuală a stelelor este o dovadă a mișcării de revoluție a Pământului în jurul Soarelui.

Să ne amintim

Sucesiunea anotimpurilor. Observațiile arată că polii cerești nu-și schimbă poziția față de stele în decursul anului. De aici rezultă că axa de rotație a Pământului rămâne paralelă cu ea însăși în mișcarea lui de revoluție în jurul Soarelui.

Mișcarea Pământului în jurul Soarelui, înclinarea axei de rotație a Pământului față de planul orbitei cu $66^{\circ}34'$ și faptul că unghiul de înclinație rămâne constant – toate acestea au drept consecință succesiunea anotimpurilor pe Pământ.

• **Mișcarea de rotație axială.** Rotația Pământului în jurul axei sale poate fi pusă în evidență cu ajutorul unui pendul gravitațional, experiment realizat pentru prima dată în 1851 de fizicianul francez Foucault (fig. 8.20). În câmpul de gravitație, pendulul are proprietatea de a-și păstra invariabilă orientarea în spațiu a planului de oscilație. Dacă, de exemplu, pendulul lui Foucault oscilează la polul nord al Pământului în planul unui anumit meridian, observatorul peste un timp va constata că planul de oscilație al pendulului s-a deplasat aparent în sensul rotației ácelor de ceasornic, adică de la est spre vest. Dat fiind faptul că planul de oscilație al pendulului nu poate să-și schimbe direcția, rezultă că în realitate Pământul se rotește de la vest spre est.

Rotația Pământului în jurul axei sale se manifestă prin succesiunea zilelor și nopților. Ca urmare a rotației Pământului, în zonele tropicale suflă mereu vânturi numite **alizee**, de la nord-est spre sud-vest în emi-

sfera nordică și de la sud-est spre nord-vest în emisfera sudică. Datorită rotației Pământului, în emisfera nordică malul drept al râurilor este mai abrupt din cauza eroziunii, iar în cea sudică – malul stâng. O altă dovadă a rotației Pământului este devierea spre est a corpurilor în cădere. Astfel, un corp lăsat să cadă liber de pe un turn înalt va atinge solul într-un punct deplasat spre est față de peretele turnului.

Numeroase cercetări au arătat că viteza unghiulară de rotație a Pământului nu este constantă, adică rotația lui nu este uniformă. S-a constatat că are loc o încetinire seculară a rotației ca urmare a frânării produse de mările lunare și solare.

- **Mișcarea Lunii.** Luna efectuează o mișcare de revoluție în jurul Pământului pe o orbită eliptică în 27,32 de zile, această perioadă fiind numită **lună siderală**. În mișcarea sa de revoluție, Luna se deplasează pe cer de la vest la est cu aproximativ 13° pe zi, trecând prin toate constelațiile zodiacale.

Întrucât orbita Lunii nu este circulară, distanța de la Pământ la Lună variază de la 356 375 km în perigeu la 406 720 km în apogeu, distanța medie fiind de 384 400 km. De asemenea, variază și diametrul unghiular aparent al discului lunar – respectiv de la $33'29''$ la $29'22''$. Acest fapt determină tipul și durata eclipselor de Soare.

- **Fazele Lunii.** Luna, ca și planetele, nu are lumină proprie, ea este văzută datorită luminii Soarelui reflectată de ea.

Ca urmare a mișcării sale de revoluție, Luna își schimbă mereu poziția față de Soare. De aceea aspectul ei pe cer variază prezentând așa-numitele **faze**: lună nouă (1), primul pătrar (2), lună plină (3), ultimul pătrar (4) (fig. 8.21). Intervalul de timp dintre două faze consecutive de același fel, numit **lună sinodică**, este egal cu 29,53 de zile.

Luna sinodică este cu 2,2 zile mai lungă decât luna siderală. Această diferență se explică prin faptul că în timpul unei rotații a Lunii în jurul Pământului, acesta, la rândul său, se rotește în jurul Soarelui cu aproximativ 27° , parcurgând circa 1° pe zi. Pentru a reveni la aceeași poziție față de Soare și Pământ, adică la aceeași fază, Luna are nevoie de 2,2 zile ca să parcurgă acest unghi (fig. 8.22).

La câteva zile după faza de lună nouă, Luna poate fi văzută seara la vest sub forma unei seceri înguste luminoase în creștere. Partea neiluminată de Soare a discului are o culoare cenușie, care se datorează luminii solare reflectate de suprafața terestră (fig. 8.23).

Pentru un observator de pe Lună, Pământul, de asemenea, prezintă faze.

Urmărind cu atenție detaliile de pe discul lunar, se poate observa că acestea sunt mereu aceleași, de unde s-ar putea trage concluzia că Luna nu se rotește în jurul axei sale. În realitate lucrurile stau cu totul altfel: Luna este în mișcare de rotație în jurul axei proprii, însă perioada acestei mișcări este egală exact cu perioada de revoluție a Lunii în jurul Pământului, adică cu 27,32 de zile.

Drept consecință, Luna este orientată mereu cu aceeași față spre Pământ.

- **Eclipsele de Soare.** Soarele este de circa 400 de ori mai mare în diametru decât Luna. În același timp, Soarele este aproximativ de 400 de

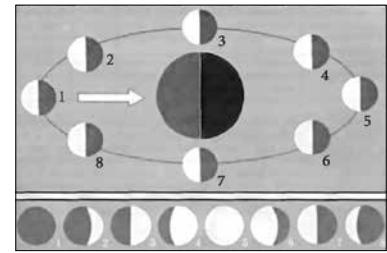


Fig. 8.21. Succesiunea fazelor Lunii

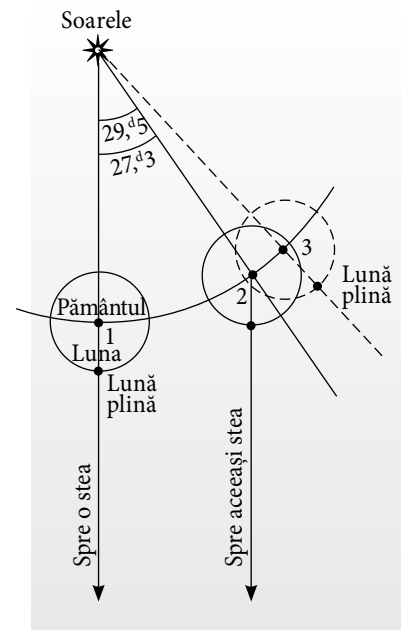


Fig. 8.22. Luna sinodică și luna siderală



Fig. 8.23. Lumina cenușie a Lunii

ori mai departe de Pământ ca Luna. În consecință, atunci când aceste corpuri se aliniază, Luna poate să acopere o parte sau tot discul solar și atunci are loc o eclipsă de Soare (fig. 8.24).

Eclipsele de Soare se produc atunci când Luna este în faza de lună nouă.

Dacă Luna în faza de lună nouă este în perigeul orbitei sale, adică la distanța minimă de Pământ, iar Pământul în afeliu (la distanța maximă de Soare), atunci se poate observa o *eclipsă totală* de Soare (cu durată maximă de 7 min. 40 s la ecuatorul Pământului) (fig. 8.25). La latitudinea Chișinăului, durată medie a unei eclipse totale de Soare este de 2-2,5 min. Diametrul maxim al umbrei Lunii pe Pământ este

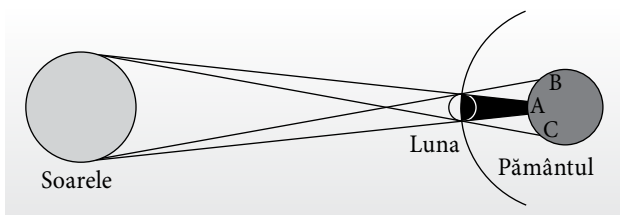


Fig. 8.24. Schema eclipsei totale de Soare



Fig. 8.25. Eclipsă totală de Soare

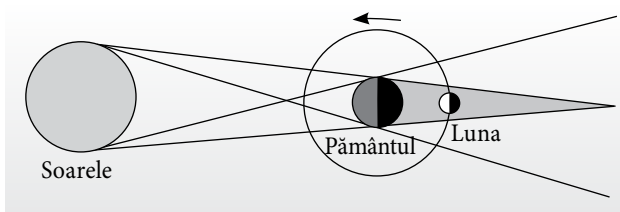


Fig. 8.26. Schema eclipsei totale de Lună

de circa 250 km. În timpul eclipsei de Soare, umbra Lunii se deplasează de la vest la est cu viteza de 0,5 km/s pe o distanță de câteva mii de kilometri. Eclipsa totală de Soare poate fi observată numai în punctele de pe Pământ prin care trece pata de umbră a Lunii (A în fig. 8.24). În timpul eclipsei totale pe cer apar aștrii mai strălucitori.

În zonele de penumbră (B și C în fig. 8.24) Luna acoperă doar o parte din discul solar și de pe Pământ se observă o *eclipsă parțială* de Soare.

Dacă Luna în faza de lună nouă este în apogeul orbitei sale (la distanța maximă de Pământ), iar Pământul – în periheliu (la distanța minimă de Soare), atunci în timpul eclipsei discul lunar nu va acoperi în întregime discul Soarelui și se va produce o *eclipsă inelară* de Soare.

Pe an pot avea loc 2-5 eclipse de Soare. În unul și același loc eclipsa totală poate avea loc o dată la circa 300 de ani.

Eclipsele totale de Soare oferă astronomilor oportunitatea de a observa și cerceta coroana solară, adică partea exterioară a atmosferei solare. Printre astronomii care și-au consacrat activitatea cercetării eclipselor solare se numără și astronomii basarabeni Nicolae Donici și Alexandru Deutsch.

În prezent, astronomii pot să creeze artificial o eclipsă totală de Soare cu ajutorul unui instrument numit *coronograf* (inventat în 1930 de Bernard Lyot).

• **Eclipsele de Lună.** Atunci când Luna în faza de lună plină uneori intră în conul de umbră al Pământului, se produce o eclipsă de Lună (fig. 8.26).

Eclipsele de Lună pot fi totale și parțiale. Umbra Pământului în spațiu are forma unui con convergent, care la distanța medie Pământ–Lună are în secțiune diametrul de 2,5 ori mai mare decât diametrul Lunii. De aceea eclipsele de Lună au durată destul de lungă. Astfel, dacă Luna în faza de lună plină se află în perigeul orbitei sale, iar Pământul este în afeliu, eclipsa totală de Lună va avea durată maximă de circa 1 oră 45 min. În timpul eclipsei totale discul lunar nu dispare de pe cer, ci capătă o culoare roșiatică (fig. 8.27). Acest fenomen se explică prin faptul că razele albastre ale Soarelui sunt împrăștiate în atmosfera Pământului mai mult decât razele roșii care se refractă și pătrund în conul de umbră, luminând suprafața Lunii.

În cazul când Luna intră numai parțial în conul de umbră al Pământului, se observă o *eclipsă parțială* de Lună.

Eclipsele de Lună sunt vizibile de pe toată emisfera Pământului, unde la momentul eclipsei Luna este deasupra orizontului. În timp de un an pot fi observate până la 3 eclipse de Lună. Încă în Antichitate s-a observat că eclipsele se repetă după 223 de luni sinodice sau 18 ani, 11 zile și 7 ore, perioadă numită **saros**, în decursul căreia au loc 71 de eclipse, inclusiv 43 de eclipse de Soare și 28 de eclipse de Lună. Sarosul permite precizarea aproximativă a eclipselor.



Fig. 8.27. Eclipsă totală de Lună (foto I. Nacu)

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Ar putea fi observată la Polul Nord o eclipsă de Soare/ o eclipsă de Lună la data de 15 iunie? la 15 decembrie? Argumentați.
2. Diametrul unghiular al Soarelui este de circa $0,5^\circ$ și e aproximativ egal cu cel al Lunii. Distanța medie de la Pământ la Lună este de 384 400 km, iar la Soare de 149 600 000 km. Calculați de câte ori diametrul liniar al Soarelui e mai mare decât cel al Lunii.
3. Enumerați factorii care determină durata eclipselor de Soare și de Lună.
4. În ce condiții se poate produce o eclipsă inelară de Soare?
5. În ce direcție se deplasează umbra Lunii pe suprafața terestră în timpul eclipselor de Soare?
6. Determinați durata unei eclipse de Soare observate de pe Lună.
7. De ce se interzice categoric observarea eclipselor de Soare direct prin telescop sau binoclu? Ce mijloace de protecție a ochilor trebuie utilizate?
8. În care din fazele Lunii se pot observa cel mai bine prin telescop craterele și alte formațiuni de pe suprafața ei? Argumentați.
9. În ce fază e văzut Pământul de pe Lună, atunci când pe Pământ Luna este în faza de lună nouă?
10. De pe care planete ar putea fi observată partea invizibilă a Lunii? Argumentați.
11. Explicați culoarea roșiatică a discului lunar în timpul eclipsei totale de Lună.

f. Timpul și măsurarea lui. Calendarul

Măsurarea timpului în astronomie este bazată pe observații efectuate asupra unor mișcări periodice: rotația Pământului în jurul axei sale, mișcarea de revoluție a Pământului în jurul Soarelui și a Lunii în jurul Pământului.

• **Timpul solar mijlociu.** În astronomie și în viața cotidiană se folosește așa-numitul *timp solar mijlociu*.

Unitatea de timp solar mijlociu este ziua solară mijlocie, care constituie intervalul de timp dintre două culminații consecutive inferioare ale soarelui ecuatorial mijlociu pe unul și același meridian geografic.

Ziua solară mijlocie începe la miezul nopții mijlocii și este constantă pe parcursul anului.

Timpul solar mijlociu se notează cu T_m și este definit ca timpul măsurat de la momentul culminației inferioare a așa-numitului soare ecuatorial mijlociu până la orice alt moment, exprimat în fracțiuni de zi solară mijlocie.

Pe meridianul dat, timpul solar mijlociu T_m este egal cu unghiul orar al soarelui mijlociu, t_m , plus 12^h , adică

$$T_m = t_m + 12^h.$$

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI!

Soarele mijlociu ecuatorial este un punct fictiv ce se mișcă uniform pe ecuatorul ceresc, nu pe ecliptică, și a cărui poziție se calculează pe cale teoretică pentru orice moment de timp. Această noțiune a fost introdusă pentru a avea drept unitate de timp o zi solară constantă, deoarece ziua solară adevărată este variabilă.

La amiază, unghiul orar al Soarelui $t_m = 0^h$ și deci timpul solar mijlociu $T_m = 12^h$.

• **Timpul local și timpul universal.** Timpul măsurat pe meridianul geografic dat este numit *timp local (civil)*.

Timpul solar mijlociu local al meridianului Greenwich (inițial) este numit timp universal, T_0 .

Timpul local pe meridianul dat se poate exprima prin timpul universal și longitudinea geografică a locului:

$$T_\lambda = T_0 \pm \lambda,$$

unde „+” se ia pentru longitudinea estică și „-” pentru longitudinea vestică.

În calendarele și anuarele astronomice momentul producerii evenimentelor astronomice este indicat în timp universal.

• **Timpul fusului orar (legal).** Utilizarea în viața cotidiană a timpului local ar fi foarte incomodă, pentru că el variază continuu de la un meridian la altul. De aceea în anul 1884 a fost propus un nou sistem de calcul al timpului având la bază așa-numitele *fuse orare*.

APLICAȚII

Determinarea longitudinii geografice. Diferența dintre timpurile locale pe două meridiane, în unul și același moment, este egală cu diferența longitudinilor geografice ale meridianelor respective, exprimată în unități de timp. De exemplu, dacă meridianele 1 și 2 au longitudinile λ_1 și λ_2 , atunci diferența de timp solar mijlociu pe ele este:

$$T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2.$$

Această relație se poate folosi la determinarea longitudinii geografice a locului dat.



Fig. 8.28. Calendarul solar Maya

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Calendarul iulian (stilul vechi). În anul 46 î.Hr., împăratul Iulius Caesar a realizat reforma calendarului roman. Durata medie a anului a fost stabilită de 365 de zile și 6 ore, adică foarte aproape de durata anului tropic. Pentru ca anul să aibă un număr întreg de zile, trei ani la rând erau considerați comuni, cu câte 365 de zile, iar al patrulea – bisect, cu 366 de zile. Anul este bisect dacă numărul care-l exprimă este divizibil exact cu 4. Prima lună din an era ianuarie. Acest calendar poartă numele de *calendar iulian sau stil vechi*. El a servit ca bază pentru calculele cronologice. Anul iulian este cu 11 minute și 13,9 secunde mai lung decât anul tropic. Ca urmare, la fiecare 128 de ani și 68 de zile se acumulează o eroare de o zi. De aceea în secolul XVI eroarea calendarului iulian atinsese 10 zile. Acest fapt introducea o confuzie în aplicarea regulii de determinare a datei Paștelui, stabilite de Conciliul I ecumenic de la Niceea (a. 325 d.Hr.): Paștele creștin se sărbătorește în prima duminică după prima lună plină care are loc după ziua echinocțiului de primăvară, 21 martie. Așadar, în secolul XVI reforma calendarului iulian devenise o problemă foarte actuală.

Globul pământesc este împărțit în 24 de fuse orare cu lățimea de 15° (sau 1^h) fiecare, numerotate de la 0 la 23. Meridianul de bază (central) al fusului zero este meridianul Greenwich.

Timpul local al meridianului de bază al fusului orar cu numărul de ordine n este numit timp al fusului orar sau timp legal, T_n , și este aplicat în limitele întregului fus orar considerat.

Relația dintre timpul legal și timpul universal este $T_n = T_0 + n^h$ („+” – la est și „-” – la vest de Greenwich). Orașul Chișinău, având longitudinea $\lambda = 28^\circ 49'$, se află în fusul orar $n = 2$, deci pentru Chișinău relația dintre timpul legal și timpul universal este

$$T_2 = T_0 + 2^h.$$

Pentru a economisi energia electrică și a utiliza la maximum lumina zilei, se introduce așa-numita **oră de vară**: în ultima duminică a lunii martie acele ceasornicului se mută cu o oră înainte. Timpul de vară (sau oficial) este egal cu timpul legal plus o oră:

$$T_v = T_n + 1^h.$$

Pentru Chișinău $T_v = T_2 + 1^h = T_0 + 3^h$, adică vara diferența dintre ora Chișinăului și timpul universal este de 3 ore. Ora de vară se anulează în ultima duminică a lunii octombrie.

La mijlocul secolului al XX-lea a fost introdusă scara strict uniformă de **timp atomic internațional**. Ea se bazează pe un proces periodic natural de înaltă precizie – tranziția de rezonanță a atomului de cezium între două niveluri energetice – și nu depinde de rotația Pământului. Drept unitate de timp se ia *secunda atomică* folosită în SI (Sistemul Internațional).

• **Calendarul.** Sistemul de calcul al intervalelor mari de timp este numit **calendar**.

De-a lungul istoriei au fost întocmite și utilizate calendare care pot fi grupate în trei tipuri: **solare, lunare și luni-solare**. Unul dintre cele mai exacte calendare solare antice este considerat Calendarul Maya (fig 8.28).

La baza calendarului solar se află durata anului tropic egală cu 365 de zile 5 ore 48 min. 46,1 s, iar la baza calendarului lunar – luna sinodică egală cu 29,5 zile. Calendarul luni-solar este bazat pe ambele aceste perioade.

La întocmirea unui calendar se urmărește ca anul calendaristic să fie cât mai aproape de durata anului tropic și să conțină un număr întreg de zile solare.

• **Calendarul gregorian (stilul nou).** În anul 1582, Papa Gregorius al XIII-lea a dispus reforma calendarului iulian. În noul calendar a fost păstrată succesiunea anilor comuni de 365 de zile și a anilor bisecți de 366 de zile din calendarul iulian, însă pentru a reduce diferența dintre anul iulian și durata anului tropic, a fost modificată regula de stabilire a anilor bisecți cu referire la anii care exprimă secole. Anii seculari sunt considerați bisecți numai dacă numărul care îi exprimă este divizibil exact cu 400. Astfel, anii 1700, 1800, 1900, 2100 devin comuni, în timp ce anii 2000, 2400, 2800 sunt bisecți. În anul bisect luna februarie are 29 de zile.

Eroarea calendarului gregorian este de doar 26 de secunde pe an, astfel că eroarea de o zi se acumulează aproximativ la 3300 de ani. Noul sistem calendaristic a căpătat denumirea de *calendar gregorian* sau *stil nou*. Către începutul secolului al XX-lea, diferența dintre stilul nou (gregorian) și cel vechi (iulian) a atins 13 zile și va rămâne așa până în anul 2100.

În prezent, calendarul gregorian este adoptat de majoritatea țărilor lumii. Stilul vechi mai continuă să fie folosit doar în unele țări de biserica creștină ortodoxă. În legătură cu intensificarea relațiilor dintre state, calendarul gregorian este astăzi utilizat în toate țările, uneori paralel cu calendarele tradiționale.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Pentru a determina coordonatele navei, căpitanul a măsurat în ziua de 22 decembrie distanța zenitală a Soarelui la amiaza adevărată, obținând valoarea de $66^{\circ}34'$. La momentul observației orologiul de timp universal (Greenwich) indica ora $10^{\text{h}}54^{\text{m}}$. Determinați coordonatele geografice ale navei.
2. Ce dată după stilul vechi este la 1 martie 2011?
3. O aeronavă A340 are de parcurs distanța de 6 400 km de la Philadelphia (SUA) la Frankfurt pe Main (Germania) cu viteza de 750 km/h, diferența de fus orar fiind 6^{h} . Când va sosi aeronava la Frankfurt, dacă ea a decolat de la Philadelphia în ziua de 3 august la ora $20^{\text{h}}00^{\text{m}}$?
4. Va fi anul 2200 un an bisect după stilul nou? Dar după stilul vechi?

8.3. SISTEMUL SOLAR

a. Planetele de tip terestru și planetele gigante. Sateliții planetelor. Planetele pitice

Caracteristici generale. Soarele și toate corpurile care se mișcă în jurul lui – planetele cu sateliții lor, asteroizii, cometele, precum și materia interplanetară, formează Sistemul Solar (*fig. VI*, planșa color, p. 162).

Aproape întreaga masă a Sistemului Solar (99,87%) este concentrată în Soare. Ca mărime, Soarele este de 109 ori mai mare în diametru și aproximativ de 333 000 de ori mai masiv decât Pământul. În jurul Soarelui orbitează următoarele planete (în ordinea creșterii distanței de la Soare): Mercur, Venus, Pământ, Marte, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun (vezi *tab. 1*, p. 157). Orbitale planetelor sunt situate aproximativ în același plan cu orbita Pământului.

Între orbitale planetelor Marte și Jupiter, în jurul Soarelui gravitează asteroizii, formând așa-numita *centură principală a asteroizilor*.

Centura asteroizilor separă sistemul planetar în două grupuri: **planetele terestre** sau **telurice**, de tipul Pământului (Mercur, Venus, Pământ și Marte), în interiorul centurii, și **planetele gigante gazoase** sau **joviene** (Jupiter, Saturn, Uranus și Neptun), în afara orbitale asteroizilor.

Planetele telurice sunt asemănătoare între ele, fiind relativ mici, cu diametrul sub 13 000 km. Ele au suprafața solidă și densitatea medie cuprinsă între $3,9$ și $5,5 \text{ g/cm}^3$. Aceste planete se caracterizează prin rotație axială lentă, număr mic de sateliți naturali (Pământul cu Luna și Marte cu sateliții săi Phobos și Deimos). Planetele terestre sunt compuse, în principal, din rocă și metal.

Planetele gigante se caracterizează prin dimensiuni mari (diametre de peste 48 000 km), densitate mică ($0,7$ – $1,8 \text{ g/cm}^3$), rotație axială rapidă, lipsa suprafeței solide, atmosferă densă și extinsă, bogată în hidrogen și heliu. Aceste planete au mulți sateliți și inele de praf și gaz.

În jurul Soarelui mai gravitează cometele și nenumărate corpuri *meteorice*, de la mărimea unui fricel de nisip până la câțiva kilometri. Asteroizii,

corpurile meteorice și cometele fac parte din categoria **corpurilor mici** ale Sistemului Solar. Spațiul dintre planete este ocupat de gaz și praf cosmic extrem de rarefiat.



Fig. 8.29. Suprafața planetei Mercur



Fig. 8.30. Planeta Venus

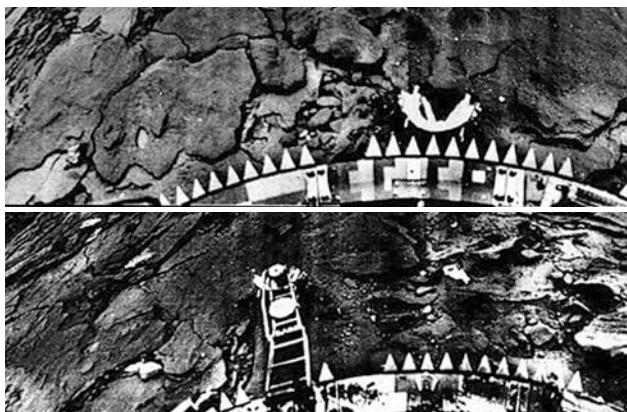


Fig. 8.31. Imagine a suprafeței planetei Venus (stația „Venera-14”, a. 1981)

Planeta Mercur

Mercur este planeta cea mai apropiată de Soare. Această planetă nu are sateliți. Având raza de 2 439 km, este doar cu puțin mai mare decât Luna. Densitatea medie a planetei este aproape ca a Pământului. Axa de rotație este practic perpendiculară pe planul orbitei sale și de aceea pe Mercur nu există anotimpuri. Perioada de revoluție – anul mercurian – este de circa 88 de zile terestre, iar perioada de rotație în jurul axei este de 58,6 zile terestre.

Mercur are câmp magnetic propriu, însă acesta este de 300 de ori mai slab decât cel al Pământului. Planeta Mercur poate fi văzută timp de cel mult o oră, aproape de orizont, fie seara la vest după apusul Soarelui, fie dimineața la est înainte de răsăritul Soarelui.

Suprafața planetei Mercur (fig. 8.29) este foarte asemănătoare cu suprafața Lunii. La fel ca și Luna, ea este acoperită de cratere de diferite dimensiuni. Planeta este practic lipsită de atmosferă. Pe suprafața ei la ecuator temperatura atinge ziua circa 700 K, iar pe partea nocturnă scade până la 100 K. Aceste condiții fac imposibilă existența vieții pe Mercur.

Planeta Venus

Venus (cunoscută sub denumirea populară de *Luceafăr*) (fig. 8.30) este a doua planetă de la Soare. Planeta Venus nu are sateliți. Ea poate fi văzută pe cer ca o stea strălucitoare dimineața înainte de răsăritul Soarelui ori seara după apusul Soarelui. Venus prezintă faze la fel ca și Luna.

În ceea ce privește masa, raza și alte caracteristici, Venus nu se deosebește mult de Pământ. Venus, ca și Pământul, are atmosferă densă. Totuși, condițiile fizice pe suprafața acesteia diferă în mod radical de cele de pe Pământ.

Date despre suprafața planetei au fost obținute cu ajutorul stațiilor automate care au coborât pe solul venusian (fig. 8.31). Aici au fost descoperite circa 1 000 de cratere, lanțuri de munți și văi asemănătoare cu cele de pe Pământ.

Măsurările directe efectuate de stațiile „Venera” și „Mariner-2” au demonstrat că în atmosfera venusiană predomină dioxidul de carbon. Datele transmise de aceste aparate cosmice au arătat că temperatura medie la suprafața planetei atinge circa 460 °C, iar presiunea este de 90 atm. Temperatura înaltă de la suprafață este rezultatul *efectului de seră* provocat de dioxidul de carbon din atmosferă.

Anul venusian s-a dovedit a fi egal cu circa 225 de zile terestre, iar perioada de rotație în jurul axei pro-

prii – cu aproximativ 243 de zile terestre, adică mai lungă decât cea de revoluție. S-a constatat că rotația axială a planetei Venus este retrogradă, adică are loc în sens opus mișcării ei orbitale. Axa de rotație este aproape perpendiculară pe planul orbitei și de aceea pe planetă nu are loc succesiunea anotimpurilor.

Planeta Venus totdeauna este acoperită cu un strat gros de nori, care nu permit observarea directă a suprafeței ei prin telescopul optic. De aceea perioada și sensul rotației axiale ale lui Venus au fost determinate prin metode radar.

Măsurările magnetometrice au arătat că Venus nu are câmp magnetic propriu. Din cauza temperaturii și presiunii extrem de înalte, viața sub orice formă pe planeta Venus e prea puțin probabilă.

Planeta Marte

Marte este a patra planetă de la Soare și gravitează în jurul acestuia la o distanță de 1,52 ori mai mare decât Pământul. Planeta este de două ori mai mică în diametru și de nouă ori mai puțin masivă decât Pământul (*fig. VII*, planșa color, p. 162). Densitatea medie a planetei este de $3,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Planul ecuatorului este înclinat cu aproape același unghi față de planul orbitei, ca și la Pământ. Aceasta înseamnă că pe Marte are loc succesiunea anotimpurilor. Perioada de revoluție în jurul Soarelui este de 1,88 de ani.

Cercetările arată că Marte are un câmp magnetic propriu foarte slab.

Prin telescop pe suprafața planetei se pot vedea regiuni luminoase de culoare portocalie-roșiatică, numite *continente*, regiuni întunecate sub formă de pete numite *mări*, precum și pete albe care se formează la poli, numite *calote polare*. Acestea reprezintă un condensat de CO_2 cu mici cantități de gheață de H_2O . Ele se formează toamna și dispar la începutul verii. Unele regiuni reprezintă albiile de râuri secate, o dovadă că miliarde de ani în urmă planeta Marte a avut, probabil, o atmosferă mai densă și apă lichidă.

În condițiile existente azi, atmosfera planetei este extrem de rarefiată și de aceea prezența apei pe suprafața marțiană este imposibilă. Componentele predominante ale atmosferei sunt dioxidul de carbon și azotul. Presiunea atmosferică la suprafață este de 160 de ori mai joasă ca pe Pământ. Temperatura medie a suprafeței este de circa -70°C .

Marte are doi sateliți, Phobos și Deimos, descoperiți în 1877. Sateliții au forma neregulată și se aseamănă mai mult cu doi asteroizi. Phobos are mărimea de 22–25 km (*fig. 8.32*), iar Deimos – de circa 13 km.

Începând cu anul 1960, spre Marte au fost lansate zeci de aparate cosmice (*fig. 8.33*). Aceste misiuni au avut drept scop colectarea de date despre suprafața și condițiile fizice de pe Marte (*fig. VIII*, planșa color, p. 163). Rezultatele cercetării planetei ar putea să contribuie la elucidarea originii și a evoluției Pământului.

Planeta Jupiter

Jupiter este cea mai mare planetă din Sistemul Solar. Masa acestei planete gigantice este de 2 ori mai mare decât masa totală a tuturor celorlalte planete (*fig. IX*, planșa color, p. 163).

Jupiter are perioada mică de $9^h 55^m 40^s$ și deci viteză mare de rotație axială. Rotația rapidă face ca planeta să fie puternic turtită la poli.

Axa de rotație fiind aproape perpendiculară pe planul orbitei, pe Jupiter practic nu are loc succesiunea anotimpurilor.



Fig. 8.32. Satelitul Phobos al planetei Marte



Fig. 8.33. Aparat robotizat marțian de teren (NASA, 2003)

Jupiter este aproximativ de cinci ori mai departe de Soare decât Pământul, de aceea primește de 27 de ori mai puțină căldură decât planeta noastră. Temperatura pe suprafața aparentă a planetei este de $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Este de menționat că Jupiter are un câmp magnetic de 50 de ori mai intens decât cel al Pământului.

Jupiter este o planetă gazoasă. Densitatea medie a planetei este puțin mai mare decât densitatea apei. Din observații s-a stabilit că atmosfera planetei se compune predominant din hidrogen molecular și heliu.

În atmosferă s-au pus în evidență benzi roșiatice întunecate de nori, paralele cu ecuatorul, și pete de diferite dimensiuni, printre care este și renumita *pată roșie*, ale cărei dimensiuni depășesc diametrul Pământului. Ea pare a fi un vârtej enorm și stabil în atmosferă.

În jurul lui Jupiter orbitează 62 de sateliți cunoscuți (2004), dintre care patru cei mai mari, numiți și *sateliți galileeni* – Io, Europa, Ganymede și Callisto, au fost descoperiți în 1610 de Galileo Galilei (*fig. X*, planșa color, p. 163). Ceilalți sateliți sunt mult mai mici.

Planeta Saturn

Saturn este a doua planetă ca mărime în Sistemul Solar. Ea are masa de 95 de ori mai mare decât a Pământului. Densitatea medie a planetei este mai mică decât cea a apei. Datorită rotației axiale rapide, Saturn este turtit la poli chiar mai puternic decât Jupiter. Ca și pe Jupiter, diverse zone ale planetei au viteze de rotație diferite, din care cauză perioada de rotație crește de la ecuator spre poli (*fig. XI*, planșa color, p. 163).

Saturn este aproximativ de două ori mai departe de Soare decât Jupiter, de aceea temperatura la suprafața atmosferei este de circa $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Atmosfera este formată din hidrogen și metan, dar, spre deosebire de Jupiter, nu conține amoniac.

O particularitate caracteristică a planetei Saturn o constituie inelele sale, observate pentru prima dată de Galileo Galilei. S-a constatat că inelele se rotesc în planul ecuatorului și sunt despărțite prin intervale întunecate numite „diviziuni” (Cassini, Encke etc.). Inelele au lățimea de zeci de mii de kilometri, iar grosimea de la 2 până la ~ 20 km. Acestea sunt alcătuite dintr-un număr enorm de particule solide, praf și gaze.

Până în prezent, în jurul lui Saturn au fost descoperiți 62 de sateliți. Cel mai mare satelit este Titan, al doilea ca mărime în Sistemul Solar după satelitul Ganymede al lui Jupiter. El are diametrul mai mare decât cel al planetei Mercur.

Titan este unicul satelit în Sistemul Solar care are o atmosferă foarte densă, constituită preponderent din azot și hidrocarburi (metan, etan etc.). Date extrem de prețioase despre Titan a furnizat nava spațială „Cassini”, lansată în 1997 cu sonda „Huygens” (pron. hōihəns) la bord. În 2005, aparatul Huygens a atins suprafața lui Titan și a transmis primele imagini ale suprafeței (*fig. 8.34*), precum și date despre temperatură, presiune, compoziția atmosferei.

Planeta Uranus

Planeta Uranus a fost descoperită în 1781 de astronomul englez William Herschel. Ea este la limita vizibilității cu ochiul liber și poate fi observată



Fig. 8.34. Suprafața satelitului Titan (NASA/ESA, a. 2005)

numai prin telescop unde apare ca un mic disc verzui (fig. XII, planșa color, p. 163). Uranus are perioada de revoluție de 84 de ani. Masa planetei este de 14,6 ori mai mare decât masa Pământului. Ca și celelalte planete gazeoase, Uranus se deosebește prin rotația sa rapidă în jurul axei, cu perioada de 10^h49^m . Planul ecuatorului este înclinat cu 98° față de planul eclipticei, din care cauză Uranus are sensul retrograd de rotație și produce impresia că se rostogolește pe orbita sa.

Datele demonstrează că în compoziția atmosferei planetei predomină hidrogenul. Temperatura la suprafața vizibilă a norilor este de circa 55 K.

Planeta Uranus are un sistem de inele subțiri.

În jurul lui Uranus gravitează 27 de sateliți cunoscuți, ale căror orbite se situează în planul ecuatorului planetei și deci sunt practic perpendiculare pe planul orbitei sale. Cel mai mare satelit este Titania, cu diametrul aproximativ de două ori mai mic decât al Lunii.

Planeta Neptun

Planeta Neptun a fost descoperită pe cale teoretică de către Le Verrier și Adams și observată pe cer, în 1846, de astronomul german Galle. Ea poate fi văzută numai prin telescop. Masa ei este egală cu 17,2 mase terestre. Perioada de revoluție a planetei este de aproape 165 de ani. Perioada de rotație axială este de 16^h6^m . Neptun are structura internă și atmosfera foarte asemănătoare cu ale lui Uranus. Densitatea medie a lui Neptun este de $1,7 \text{ g/cm}^3$.

Atmosfera lui Neptun este alcătuită din hidrogen, heliu și metan. Metanul absoarbe intens razele de culoare roșie și galbenă, de aici și culoarea albastruie a planetei.

Pe planetă a fost identificată o pată neagră (fig. XIII, planșa color, p. 163), asemănătoare cu pata roșie de pe Jupiter, care peste un timp a dispărut. Se presupune că sub învelișul atmosferic ar putea să existe gheață și cel mai mare ocean din Sistemul Solar.

Câmpul magnetic este ceva mai intens ca al Pământului.

Neptun are 13 sateliți cunoscuți. Cel mai mare dintre ei, Triton, descoperit în 1846, depășește după mărime planeta pitică Pluto. Neptun, de asemenea, are un sistem de inele de gaz și praf.

În 2006 a fost adoptată o nouă clasificare a planetelor și introdusă categoria **planetelor pitice**. Din acestea fac parte: Pluto, Haumea, Makemake, Eris și asteroidul Ceres (vezi tab. 2, p. 157).

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

- În anul 1986, nava spațială „Voyager-2” a transmis imagini ale planetei Uranus, sateliților și inelelor ei. Câmpul magnetic al lui Uranus este ceva mai slab decât al Pământului.
- Aproape toate cunoștințele noastre despre planeta Neptun se bazează pe datele furnizate de sonda spațială „Voyager-2” în 1989.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Unde trebuie căutate pe cer planetele Mercur și Venus?
2. Cât timp și la ce înălțime maximă pot fi observate pe cer planetele Mercur și Venus la Chișinău?
3. Explicați succesiunea fazelor planetei Venus.
4. Care sunt consecințele efectului de seră pe planeta Venus?
5. Ce reprezintă renumita „pată roșie” de pe Jupiter?
6. Descrieți și explicați ce reprezintă inelele planetei Saturn.
7. Care este particularitatea mișcării de rotație a planetei Uranus?
8. Descrieți cum a fost descoperită planeta Neptun.

b. Corpurile mici ale Sistemului Solar

• **Asteroidii.** În decursul secolului XIX au fost descoperite numeroase corpuri cerești de dimensiuni mici, denumite *asteroizi* sau *planete minore*. În prezent se cunosc cca 18 000 de asteroizi catalogați, inclusiv peste 3 000 de asteroizi cu dimensiuni mai mari de 0,5 km.

Majoritatea asteroizilor sunt concentrați între orbitele planetelor Marte și Jupiter, formând **centura principală a asteroizilor** (fig. 8.35). Există și asteroizi

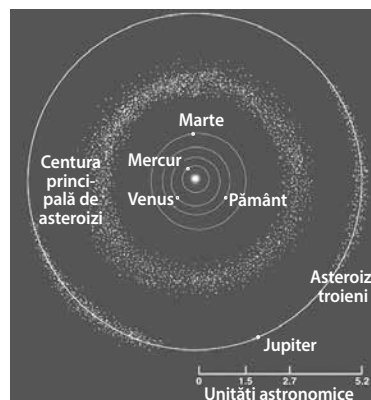


Fig. 8.35. Centura asteroizilor

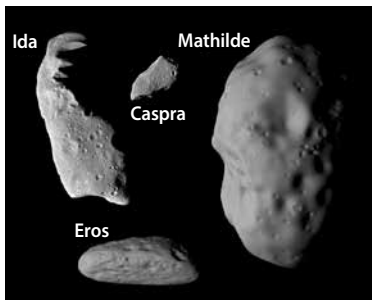


Fig. 8.36. Asteroizi

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Mișcarea cometelor a fost explicată pentru prima dată în anul 1705 de astronomul englez Edmond Halley care a descoperit, de asemenea, cometa ce îi poartă numele, cu perioada de 76 de ani (fig. 8.38). Ultima trecere a cometei Halley la periheliu a avut loc în 1986, când ea a fost cercetată cu ajutorul unor aparate cosmice automate. Data viitoare această cometă va putea fi observată în anul 2061.



Fig. 8.38. Cometa Halley, a. 1986

ale căror orbite se extind dincolo de centura asteroizilor. De exemplu, asteroidul Icarus la periheliu este mai aproape de Soare decât Mercur.

Asteroizii apar pe cer ca niște stele slabe ce se deplasează foarte lent pe bolta cerească, descriind bucle aparente, asemenea planetelor superioare. Masa totală a asteroizilor cunoscuți este $\approx 4 \cdot 10^{21}$ kg sau de aproximativ 20 de ori mai mică decât masa Lunii și împreună ar forma o planetă cu diametrul de numai circa 1 500 km.

Asteroizii au formă neregulată (cu excepția lui Ceres) și sunt lipsiți de atmosferă. Forma neregulată a asteroizilor ar putea însemna că ei reprezintă fragmente rezultate în urma unor coliziuni (fig. 8.36).

Asteroizilor li se atribuie nume proprii din mitologia greco-romană, dar și nume de personalități marcante, denumiri geografice etc. De exemplu, există asteroidul „Moldova” având magnitudinea aparentă de 16,5^m, asteroizii „Transilvania”, „Danubia”, „Eminescu”, „Donici” ș.a. Astronomul Alexandru Deutsch, activând la Observatorul Pulkovo din St.-Petersburg (Rusia), a descoperit asteroidul „Reni”.

• **Cometele.** Aceste corpuri mici ale Sistemului Solar reprezintă un amestec de gheață (apă și gaze înghețate), particule de rocă și praf care din anumite cauze nu au fost înglobate în planete atunci când s-a format Sistemul Solar.

Cometele devin vizibile doar atunci când se apropie de Soare. În această perioadă ele sunt active și prezintă o anumită structură cu următoarele părți distincte: nucleul, coma, coada (fig. 8.37).

Nucleul solid, relativ stabil, cu dimensiuni de la câteva sute de metri la câteva zeci de kilometri, este alcătuit preponderent din gheață de metan, amoniac, apă, cian, dioxid de carbon, azot, cu o mică cantitate de praf și fragmente de rocă.

Coma reprezintă un nor rarefiat în jurul nucleului, constituit din vapori de apă, dioxid de carbon și alte gaze neutre, sublimite din nucleu.

Coada de praf, de până la 10 milioane de kilometri lungime, este formată din particule de praf ejectate din nucleu.

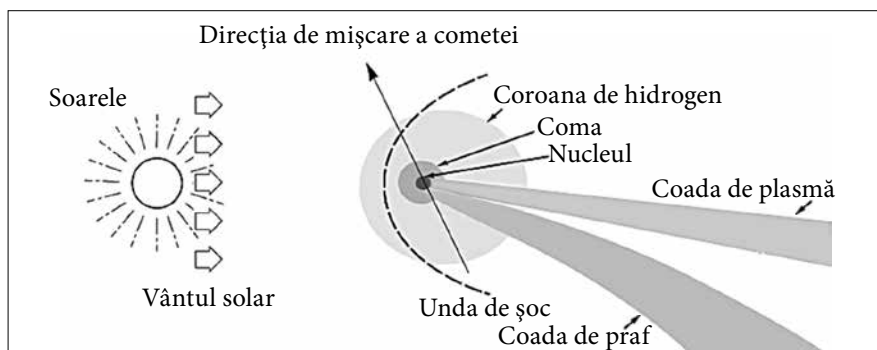


Fig. 8.37. Structura cometei

Coada de plasmă (de ioni), de câteva sute de milioane de kilometri lungime, este formată din plasmă sub formă de raze și jeturi generate de interacțiunea cu vântul solar.

Datorită presiunii luminii și vântului solar, coada cometei este orientată totdeauna în direcție opusă Soarelui. Coada poate avea diferite

forme în funcție de raportul dintre forțele de gravitație solară, orientate spre Soare, și forțele de presiune ale luminii și vântului solar, orientate în direcție opusă Soarelui.

Majoritatea cometelor se mișcă pe orbite eliptice extrem de întinse sau parabolice. Perioadele de revoluție ale acestor comete în jurul Soarelui se presupune că ar atinge milioane de ani. Mai puțin numeroase sunt cometele cu orbite eliptice și perioade mai mici de 200 de ani numite **scurtperiodice**.

Un grup numeros de comete scurtperiodice cu perioada de 3-10 ani, cunoscut sub denumirea de „familia lui Jupiter”, se depărtează de Soare în afeliu până la orbita lui Jupiter.

Având în vedere masa extrem de mică a cometelor în comparație cu masa Pământului, ele nu prezintă un pericol prea mare pentru planeta noastră. În anul 1910, Pământul a trecut prin coada cometei Halley. Cu toate acestea, la suprafața Pământului nu s-au înregistrat urme de gaze nocive – oxid de carbon și cian, prezente în coada cometei. Altă situație ar crea ciocnirea Pământului cu nucleul unei comete care ar provoca o explozie grandioasă și o undă de șoc distrugătoare ce ar produce mari dezastre. Se presupune că un eveniment similar, cunoscut ca „fenomenul Tunguska”, ar fi avut loc în 1908 în Siberia Centrală, când unda de șoc, generată de explozia unui corp neidentificat, a produs „culcarea” arborilor din taiga pe o rază de 30 km.

• **Obiectele transneptuniene.** Corpurile mici și îndepărtate care gravitează în jurul Soarelui dincolo de orbita planetei Neptun sunt numite **obiecte transneptuniene** (fig. 8.39). O parte din ele au fost descoperite abia recent. Primul corp transneptunian, planeta pitică Pluto, a fost identificat în 1930.

Începând din 1992, au fost descoperite aproape o mie de obiecte transneptuniene. Unele din acestea au nume proprii, cum ar fi Ixion, Varuna, Quaoar, Eris, Sedna ș.a.

Observarea obiectelor transneptuniene a devenit posibilă datorită utilizării telescoapelor spațiale, precum și a celor mai performante telescoape terestre.

• **Centura Kuiper.** În zona influenței gravitaționale a lui Neptun, cuprinsă între 30 și 50 UA de la Soare, se află așa-numita *Centură Kuiper*, formată din obiecte pe orbite aproape circulare situate aproape de planul Sistemului Solar. În prezent se cunosc circa 10 000 de obiecte, ce reprezintă corpuri înghe-

țate mai mari de 50 km aparținând Centurii Kuiper. Printre acestea sunt Varuna, având circa 500 km în diametru, descoperită în anul 2000, Quaoar de circa 1 250 km (a. 2002), Sedna – 1 700 km (a. 2003) ș.a.

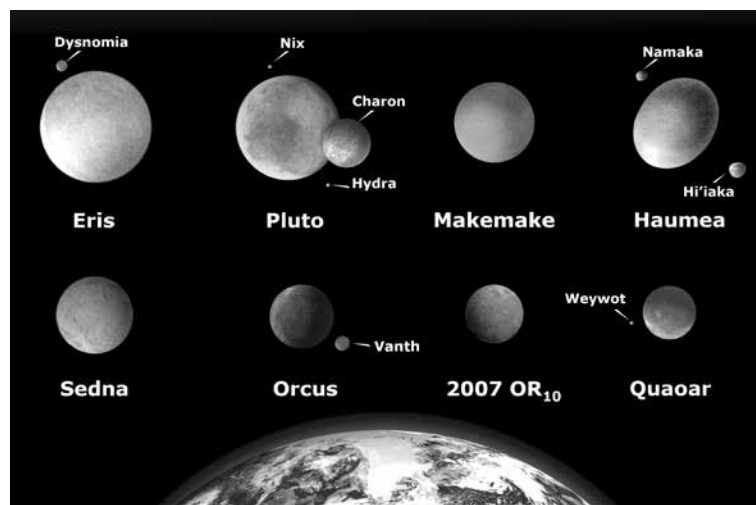


Fig. 8.39. Obiecte transneptuniene

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

• Ce consecințe ar avea impactul unei comete cu Pământul? O cometă a cărei orbită este foarte aproape de Soare ar putea ori să lovească o planetă, ori să fie aruncată în afara Sistemului Solar. Un asemenea fenomen s-a produs în 1994 când nucleul cometei Shoemaker-Levy-9 s-a dezintegrat în zeci de fragmente care apoi s-au ciocnit cu Jupiter.

• Una dintre problemele care îi frământă mult pe astronomi este originea cometelor. Potrivit ipotezei emise de astronomul olandez Oort în 1950, Sistemul Solar este înconjurat de un nor sferic uriaș de nuclee cometare, cunoscut ca „norul lui Oort”. Acesta conține miliarde de nuclee și se întinde până la distanțe de circa 100–150 mii UA* de la Soare.

* 1 UA (unitate astronomică) = 149,6 mil. km – distanța medie Pământ–Soare.

• Conform noilor definiții adoptate de Uniunea Astronomică Internațională în 2006, patru dintre obiectele transneptuniene – Pluto, Haumea, Makemake și Eris – sunt considerate planete pitice din categoria *plutoizilor*, deci ele nu fac parte din clasa corpurilor mici ale Sistemului Solar.

Verificați-vă cunoștințele

1. Pot fi observați asteroizii pe cer cu ochiul liber?
2. Cum se poate deosebi pe cer un asteroid de o stea?
3. Care este numărul aproximativ și masa totală a asteroizilor cunoscuți astăzi?

c. Pământul. Structura internă, hidrosfera, atmosfera și magnetosfera Pământului. Luna. Mareele

• **Pământul.** Încă în Antichitate babilonienii și indienii, observând cum dispar treptat corăbiile la orizont, își dădeau seama că Pământul este convex. Mai târziu, ideea sfericității Pământului a fost susținută și de grecii antici în școlile de filosofie ale lui Pitagora și Platon. Aristotel (384–322 î.Hr.) a fundamentat teoretic această idee folosind drept dovadă eclipsele de Lună, în timpul cărora pe discul lunar se vede marginea rotundă a umbrei Pământului.

Astăzi, imaginile fotografice, realizate cu ajutorul sateliților artificiali și al navelor cosmice, arată clar că Pământul are forma aproape sferică și privit din cosmos prezintă faze asemănătoare cu cele ale Lunii. Raza ecuatorială a Pământului determinată cu ajutorul sateliților artificiali este egală cu 6 378,14 km.

• **Structura internă.** Pământul are o structură internă stratificată. El este format din crustă (scoarță), manta și nucleu (*fig. XIV*, planșa color, p. 163).

Crusta terestră este stratul exterior solid al Pământului. Grosimea crustei variază de la 5 km în oceane la 30–50 km în partea continentală. Temperatura crustei crește rapid cu adâncimea, aproximativ cu 20 °C la kilometru. Astfel, la adâncimea de 10 km temperatura atinge 180 °C. Vârsta crustei terestre se estimează la aproximativ 4,5 miliarde de ani.

Mantaua constituie 67% din masa Pământului și circa 83% din volumul său. Ea reprezintă un înveliș în jurul nucleului, de la suprafața exterioară a nucleului până la partea inferioară a scoarței, cu grosimea de 2 890 km.

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Forma și dimensiunile Pământului au fost stabilite cu mare precizie, prin metoda *măsurărilor de grad* utilizată încă în secolul III î.Hr. de către matematicianul și astronomul antic grec Eratostene (cca 276–194 î.Hr.).

Eratostene știa că la Siena (acum localitatea Asuan, Egipt), situată mai la sud de Alexandria pe același meridian, la amiază Soarele este în zenit și luminează fundul celor mai adânci fântâni. În aceeași zi, la Alexandria distanța zenitală a Soarelui este egală aproximativ cu 7,2°. Știind distanța dintre Alexandria și Siena egală cu 5 000 de stadii egiptene, el a determinat raza Pământului. Lungimea stadii egiptene nu se cunoaște astăzi cu precizie, de aceea nu poate fi apreciată exact valoarea razei obținute de Eratostene.

Mantaua superioară și crusta terestră formează învelișul superior solid al Pământului, numit **litosferă**. Grosimea medie a litosferei este de cca 100 km. Litosfera e fragmentată în platforme solide, numite plăci tectonice, care se deplasează independent una față de alta. În regiunea faliilor dintre plăci se pot produce cutremure de pământ și se intensifică activitatea vulcanică.

Se presupune că sursele de căldură din interiorul Pământului sunt concentrate în nucleu și determinate de dezintegrarea radioactivă a elementelor.

Nucleul este constituit dintr-un aliaj de fier și nichel cu impurități de alte elemente. Analiza propagării undelor seismice arată că Pământul are un nucleu interior solid, înconjurat de nucleul exterior fluid. *Nucleul interior* are raza de 1 225 km și densitatea de 12,5 g/cm³. *Nucleul exterior* are grosimea de circa 2 245 km și densitatea de 1 000 kg/m³. Materia din acest strat vâscos este un bun conductor electric.

• **Hidrosfera.** Oceanele acoperă 71% din suprafața Pământului și formează hidrosfera terestră. Pământul este unica planetă din Sistemul Solar care are hidrosferă. Ea influențează considerabil clima de pe Pământ.

• **Atmosfera.** Pământul are o atmosferă stratificată pe verticală (*fig. 8.40*). Gazele componente ale atmosferei sunt azotul, N₂ (78%), oxigenul, O₂ (21%) și alte gaze în cantități foarte mici (dioxid de carbon, gaze inerte, hidrogen, ozon ș.a.), precum și vaporii de apă.

Atmosfera terestră are un rol extrem de important pentru existența vieții pe Pământ, deoarece ne protejează de radiațiile cosmice distrugătoare, de vântul solar format din protoni de înaltă energie, precum și de micrometeorii. Studiul atmosferei terestre ne permite să înțelegem mai bine proprietățile atmosferelor de pe alte planete.

• **Câmpul magnetic și magnetosfera Pământului.** Conform concepțiilor actuale, câmpul magnetic terestru este generat de nucleul lichid și cel solid al Pământului în urma unor procese fizice complexe. Pământul, rotindu-se în jurul axei sale, antrenează în această mișcare și nucleul. Ca urmare, în nucleu ia naștere un curent electric circular care generează câmpul magnetic.

Câmpul magnetic al Pământului reprezintă un dipol, a cărui axă formează un unghi de 11° cu axa

de rotație și nu trece prin centrul geometric de rotație al Pământului.

Câmpul geomagnetic protejează Pământul împotriva razelor cosmice – particule încărcate electric de înaltă energie (protoni și nuclee de elemente grele) – care vin din spațiul cosmic îndepărtat, precum și împotriva vântului solar – particule încărcate, expulzate de Soare în timpul erupțiilor cromosferice.

Spațiul ocupat de câmpul magnetic terestru este numit **magnetosferă** (fig. 8.41). Aceasta este puternic deformată în partea dinspre Soare din cauza vântului solar care o comprimă, reducând dimensiunile ei la circa 70 000 km. În partea opusă, adică nocturnă, magnetosfera este foarte alungită extinzându-se până la orbita Lunii. Frontiera dintre magnetosferă și spațiul cosmic este numită **magnetopauză**.

În urma cercetării spațiului cosmic circumterestru cu ajutorul aparatelor cosmice s-a constatat că în magnetosferă există regiuni sub formă de inele ce înconjoară Pământul și în care sunt concentrate fluxuri enorme de protoni și electroni captați din vântul solar. Aceste regiuni au denumirea **centuri de radiație** ale Pământului (fig. 8.41).

Fluxul de particule din vântul solar care se mișcă cu viteze de 400–1 000 km/s, ajungând la Pământ, perturbază câmpul geomagnetic, provocând așa-numitele *furtuni magnetice*. Acestea dau naștere aurorelor polare și pot dereglă comunicațiile radio în regiunile polare.

• **Luna.** Unicul satelit natural al Pământului, Luna, este și cel mai strălucitor corp ceresc după Soare (fig. 8.42). Masa Lunii este de 81,3 ori mai mică decât cea a Pământului. Perioada de rotație a Lunii în jurul axei este de 27,3 zile fiind egală cu perioada de revoluție a ei în jurul Pământului. Drept consecință, Luna este orientată mereu cu aceeași parte spre Pământ.

Luna nu are atmosferă. Lipsa atmosferei face ca temperatura pe Lună să varieze considerabil de la +130 °C ziua la –173 °C noaptea.

Pământul văzut de astronauți pe cerul Lunii este un disc cu diametrul unghiular aparent de 3,5 ori mai mare decât cel al Soarelui și prezintă faze la fel ca și Luna privită de pe Pământ (fig. 8.43).

Privind Luna cu ochiul liber, putem observa pe suprafața ei regiuni mai întunecate denumite „mări” ce reprezintă depresiuni enorme cu adâncimea de

până la 3 km, acoperite cu lavă vulcanică de culoare întunecată, și regiuni mai luminoase numite „continente”.

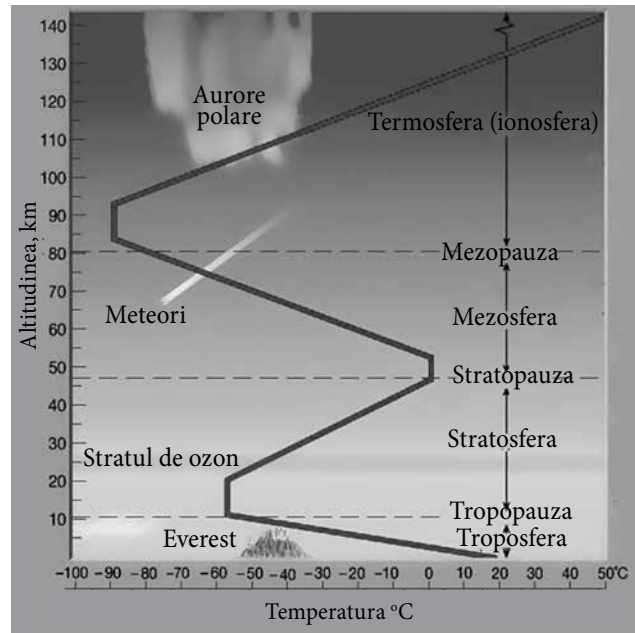


Fig. 8.40. Structura atmosferei Pământului și variația temperaturii ei în funcție de înălțime

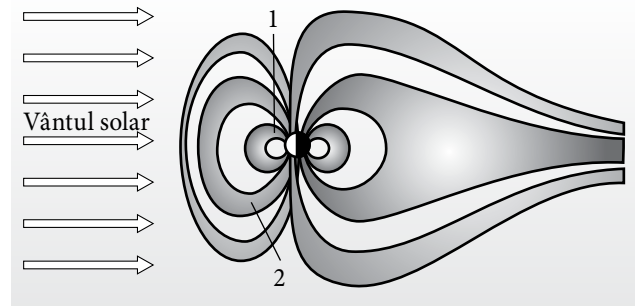


Fig. 8.41. Magnetosfera și centurile de radiație ale Pământului: 1 – centura interioară; 2 – centura exterioară

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

În prezent, polaritatea câmpului magnetic terestru este opusă polarității geografice. Polul nord magnetic este situat la sud, aproape de Antarctica, iar polul sud – la nord, în Canada. Deci acul busolei nu indică direcția spre nordul geografic, ci spre polul sud magnetic. Polii geomagnetici își schimbă lent poziția, deplasându-se pe suprafața Pământului cu aproximativ 55 km pe an. Există dovezi arheologice că în trecutul îndepărtat câmpul geomagnetic și-a schimbat polaritatea și că acest fenomen ar avea un caracter periodic.



Fig. 8.42. Luna



Fig. 8.43. Pământul pe cerul Lunii
(Foto „Apollo-11”)

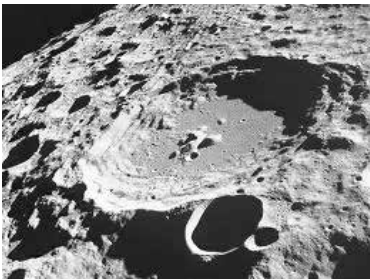


Fig. 8.44. Cratere pe Lună



Fig. 8.45. Astronaut pe Lună.
Misiunea „Apollo-11”

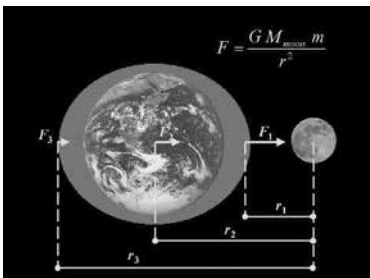


Fig. 8.46. Mareele

Pe Lună se află și lanțuri de munți cu înălțimea de până la 6 km. Suprafața Lunii este acoperită cu un strat de *regolit*, un amestec de praf fin și granule de rocă.

Luna suportă bombardările fără încetare ale corpurilor meteorice, în urma cărora s-au format *cratere* de impact de diverse dimensiuni și forme. Unele cratere sunt de origine vulcanică (fig. 8.44).

Pe acest astru nu a fost găsită apă, însă datele furnizate de sondele selenare (lunare) arată totuși că gheața este prezentă pe fundul unor cratere adânci din regiunile polare unde nu ajung razele solare.

Prima hartă a emisferei vizibile a Lunii cu denumirile mărilor și munților lunari a fost întocmită în secolul XVII de către astronomul polonez Jan Hevelius (1611–1687). Harta exactă a întregii suprafețe selenare a putut fi întocmită abia după ce partea invizibilă a Lunii a fost fotografiată pentru prima dată în 1959 de către stația interplanetară sovietică „Luna-3”.

Structura internă a Lunii a fost pusă în evidență prin intermediul undelor seismice. *Scoarța* Lunii are grosimea de circa 60 km pe partea vizibilă și 100 km în emisfera invizibilă de pe Pământ. Sub scoarța se află *mantaua* cu grosimea de până la 1 000 km. Luna are un *nucleu* mic solid cu raza de câteva sute de kilometri. Luna nu are un câmp magnetic global, deși o parte din rocile de la suprafață prezintă urme de magnetism.

Luna a fost și este studiată intens cu ajutorul stațiilor automate și al navelor spațiale. La 20 iulie 1969 pe suprafața selenară au pășit primii oameni, astronauții americani Neil Armstrong și Edwin Aldrin în cadrul misiunii „Apollo-11” (fig. 8.45).

• **Mareele.** Forțele gravitaționale exercitate de Lună și Soare acționează nu numai asupra centrului Pământului, dar și a celorlalte învelișuri componente ale lui, inclusiv asupra oceanelor și atmosferei. De exemplu, aceeași masă de substanță, aflată în centrul Pământului, este atrasă de Lună mai slab decât pe suprafața terestră îndreptată spre Lună.

Pământul nu este un corp absolut solid, iar acțiunea diferită a forțelor gravitaționale asupra diverselor puncte ale Pământului provoacă fenomenul **mareelor**. Ca rezultat, Pământul și îndeosebi învelișul său de apă se alungește puțin pe direcția Pământ–Lună, formând două proeminențe: una pe partea îndreptată spre Lună și alta pe partea opusă (fig. 8.46). În punctele situate pe linia Pământ–Lună nivelul apei crește atingând cote maxime. Astfel se produce fenomenul numit **flux**. În punctele situate la 90° față de direcția Pământ–Lună, nivelul apei scade până la cote minime, producându-se fenomenul denumit **reflux**. Datorită rotației diurne a Pământului, zonele de flux și reflux cuprind, pe rând, diverse regiuni ale suprafeței terestre. Astfel, în decurs de 24^h50^m au loc două fluxuri și două refluxuri.

Fenomenele mareice se manifestă și în scoarța terestră care se înalță și coboară de două ori pe zi cu câțiva decimetri. Acestea au loc și în atmosfera terestră, ele provocând variația presiunii atmosferice.

Atracția Soarelui generează, de asemenea, maree în învelișul de apă al Pământului, însă ele sunt de 2,2 ori mai mici decât cele provocate de Lună din cauza distanței foarte mari de la Soare.

Mareele generează așa-numita **frecare mareică** care frânează rotația Pământului și duce la creșterea duratei zilei.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Explicați mecanismul de generare a câmpului magnetic al Pământului.
2. Ce reprezintă aurorele polare și ce factori determină intensitatea lor?
3. Cum ar fi anotimpurile pe Terra dacă axa de rotație a Pământului ar fi perpendiculară pe planul eclipticei?
4. Pe Pământ e văzută mereu aceeași emisferă a Lunii. Cum se explică acest fapt?
5. Descrieți și explicați fenomenul luminii cenușii de pe Lună.
6. De ce pe suprafața Lunii temperatura la umbră e mai joasă cu zeci de grade față de locurile iluminate de Soare?

d. Noțiuni de cosmogonie. Originea și evoluția Sistemului Solar

Problema originii și evoluției corpurilor cerești constituie obiectul de studiu al unui capitol special al astronomiei numit *cosmogonie*.

Originea și evoluția Sistemului Solar este o problemă extrem de complicată. Ea poate fi abordată pe cale pur teoretică prin aplicarea legilor generale ale fizicii. Acest fapt este necesar pentru a pune în evidență condițiile ce trebuiau să fi existat în trecut, pentru ca Soarele și planetele să treacă prin anumite faze de evoluție și să obțină caracteristicile pe care le au în prezent.

Potrivit ipotezelor cosmogonice moderne, Soarele împreună cu planetele s-au format din una și aceeași nebuloasă primară de gaz și praf în stare de rotație. Deși nu există încă o teorie definitivă, în prezent se conturează totuși următoarele etape principale în evoluția timpurie a Sistemului Solar (fig. 8.47):

a) Inițial a existat un nor uriaș de materie interstelară constituit din molecule de gaz (H_2 , H_2O , OH ș.a.) și praf în stare de rotație;

b) În unele regiuni ale norului apar neomogenități care, depășind o anumită valoare critică a masei, încep să se contracte sub acțiunea forțelor de gravitație. În consecință, norul se descompune în fragmente, unul dintre care ulterior dă naștere Soarelui și Sistemului Solar;

c) Peste aproximativ 10 mii-100 mii de ani de la începutul contracției, masa nucleului fragmentului atinge circa 0,1 din masa Soarelui actual și materia devine netransparentă. Într-un timp foarte scurt, de 10-100 de ani, nucleul central se contractă și mai mult formând o protostea – *protosoarele*. Ca urmare a instabilității de rotație, în jurul protosoarelui se formează discul unei *nebuloase protoplanetare* de gaz și praf. Peste aproximativ 100 mii de ani protosoarele atinge masa Soarelui actual, însă raza e cam de 100 de ori mai mare. La această etapă începe stadiul de contracție gravitațională a protosoarelui.

Nebuloasa protoplanetară capătă o structură inelară și în regiunile ei periferice se declanșează procesul de formare a planetelor gigante. Discul de gaz și praf din jurul acestor planete mai târziu a dat naștere sistemelor de sateliți;

d) Etapa următoare are durată de circa 100 milioane de ani, în care continuă contracția gravitațională a protosoarelui. Dimensiunile lui se micșorează până aproape de cele actuale. Componenta de praf a nebuloasei protoplanetare se concentrează preponderent spre centrul discului protoplanetar. Particulele de praf, ciocnindu-se între ele, formează particule mai mari care, la rândul lor, prin agregare dau naștere unor corpuri solide. Masa corpurilor mai mari crește pe seama celor mai mici. Astfel apar corpuri masive asemănătoare cu asteroizii, numite **planetezimale**. Numărul lor fiind foarte mare, ele suferă ciocniri, în urma

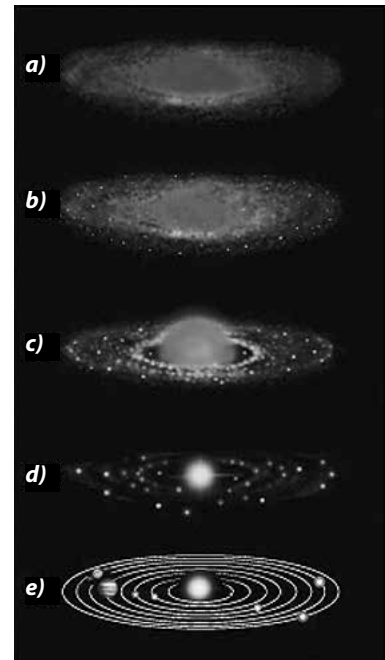


Fig. 8.47. Formarea Sistemului Solar

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

În secolul XVII (a. 1644), Descartes, pentru prima dată a emis ipoteza că Sistemul Solar s-a format dintr-un nor de gaz și praf. Această ipoteză a fost dezvoltată de Kant (a. 1755), care a presupus că în centrul norului s-a format Soarele, iar la periferie – planetele.

În anul 1796, Laplace a exprimat ipoteza că în procesul de formare a planetelor un rol important îl are mișcarea de rotație a nebuloasei primare în stare de contracție gravitațională și forța centrifugă de inerție. Nebuloasa ia forma de disc, iar materia de la ecuatorul discului se desprinde de nebuloasă, formând în jurul ei inele asemănătoare cu cele ale planetei Saturn. Condensarea ulterioară a gazului din aceste inele duce la formarea planetelor (fig. 8.47).

Cu toate că ipotezele lui Kant și Laplace par a fi verosimile, ele însă nu pot explica faptul că 98% din momentul impulsului total al Sistemului Solar revine planetelor, iar Soarelui – doar 2%.

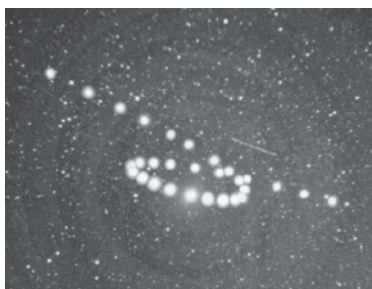


Fig. 8.48. Mișcarea retrogradă a planetei Marte

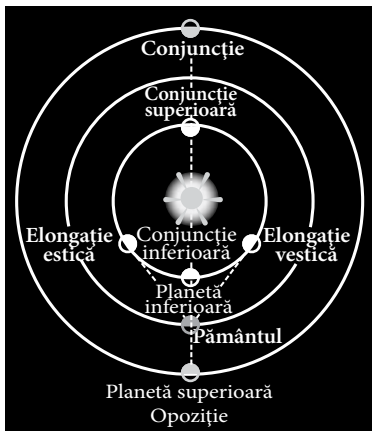


Fig. 8.49. Pozițiile relative și fazele planetelor

cărora unele se contopesc, altele se distrug dând naștere corpurilor meteorice. Câteva corpuri deosebit de mari devin nuclee ale viitoarelor planete de tip terestru;

e) Pământul, a cărui vârstă se estimează la 4,5 miliarde de ani, a atins dimensiunile sale actuale, probabil, în decursul unei perioade cuprinse între 100 mii și 100 milioane de ani.

8.4. ELEMENTE DE MECANICĂ CEREASCĂ

a. Mișcarea aparentă a planetelor. Concepția heliocentrică a Universului

• **Mișcarea aparentă a planetelor** pe sfera cerească se deosebește de mișcarea aparentă a stelelor și a Soarelui. Planetele ale căror orbite se află în interiorul orbitei terestre sunt numite **planete inferioare** (Mercur și Venus), iar planetele ale căror orbite se află în exteriorul orbitei terestre – **planete superioare** (celelalte planete).

Mercur și Venus se mișcă pe cer în apropiere de Soare, fie la est de Soare când sunt observate seara după apusul lui, fie la vest de el când pot fi văzute dimineața înainte de răsăritul Soarelui. Unghiul dintre direcțiile Pământ–Soare și Pământ–planetă inferioară este numit **unghi de elongație** sau **elongație**. Elongația poate atinge valoarea maximă de 18–28° pentru Mercur și 45–48° pentru Venus. În popor, planeta Venus, cel mai strălucitor corp ceresc după Soare și Lună, este cunoscută ca *Luceafărul-de-diminează* sau *-de-seară*.

Mișcarea aparentă a unei planete de la vest la est poartă numele de **mișcare directă**, iar cea de la est spre vest – **mișcare retrogradă**. Planetele un timp sunt în mișcare directă, apoi se opresc (staționează), după care își reiau deplasarea în sens opus – mișcare retrogradă, descriind pe cer niște bucle (fig. 8.48).

În mișcarea lor de revoluție în jurul Soarelui, planetele ocupă diverse poziții relative față de Pământ și Soare (fig. 8.49). În cazul când planetele inferioare sunt între Pământ și Soare, se spune că ele se află în **conjunție inferioară** cu Soarele. În această poziție planetele se află la cea mai mică distanță de Pământ. În cazul în care planeta inferioară, Soarele și Pământul se situează pe aceeași linie, are loc **tranzitul** planetei pe discul Soarelui, ea fiind observată ca un cerculeț întunecat pe discul solar. Când planeta inferioară este dincolo de Soare, în **conjunție superioară**, ea se află la distanța maximă de Pământ și este invizibilă.

Observate de pe Pământ, planetele inferioare prezintă **faze** ca și Luna, în funcție de poziția lor față de Soare.

Planetele superioare, de asemenea, se pot afla în diferite poziții relative față de Pământ și Soare (fig. 8.49). Dacă, de exemplu, Pământul este între planeta superioară și Soare, atunci planeta se află în **opoziție** cu Soarele. Opozițiile oferă cele mai favorabile condiții pentru observații. În aceste perioade planetele superioare se apropie cel mai mult de Pământ. Ele trec prin culminația superioară aproximativ la miezul nopții, fiind

vizibile pe parcursul întregii nopți. Când planeta se află dincolo de Soare în raport cu Pământul, ea este în *conjuncție* cu Soarele și nu poate fi observată.

• **Concepția heliocentrică a Universului.** Marele astronom al Antichității Aristarh din Samos (320–~250 î.Hr.), pentru prima dată, a enunțat ideea că în centrul lumii se află Soarele, iar planetele se rotesc în jurul lui. Contemporanii săi însă nu au acceptat această ipoteză, preferând concepțiile geocentrice ale lui Aristotel.

Concepțiile astronomilor antici despre Univers au fost sintetizate, în anul ~150 d.Hr., de către astronomul grec Claudiu Ptolemeu (~87–165 d.Hr.) din Alexandria (Egipt) în tratatul său de matematică și astronomie „Megale Syntaxis” (tradus în limba arabă ca *Almagest*).

Pe măsură ce precizia măsurărilor astronomice creștea, se constatau neconcordanțe dintre teoria lui Ptolemeu și observații. Marele astronom polonez Nicolaus Copernic (1473–1543) a pus la îndoială consistența principiilor fundamentale ale sistemului geocentric ptolemaic. În lucrarea sa „De revolutionibus Orbium Coelestium”, publicată în 1543, Copernic a elaborat *sistemul heliocentric* al Universului. La baza acestui sistem au fost puse următoarele principii: 1) în centrul Universului se află Soarele; 2) Pământul sferic se rotește în jurul axei proprii; 3) Pământul, ca și celelalte planete, se mișcă în jurul Soarelui pe orbită circulară. Luna se mișcă în jurul Pământului; 4) toate mișcărilor reprezintă combinații de mișcări circulare uniforme; 5) mișcările aparente directe și retrograde ale planetelor rezultă din mișcarea Pământului.

Copernic pentru prima oară a argumentat structura corectă a Sistemului Solar, calculând distanțele relative ale planetelor de la Soare și perioadele lor de revoluție. El a explicat corect mișcările aparente complicate, directe și retrograde, ale planetelor ca o combinație a două mișcări reale în jurul Soarelui a planetei și a Pământului.

Renunțând la teza dogmatică despre imobilitatea Pământului, care secole de-a rândul stăpânea spiritele umane, Copernic a produs o revoluție nu numai în astronomie, dar și în concepția științifică despre lume.

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

• **Concepția geocentrică.** La baza sistemului ptolemaic al Universului, cunoscut ca *sistemul geocentric* al lumii, stau patru principii: 1) Pământul este sferic și se află în centrul Universului; 2) Pământul este nemișcat; 3) toate corpurile cerești, inclusiv Soarele și Luna, se mișcă în jurul Pământului; 4) planetele se mișcă uniform pe epicleuri, ale căror centre orbitează pe deferente în jurul Pământului (fig. 8.50).

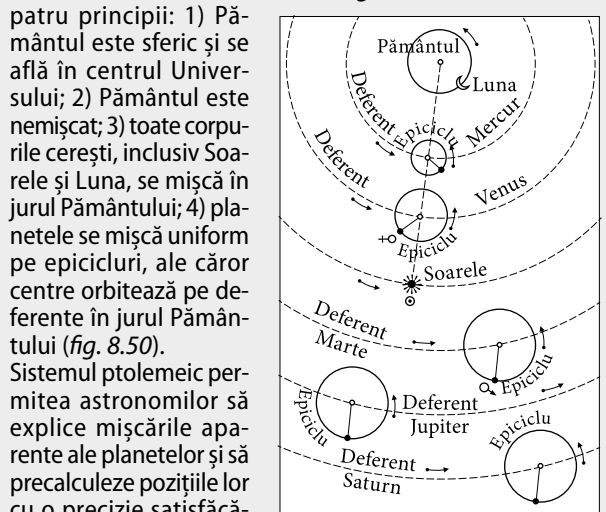


Fig. 8.50. Sistemul geocentric al lui Ptolemeu

• **Heliocentrismul** submina dominația religiei, care susținea dogma privind imobilitatea și poziția deosebită a Pământului în centrul Universului. De aceea la începutul sec. al XVII-lea inchiziția a declanșat o luptă necruțătoare împotriva teoriei lui Copernic și a susținătorilor ei. Astfel, în anul 1600 la Roma a fost ars pe rug Giordano Bruno (1548–1600), un susținător înflăcărat al ideilor lui Nicolaus Copernic, care promova ideea existenței mai multor civilizații în Univers. Un alt adept al concepțiilor lui Copernic a fost marele fizician și astronom italian Galileo Galilei (1564–1642), primul om care în 1609 a îndreptat telescopul spre cer și prin descoperirile sale a confirmat teoria lui Copernic. Galileo a descoperit fazele planetei Venus, munți pe Lună și a calculat înălțimea acestora, a descoperit patru sateliți ai planetei Jupiter care acum îi poartă numele. Observând pete pe Soare și deplasarea acestora, Galileo a tras concluzia că Soarele se rotește în jurul axei sale. Privind prin telescop Calea-Lactee, Galileo a stabilit că ea este constituită dintr-o mulțime de stele.

➤ Verificați-vă cunoștințele

1. O planetă e văzută pe cer la distanța de 110° de la Soare. Este această planetă superioară ori inferioară?
2. Poate fi văzut Luceafărul (planeta Venus) seara în partea de est a cerului? Argumentați.
3. La 1 mai Jupiter s-a aflat în opoziție cu Soarele. În ce constelație putea fi observată planeta?
4. Ar putea avea Pământul, observat de pe Marte, o mișcare retrogradă, apoi una directă?

b. Perioada siderală și perioada sinodică de revoluție a planetelor.

Legile lui Kepler

• **Perioada siderală și perioada sinodică.** Perioada de revoluție a unei planete în jurul Soarelui față de stele este numită **perioadă siderală**, T . Perioada siderală a Pământului este numită **an sideral** ($T_{\oplus} = 1$ an).

Intervalul de timp dintre două poziții relative identice ale unei planete în mișcarea ei aparentă se numește **perioadă sinodică**, S , a planetei.

Între aceste trei perioade există o relație simplă, numită **ecuația mișcării sinodice** care poate fi ușor dedusă. Pentru planetele inferioare ecuația mișcării sinodice are forma: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}}$, iar pentru cele superioare: $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T}$.

Direct din observări poate fi determinată numai perioada sinodică a planetelor, S , și anul sideral, T_{\oplus} . Perioada siderală a planetelor T se calculează folosind ecuația mișcării sinodice respective.

• **Legile lui Kepler.** În sistemul heliocentric al lui Copernic orbitele planetelor reprezintă aceleași cercuri considerate „curbe ideale”, ca și în sistemul geocentric al lui Ptolemeu.

Studiind mișcarea planetei Marte în jurul Soarelui, astronomul german Johannes Kepler (1571–1630) a constatat existența unei neconcordanțe între pozițiile calculate și cele observate ale acestei planete. După mai mulți ani de muncă asiduă și calcule anevoioase, Kepler a ajuns la concluzia că orbitele planetelor nu sunt circulare, iar mișcarea lor nu este uniformă și astfel a enunțat cele trei legi fundamentale ale mișcării planetelor care îi poartă numele.

Legea I: Fiecare planetă se mișcă pe o orbită eliptică, având Soarele în unul dintre focare (legea elipselor) (fig. 8.51).

Forma elipsei este caracterizată de o mărime numită **excentricitate**, $e = \frac{c}{a}$, unde c este distanța de la centrul elipsei până la focarul său; a – semiaxa mare a elipsei. Excentricitatea arată cât de mult elipsa diferă de circumferință. În cazul când $c = 0$, avem $e = 0$ și elipsa se transformă într-un cerc cu raza a . Excentricitatea orbitei Pământului $e = 0,017$.

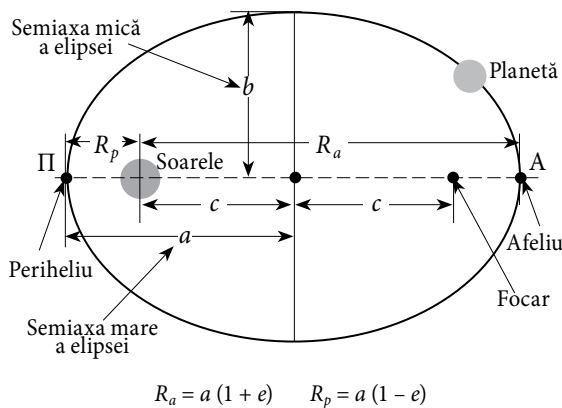


Fig. 8.51. Legea I a lui Kepler

Punctul cel mai apropiat de Soare al orbitei planetei se numește **periheliu**, iar punctul cel mai îndepărtat de Soare se numește **afeliu** (fig. 8.51). Punctul cel mai apropiat de Pământ al orbitei Lunii sau al unui satelit artificial este numit **perigeu**, iar punctul cel mai îndepărtat – **apogeu**.

Se poate demonstra că semiaxa mare a orbitei planetei, a , este egală cu distanța medie a planetei de la Soare. Semiaxa mare a orbitei Pământului, adică distanța medie de la Pământ la Soare este luată drept unitate de distanță în astronomie, numită **unitate astronomică** (UA):

$$a_{\oplus} = 1 \text{ UA} = 149,6 \text{ mil. km.}$$

Legea a II-a: Raza vectoroare a planetei descrie arii egale în intervale de timp egale (legea ariilor egale).

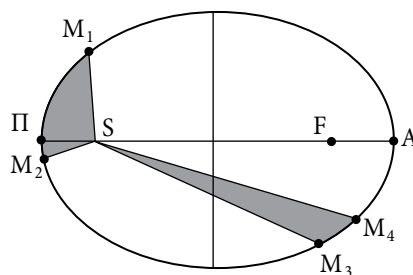


Fig. 8.52. Legea a II-a a lui Kepler

Raza vectoroare este segmentul de dreaptă care pornește din centrul Soarelui (focarul orbitei) către centrul planetei. Conform legii a II-a, ariile M_1M_2 și M_3M_4 sunt egale (fig. 8.52). Arcele M_1M_2 și M_3M_4 , parcurse de planetă în intervale de timp egale, au lungimi diferite, $M_1M_2 > M_3M_4$. Deci mișcarea planetei în jurul Soarelui nu este uniformă. Cu cât planeta este mai aproape de Soare, cu atât viteza ei este

mai mare. De exemplu, atunci când Pământul se află la periheliu, adică la distanța minimă de Soare (în jurul datei de 3 ianuarie), viteza lui orbitală este maximă, 30,29 km/s, viteza medie fiind de 29,7 km/s.

Legea a III-a: Pătratul perioadei siderale de revoluție a planetei este proporțional cu cubul semiaxei mari a orbitei (legea armoniilor).

Legea a III-a a lui Kepler stabilește legătura dintre perioadele siderale și distanțele medii ale planetelor de la Soare.

Dacă notăm cu a_1 și a_2 semiaxele mari ale orbitelor a două planete, iar cu T_1 și T_2 perioadele lor siderale de revoluție, atunci legea a III-a se scrie sub forma:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Legea a III-a a lui Kepler, la fel ca și celelalte două legi, se aplică nu numai la mișcarea planetelor, ci și la mișcarea sateliților lor naturali și artificiali. Folosind legea a III-a, semiaxele mari ale orbitelor tutu-

ror planetelor pot fi exprimate în unități astronomice. Dacă vom exprima perioadele de revoluție în ani, atunci pentru Pământ $a_{\oplus} = 1$ UA și $T_{\oplus} = 1$ an. În acest caz perioada de revoluție în jurul Soarelui a oricărei planete exprimată în ani este:

$$T = \sqrt{a^3}.$$

Legile lui Kepler au fost descoperite în baza datelor observaționale și deci sunt legi empirice. Pe baza legii gravitației universale, Newton a precizat și a generalizat legile lui Kepler. Legea a III-a generalizată, aplicată la două sisteme formate din corp ceresc central și satelit, se scrie sub forma:

$$\frac{T_1^2 \cdot (M_1 + m_1)}{T_2^2 \cdot (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Aici M_1 și M_2 reprezintă masele corpurilor centrale, iar m_1 , T_1 , a_1 și m_2 , T_2 , a_2 sunt masa, perioada siderală și semiaxa mare a orbitei sateliților respectivi.

Legea a III-a generalizată are o importanță deosebită în astronomie, deoarece permite determinarea maselor corpurilor cerești.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Folosind ecuația mișcării sinodice, determinați perioada de revoluție a planetei Venus. Se știe că perioada sinodică a acestei planete este de 584 de zile.
2. Asteroidul Vesta are perioada de revoluție în jurul Soarelui de 3,63 de ani. De câte ori Vesta este mai departe de Soare decât Pământul?

8.5. SOARELE

a. Structura internă și atmosfera Soarelui

Caracteristici generale. În centrul Sistemului nostru planetar este situat Soarele, o stea obișnuită cu diametrul de 109 ori și masa de 333 000 de ori mai mare decât ale Pământului. Soarele se află la circa 150 mil. km de Pământ și este unica stea al cărei disc e vizibil de pe Pământ. Celelalte stele, aflându-se la distanțe enorme, apar ca puncte luminoase chiar și în cele mai mari telescoape. Soarele reprezintă o sferă de plasmă având densitatea medie de $1\,410\text{ kg/m}^3$. Temperatura la suprafața aparentă vizibilă a Soarelui este de circa 6 000 K.

În compoziția Soarelui se regăsesc practic toate elementele chimice din sistemul periodic, însă predomină hidrogenul (circa 70%), după care urmează heliul (circa 29%). Celorlalte elemente le revine circa 1%.

Soarele se rotește în jurul axei sale în același sens ca și Pământul. Deoarece Soarele nu este un corp solid, regiunile ecuatoriale ale lui au viteze de rotație mai mari decât cele polare. Perioada siderală de rotație a regiunilor ecuatoriale este de circa 25 de zile, iar în apropiere de poli atinge 30 de zile.

Conform modelelor actuale de evoluție a stelelor, Soarele are vârsta de 4,6 miliarde de ani și este la mijlocul duratei sale de viață.

• **Structura internă și atmosfera Soarelui.** Astrofizica modernă demonstrează că sursa principală de energie care poate să întrețină radiația observată a Soarelui o constituie reacțiile termonucleare de fuziune a nucleelor de hidrogen – de transformare a hidrogenului în heliu. Ele au loc în **nucleul** Soarelui având raza egală cu 0,3 din raza solară. Aici presiunea atinge $2 \cdot 10^{12}$ Pa, iar temperatura – circa $1,55 \cdot 10^7$ K. La asemenea temperaturi și presiuni materia este total ionizată. Reacțiile termonucleare din nucleul Soarelui sunt însoțite de degajarea unor cantități uriașe de energie.

Pentru a ajunge la suprafață, energia, degajată în urma reacțiilor de fuziune termonucleară din nucleul Soarelui, are de străbătut straturi enorme de plasmă incandescentă. În zona cuprinsă între 0,3 și 0,7 raze solare, numită **zonă radiativă**, energia se transmite de la strat la strat prin procese de absorbție și radiație.

În regiunile situate la aproximativ 0,3 raze solare de la suprafața Soarelui, energia este transmisă spre suprafață prin procese de *convecție*, adică prin deplasarea straturilor de substanță solară. Aceasta este **zona convectivă** care se extinde până la suprafața vizibilă a Soarelui. Granulația observată la suprafața Soarelui este o dovadă a proceselor de convecție.

Radiația solară aproape în întregime este emisă de învelișurile exterioare ale Soarelui care formează **atmosfera solară**: fotosfera, cromosfera și coroana solară (fig. XV, planșa color, p. 163).

Fotosfera constituie învelișul gazos netransparent al atmosferei solare ce radiază practic toată energia solară cu spectru continuu care ajunge și la Pământ. În timpul observațiilor acest strat este văzut ca suprafața aparentă a Soarelui. Grosimea fotosferei este de aproape 200 km. Densitatea gazului în fotosferă este de mii de ori mai mică decât densitatea aerului la suprafața Pământului. Strălucirea discului solar nu e uniformă, fiind în descreștere de la centru spre marginile lui. Fotosfera are o *structură granulară*, mărimea medie a granulelor fiind de aproximativ 1 000 km. *Granulele* sunt formațiuni instabile, cu durata de 7-10 min., după care dispar, iar în locul lor apar altele noi. Un alt tip de formațiuni ale fotosferei sunt *petele solare* care, de regulă, apar în grupuri formate din perechi de pete. Diametrul unei pete solare tipice este ceva mai mare ca Pământul și există câteva săptămâni. Partea centrală a petei, *umbra*, pare mai întunecată decât fotosfera strălucitoare, pentru că temperatura ei e mai joasă decât a fotosferei – aproximativ 4 100 K. În jurul petelor văzute la marginea discului solar pot fi observate formațiuni luminoase numite *facule* fotosferice. Faculele sunt mai fierbinți cu 200–300 K față de regiunile înconjurătoare și reprezintă formațiuni relativ stabile care pot exista câteva săptămâni.

Deasupra fotosferei se află un strat de 12 000–15 000 km al atmosferei solare numit **cromosferă**. Densitatea substanței în cromosferă este mult mai mică decât în fotosferă. Strălucirea cromosferei este de sute de ori mai slabă decât a fotosferei, de aceea ea poate fi observată doar în timpul eclipselor totale de Soare ca o fâșie inelară strălucitoare de culoa-

re roz. Cromosfera are o structură neomogenă mult mai pronunțată decât granulația fotosferei. Cele mai mici formațiuni ale ei, numite *spicule*, se văd bine la marginea discului solar sub formă de jeturi de câteva mii de kilometri lungime.

Coroana solară este partea exterioară extrem de rarefiată a atmosferei solare, care trece treptat în mediul interplanetar sub forma vântului solar care se propagă de la Soare. Ea poate fi observată cu ochiul liber numai în timpul eclipselor totale de Soare când apare ca o auroră sidemie în jurul discului solar. În coroană sunt observate formațiuni active numite *protuberanțe*, ce reprezintă nori denși de plasmă. De cele mai multe ori protuberanțele au aspectul unor structuri verticale arcuite (fig. XV, planșa color, p. 163). Coroana de plasmă a Soarelui este un generator continuu de particule încărcate (electroni și protoni) care formează *vântul solar*.

b. Activitatea solară și relațiile Soare–Pământ

Numărul de pete solare în fotosfera Soarelui variază în limite foarte largi. În unii ani ele pot fi numeroase, alteleori suprafața Soarelui este absolut curată luni la rând. La fel variază și aria acoperită cu facule. Acest fenomen de variație a numărului de pete solare are perioada medie de 11,1 ani, numită **ciclu de activitate solară**. Cercetările arată că de la un ciclu la altul petele își schimbă polaritatea magnetică, astfel încât *ciclu complet* de activitate a Soarelui constituie 22,2 ani.

O altă manifestare a activității solare sunt **erupțiile solare** – explozii extrem de violente cu durata de până la două ore care se produc în cromosferă și coroană, într-o mică regiune dintre petele solare în dezvoltare. Fluxul de electroni și protoni generat de asemenea erupții ajunge la Pământ în câteva zile.

Fenomenele care se produc în Soare au o influență nemijlocită asupra Pământului. Particulele **vântului solar**, protonii și electronii, se mișcă cu viteze de 400–1 000 km/s și pătrund în spațiul circumterestru peste 1-2 zile după erupțiile solare. Ele provoacă fenomenele geofizice care se produc pe Pământ, cum ar fi aurorele polare (fig. XVI, planșa color, p. 163), furtunile geomagnetice etc. Aurorele polare sunt generate de particule încărcate ce pătrund în atmosferă în regiunile polare mișcându-se în spirală de-a lungul liniilor de inducție ale câmpului magnetic al Pământului.

Vântul solar, generat de o erupție solară puternică, perturbază câmpul magnetic al Pământului, fenomen cunoscut ca **furtună geomagnetică** care poate

afecta grav liniile de telecomunicație și radiocomunicație, rețelele electroenergetice terestre, funcționarea aparatelor cosmice, precum și sănătatea oamenilor.

Datorită energiei solare, atmosfera, oceanele și continentele terestre se încălzesc. Există o legătură directă dintre ciclurile de activitate solară și clima pe Pământ.

Energia solară, fiind cea mai ecologică, este utilizată pe scară tot mai largă în instalațiile heliotehnice (centralele electrice solare, serele, instalațiile de încălzire a apei și a locuințelor etc.). Bateriile solare servesc drept surse de energie electrică la bordul sateliților artificiali ai Pământului și al stațiilor cosmice.

O importanță deosebită are stratul de ozon din atmosfera terestră, care se formează sub acțiunea razelor solare ca produs al reacțiilor fotochimice din stratosferă. Stratul de ozon protejează viața terestră de acțiunea radiației ultraviolete. Căldura și lumina emise de Soare fac posibilă existența vieții pe planeta noastră.

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Strălucirea Soarelui este extrem de intensă. Prin urmare, este interzis categoric să-l privim direct fie cu ochiul liber, fie prin instrumente optice, deoarece el poate provoca orbirea ireversibilă. Pentru a fi observat și studiat, Soarele este, de obicei, proiectat pe un ecran special.

8.6. STELELE

a. Clasificarea stelelor

Caracteristici generale. Stelele apar pe cer ca niște puncte luminoase strălucitoare. Un telescop școlar cu diametrul de 8–10 cm ne permite să observăm aproape un milion de stele. Toate aceste corpuri cerești fac parte din marea familie a stelelor legate fizic între ele prin forțe gravitaționale, care formează sistemul nostru stelar numit Galaxia Calea-Lactee.

Există două caracteristici fizice ale stelelor care pot fi observate cu ochiul liber: strălucirea aparentă și culoarea.

Stelele reprezintă corpuri cerești ce radiază lumină proprie ca și Soarele.

Ideea că stelele sunt niște „sori” a fost exprimată încă în Antichitate, iar mai târziu de Giordano Bruno.

Strălucirea aparentă a stelelor este exprimată printr-o mărime numită **magnitudine aparentă**. Aceasta caracterizează fluxul de radiație (lumină)

incident pe unitatea de arie a unei suprafețe. Magnitudinea aparentă se notează cu litera m . S-a convenit că stelele de magnitudine aparentă 1^m sunt mai strălucitoare de 100 de ori decât stelele de magnitudine 6^m . O stea de magnitudine 1^m e mai strălucitoare de 2,512 ori decât o stea de magnitudine 2^m ș.a.m.d. Cele mai strălucitoare stele au magnitudini negative. De exemplu, steaua Vega are magnitudinea aparentă $0,3^m$, iar Soarele are magnitudinea aparentă egală cu $-26,8^m$.

Energia radiată de o stea în unitatea de timp în toate direcțiile pe toate lungimile de undă este numită **luminozitate.**

De obicei, luminozitatea stelelor se exprimă în luminozități solare (luminozitatea Soarelui fiind luată drept unitate).

• **Clasificarea stelelor.** Stelele au străluciri și culori diferite. Strălucirea stelelor depinde de dimensiunile lor și de distanța la care se află, iar culoarea – de temperatura lor. Din observații s-a stabilit că stelele au temperaturi cuprinse între 2 500 și 50 000 K. Cele mai fierbinți sunt stelele *albastre*, urmate de stelele *albe* care sunt mai reci, apoi de cele *galbene*, *portocalii*. Cele mai reci se consideră stelele *roșii*. *Stele albe* sunt, de exemplu, Vega (constelația Lira) și Altair (constelația Vulturul), vizibile la noi vara și toamna, Sirius (constelația Câinele-Mare) – cea mai strălucitoare stea de pe cer, vizibilă iarna. Cele mai cunoscute *stele roșii* sunt Betelgeuse (constelația Orion) și Aldebaran (constelația Taurul), vizibile iarna, Antares (constelația Scorpionul) – vizibilă vara. Dintre *stelele albastre* vom menționa Spica (constelația Fecioara). Soarele nostru face parte din categoria stelelor *galbene*. O altă stea galbenă este Capella (constelația Vizitiul), vizibilă iarna.

În funcție de spectrele lor, stelele au fost împărțite în așa-numite **clase spectrale**, notate cu litere ale

E BINE SĂ MAI ȘTIȚI

Culoarea unei stele, ca și a unui corp încălzit, este determinată de temperatura ei. Acest fapt ne permite să determinăm temperatura stelelor după distribuția energiei în spectrul lor. Majoritatea stelelor au spectrul continuu întretăiat de linii întunecate de absorbție. Radiația emisă de stea are intensitatea maximă pe o anumită lungime de undă care depinde de temperatura ei. Relația dintre această lungime de undă și temperatură este dată de legea lui Wien: $\lambda_{\max} = b/T$. Aici $b = 2\,898\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$, T se exprimă în kelvini, K, iar λ_{\max} în micrometri, μm .

alfabetului latin: O-B-A-F-G-K-M și 10 subclase (de la 0 la 9). În această clasificare Soarele face parte din clasa spectrală G2. Studiind spectrul stelelor, se pot determina astfel de parametri ca presiunea și compoziția chimică a gazului din atmosferele lor, perioada de rotație a stelei în jurul axei proprii, prezența câmpului magnetic, viteza radială ș.a.

➔ Verificați-vă cunoștințele

1. Dincolo de limitele atmosferei terestre, stelele și planetele pot fi observate și ziua. De ce acestea nu se văd ziua și la suprafața Pământului?
2. De câte ori este mai strălucitor Luceafărul (Venus), având magnitudinea aparentă egală cu $-4,4^m$, față de Sirius, cea mai strălucitoare stea din constelația Câinele-Mare, care are magnitudinea de $-1,58^m$?

b. Diagrama „spectru-luminozitate”. Evoluția stelelor. Stelele variabile și nestaționare

• **Diagrama „spectru-luminozitate”.** La începutul secolului XX, astronomul danez Hertzsprung și astrofizicianul american Russell au stabilit că există o dependență între spectrul stelei (adică temperatura ei) și luminozitatea acesteia. Dependența dată poate fi reprezentată sub forma unei diagrame în care o axă este clasa spectrală sau temperatura stelei, iar o altă axă reprezintă luminozitatea stelei. Diagrama astfel construită este numită diagrama „spectru-luminozitate” sau diagrama „Hertzsprung-Russell” (fig. XVII, planșa color, p. 163).

Cele mai multe stele sunt dispuse pe diagonala numită **secvența principală** care pleacă din colțul stâng de sus spre colțul drept de jos al diagramei. În partea de sus a secvenței principale se află stelele cele mai fierbinți, iar în partea de jos – cele mai reci, care sunt stele **pitice**. În partea dreaptă de sus a diagramei se găsesc stelele **gigante** și **supergigante** strălucitoare. Mai jos de secvența principală, paralel cu ea, este dispusă seria stelelor **subpitice**.

• **Evoluția stelelor.** Diagrama „spectru-luminozitate” este un instrument foarte important de studiere a stelelor. Poziția stelei într-un punct de pe diagramă este determinată de proprietățile fizice și stadiul de evoluție al ei. Analiza diagramei arată că există grupuri de stele cu proprietăți fizice asemănătoare. Ea permite, de asemenea, să se stabilească o dependență între caracteristicile stelelor.

• **Stelele variabile.** Pe cer pot fi observate două sau mai multe stele situate aparent foarte aproape

una de alta. Sistemul de două stele separate printr-o distanță unghiulară foarte mică este numit **stea dublă** (fig. 8.53). În Calea-Lactee, aproape jumătate din stele formează sisteme duble sau multiple.

Unele stele se proiectează aparent pe sfera cerească ca un sistem dublu, însă în realitate ele se află la distanțe enorme una de alta, nefiind legate prin forțe de atracție gravitațională. Astfel de stele au denumirea de *stele duble optice*.

În cazul când două stele sunt legate prin forțe de atracție gravitațională și se rotesc în jurul unui centru comun de masă, formând un sistem dinamic, ele se numesc *stele duble fizice* sau *stele binare*. Dacă planul orbitei sistemului binar conține și raza vizuală, stelele componente se pot eclipsa reciproc. Aceste binare se mai numesc și *variabile cu eclipsă*.

Sistemele de stele binare sunt importante în astrofizică, pentru că din observații asupra orbitelor acestora se pot determina masele lor.

Strălucirea unor stele variază cu timpul datorită proceselor fizice care se produc în interiorul sau în atmosferele lor. Procesele date sunt însoțite de variații ale parametrilor fizici ai stelelor (luminozitatea, volumul, densitatea, clasa spectrală ș.a.). Stelele de acest tip sunt numite *stele variabile fizice*.

Există trei tipuri de stele variabile: *pulsante* – stele a căror rază se contractă și se dilată alternativ datorită proceselor naturale de evoluție a stelelor; *eruptive* – stele pe suprafața cărora se produc erupții, cum ar fi protuberanțe sau ejectări de materie; *cataclismice* – stele care își schimbă proprietățile în urma unor cataclisme, cum se întâmplă cu *novele* și *supernovele*.

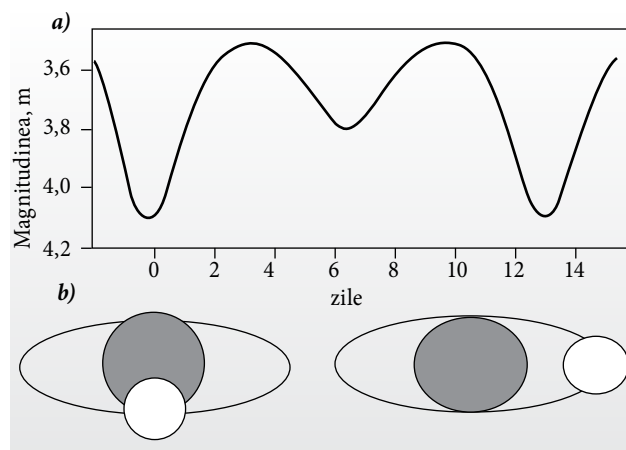


Fig. 8.53. Steaua dublă Beta Lyrae: curba de lumină (a); schema sistemului dublu (b)

Novele reprezintă variabile cataclismice, la care cel puțin o dată a fost observată o creștere bruscă a luminozității (o erupție). În timpul erupției, luminozitatea ei crește de zeci și sute de mii de ori în decurs de 2-3 zile. Spectrul novelor arată că în momentul de strălucire maximă ele sunt asemănătoare cu supergigantele din clasele spectrale A–F, iar după erupție – cu niște pitice fierbinți. Se consideră că novele constituie *sisteme binare compacte* reprezentând o pereche de stele, situate la o distanță mică una de alta. Un rol important în evoluția sistemului binar compact îl joacă forțele de interacțiune mareică dintre componentele sistemului. Până în prezent au fost înregistrate peste 400 de nove, dintre care 150 în Galaxia noastră, iar restul în nebuloasa Andromeda și în galaxiile Norul Mare și Norul Mic ale lui Magellan.

În faza finală a evoluției, stelele cu masa mai mare de 8 mase solare trec prin stadiul numit erupție de **supernovă** care se caracterizează printr-o explozie catastrofală, însoțită de degajarea unor cantități enorme de energie. Supernovele își măresc brusc, în numai câteva ore, luminozitatea de zeci de milioane de ori, depășind chiar și luminozitatea galaxiei din care fac parte. Erupția durează, de obicei, câteva sute de zile, în care supernova radiază tot atâta energie cât emite Soarele pe durata existenței sale. Până în prezent au fost înregistrate circa 500 de supernove în alte galaxii și vreo zece în Galaxia noastră. Cea mai remarcabilă a fost erupția supernovei observată în anul 1054 în constelația Taurul și descrisă de astronomii chinezi și japonezi ca o stea ce se vedea și ziua. Astăzi în acel loc se poate observa faimoasa nebuloasă gazoasă Crab (*fig. 8.54*). Ultima erupție de supernovă a fost descoperită la 24 februarie 1987 în galaxia Norul Mare al lui Magellan.

Fenomenele care se produc în ultimele stadii ale evoluției stelelor masive se încheie cu contracția gravitațională catastrofală, urmată de o explozie termoneucleară a întregii stele, după care ea se transformă în *stea neutronică* sau *gaură neagră*.

• **Stelele nestaționare.** În stadiile finale de evoluție, stelele se transformă în obiecte cu proprietăți neobișnuite: pitice albe, stele neutronice și găuri negre.

Piticele albe reprezintă stele foarte compacte având masa de ordinul masei Soarelui, însă raza de 100 de ori mai mică. Din această cauză ele au densități enorme, care ating mai multe tone pe centimetru cub. Piticele albe au temperaturi înalte care ating 70 000 K, însă luminozitatea lor e slabă datorită dimensiunilor mici.

În diagrama „Hertzsprung–Russell” ele se situează în partea stângă jos (*fig. XVII*, planșa color, p. 163). Piticele albe sunt lipsite de surse termonucleare de energie, de aceea ele se răcesc lent pentru că radiază energia termică stocată în adâncurile lor la etapele anterioare de evoluție.

Masa piticelor albe nu poate depăși valoarea de 1,44 mase solare. Dacă masa acestora trece peste această limită, ele devin instabile și trec în starea de contracție rapidă, numită *colaps*, care în unele cazuri se sfârșește cu apariția unei **stele neutronice**.

Masa minimă a stelelor neutronice este de 0,1 mase solare. Procesele de transformare a materiei stelare în neutroni devin dominante la densități foarte mari, fiind însoțite de radiația de neutrini. Întrucât raza stelei cu masa dată este de circa 10-15 km, densitatea ei constituie cca $2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$, adică aproape de densitatea materiei nucleare. Studiile teoretice arată că stelele neutronice nu pot avea mase mai mari de 2-2,5 mase solare.

Atunci când o stea obișnuită prin contracție gravitațională (*colaps*) devine stea neutronică, câmpul ei magnetic se intensifică rapid, atingând valori de mii de ori mai înalte decât în interiorul atomului.

În anul 1967 a fost înregistrată o radiație radio de origine cosmică, emisă de o sursă punctiformă sub formă de impulsuri scurte care se repetau la intervale strict constante de timp. Aceste obiecte cerești au fost numite **pulsari**. În prezent se cunosc cca 1 000 de pulsari, având perioade de la 1,5 ms la 4,5 s. Radiația radio a pulsarilor este puternic polarizată și nu este de natură termică. Pulsarii sunt obiecte relativ apropiate, aflate în Galaxia noastră. Unul dintre cei mai remarcabili pulsari coincide cu una din cele două stele existente în centrul nebuloasei Crab (*fig. 8.54*).

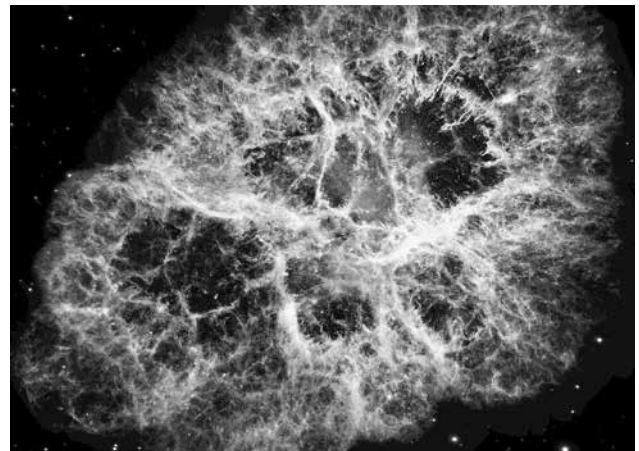


Fig. 8.54. Nebuloasa Crab

În cazul când masa unei stele este de câteva ori mai mare decât masa Soarelui, forțele de presiune interioară nu se mai pot opune forțelor gravitaționale. Conracția gravitațională (colapsul) a stelei continuă până când raza stelei se apropie de valoarea critică numită **raza gravitațională** Schwarzschild, $R_{\text{grav}} = 2GM/c^2$, unde G este constanta gravitațională, M – masa stelei. Viteza parabolică (a doua viteză cosmică) pe stea devine egală cu viteza luminii în vid, c . Dacă raza obiectului este mai mică decât raza gravitațională, lumina nu mai poate părăsi obiectul, el nu mai radiază și deci nu poate fi observat. Aceste corpuri cerești prezise pe cale teoretică sunt numite **găuri negre**.

În interiorul găurii negre și în apropiere de suprafața ei exterioară legile fizicii clasice ale lui Newton nu mai sunt valabile. În acest caz este necesară aplicarea legilor teoriei relativității generalizate a lui Einstein.

8.7. NOȚIUNI DE COSMOLOGIE

a. Galaxia noastră. Roiuri stelare. Mișcarea proprie a stelelor și a Sistemului Solar. Mișcarea de rotație a Galaxiei

- **Galaxia noastră.** Fâșia luminoasă observată într-o noapte de vară cu cer senin traversând bolta cerească de la nord-vest spre sud-est e cunoscută sub numele de Calea-Lactee. Aceasta nu este altceva decât Galaxia noastră care cuprinde toate stelele vizibile pe sfera cerească, inclusiv Sistemul nostru Solar. Poziția Căii-Lactee față de orizont variază considerabil, datorită mișcării diurne și anuale a sferei cerești.

Galaxia reprezintă un sistem stelar sub formă de disc, simetric față de planul ei principal (fig. 8.55). Grosimea discului este de 16 mii de ani-lumină, iar diametrul constituie circa 100 mii de ani-lumină. Soarele se află la aproximativ 33 mii ani-lumină de centrul ei (1 an-lumină = 63 240 UA).

Numărul total de stele în Galaxia noastră se estimează la circa 150 de miliarde. Majoritatea stelelor Galaxiei este concentrată în *discul stelar galactic*. Galaxia noastră este alcătuită din obiecte dintre cele mai diferite – stele masive fierbinți și pitice albe tinere, gigante roșii și obiecte intermediare între stele și planete, numite „pitice brune”, *nebuloase planetare* și *difuze*, nori de gaz și praf interstelar ș.a. Obiectele tinere ale discului formează o structură complexă, numită *brațe spirale*, asemănătoare cu brațele spira-

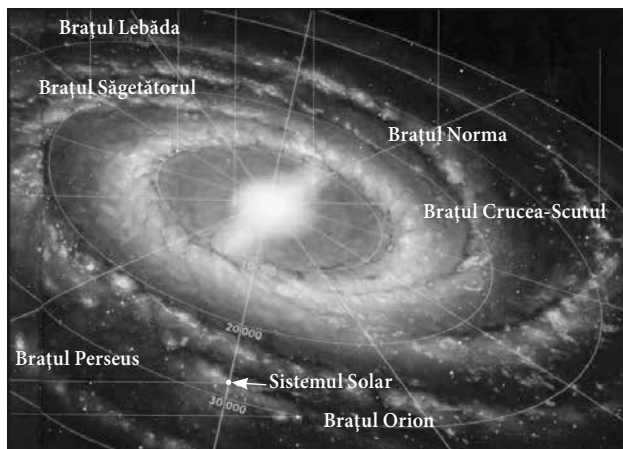


Fig. 8.55. Structura Galaxiei (Căii-Lactee) și locul Sistemului Solar în Calea-Lactee

le observate la alte galaxii. În brațele spirale sunt concentrate stele tinere și cantități masive de gaz.

În centrul Galaxiei, în direcția spre constelația Săgetătorul se află nucleul ei. Nucleul emite un flux enorm de energie care poate fi explicat prin existența unei găuri negre masive ce depășește masa Soarelui de câteva milioane de ori. Existența acestuia pare a fi confirmată de observatoarele Röntgen orbitale, precum și prin observații în domeniul radio.

- **Roiuri stelare.** Majoritatea stelelor formează sisteme stelare cu un centru comun de masă legate prin forțe gravitaționale: stele multiple (duble, triple, cvaduple) și roiuri stelare. La rândul lor, roiurile stelare pot fi deschise sau globulare.

Roiurile stelare deschise conțin zeci, sute, iar uneori și mii de stele având densitatea stelară relativ mică. Aceste roiuri numite și *roiuri dispersate* sunt situate, în majoritatea lor, în apropierea planului ecuatorial galactic. Astăzi se cunosc peste 800 de roiuri de acest tip accesibile observațiilor. Se estimează că în Calea-Lactee ar putea fi câteva zeci de mii de roiuri dispersate, însă cu ochiul liber pot fi văzute numai două roiuri deschise: Pleiadele (circa 120 de stele strălucitoare) (fig. 8.56), cunoscute în popor sub denumirea de „Cloșca-cu-Pui”, și Hyadele (circa 100 de stele), ambele situate în constelația Taurul.

Roiurile stelare globulare conțin zeci și sute de mii, iar în unele cazuri – chiar milioane de stele. Ele au o distribuție sferică cu o mare concentrație de stele spre centrul roiului (fig. 8.57). În Galaxia noastră s-au identificat circa 130 de roiuri globulare, dar se estimează că numărul lor ar fi mai mare. Aceste roiuri au luminozitatea mare, cel mai strălucitor fiind roiul ω din constelația Centaurul cu magnitu-



Fig. 8.56. Roiul Pleiadele

dinea 4^m , vizibil cu ochiul liber în emisfera sudică. Roiurile globulare conțin stele gigante roșii și galbene cu vârsta de 8–10 miliarde de ani, precum și supergigante. În aceste roiuri au fost descoperite surse de radiație Röntgen, aceasta conducând la ipoteza că în centrul lor s-ar afla găuri negre.

• **Mișcarea proprie a stelelor.** Comparând pozițiile aceluiași stele determinate la intervale considerabile de timp, s-a descoperit că coordonatele stelelor variază în timp. O parte din aceste variații este determinată de diverse efecte legate de mișcările Pământului și poziția observatorului.

Deplasarea stelei pe sfera cerească în decursul unui an care persistă și după eliminarea acestor efecte este numită mișcare proprie a stelei și se exprimă în secunde de arc pe an.

Mișcările proprii ale diverselor stele diferă ca mărime și direcție și nu depășesc câteva secunde de arc, cu excepția stelei „zburătoare” Barnard (din



Fig. 8.57. Roi globular de stele

constelația Ophiuchus „Îmblânzitorul-de-Șerpi”) cu cea mai mare mișcare proprie – circa $10''$ pe an. Mișcările proprii ale stelelor fiind foarte mici, variațiile pozițiilor aparente ale lor nu pot fi observate cu ochiul liber, de unde a și apărut noțiunea de „stele fixe”. Proiecția vitezei spațiale a stelei pe raza vizuală se numește *viteză radială*, v_r .

• **Mișcarea Sistemului Solar în Galaxie.** Soarele împreună cu planetele care se rotesc în jurul lui, inclusiv Pământul, de asemenea se mișcă în spațiu. Punctul de pe sfera cerească spre care este orientat vectorul vitezei Soarelui este numit *Apex solar*. Soarele se mișcă spre acest punct cu viteza de 20 km/s.

• **Mișcarea de rotație a Galaxiei. Anul galactic.** Studiind mișcările proprii și vitezele radiale ale obiectelor foarte îndepărtate, se pot obține date despre mișcările care au loc în întreaga Galaxie. În urma măsurărilor vitezelor radiale ale stelelor s-a constatat că stelele apropiate de Soare se mișcă împreună cu el în jurul centrului Galaxiei. Această mișcare este o consecință a rotației Galaxiei, care se produce în sens orar dacă e privită din polul nord al Galaxiei situat în constelația Cosița-Berenicei. Soarele și stelele din vecinătatea sa efectuează o rotație completă în jurul centrului Galaxiei în aproximativ 240–250 milioane de ani. Acest interval de timp este numit *an galactic*.

b. Clasificarea galaxiilor. Galaxii cu nuclee active. Quasarii. Expansiunea Universului. Marea Explozie

Originea și evoluția Universului constituie obiectul de studiu al unui capitol din astronomie numit *cosmologie*. Cosmologia studiază proprietățile fizice, structura și evoluția Universului în ansamblu, în special, ale spațiului cosmic accesibil observațiilor directe, numit deseori **Metagalaxie**.

• **Clasificarea galaxiilor.** În afara Galaxiei noastre, există și alte sisteme stelare uriașe, numite **galaxii**, al căror număr depășește 100 de milioane și care apar pe cer ca niște **nebuloase**. Trei dintre acestea pot fi observate pe cer cu ochiul liber sub forma unor pete mici abia vizibile: Norul Mare și Norul Mic ai lui Magellan, vizibili în emisfera de sud, și nebuloasa Andromeda din constelația cu același nume (fig. 8.58). Miliarde de alte galaxii îndepărtate sunt atât de slabe, încât nu pot fi observate decât cu ajutorul celor mai mari telescoape moderne.

Se presupune că în regiunile exterioare ale galaxiilor predomină așa-numita *materie întunecată* (*ascunsă*) de natură încă necunoscută, a cărei masă este comparabilă sau chiar depășește considerabil masa totală a stelelor și a gazului interstelar.

Galaxiile diferă foarte mult unele de altele. După forma exterioară și strălucire, ele se împart în galaxii eliptice, spirale, lenticulare și neregulate.

Galaxiile eliptice (E0–E7, *fig. 8.59*) au forma de elipsă fără un contur distinct. Ele nu prezintă vreo structură în interior. Aceste galaxii constituie cam un sfert din numărul celor observate.

Galaxiile spirale (Sa–Sc, SBa–SBc, *fig. 8.59*) reprezintă circa jumătate din numărul galaxiilor, adică sunt cele mai răspândite. Dintre ele face parte și Galaxia noastră, dar și nebuloasa Andromeda. Aceste galaxii au o structură caracteristică de *brațe spirale*, care conțin stele tinere strălucitoare, roiuri stelare și nebuloase gazoase luminoase.

În multe galaxii spirale stelele din regiunea interioară formează o punte – o bară – de la capetele căreia pornesc ramurile spirale.

Galaxiile lenticulare (S0, *fig. 8.59*) sunt asemănătoare cu cele eliptice, însă au discul din stele, fapt care le aseamănă și cu galaxiile spirale, deși se deosebesc de acestea prin absența componentei plane și a brațelor spirale.

Galaxiile neregulate au forme nesimetrice, gazul interstelar și stelele fiind împrăștiate pe întreg discul galactic. Galaxiile respective conțin multe stele tinere.

• **Galaxii cu nuclee active.** Nucleele unor galaxii au un șir de proprietăți cu totul deosebite, iar fenomenele care se produc în ele încă nu sunt studiate în măsură suficientă. Nucleele multor galaxii emit



Fig. 8.58. Nebuloasa Andromeda

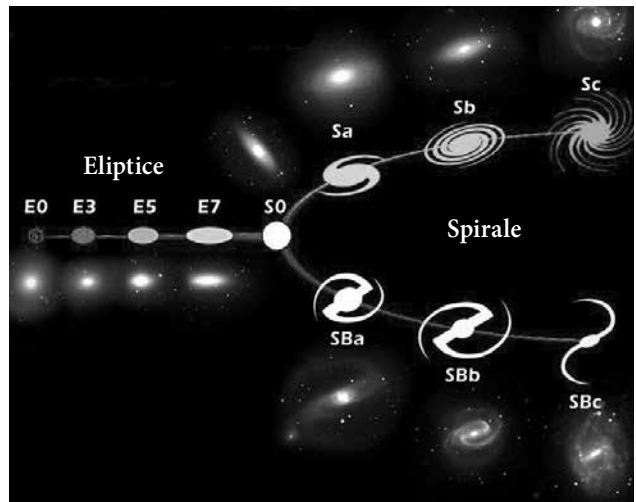


Fig. 8.59. Clasificarea galaxiilor

cantități uriașe de energie, comparabile sau chiar mai mari decât energia totală radiată de toate stelele din galaxie. Nucleele galaxiilor în care are loc degajarea intensă de energie sunt numite **nuclee active**. Numărul galaxiilor cu nuclee active constituie câteva procente față de numărul galaxiilor normale.

Galaxiile spirale masive, în centrul cărora se observă o sursă de radiație de dimensiuni unghiulare foarte mici, al cărei spectru nu este de natură termică, poartă denumirea de *galaxii Seyfert*. O particularitate a acestor galaxii constă în faptul că radiația nucleului este variabilă, având perioada de câteva luni, săptămâni sau chiar zile.

Radiogalaxiile fac parte din galaxiile eliptice masive și se caracterizează prin radiații radio de zeci de mii de ori mai intense decât radiația radio a galaxiilor normale. Această radiație radio, numită sincrotronă, este determinată de mișcarea în câmp magnetic a unor nori de particule relativiste. Radiogalaxia cea mai apropiată de noi se află în constelația Centaurul (radiosursa Centaurus A).

• **Quasarii.** În 1963, unele surse de radiație radio de dimensiuni mici au fost identificate ca fiind obiecte asemănătoare cu stelele. Ele au fost numite *quasari*, ceea ce înseamnă **radiosurse cvasistelare**. În prezent se cunosc mii de asemenea obiecte. Liniile spectrale ale quasarelor prezintă o deplasare considerabilă spre roșu. Valorile mari ale deplasării spre roșu arată că quasarii sunt obiecte extragalactice, situate la miliarde de ani-lumină depărtare. Unul dintre cei mai apropiați quasari este 3C 273, observat la circa 3 miliarde de ani-lumină de Pământ.

Quasarii au proprietăți asemănătoare cu cele ale nucleelor galactice active. Ei reprezintă obiecte compacte ce se caracterizează prin radiație variabilă de natură netermică de mare intensitate. Observațiile ne demonstrează că mulți quasari sunt cu adevărat nuclee de galaxii foarte active. Mecanismul degajării cantităților enorme de energie de către nucleele galactice și quasari nu este încă cunoscut.

• **Expansiunea Universului.** În anul 1920, astronomul american Edwin Hubble a demonstrat că nebuloasele spirale observate sunt în realitate alte galaxii asemănătoare cu Galaxia noastră, situate la milioane și miliarde de ani-lumină depărtare. El a descoperit că liniile din spectrele majorității galaxiilor sunt deplasate spre roșu. Aceasta înseamnă că galaxiile se depărtează unele de altele, adică Universul este în expansiune. Galaxiile mai îndepărtate și deci cu o strălucire mai slabă au o deplasare spre roșu mai mare, ceea ce înseamnă că ele se depărtează cu o viteză mai mare. Hubble a stabilit legea:

$$V = H \cdot r,$$

unde V este viteza relativă a galaxiilor, H – o constantă dependentă de timp, numită constanta lui Hubble care are un profund sens fizic, iar r – distan-

ța până la galaxie. Valoarea inversă a acestei constante este egală cu „vârsta” Universului considerată astăzi a fi egală cu 13,7 miliarde de ani. Această valoare este în concordanță cu vârsta majorității galaxiilor și a celor mai bătrâne stele din Galaxia noastră.

• **Marea Explozie (Big Bang).** Descoperirea expansiunii Universului conduce la teoria Marii Explozii. Potrivit acestei teorii, inițial Universul se afla într-o stare fierbinte superdensă, numită **singularitate**, în care valorile presiunii și densității materiei tind către infinit. Starea substanței în apropiere de singularitate nu poate fi descrisă cu ajutorul legilor fizicii cunoscute astăzi. Dilatarea a început de la această stare într-un moment numit convențional **Marea Explozie** (în engleză – *Big Bang*).

Un rol important în descoperirea a milioane de galaxii foarte îndepărtate care s-au format în stadiile timpurii de evoluție a Universului l-a avut telescopul spațial Hubble.

O confirmare a teoriei *Marii Explozii*, elaborate în baza teoriei relativității generalizate a lui Einstein este considerată descoperirea în 1965 a *radiației radio cosmice de fond*, care este de natură termică, corespunde temperaturii de 2,73 K și a fost emisă de materia fierbinte în Universul foarte timpuriu.

Planetele Sistemului Solar (date generale)

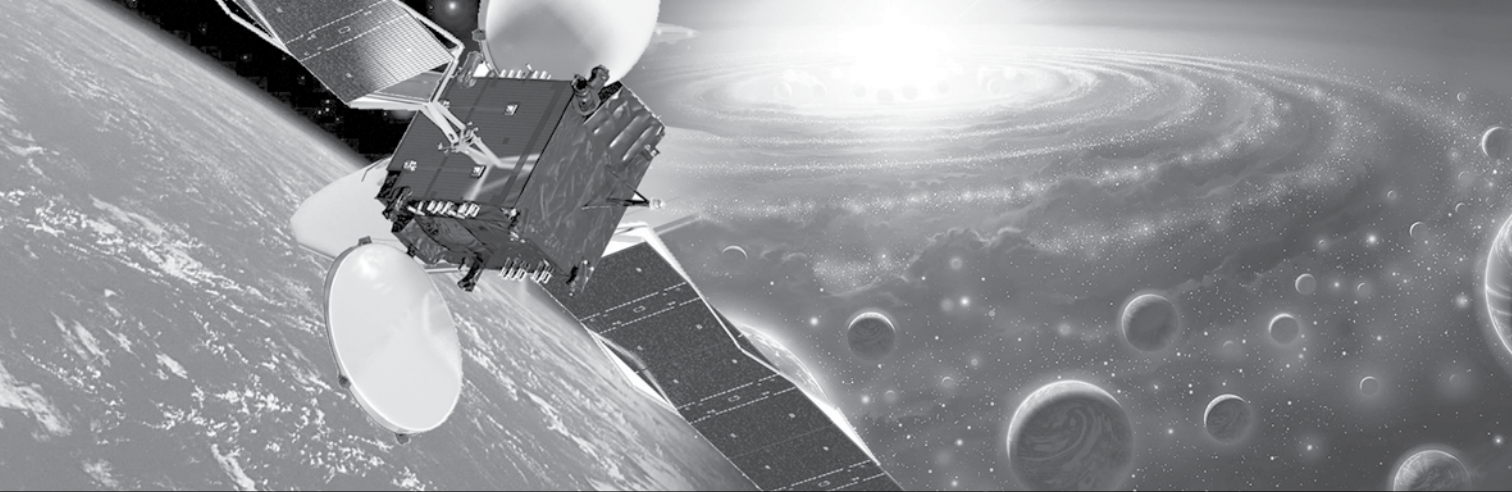
Tabelul 1

Planeta	Distanța medie până la Soare, UA	Masa (în mase terestre)	Raza medie, km	Densitatea medie, kg/m ³ , 10 ³	Perioada siderală, ani	Perioada de rotație axială	Viteza orbitală medie, km/s
Mercur	0,387	0,056	2 437	5,5	0,24	58,7 ^d	47,9
Venus	0,723	0,82	6 052	5,2	0,61	243,1 ^d	35,0
Pământ	1,0	1,0	6 370	5,5	1,00	23 ^h 56 ^m 4 ^s	29,8
Marte	1,524	0,107	3 397	3,9	1,88	24 ^h 37 ^m 22 ^s	24,1
Jupiter	5,203	318	71 400	1,3	11,86	9 ^h 50 ^m	13,1
Saturn	9,539	95,2	60 400	0,7	29,46	10 ^h 14 ^m	9,6
Uranus	19,182	14,6	25 400	1,4	84,02	10 ^h 49 ^m	6,8
Neptun	30,07	17,2	24 500	1,6	164,78	15 ^h 48 ^m	5,4

Planetele pitice ale Sistemului Solar (date generale)

Tabelul 2

Planeta	Distanța medie până la Soare, UA	Masa (în mase terestre)	Raza medie, km	Densitatea medie, kg/m ³ , 10 ³	Perioada siderală, ani	Perioada de rotație axială	Viteza orbitală medie, km/s
Ceres	2,766	0,00016	975x909	2,08	4,6	9 ^h	17,88
Pluto	39,4	0,0022	2306±20	2,0	248	6,387 ^d	4,666
Haumea	43	0,0007	1960x1518x996	3,5	285	3,9 ^h	
Makemake	45	0,0005	1500x1420	~2	309,9		4,419
Eris	67,67	0,0028	2400±300	2,5	557	>8 ^h	3,437



TABLOUL ȘTIINȚIFIC AL LUMII

9.1. ETAPELE DE DEZVOLTARE A TABLOULUI FIZIC AL LUMII

Ajunși la finele cursului liceal de fizică și astronomie, să analizăm evoluarea acestui domeniu de la începuturi până în prezent și să urmărim formarea conceptelor despre lume în perioadele respective.

Se consideră că primele cunoștințe în domeniul fizicii au fost obținute încă în Antichitate. Tales din Milet (sec. VI î.Hr.) știa că chihlimbarul frecat cu țesătură de lână atrage corpuri ușoare, iar magnetita atrage obiectele din fier. În secolele V–IV î.Hr., Leucip și Democrit au formulat ideea despre existența unei limite a divizibilității substanței, a unor particule indivizibile – a atomilor. Aristotel (sec. IV î.Hr.) a pus bazele mecanicii: a descris mișcarea mecanică, a evidențiat mișcările rectilinii și curbilinii, a formulat regula compunerii deplasărilor reciproc perpendiculare.

În secolul următor, Euclid a formulat legea propagării rectilinii a luminii, a stabilit legile reflexiei luminii, iar Arhimede a obținut unele rezultate în domeniul mecanicii: a introdus noțiunile de centru de greutate și de moment al forței, a formulat legea pârghiei, a stabilit legea hidrostatiei (cunoscută în prezent ca legea lui Arhimede) și condițiile de plutire a corpurilor.

În era noastră, Heron din Alexandria (sec. I) a descris o serie de mecanisme simple: scripetii, pana, șurubul, vârtejul, iar Ptolemeu (sec. II) a descris fenomenul refracției luminii, a elaborat forma definitivă a sistemului geocentric al lumii.

Această enumerare de descoperiri denotă că în Antichitate au apărut acei germeni care, dezvoltându-se, au devenit capitolele importante ale fizicii: mecanica, electrodinamica, fizica moleculară și optica.

La mijlocul secolului al XVI-lea, Nicolaus Copernic a publicat lucrarea sa fundamentală *Despre mișcările de revoluție ale corpurilor cerești*, în care a fundamentat concepția heliocentrică, potrivit căreia Pământul, împreună cu celelalte planete, se rotește simultan în jurul Soarelui și al propriilor axe. La începutul secolului următor, Johannes Kepler a descoperit legile mișcării planetelor în jurul Soarelui, argumentând sistemul heliocentric.

Secolul XVII s-a remarcat prin apariția a două lucrări în care au fost puse bazele mecanicii. În 1632, Galileo Galilei a publicat *Dialogul despre două sisteme principale ale lumii*, în care a formulat două principii fundamentale ale mecanicii – principiul relativității și cel al inerției. În anul 1687 a văzut lumina tiparului lucrarea lui Isaac Newton *Principiile matematice ale filosofiei naturale*, în care au fost expuse noțiunile fundamentale ale mecanicii, trei principii ale dinamicii și legea atracției universale. În baza acestor principii, a fost elaborat **tabloul mecanic al lumii**, conform căruia toate fenomenele din natură se reduc doar la mișcări mecanice, adică la schimbarea pozițiilor corpurilor unele față de altele. Corpurile sunt caracterizate de masele și dimensiunile lor spațiale, mișcările lor fiind independente de structura internă.

În mecanica newtoniană spațiul și timpul sunt considerate absolute și independente între ele. Proprietățile spațiului și timpului nu sunt influențate de corpurile și de mișcările acestora. Se admite că spațiul este omogen

și izotrop (proprietățile lui sunt identice în toate regiunile spațiului și în toate direcțiile), iar timpul omogen decurge uniform în tot spațiul. Interacțiunea dintre corpuri se transmite momentan și este caracterizată de forțe, ale căror valori depind de parametrii corpurilor, de pozițiile lor reciproce (distanța dintre ele), iar în cazul corpurilor aflate în contact – de vitezele lor relative. Cunoscând forțele ce acționează asupra corpului, pozițiile și vitezele punctelor lui la un moment de timp considerat inițial, în baza principiilor mecanicii, pot fi determinate pozițiile și vitezele lor la orice moment de timp ulterior. Au fost rezolvate, astfel, diferite probleme de mișcare a corpurilor, începând cu cele mai simple (alunecarea corpului pe planul înclinat sau mișcarea corpului aruncat sub un unghi față de orizontală), precum și probleme de mișcare a planetelor și a sateliților lor. Este bine cunoscută previziunea, în baza legiților mecanicii și a observațiilor astronomice, făcută de Le Verrier privind existența unei planete, necunoscute la timpul respectiv și descoperită ulterior (a. 1846) de către Gallé – planeta Neptun.

Principiile mecanicii au fost aplicate cu succes și în alte ramuri ale fizicii. În teoria cinetico-moleculară a gazelor ideale – sisteme de molecule în mișcare haotică – a fost dedusă formula fundamentală a acestei teorii – relația dintre presiunea gazului, concentrația moleculelor și energia cinetică medie a mișcării lor haotice de translație.

În optică, Newton afirma că lumina este un flux de corpusculi. Considerând elastice ciocnirile dintre corpusculi și oglindă, el a dedus legile reflexiei luminii. A dedus, de asemenea, legile refracției luminii, considerând că la trecerea din aer într-un mediu transparent acesta atrage corpusculii de lumină în interior, unde aceștia se deplasează cu viteze mai mari decât în aer (vid).

Succesul obținut în explicarea unor fenomene ale naturii, în baza principiilor mecanicii, a creat iluzia că acestea sunt unicele principii fundamentale ale naturii.

În această ordine de idei, Einstein releva: „...impresiona faptul că metodele mecanice erau aplicate cu succes în domenii care nu aveau nimic cu mecanica: teoria mecanică a luminii...; teoria cinetică a gazelor...; teoria conducției căldurii...”.

În primele două decenii ale secolului XIX au fost efectuate cercetări vaste în domeniul opticii. Young, Fresnel, Fraunhofer, Malus și Brewster au realizat o serie de experimente și studii teoretice privind interferența, difracția și polarizarea luminii. S-a con-

firmit teoria ondulatorie a luminii, propusă de către Huygens (a. 1678). S-a stabilit că undele de lumină sunt unde transversale. Către mijlocul secolului al XIX-lea, natura ondulatorie a luminii era considerată un fapt demonstrat.

Anul 1820 a fost unul de cotitură în fizica fenomenelor electrice și magnetice. Oersted a observat influența curentului electric asupra acului magnetic situat în vecinătatea conductorului parcurs de curent. În același an, Ampère a efectuat o serie de experimente în care a cercetat interacțiunea conductoarelor parcurse de curent electric și a stabilit expresia pentru forța respectivă, cunoscută în prezent cu denumirea de *forță electrodinamică* sau *forța Ampère* (expresia forței de interacțiune dintre sarcinile electrice punctiforme a fost stabilită în 1785 de către Coulomb). Descoperirea fenomenului inducției electromagnetice de către Faraday (a. 1831) și a autoinducției de către Henry (a. 1832) a determinat utilizarea vastă a curentului electric în industrie, astfel încât veacul XIX a intrat în istorie ca **secolul electricității**. Aceste descoperiri au demonstrat, de asemenea, existența unei interdependențe indestructibile între fenomenele electrice și cele magnetice. Trebuie de menționat, de asemenea, formularea de către Faraday a ideii despre câmp și introducerea noțiunii de „linii de forță”, cunoscute în prezent ca linii de intensitate a câmpului electric, și de linii de inducție magnetică.

Astfel, în prima jumătate a secolului al XIX-lea au fost descoperite o serie de fenomene importante din domeniul electromagnetismului, au fost introduse noțiuni fizice necesare descrierii lor și au fost stabilite legițile experimentale respective.

Interpretarea teoretică și generalizarea rezultatelor din domeniul dat a fost efectuată de către Maxwell prin elaborarea **electrodinamicii** (1860–1865) – teoria câmpului electromagnetic. La baza acesteia se află un sistem de ecuații fundamentale, cunoscute sub numele de ecuațiile lui Maxwell pentru câmpul electromagnetic. Fiind aplicate la sisteme fizice concrete, la ecuațiile menționate se adaugă ecuațiile materiale ce exprimă anumite relații dintre parametrii sistemului considerat.

În cadrul teoriei sale, Maxwell nu numai că a reușit să explice faptele experimentale ce-i erau cunoscute, dar și să facă preziceri în domeniul fizicii, ceea ce este deosebit de important. Astfel, pe cale pur teoretică a prevăzut existența undelor electromagnetice

și a descris proprietățile lor. A stabilit că undele de lumină și cele electromagnetice au proprietăți identice, confirmându-se, pe această cale, natura electromagnetică a luminii.

Experimental, undele electromagnetice au fost descoperite de către Hertz (1888).

Către ultimul deceniu al secolului XIX s-a conturat **tabloul electromagnetic al lumii**.

Tentativele de a explica toate fenomenele naturii în limitele unui sau altui tablou fizic din cele menționate nu s-au încununat de succes. S-a constatat că aceste tablouri se completează reciproc, dar împreună nu pot explica o parte din fenomene.

Spre finele secolului XIX au fost realizate trei descoperiri importante: razele Röntgen (a. 1895), radioactivitatea (a. 1896) și electronul (a. 1897). Rămâneau însă neexplicate legăturile experimentale ale radiației termice, ale efectului fotoelectric și ale spectrelor atomilor.

Nesoluționată era și problema eterului, a mediului ipotetic purtător al undelor de lumină. Au fost întreprinse încercări de a-l descoperi și a-i cerceta proprietățile. Rezultatele însă erau contradictorii, „curenții de eter” rămâneau nedescoperiți. Au fost emise diferite ipoteze, în baza cărora s-au obținut și rezultate corecte, dar acestea nu constituiau un sistem unic.

Teoria respectivă a fost elaborată de către Einstein (a. 1905) – **teoria relativității restrânse**. În cadrul acesteia însă eterul nu și-a găsit loc, fiind eliminat din fizică. De asemenea, spațiul și timpul nu mai sunt considerate absolute și independente, ci relative și legate reciproc. S-a demonstrat că interacțiunea, în particular cea electromagnetică, nu se transmite momentan, viteza maximă de transmitere a ei fiind egală cu viteza luminii în vid, iar între masă și energie există o anumită relație. Teoria relativității restrânse indică limita de aplicabilitate a mecanicii newtoniene (viteze $v \ll c$).

Planck a explicat legăturile radiației termice în baza ipotezei privind cuantele de energie. Ipoteza respectivă a fost dezvoltată și folosită la explicarea și altor fenomene. Către mijlocul anilor '20 ai secolului XX din ea s-a constituit **mecanica cuantică**, aplicată la descrierea proprietăților sistemelor microscopice – atomilor și moleculelor. S-a constatat că particulele de substanță posedă proprietăți ondulatorii, iar undele electromagnetice – proprietăți corpusculare. Ca rezultat, noțiunea de traiectorie aplicată la microparticule își pierde sensul. Este imposibilă determinarea simultană a pozițiilor și impulsurilor acestora, nece-

sare pentru a construi traiectoria particulei, și stabilirea poziției exacte a acesteia la orice moment de timp ulterior. În fizica cuantică poate fi calculată doar probabilitatea că microparticula se află la momentul dat într-o regiune sau alta a spațiului. Energia și unele din caracteristicile microparticulei pot lua doar anumite valori, discrete, spre deosebire de fizica clasică, în care aceleași mărimi variază în mod continuu.

Pentru fizica secolului XX este caracteristică studiarea mai profundă a structurii substanței. Descoperirea electronului (a. 1897) a fost urmată de descoperirea nucleului (a. 1911) și de stabilirea modelului nuclear al atomului. În anul 1919 a fost descoperit protonul, iar în 1932 – neutronul, și tot în același an a fost adoptat modelul protono-neutronic al nucleului. De asemenea, în anul 1932 Anderson a descoperit pozitronul – prima antiparticulă, confirmând astfel ipoteza lui Dirac despre existența antiparticulelor. Fermi a elaborat (a. 1933) teoria dezintegrării β în care a fost dezvoltată ipoteza lui Pauli (a. vedea *tema 7.3, a*). Astfel s-a constituit o ramură nouă a fizicii, cea a particulelor elementare.

Un succes al fizicii cuantice a fost aplicarea metodelor ei la descrierea proprietăților sistemelor formate dintr-un număr mare de microparticule. Au fost explicate proprietățile metalelor, inclusiv starea lor de supraconductibilitate la temperaturi foarte joase.

În cadrul teoriei cuantice au fost descrise proprietățile electrice și optice ale semiconductoarelor, influența câmpurilor electrice și magnetice asupra acestora. În urma cercetărilor au fost inventate dioda semiconductoare (joncțiunea $p-n$), apoi tranzistorul. În consecință, au fost miniaturizate mai multe dispozitive electronice. Un alt succes este realizarea telefoniei mobile. După cum se cunoaște, inventarea maserului și a laserului a fost posibilă numai în cadrul fizicii cuantice. Astfel,

fizica secolului XX s-a dezvoltat sub semnul teoriei relativității și a mecanicii cuantice

și s-a remarcat prin aplicații de importanță majoră.

Pentru perioada respectivă este caracteristică, de asemenea, interconexiunea fizicii cu alte ramuri ale științei. Ca rezultat, s-au dezvoltat: astrofizica, geofizica, biofizica, chimia cuantică etc.

Savanții sunt convingși că secolul XXI va fi încununat de noi succese ale fizicii și aplicații, astăzi inimaginabile pentru noi.

9.2. ASTRONOMIA ȘI CONCEPȚIA ȘTIINȚIFICĂ DESPRE LUME

În istoria astronomiei, mai multe teorii și descoperiri fundamentale au revoluționat dezvoltarea științei și au contribuit la schimbarea concepției științifice despre lume.

Prima revoluție științifică a avut loc în secolele VI–IV î.Hr., în urma căreia a luat naștere știința astronomiei reflectată în lucrările lui Aristotel (384–322 î.Hr.), Aristarh din Samos (320–250 î.Hr.) și Hiparh (190–125 î.Hr.).

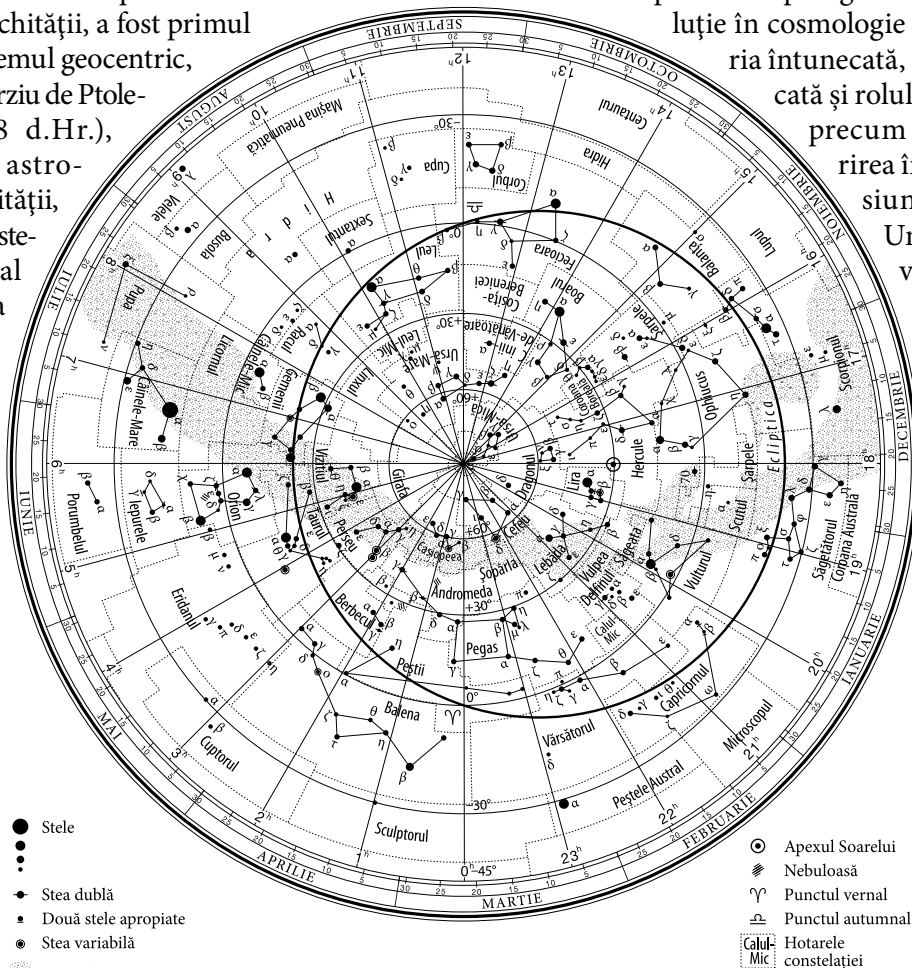
Aristotel a alcătuit prima schemă geocentrică a Universului, în centrul căreia a pus Pământul nemîșcat sub formă de sferă. Aristarh din Samos, supranumit „Copernic al lumii antice”, a propus primul sistem heliocentric cu Soarele în centrul lumii, sistem redescoperit peste optsprezece secole de către marele astronom polonez Nicolaus Copernic.

Hiparh, considerat drept cel mai mare astronom al Antichității, a fost primul care a creat sistemul geocentric, dezvoltat mai târziu de Ptolemeu (100–168 d.Hr.), ultimul mare astronom al Antichității, care a elaborat sistemul geocentric al lumii având la bază teoria geometrică a epicicurilor ce s-a menținut în știință circa 1 500 de ani.

A doua revoluție științifică în astronomie s-a produs în secolele XVI–XVIII, când s-a făcut o serie de descoperiri fundamentale, legate de numele lui Nicolaus Copernic (sistemul heliocentric al lumii), Galileo Galilei (primele observații telescopice), Johannes Kepler (legile mișcării planetelor) și Isaac Newton (legea atracției universale).

Următoarea revoluție în astronomie este legată de marile descoperiri din secolele XIX–XX: analiza spectrală, fotografia, undele radio, razele Röntgen și gama, deplasarea spre roșu a liniilor spectrale ale galaxiilor îndepărtate, interpretată ca expansiunea Universului, descoperirea quasrilor, pulsarilor și a stelelor neutro-nice, a radiației radio cosmice de fond, care este un argument în favoarea teoriei Marii Explozii (Big Bang) ș.a. Tabloul științific al lumii s-a întemeiat pe noile teorii ale spațiului și timpului: teoria relativității restrânse și teoria relativității generalizate ale lui Einstein, care au produs o revoluție în cosmologie.

În prezent se prefigurează o nouă revoluție în cosmologie legată de materia întunecată, energia întunecată și rolul antigravitației, precum și de descoperirea în 1998 a expansiunii accelerate a Universului, care vor întregi în continuare tabloul științific al lumii.



Harta cerului înstelat

PLANȘĂ COLOR

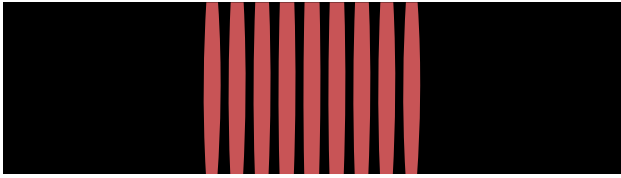


Fig. I. Interferența luminii de la două surse coerente (dispozitivul lui Young)

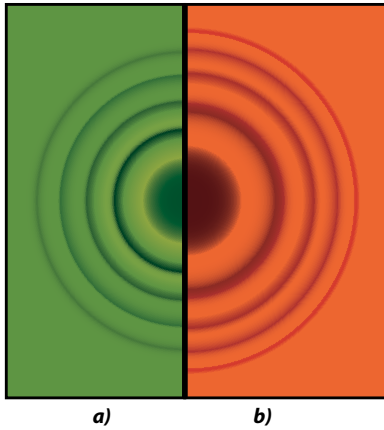


Fig. II. Inelele lui Newton în lumină reflectată: a) verde; b) roșie



Fig. III. Difracția luminii de la o fantă îngustă. Observați deosebirea tabloului de difracție de cel de interferență (fig. I): la difracție lățimea franjelor și distanța dintre ele sunt variabile, iar la interferență ambele sunt constante.

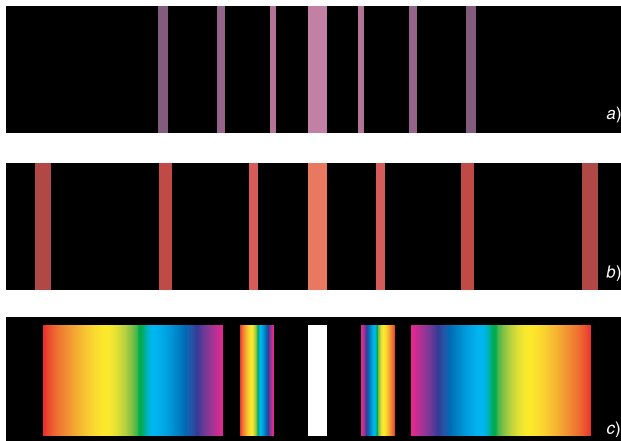


Fig. IV. Difracția luminii de la o rețea de difracție: a) în lumină violetă; b) în lumină roșie; c) în lumină albă

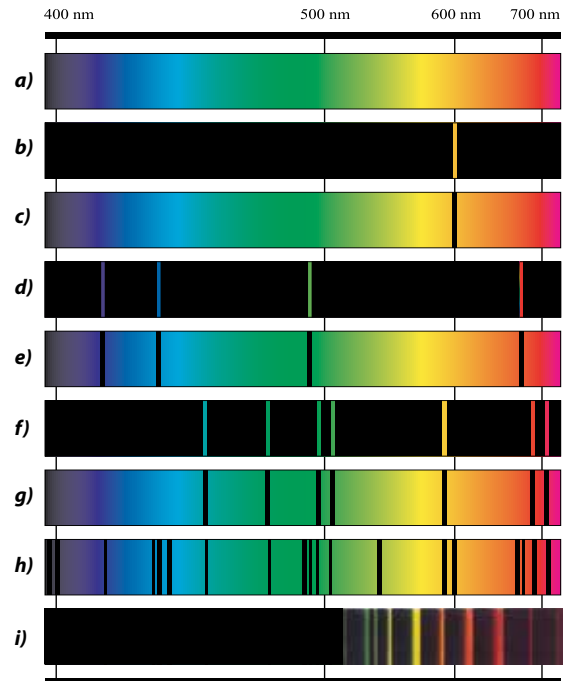


Fig. V. Spectrul de emisie continuu (a); spectrul natriului: de emisie (b), de absorbție (c); spectrul hidrogenului: de emisie (d), de absorbție (e); spectrul heliului: de emisie (f), de absorbție (g); spectrul Soarelui: de absorbție (h), de emisie (i)



Fig. VI. Planetele Sistemului Solar



Fig. VII. Planeta Marte (foto, telescopul Hubble)



Fig. VIII. Suprafața planetei Marte



Fig. IX. Planeta Jupiter



Fig. X. Sateliții galileeni ai planetei Jupiter



Fig. XI. Planeta Saturn



Fig. XII. Planeta Uranus



Fig. XIII. Planeta Neptun

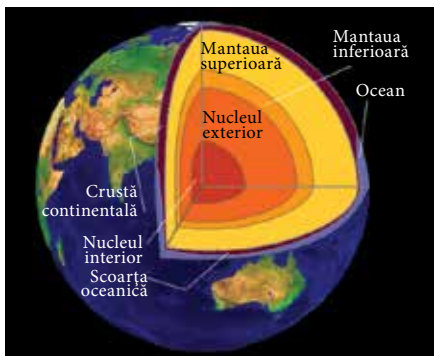


Fig. XIV. Structura Pamântului

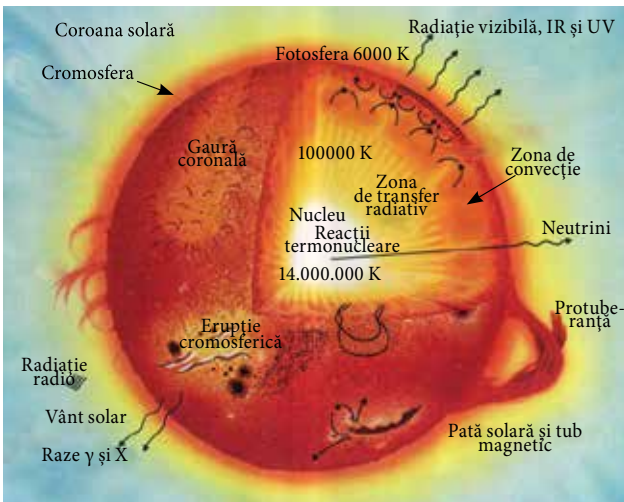


Fig. XV. Structura internă și atmosfera Soarelui



Fig. XVI. Aurora polară

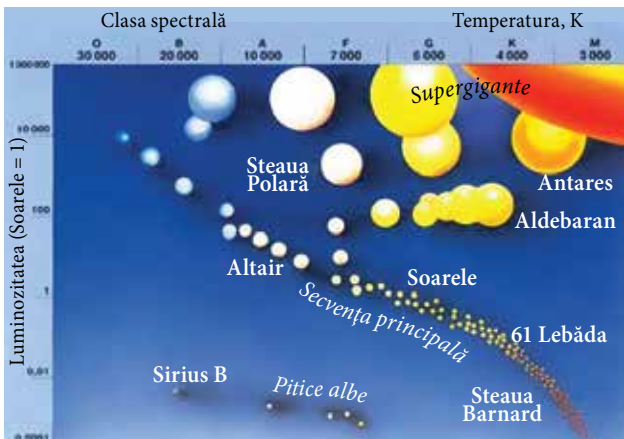


Fig. XVII. Diagrama „spectru-luminozitate” („Hertzsprung–Russell”)

TESTE DE EVALUARE SUMATIVĂ

ELECTROMAGNETISMUL

PROFIL REAL

1	Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:		
	a) Forța electromagnetică este maximă în cazul în care conductorul rectiliniu parcurs de curent electric este orientat ... liniile de inducție magnetică.		1 p.
	b) Tensiunea electromotoare de autoinducție într-un circuit este ... cu viteza de variație a intensității curentului din acest circuit. Coeficientul de proporționalitate este ... circuitului.		2 p.
2	Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A” și cu „F” dacă ea este falsă:		
	a) Sensul liniei magnetice într-un punct oarecare al câmpului este indicat de polul nord al acului magnetic ce se poate roti liber și care este plasat în locul respectiv al câmpului.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Autoinducția este fenomenul de inducție electromagnetică într-un circuit parcurs de curent continuu.	<input type="checkbox"/>	1 p.
3	Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile ce le exprimă:		
	Inducția magnetică	• N	1 p.
	Fluxul magnetic	• $A \cdot m^2$	1 p.
	Inductanța	• T	1 p.
	<i>T.e.m.</i> de inducție	• mWb	1 p.
	Forța electromagnetică	• V	1 p.
		• H	
	Itemul 4 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).		
4	Valoarea forței electromagnetice care acționează asupra unui conductor rectiliniu, parcurs de curent electric din partea câmpului magnetic omogen în care se află, este în funcție de unghiul dintre sensul curentului în conductor și cel al inducției magnetice, deoarece liniile de inducție magnetică sunt linii închise.		
	Răspuns: afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .		3 p.
5	O porțiune cu lungimea de 0,8 m a unui conductor rectiliniu, parcurs de curent electric cu intensitatea de 2,5 A, se află într-un câmp magnetic omogen a cărui inducție este egală cu 0,6 T. Determinați:		
	a) valoarea maximă a forței electromagnetice care acționează asupra conductorului;		2 p.
	b) unghiul format între conductor și vectorul inducției magnetice la care forța electromagnetice capătă o valoare de două ori mai mică decât valoarea maximă a sa.		2 p.
6	Un proton ($m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C), accelerat la o diferență de potențial de 3,34 kV, pătrunde într-un câmp magnetic omogen cu inducția de 50 mT, perpendicular pe liniile de inducție ale acestuia. Determinați:		
	a) forța ce acționează asupra protonului din partea câmpului magnetic;		4 p.
	b) raza cercului descris de proton în câmpul magnetic;		2 p.
	c) perioada de rotație a protonului pe cercul descris.		2 p.
7	La modificarea fluxului magnetic care străbate conturul unui conductor de rezistență $R = 1 \Omega$ de la 0,5 mWb până la 5 mWb, <i>t.e.m.</i> de inducție a devenit egală cu 5 V. Determinați:		
	a) timpul Δt în care se produce modificarea fluxului magnetic;		2 p.
	b) intensitatea curentului de inducție.		2 p.
8	O bobină cu inductanța de 100 mH este străbătută de un flux magnetic egal cu 40 mWb. Determinați:		
	a) energia câmpului magnetic al bobinei;		2 p.
	b) intensitatea curentului continuu prin bobină.		2 p.

PROFIL UMANIST

1	Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:		
	a) Forța electromagnetică este forța care acționează asupra ... din partea ...		1 p.
	b) Asupra particulei încărcate ce se mișcă într-un câmp magnetic acționează ... , care întotdeauna este orientată ... viteza particulei.		1 p.
2	Stabiliți (prin săgeți) corespondența dintre următoarele mărimi fizice și unitățile ce le exprimă:		

Inducția magnetică	•	• $A \cdot m^2$	1 p.
Fluxul magnetic	•	• T	1 p.
Inductanța	•	• mWb	1 p.
T.e.m. de inducție	•	• V	1 p.
		• H	
Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).			
3	Un electron care pătrunde într-un câmp magnetic va avea energie cinetică constantă, deoarece forța Lorentz nu efectuează lucru mecanic.		
Răspuns:	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .		3 p.
4	Cu ce forță acționează un câmp magnetic de inducție $B = 0,2$ T asupra unui conductor rectiliniu de lungime $l = 50$ cm, parcurs de un curent cu intensitatea de 4 A, dacă el este perpendicular pe liniile de câmp?		2 p.
5	O spiră din sârmă cu rezistența de $0,01 \Omega$, de forma unui pătrat cu latura de 10 cm, se află într-un câmp magnetic omogen de inducție $B = 10$ mT. Planul spirei formează un unghi de 30° cu liniile de inducție ale câmpului. Calculați:		
	a) fluxul magnetic prin această spiră;		3 p.
	b) sarcina totală care trece prin spiră la dispariția câmpului magnetic.		3 p.
6	Un electron cu sarcina $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C și masa $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg pătrunde într-un câmp magnetic omogen cu inducția $B = 50$ mT, având viteza $v = 5 \cdot 10^7$ m/s perpendiculară pe liniile de câmp. Determinați:		
	a) valoarea forței care acționează asupra electronului;		2 p.
	b) raza traiectoriei descrise de electron;		3 p.
	c) perioada și frecvența de rotație a electronului în câmpul magnetic.		3 p.

CURENTUL ELECTRIC ALTERNATIV. OSCILAȚII ȘI UNDE ELECTROMAGNETICE PROFIL REAL

1	Continuați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:		
	a) Intensitatea curentului și t.e.m., induse într-un cadru metalic rotitor, devin maxime când fluxul magnetic prin acesta este ...		1 p.
	b) Un circuit RLC serie în curent alternativ se află în rezonanță atunci când impedanța sa este ...		1 p.
2	Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A” și cu „F” dacă ea este falsă:		
	a) Mărirea inversă a capacității în cazul oscilațiilor electrice corespunde constantei de elasticitate în cazul celor mecanice.	<input type="checkbox"/>	1 p.
	b) Undele electromagnetice sunt unde longitudinale.	<input type="checkbox"/>	1 p.
Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).			
3	Defazajul dintre intensitatea curentului și tensiunea de alimentare a unui circuit de curent alternativ ce conține doar rezistență activă este $\pi/2$, deoarece energia consumată de rezistor se transformă în energie termică.		
Răspuns:	afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .		3 p.
4	Un condensator este conectat în serie cu o bobină de inductanță $L = \frac{1}{\pi}$ mH. Pentru ce valoare a capacității condensatorului curentul cu frecvența de 1 kHz va fi maxim?		2 p.
5	Un fascicul paralel de lumină monocromatică este incident normal pe o rețea de difracție cu perioada de $4 \mu\text{m}$. Determinați lungimea de undă a luminii folosite dacă unghiul dintre direcțiile spre cele două maxime principale de ordinul 3 din tabloul de difracție este de 60° .		
6	Un circuit RLC serie de curent alternativ este parcurs de un curent de intensitate $i(t) = 10\sqrt{2} \sin(200\pi t - \varphi)(A)$. Elementele reale ale circuitului au următorii parametri: condensatorul – capacitatea $C = \frac{500}{\pi} \mu\text{F}$ și rezistența $R_1 = 0,1 \Omega$; bobina – inductanța $L = \frac{5}{\pi}$ mH și rezistența $R_2 = 3,9 \Omega$; rezistorul – rezistența $R_3 = 8 \Omega$. Determinați:		
	a) frecvența tensiunii instantanee de la bornele circuitului;		1 p.
	b) reactanțele inductivă și capacitativă, precum și impedanța circuitului;		3 p.
	c) factorul de putere și defazajul dintre tensiune și intensitatea curentului.		2 p.

PROFIL UMANIST

1	Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:	
	a) Valorile maxime ale tensiunii și intensității curentului alternativ sunt de ... ori mai ... decât cele efective.	1 p.
	b) Constanta rețelei de difracție reprezintă ...	1 p.
2	Determinați dacă afirmația este adevărată, marcând cu „A” și cu „F” dacă ea este falsă:	
	a) Un curent cu frecvența de 60 Hz își schimbă sensul de 100 de ori în fiecare secundă.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	b) Distanța la care se propagă unda electromagnetică în timp de o perioadă este numită lungime de undă.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Transportul energiei electrice la distanțe mari se realizează la tensiuni înalte, deoarece pierderile de energie în linia de transport scad odată cu creșterea tensiunii.	
	Răspuns: afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	3 p.
4	Mihai ascultă muzică la un post de radio recepționat la frecvența de 71,57 MHz. Care este lungimea de undă a undelor emise de acest post?	
5	Pe o rețea de difracție cu lungimea de 1,5 cm și 3 000 de zgârieturi lumina monocromatică cu lungimea de undă de 550 nm este incidentă normal. Determinați:	
	a) constanta rețelei de difracție;	2 p.
	b) numărul total de maxime obținute cu această rețea.	2 p.
6	Valoarea instantanee a intensității curentului alternativ este dată de ecuația $i(t) = 4,2 \sin(100\pi t + \pi/6)$ (A). Determinați:	
	a) valoarea efectivă a intensității curentului;	2 p.
	b) faza inițială și frecvența acestui curent;	2 p.
	c) valoarea intensității curentului la momentul de timp $t_1 = 0,02$ s.	3 p.

ELEMENTE DE TEORIE A RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE ȘI DE FIZICĂ CUANTICĂ

PROFIL REAL

1	Continuați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:	
	a) În conformitate cu primul postulat al teoriei relativității restrânse (al lui Einstein), legile fizicii ...	1 p.
	b) Variația masei corpului și variația energiei lui ...	1 p.
	c) Efectul fotoelectric extern se produce numai dacă energia fotonilor incidenti ...	1 p.
2	Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A” și cu „F” dacă ea este falsă:	
	a) Viteza luminii în vid nu depinde de viteza sursei care o emite.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	b) Energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din metal de radiația incidentă pe el este proporțională cu fluxul de energie al acesteia.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Valoarea curentului fotoelectric de saturație nu depinde de fluxul de energie al radiației incidente pe catod, deoarece efectul fotoelectric se produce numai dacă frecvența radiației depășește frecvența de prag.	
	Răspuns: afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	3 p.
4	Determinați energia fotonului al cărui impuls este egal cu $1,2 \cdot 10^{-27}$ kg · m/s.	2 p.
5	Energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din metal este egală cu $2,875 \cdot 10^{-19}$ J, dacă frecvența radiației electromagnetice incidente pe metal este egală cu $1,4 \cdot 10^{15}$ Hz. Să se determine:	
	a) lucrul de extracție pentru acest metal;	3 p.
	b) energia cinetică maximă a fotoelectronilor extrași din acest metal de radiația electromagnetică a cărei frecvență este egală cu $1,8 \cdot 10^{15}$ Hz.	3p.

ELEMENTE DE FIZICĂ A ATOMULUI ȘI A NUCLEULUI

PROFIL REAL

1	Continuați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:	
	a) Energia de legătură pe un nucleon este egală cu ...	1 p.
	b) Prin dezintegrare α elementul radioactiv se transformă într-un element situat în tabelul periodic al elementelor ...	1 p.
2	Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A” și cu „F” dacă ea este falsă:	
	a) La suprapunerea spectrului de emisie pe cel de absorbție al aceluiași gaz se obține un spectru continuu.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	b) Numărul de electroni din atomul ionizat este egal cu numărul de sarcini pozitive ale nucleului.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	c) Nucleul izotopului rubidiului ${}^{90}_{37}\text{Rb}$ conține cu 17 protoni mai mulți decât neutroni.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	
3	Între protonii din componența nucleului acționează forțe de respingere electrică, însă ei cu neutronii nu se împrăștie, ci se mențin împreună, deoarece în jurul nucleului se mișcă electroni purtători de sarcină electrică negativă.	
	Răspuns: afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	3 p.
4	Să se determine frecvența fotonului emis de atomul de hidrogen la tranziția electronului din starea cu energia de $(-1,51)$ eV în cea cu energia egală cu $(-3,39)$ eV.	3 p.
5	În urma unui lanț de transformări radioactive izotopul de toriu ${}^{232}_{90}\text{Th}$ se transformă în izotopul de plumb ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Determinați:	
	a) numărul de dezintegrări α din acest lanț ...;	2 p.
	b) numărul de dezintegrări β ...	3 p.
6	Izotopul de uraniu ${}^{235}_{92}\text{U}$ absorbind un neutron lent fisionează în două fragmente și doi neutroni.	
	a) Știind că un fragment este izotopul ${}^{95}_{38}\text{Sr}$, determinați numărul de ordine și numărul de masă al fragmentului al doilea.	3 p.
	b) Calculați defectul de masă (în u) pentru izotopul de uraniu ${}^{235}_{92}\text{U}$, știind că masa atomului de acest izotop este egală cu 235,04393 u, masa atomului de hidrogen ${}^1_1\text{H}$ este egală cu 1,00782 u și a neutronului – cu 1,00866 u.	3 p.

ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ, DE FIZICĂ A ATOMULUI ȘI A NUCLEULUI

PROFIL UMANIST

1	Completați următoarele afirmații astfel ca ele să fie adevărate:	
	a) Electronii sunt extrași din metal numai dacă frecvența luminii incidente nu este mai ... decât cea de prag.	1 p.
	b) În centrul atomului se află ... în care este concentrată practic toată masa atomului și care este încărcat cu sarcină electrică ...	1 p.
	c) La emisia particulelor β elementul radioactiv se transformă într-un element situat în tabelul periodic al elementelor în căsuța ...	1 p.
2	Determinați dacă afirmația este adevărată marcând cu „A” și cu „F” dacă ea este falsă:	
	a) Lucrul de extracție a electronului din metal depinde de natura metalului și nu depinde de lungimea de undă a luminii incidente.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	b) Izotopii sunt atomii aceluiași element chimic, dar nucleele lor conțin aceleași numere de neutroni la numere diferite de protoni.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	c) La dezintegrarea α numărul de masă A se micșorează cu 2, iar Z se micșorează cu 4.	<input type="checkbox"/> 1 p.
	Itemul 3 este alcătuit din două afirmații legate între ele prin conjuncția deoarece . Stabiliți dacă afirmațiile sunt adevărate (scriind A) sau false (scriind F) și dacă între ele există relația cauză–efect (scriind da sau nu).	

3	Energia cinetică a fotoelectronilor nu depinde de lungimea de undă a luminii incidente, deoarece lucrul de extracție a fotoelectronilor depinde de natura substanței fotocatodului.	
	Răspuns: afirmația 1 – <input type="checkbox"/> ; afirmația 2 – <input type="checkbox"/> ; relația cauză–efect – <input type="checkbox"/> .	3 p.
4	Să se determine energia fotonului ce corespunde luminii galbene cu lungimea de undă de 560 nm.	2 p.
5	Un atom a trecut dintr-o stare cu energia de $-5,42 \cdot 10^{-19}$ J în alta cu energia de $-0,87 \cdot 10^{-19}$ J. Determinați:	
	a) a fost emis sau absorbit fotonul respectiv;	3 p.
	b) energia acestui foton.	3 p.
6	Determinați numărul atomic Z și cel de masă A pentru:	
	a) nucleul-țintă X din reacția nucleară $X + {}^1_1p \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$;	2 p.
	b) nucleul Y ce rezultă din reacția nucleară ${}^{55}_{25}\text{Mn} + {}^1_1p \rightarrow Y + {}^1_0n$.	2 p.

RĂSPUNSURI LA PROBLEME

Capitolul 1. Electromagnetismul

- pag. 9 **4.** 0,1 T; **5.** 0,72 N; **6.** 0,36 N; **7.** În funcție de sensul curentului prin conductor forța electromagnetică se adună la cea de greutate sau se scade din ea; respectiv, tensiunea fiecărui fir este egală cu 0,055 N și cu 0,025 N.
- pag. 11 **4.** $3,2 \cdot 10^{-14}$ N; $2,77 \cdot 10^{-14}$ N; **5.** $5,3 \cdot 10^{16}$ m/s².
- pag. 13 **4.** 2,5 mT; **5.** 1,25 m.
- pag. 20 **7.** 3 mWb; **8.** 1 mC; **9.** 45,4 μC.
- pag. 22 **5.** 100 V.
- pag. 23 **3.** 10 mJ; **4.** a) 0,5 A; b) 4 mWb.

Capitolul 2. Curentul electric alternativ

- pag. 26 **6.** 100 de ori.
- pag. 27 **3.** ≈ 311 V; **4.** 2 A; 1,41 A.
- pag. 35 **15.** 20 mA; 28,3 mA; **16.** 6,28 Ω; **17.** 16 Hz; **18.** 18 Ω; 47,6 mH; 0,97 rad; **19.** 13,3 μF; -0,93 rad; 150 V; **20.** 1,92 A.
- pag. 38 **8.** a) 20 Ω; b) 6 A; c) 0,8; d) 576 W; 432 VAR; 720 VA; **9.** a) 12 Ω; b) $12\sqrt{3}$ Ω; c) 3,6 kW; 2,08 kVAR; 4,16 kVA.
- pag. 41 **9.** 0,2; 5 000; **10.** 3,6 A; **11.** 4,75 A.

Capitolul 3. Oscilații și unde electromagnetice

- pag. 45 **8.** 40 μF; **9.** Se micșorează de 4 ori; **10.** 1,97 mm.
- pag. 48 **6.** 1 884 m.
- pag. 59 **12.** 0,6 μm; **13.** 1,2 μm.
- pag. 63 **9.** 4,8 μm, 61°; **10.** 100 fante/mm.
- pag. 68 **8.** 48,7°.

Capitolul 4. Elemente de teorie a relativității restrânse

- pag. 75 **5.** 20 cm; **6.** În direcția diagonalei mai lungi cu viteza $u = 0,8 c$.
- pag. 76 **1.** $x = 7,8 \cdot 10^4$ m; $y = 2 \cdot 10^4$ m; $z = 0$; $t = 2,5 \cdot 10^{-4}$ s; **2.** a) 0,97 c; b) 1,5 c.
- pag. 78 **6.** $4,5 \cdot 10^6$ kg = 4 500 tone; **7.** $2,68 \cdot 10^5$ kg = 268 tone; **8.** $2\sqrt{2} c/3$.

Capitolul 5. Elemente de fizică cuantică

- pag. 81 **4.** Corpul negru; **5.** Trandafir vizibil pe cană neagră; **7.** $2,87 \cdot 10^{-19}$ J; **8.** $2,5 \cdot 10^{13}$ Hz.
- pag. 86 **5.** $3,61 \cdot 10^{-19}$ J = 2,26 eV; **6.** $9,5 \cdot 10^{-28}$ kg · m/s; roșie; **7.** 289 nm; **8.** $6,6 \cdot 10^{-20}$ J = 0,41 eV; **9.** $3,85 \cdot 10^3$ m/s.
- pag. 90 **5.** ≈ $7,3 \cdot 10^{-11}$ m; **6.** Se micșorează de 2 ori.

Capitolul 6. Elemente de fizică a atomului

- pag. 99 **10.** $4,56 \cdot 10^{14}$ Hz; $0,658 \cdot 10^{-6}$ m; **11.** $6,17 \cdot 10^{14}$ Hz; $0,486 \cdot 10^{-6}$ m.

Capitolul 7. Elemente de fizică a nucleului atomic. Particule elementare

- pag. 104 **5.** $6,5 \cdot 10^{-15}$ m; **6.** 90 de protoni, 142 de neutroni.
- pag. 106 **7.** 0,11236 u; **8.** 37,60 MeV; **9.** 0,58539 u; **10.** a) ${}^{238}_{92}\text{U}$; b) 980 MeV; c) 1,9 u; d) 196 u.
- pag. 110 **5.** 84; 218; **12.** 8 zile; **13.** 87,5%; **14.** A 8-a parte.
- pag. 114 **1.** Particula α; **2.** Izotopul mercurului ${}^{198}_{80}\text{Hg}$; **3.** Izotopul carbonului ${}^{13}_6\text{C}$; **4.** Protonul; **6.** 2,785 MeV.

Capitolul 8. Elemente de astronomie

- pag. 130 **1.** 42°55'; 66°21'; 19°29'; **2.** $1^{\text{h}}54^{\text{m}}37^{\text{s}}$; **3.** 42°55'; **4.** 66°57'; **5.** S-W; **6.** La poli; **8.** Echinocțiu; **9.** $8^{\text{h}}34^{\text{m}}19^{\text{s}}$; **10.** Racul, 5 august.
- pag. 133 **1.** Da/nu; nu/da; **2.** 389,2; **3.** Distanțele Pământ–Lună, Pământ–Soare; **4.** Luna la apogeu; **5.** De la W spre E, N-E, S-E; **6.** Egală cu durata eclipsei de Lună pe Pământ; **8.** $\phi = 0,2-0,5$; **9.** Pământul în faza plină $\phi = 1$; **10.** Oricare, cu excepția Pământului.
- pag. 135 **1.** $\phi = 43^{\circ}08'$; $\lambda = 1^{\text{h}}06^{\text{m}}$; **2.** 16 februarie 2011; **3.** La 4 august, ora $10^{\text{h}}32^{\text{m}}$ (ora Europei Centrale); **4.** Nu; da.
- pag. 139 **1.** Seara la Vest, iar dimineața – la Est; **2.** Mercur: $t \leq 1^{\text{h}}$ la $h \leq 15^{\circ}$ de la orizont; Venus: $t \leq 3^{\text{h}}$ la $h \leq 40^{\circ}$ de la orizont; **3.** Venus – planetă interioară; **4.** $t^{\circ} \sim 500$ °C; **7.** Axa înclinată cu 98°; **8.** Calculul perturbațiilor planetei Uranus.
- pag. 141 **1.** Nu; **2.** Asteroizii se deplasează față de stele; **3.** Catalogați 18 000, ~ $4 \cdot 10^{21}$ kg.
- pag. 145 **1.** Principiul dinamului în rotația axială a Pământului; **2.** Ionizarea atmosferei. Intensitatea erupțiilor solare; **3.** Nu vor exista; **4.** Perioada de rotație a Lunii în jurul axei sale este egală cu perioada ei de revoluție în jurul Pământului; **5.** Lumina solară reflectată de Pământ, iluminând suprafața Lunii, este percepută ca o lumină cenușie pe Lună; **6.** Lipsa atmosferei pe Lună.
- pag. 147 **1.** Superioară; **2.** Nu; **3.** Balanța; **4.** Da.
- pag. 149 **1.** 224, 7 zile; **2.** 2,36.
- pag. 152 **1.** Da, din cauza difuziei luminii în atmosfera terestră; **2.** 13,4.