

MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII ȘI TINERETULUI

Fizică

F1+F2

Manual pentru clasa a XII-a

Octavian Rusu

Constantin Trăistaru

Livia Dinică

Marius Nistor



MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII ȘI TINERETULUI

Fizică

F1 + F2

Manual pentru clasa a XII-a

Octavian Rusu

Constantin Trăistaru

Livia Dinică

Marius Nistor



Manualul a fost aprobat prin O.MEdCT nr. 1262/42 din 6.06.2007, în urma evaluării calitative și este realizat în conformitate cu programa analitică aprobată prin Ordin al ministrului educației și cercetării nr. 5959 din 22. 12. 2006.

Date despre autori:

OCTAVIAN RUSU, profesor gradul I la Colegiul Național „Sfântul Sava” din București, autor și coautor de manuale școlare pentru clasele IX-XII și de auxiliare pentru liceu și pentru examenul de bacalaureat, coautor de soft educațional.

CONSTANTIN TRĂISTARU, profesor gradul I la Colegiul Național „Sfântul Sava” din București, autor și coautor de auxiliare pentru liceu și pentru examenul de bacalaureat.

LIVIA DINICĂ, profesor gradul I la Colegiul Tehnic de Telecomunicații „Gheorghe Airinei” din București, autor de manuale școlare pentru liceu, autor și coautor de auxiliare școlare pentru clasele IX-XII și pentru examenul de bacalaureat.

MARIUS NISTOR, profesor gradul I la Liceul Teoretic „Nicolae Iorga” din București, coautor de auxiliare școlare pentru învățământul preuniversitar.

Referenți:

Prof. univ. dr. **Emil Ștefan Barna**, Facultatea de Fizică, Universitatea București

Prof. univ. dr. **Lucian Georgescu**, Facultatea de Fizică, Universitatea București

Redactor: **Rodica Mihalache**

Tehnoredactare computerizată: **Radu Dobreci**

Coperta: **Valeria Moldovan**

GRUPUL EDITORIAL CORINT

Departamentul de vânzări:

Str. Mihai Eminescu nr. 54 A, sector 1, București, cod poștal 010517

Tel./fax: 021.319.47.97; 021.319.48.20

Depozit:

Calea Plevnei nr. 145, sector 6, cod poștal 060012, București

Tel.: 021.310.15,30

E-mail: vanzari@edituracorint.ro

Magazin virtual: www.grupulcorint.ro

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

Fizică: F1+ F2: manual pentru clasa a XII-a / Rusu Octavian,

Trăistaru Constantin, Dinică Livia, Nistor Marius.

– București: Corint, 2007

Bibliogr.

ISBN 978-973-135-091-2

I. Rusu, Octavian

II. Trăistaru, Constantin

III. Dinică, Livia

IV. Nistor, Marius

53(075.35)

ISBN: 978-973-135-091-2

Toate drepturile asupra acestei lucrări sunt rezervate Editurii CORINT,
parte componentă a GRUPULUI EDITORIAL CORINT.

CUPRINS

<i>Prefață</i>	5
----------------------	---

Capitolul 1. Teoria relativității restrânse.....7

1.1. Bazele teoriei relativității restrânse	8
1.1.1. Relativitatea clasică	8
1.1.2. Experimentul lui Michelson	10
1.2. Postulatele teoriei relativității restrânse. Transformări Lorentz. Consecințe	13
1.3. Elemente de cinematică și dinamică relativistă	20
1.3.1. Compunerea relativistă a vitezelor ($*F_2$)	20
1.3.2. Principiul fundamental al dinamicii ($*F_2$)	22
1.3.3. Relația masă-energie	23
1.4. Probleme și teste propuse	25
1.4.1. Probleme cu grad scăzut de dificultate	25
1.4.2. Probleme cu grad mediu de dificultate	26
1.4.3. Test pentru evaluare	27

Capitolul 2. Elemente de fizică cuantică 29

2.1. Efectul fotoelectric extern	30
2.1.1. Legile efectului fotoelectric extern	30
2.1.2. Ipoteza lui Planck. Ipoteza și ecuația lui Einstein	31
2.1.3. Interpretarea legilor efectului fotoelectric extern	32
2.2. Efectul Compton*	34
2.3. Ipoteza de Broglie. Difracția electronilor ($*F_2$). Aplicații ($*F_2$)	36
2.4. Dualismul undă-corpusul ($*F_2$)	39
2.5. Probleme și teste propuse	42
2.5.1. *Probleme recapitulative rezolvate	42
2.5.2. Probleme cu grad scăzut de dificultate	42
2.5.3. Probleme cu grad mediu de dificultate	44
2.5.4. Test pentru evaluare	45

Capitolul 3. Fizica atomică..... 47

3.1. Spectre	48
3.2. Experimentul Rutherford. Modelul planetar al atomului	52
3.3. Experimentul Franck-Hertz	54
3.4. Modelul Bohr	56
3.5. *Atomul cu mai mulți electroni	60

3.6. Radiațiile X	65
3.7. *Efectul laser	68
3.8. Probleme și teste propuse	73
3.8.1. Probleme cu grad scăzut de dificultate	73
3.8.2. Probleme cu grad mediu de dificultate	78
3.8.3. Test pentru evaluare	80
Capitolul 4. Semiconductoare. Aplicații în electronică	81
4.1. Conducția electrică în metale și semiconductori. Semiconductori intrinseci și extrinseci	82
4.2. Dioda semiconductoare. redresarea curentului alternativ	84
4.3. *Tranzistorul cu efect de câmp. Aplicații	92
4.4. *Circuite integrate	98
4.5. Probleme și teste propuse	102
4.5.1. *Probleme rezolvate	102
4.5.2. Probleme cu grad mediu de dificultate	103
4.5.3. Test pentru evaluare	104
Capitolul 5. Fizica nucleară	105
5.1. Proprietăți generale ale nucleului	106
5.2. Energia de legătură a nucleului. Stabilitatea nucleului (*F ₂)	108
5.3. Radioactivitatea. Legile dezintegrării radioactive	111
5.4. Interacțiunea radiațiilor nucleare cu substanța. Detecția radiațiilor nucleare. Dozimetrie	115
5.5. Fiziunea nucleară. Reactorul nuclear	120
5.6. Fuziunea nucleară	124
5.7. *Acceleratoare de particule	126
5.8. *Particule elementare	128
5.9. Probleme și teste propuse	140
5.9.1. Probleme cu grad scăzut de dificultate	140
5.9.2. Probleme cu grad mediu de dificultate	141
5.9.3. Test pentru evaluare cu grad scăzut de dificultate	146
5.9.4. *Test recapitulativ cu grad mediu de dificultate	147
Constante importante	151
Mărimi fizice fundamentale și derivate	151
Bibliografie	152

PREFAȚĂ

Acest manual pentru clasa a XII-a este optim structurat, cu nivel de dificultate relativ scăzut, respectă riguros, integral și uniform ansamblul de conținuturi și competențe specifice impuse de programa în vigoare, realizând o excelentă corelare cu sarcinile de învățare la toate capitolele.

Deoarece manualul se adresează atât elevilor de la profilul F1, cât și celor de la profilul F2, au fost marcate cu linie verticală roșie, plasată lateral, toate secvențele care trebuie studiate numai de elevii de la profilul F2, urmând ca cei de la F1 să-l studieze integral.

Conținuturile marcate cu asterisc (*) sunt suplimentare (curriculumul diferențiat pe profiluri) sau facultative* (a căror parcurgere este decisă de profesor în funcție de nivelul și nevoile elevilor, în cadrul orelor alocate în curriculumul la decizia școlii). Lecturile* și extinderile* opționale se referă la personalități din istoria fizicii, la aplicații sau la noutăți științifice. Manualul stimulează bunul simț științific, imaginația, inventivitatea, elevul devenind astfel, partener în procesul învățării interactive și în cultivarea valorilor și a atitudinilor prevăzute de programă.

Adresându-se elevilor de nivel mediu, conținuturile prezintă o creștere progresivă a dificultății și sunt ușor accesibile, iar definițiile, explicațiile și demonstrațiile – clare și corecte. Modelările grafice și galeriile de fotografii bine echilibrate în raport cu textul, poziționate în imediata apropiere a informațiilor la care se referă, fac trimiteri la fenomenele analizate sau amintite în text, sprijină înțelegerea conținuturilor, sunt suficiente ca număr. Stilul de redactare este atrăgător, titlurile și subtitlurile – ușor de reperat; paginile și capitolele sunt numerotate vizibil, iar ideile principale – bine marcate. Definițiile, noțiunile noi și simbolurile mărimilor fizice sunt scrise cu caractere diferite, pentru a se fixa mai bine în memoria vizuală și a veni în sprijinul elevilor cu ritmuri proprii de învățare mai lente.

Reflectând o bogată experiență didactică și de autor de carte școlară, manualul este elaborat într-o manieră modernă, aliniată standardelor Reformei în învățământ și asigurării cadrului de creștere a calității în învățare; manualul folosește metode atractive și eficiente (scheme și modelări grafice pe calculator, analogii, demonstrații teoretice sau experimentale simple, dar intuitive și reveniri asupra noțiunilor dificile).

Acest manual permite profesorilor particularizarea sarcinilor de învățare asociate fiecărui conținut, spre a asigura elevilor progresul școlar.

Informarea elevilor privind descoperirile din fizică cu aplicațiile lor, într-o foarte bună corelare cu sarcinile de învățare, se realizează printr-o gamă largă de instrumente de interacțiune cu aceștia: observații, lecturi, experimente, aplicații, tabele, scheme, exemple concludente, tipuri de probleme rezolvate bine alese și numeric suficiente.

La fiecare capitol există un număr satisfăcător de probleme propuse, cu un grad mic de dificultate pentru **F2** și grad mediu de dificultate pentru **F1**, într-o creștere progresivă. Alegerea lor o face profesorul. La finalul fiecărui capitol există teste de autoevaluare diferite (fixare, recapitulare) cu dificultate gradată pentru stimularea activității individuale.

Experiența, bibliografia folosită și colaborarea autorilor cu profesorii universitari de la Facultatea de Fizică – Universitatea București și departamentul de fizică al Universității Politehnica din București sunt evidente în respectarea conținutului științific și a terminologiei corecte.

Din rapoartele de evaluare ale referenților științifici reiese că manualul este pe cât de accesibil și atrăgător, pe atât de adecvat ca și conținut vârstei elevilor în prag de absolvire și bacalaureat. Abordarea fenomenelor fizice prin exemple sugestive, destul de cunoscute elevilor, dezvoltă gândirea critică și creativitatea tehnică.

Experimentele descrise susțin procesul de învățare eficientă, sunt opționale datorită constrângerilor legate de dotarea laboratorului școlar și de numărul de ore insuficient pentru realizarea lor, dar nu îngreunează libertatea profesorului de a alege alternative.

Considerăm realizat echilibrul optim între: accesibilitate, analiză corectă cu limbaj științific adecvat, rigurozitate științifică, exemple concludente și informare a elevilor privind descoperirile din fizică cu aplicațiile lor tehnico-științifice. A fost utilizată o gamă largă de segmente – observații, lecturi, experimente, aplicații, tabele, scheme, probleme rezolvate, probleme propuse cu răspunsuri multiple, teste de recunoaștere a afirmațiilor adevărate și false, exerciții de completare a blaturilor cu termenii corecți într-un text dat, mărimi și unități, teste de autoevaluare.

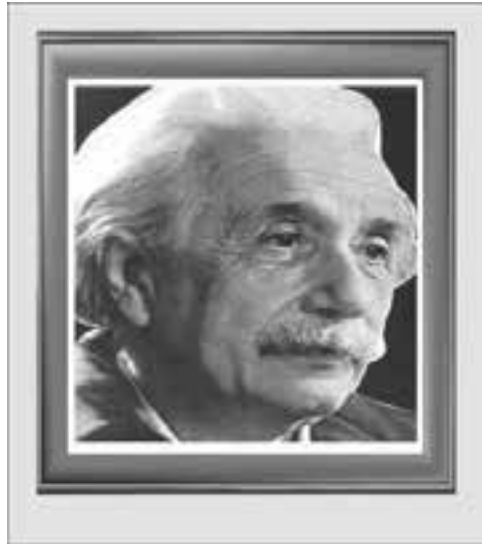
Proiectele de portofoliu cu tema „Contribuția laureaților premiului Nobel la dezvoltarea fizicii moderne”, indicate cu sigla , reprezintă un instrument complex de evaluare a capacității de analiză a elevilor pe parcursul anului școlar. Lecturile și extinderile conțin informații obținute din rețeaua Internet, documentare TV, cărți, reviste, enciclopedii etc.

Toate acestea stimulează activitatea individuală și în echipă.

Vă dorim mult succes cu acest manual!

Autorii

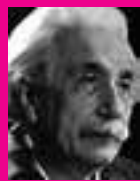
TEORIA RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE



Albert Einstein (1879-1955) a obținut în anul 1921 premiul Nobel pentru serviciile aduse fizicii teoretice. În anul 1905, el a publicat explicația legilor experimentale ale efectului fotoelectric (descoperit în 1887 de H. Hertz) și teoria relativității restrânse. În lucrarea „Asupra electrodinamicii corpurilor în mișcare”, Einstein afirmă că: „Experiențele întreprinse pentru a demonstra mișcarea Pământului în raport cu «mediul eter» în care se propagă lumina și ale căror rezultate au fost negative fac să se nască presupunerea că nu numai în mecanică nici o proprietate a fenomenelor nu corespunde noțiunii de mișcare absolută, ci și în electrodinamică. În toate sistemele inerțiale, pentru care ecuațiile mecanicii rămân valabile, legile electrodinamicii și opticii păstrează aceeași formă, ceea ce s-a demonstrat. Noi vrem să ridicăm această presupunere la rangul de postulat.” În teoria relativității restrânse, care se referă la fenomenele mecanice și electromagnetice din sistemele de referință inerțiale, spațiul și timpul sunt două entități ce nu pot fi separate. Teoria relativității einsteiniene este valabilă pentru corpurile și sistemele inerțiale relativiste (care au viteze relative de deplasare comparabile cu viteza c a luminii în vid) sau nerelativiste.

Descoperirea radioactivității pusese în evidență că și în cea mai mică particulă de substanță există energie. Celebra ecuație a lui Einstein $E = mc^2$ susține că o cantitate infimă de masă de substanță corespunde unei enorme cantități de energie. Teoria relativității restrânse a fost confirmată în numeroase procese fizice.

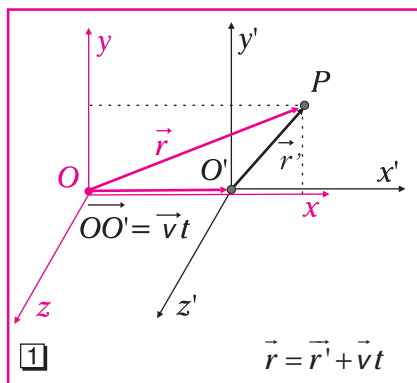
după Roger Penrose, *Mintea și legile fizicii*



1.1. BAZELE TEORIEI RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE

„Dacă privim mișcarea unui tren, atunci o raportăm la suprafața Pământului, pe care o admitem în repaos. Când trenul se oprește la o stație, el se află în repaos în raport cu gara sau în raport cu Pământul. Dar fiindcă Pământul însuși se învâртеște împrejurul axei sale și înănteează totodată în calea lui împrejurul Soarelui, repaosul trenului nu este un repaos real sau absolut, ci numai un repaos relativ la Pământ.”

M. Eminescu



Viteza $\vec{u}$, de deplasare a punctului material P față de sistemul de referință inerțial S cu axele xyz , reprezintă suma vectorială a vitezei $\vec{u}'$ de deplasare a punctului material P față de sistemul de referință inerțial S' cu axele $x'y'z'$ și a vitezei $\vec{v}$ de deplasare relativă (de transport) a sistemului S' față de sistemul S :

$$\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}.$$

1.1.1. Relativitatea clasică

Relativitatea clasică se referă la fenomene mecanice raportate la sisteme de referință inerțiale, care se mișcă uniform. Sistemele de referință neinerțiale se mișcă accelerat.

Poziția unui punct material, viteza și traiectoria acestuia sunt relative, deoarece depind de sistemul de referință (referențialul) ales. Noi nu simțim că ne mișcăm în spațiu cu viteza Pământului, $v_p \approx 30$ km/s. Dacă un sistem de referință inerțial S' se deplasează, față de sistemul de referință inerțial S , cu viteza v pe direcția axei Ox și considerăm că originile O și O' ale celor două sisteme coincid la momentul $t = t' = 0$, atunci între coordonatele unui punct raportat la aceste sisteme de referință inerțiale, ca în figura [1], sunt valabile transformările lui Galilei:

$$\begin{cases} x = x' + vt'; \\ y = y'; z = z'; \\ t = t' \end{cases} \text{ și, respectiv, } \begin{cases} x' = x - vt; \\ y' = y; z' = z; \\ t' = t. \end{cases}$$

Din transformările lui Galilei obținem legea compunerii vitezelor pentru mișcările din mecanica newtoniană (clasică):

$$u_x = u'_x + v; u_y = u'_y; u_z = u'_z,$$

$$\text{unde } u_x = \frac{dx}{dt} \text{ și } u'_x = \frac{dx'}{dt'} \text{ și analog celelalte.}$$

În conformitate cu principiul relativității din mecanica clasică, toate sistemele de referință inerțiale sunt echivalente în raport cu legile mecanicii.

Propagarea luminii se face din aproape în aproape, cu viteză finită, analog cu propagarea unei unde elastice. Undele elastice nu se propagă în vid, neavând suport material, dar lumina se propagă cu viteza c , mai mare decât în alte medii. Fizicienii de la sfârșitul secolului al XIX-lea au considerat, prin analogie cu mediul elastic prin care se propagă undele elastice, un mediu ipotetic, numit eter, care există peste tot în spațiu și prin care se propagă undele electromagnetice.

Dacă viteza luminii are o valoare față de mediul eter, considerat ca sistem de referință absolut, atunci față de Pământ, care se deplasează cu viteza $v_p = 30 \text{ km/s}$ în raport cu eterul, viteza luminii se obține cu legea de compunere a vitezelor? Experimentele concepute pe această ipoteză au avut un rezultat negativ, deci eterul nu există.



Experimentul fizicianului francez Fizeau a infirmat ipoteza eterului universal antrenat de un mediu optic în mișcare, făcută de Hertz.

Un fascicul de lumină provenit de la sursa S este divizat de oglinda semitransparentă O_1 :

- o parte din fascicul (1) se propagă în sens opus vitezei v de curgere a lichidului din tub,
- cealaltă parte din fascicul (2) se propagă în sensul vitezei de curgere a lichidului, până când întâlnesc din nou oglinda semitransparentă, pe care se reflectă și, respectiv, o traversează, iar apoi interferează (fig. [2]).

Undele sunt coerente deoarece provin de la aceeași sursă.

Viteza de propagare a luminii în raport cu lichidul este $c_1 = c/n$.

Dacă eterul din lichidul cu indicele de refracție n este total antrenat de lichid, atunci între undele luminoase care se propagă în sensul curgerii lichidului și cele care se propagă în sens contrar apare o diferență de timp și nu sosesc în fază în câmpul franjelor de interferență:

$$\Delta t = \frac{2l}{c_1 - v} - \frac{2l}{c_1 + v} = \frac{4lv}{c_1^2 - v^2} \approx \frac{4lv}{c_1^2},$$

deoarece $v \ll \frac{c}{n}$.

Rezultă diferența de fază corespunzătoare:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \approx 2\pi \frac{4lv n^2}{c^2 T} = 2\pi \frac{4lv n^2}{c\lambda},$$

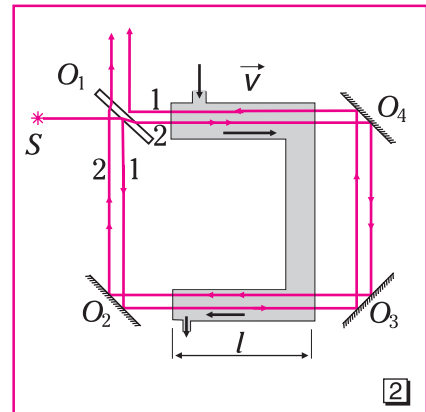
unde $l = cT$.

Pe figura de interferență, s-a constatat că franjele nu s-au deplasat față de situația când lichidul nu mai curge.

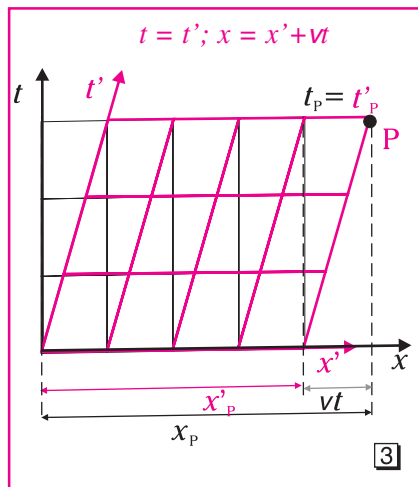
Ipoteza eterului și regula clasică de compunere a vitezelor în cazul luminii nu au fost confirmate, deoarece Fizeau nu a observat deplasarea prevăzută teoretic.

„ Prin intermediul experimentului omul de știință creează informație și apoi interpretează în conformitate cu ideile sale tot ce recepționează. Cunoașterea este un proces la care participă imaginația omenească și lumea exterioară.”

Ernest Hutten, *Ideile fundamentale în fizică*



Obs Ipoteza eterului și regula clasică de compunere a vitezelor în cazul luminii nu au fost confirmate, deoarece Fizeau nu a observat deplasarea prevăzută teoretic.



În relativitatea clasică, intervalul de timp dintre două evenimente și simultaneitatea a două evenimente care se desfășoară în două puncte diferite nu depinde de referențialul ales, deoarece

$$t = t'.$$



Albert Michelson – premiul Nobel (1907) pentru instrumentele sale optice de precizie și pentru cercetările metrologice efectuate cu ajutorul lor.

În figura 3, valorile noilor sau vechilor coordonate, ale unui eveniment, sunt date de transformările Galilei:

$$\begin{aligned} t &= t'; \\ x &= x' + vt \end{aligned}$$

și pot fi citite prin desenarea unor axe care intersectează sistemul de coordonate.

Ipoteza lui Lorentz admitea existența eterului imobil ca sistem de referință absolut, deci suport al undelor electromagnetice. Această ipoteză fost infirmată printr-un experiment efectuat de Albert Michelson (1881).

Presupunând că Pământul se mișcă în jurul Soarelui printr-un „ocean de eter” imobil, față de care lumina se propagă cu viteza $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, atunci viteza luminii față de un observator terestru este obținută cu legea compunerii vitezelor?

1.1.2. Experimentul lui Michelson

În interferometrul Michelson, un fascicul monocromatic de lumină provenit de la sursa S trece printr-o fantă îngustă și ajunge la o lamă cu fețe plane și paralele (fig. 4). Această lamă are o față semitransparentă și divizează fasciculul de lumină: o parte din acesta străbate lama, se reflectă pe oglinda plană O_1 , ajunge pe lamă și se reflectă către ochiul observatorului; cealaltă parte a fasciculului se reflectă pe lamă, ajunge pe oglinda plană O_2 , se reflectă înapoi și străbate lama către ochiul observatorului.

Brațele interferometrului între lamă și oglinzile O_1 și, respectiv, O_2 sunt riguros egale, de lungime L .

În calea unui fascicul se introduce o lamă compensatoare a drumului optic, perfect transparentă și cu aceeași grosime ca lama semitransparentă, pentru ca fiecare fascicul să străbată de trei ori grosimea unei lame.

Interferometrul a fost montat pe un bloc rigid din piatră care se putea roti într-o cadă cu mercur.

Cele două fascicule de lumină sunt coerente și interferă. Franjele pot fi analizate de observator printr-o lunetă.

Experimental nu s-a observat deplasarea prognozată, cu legea compunerii vitezelor, a franjelor de interferență.

* Fig. 3 după Hans Ohanian, Physics, Union College and Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 1985.

Analiza și implicațiile experimentului

În experimentul lui Michelson, reluat de Morley, un braț al interferometrului coincide cu direcția de deplasare a Pământului în raport cu eterul imobil.

Datorită mișcării relative a Pământului cu viteza relativă $v_p \approx 30 \text{ km/s}$ față de eter, pe Pământ ar trebui să apară un „vânt de eter” cu aceeași viteză, dar orientată în sens opus mișcării de revoluție.

Din legea compunerii vitezelor:

$$\begin{aligned}\vec{c}_{\text{lumină} \rightarrow \text{eter}} &= \vec{u}'_{\text{lumină} \rightarrow \text{Pământ}} + \vec{v}_{\text{Pământ} \rightarrow \text{eter}} = \\ &= \vec{u}'_{\text{lumină} \rightarrow \text{Pământ}} - \vec{v}_{\text{eter} \rightarrow \text{Pământ}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \vec{u}'_{\text{lumină} \rightarrow \text{Pământ}} &= \vec{c}_{\text{lumină} \rightarrow \text{eter}} + \vec{v}_{\text{eter} \rightarrow \text{Pământ}}.\end{aligned}$$

Cele două trenuri de unde se propagă dus-întors de-a lungul brațelor interferometrului în intervale de timp diferite t_1 și t_2 , deci nu sosesc în fază în câmpul franjelor de interferență (fig. 4).

Dacă se rotește interferometrul cu 90° , atunci diferența de fază între cele două trenuri de unde trebuie să se schimbe, deci și franjele din figura de interferență ar fi logic să se schimbe.

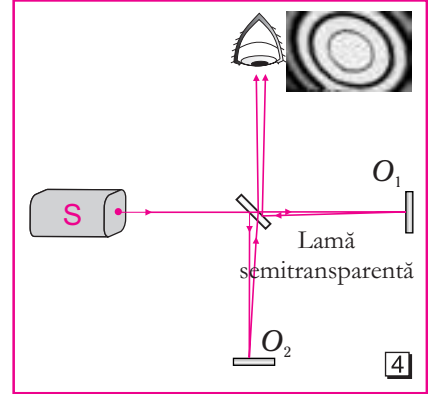
Notăm raportul vitezelor $\beta = \frac{v}{c}$.

Deoarece $v \ll c$ și $\beta \ll 1$, vom folosi aproximările:

$$\begin{aligned}\frac{1}{1-\beta^2} &\approx 1 + \beta^2 \text{ și} \\ \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} &\approx \frac{1}{1-\frac{1}{2}\beta^2} \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2.\end{aligned}$$

Intervalele de timp t_1 și t_2 se calculează analog cazului bărcilor care pleacă simultan longitudinal și, respectiv, transversal cu o viteză c față de apa care curge cu viteza v și parcurg aceeași distanță L față de punctul de plecare:

$$t_{1,\text{longitudinal}} = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} \Rightarrow$$

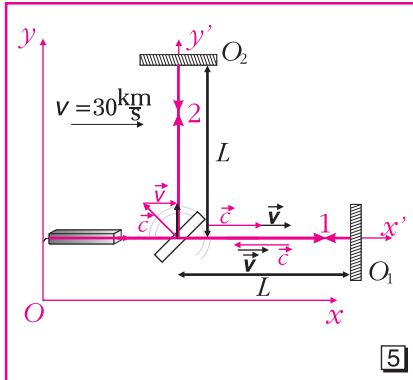


Experimentul efectuat de Michelson în 1881 a fost repetat de Michelson și Morley în 1887 și de Morley și Miller în 1904. Rezultatul negativ a dus la concluzia că principiile generale ale mecanicii newtoniene au caracter limitat. A apărut necesitatea elaborării unei noi teorii capabile să explice faptele experimentale acumulate.

Noua teorie a relativității restrânse, în acord cu experimentele, a convins fizicienii secolului XX că viteza de propagare a luminii în vid nu depinde de viteza sursei de lumină sau a observatorului. Renunțarea la concepțiile clasice nu a fost ușoară, deoarece trebuia concepută o teorie care să înglobeze, ca pe un caz particular, teoria clasică.

P Realizează pe parcursul anului școlar portofoliul cu tema: „Contribuția laureaților premiului Nobel la dezvoltarea fizicii moderne”. Portofoliul va cuprinde lucrările indicate

în manual cu sigla **P**. Poți completa portofoliul și cu alte lucrări: fișe de observații sau documentare, curiozități etc. Consultă diverse surse bibliografice: cărți, reviste de specialitate, enciclopedii, rețeaua Internet etc.



[5]

Obs

Transformările Galilei sunt valabile la viteze mici, în raport cu viteza luminii.

Interacțiunile nu se pot propaga cu viteze mai mari decât viteza luminii în vid.

Presupusul eter nu joacă nici un rol, deci acest concept trebuia abandonat. Prin negarea existenței eterului, câmpul electromagnetic devine o entitate independentă de orice substanță. Din momentul în care fasciculul de lumină atinge primul element optic al sistemului, prin acel sistem nu se mai propagă fasciculul inițial, ci unul reflectat sau refractat, emis de elementul optic respectiv, conform principiului Huygens-Fresnel. Acestea se propagă cu viteze care depind de indicele de refracție al mediului respectiv și nu de viteza de mișcare a acestora.

$$t_{1, \text{longitudinal}} = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right);$$

$$t_{2, \text{transversal}} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

Rezultă că, în funcție de direcția de propagare a luminii, viteza luminii față de eter, notată cu $\vec{c}$, se compune cu viteza eterului față de Pământ, notată cu $\vec{v}$ (fig. [5]).

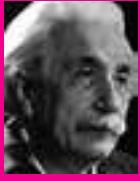
Dacă două trenuri de unde pleacă simultan de pe lamă, atunci vor reveni cu o întârziere

$$\Delta t = t_{1, \text{longitudinal}} - t_{2, \text{transversal}} = \frac{L}{c} \frac{v^2}{c^2} = \frac{L}{c} \beta^2.$$

Prin rotirea plăcii de marmură cu 90° , intervalul de timp își schimbă semnul și ar fi trebuit să apară o diferență de timp dublă $\Delta t_{\text{total}} = 2\Delta t = 2 \frac{L}{c} \beta^2$, căreia ar fi trebuit să-i corespundă o deplasare a franjelor de interferență cu un număr N de interfranje: $N = \frac{c \Delta t_{\text{total}}}{\lambda} \neq 0$.

C **Experimental nu s-a observat deplasarea semnificativă a franjelor de interferență** când brațele sunt rotite cu 90° nici în 1881 și nici ulterior. **Acest rezultat negativ din istoria fizicii a dus la concluzia că ipotezele sunt greșite.**

Din insuccesul experimentului Michelson, Einstein a tras concluzia că lumina are aceeași viteză de propagare c pe oricare direcție din interferometru, indiferent de orientarea brațelor acestuia, deci nu apare diferență de drum sau diferență de timp și nici deplasare a franjelor când brațele sunt rotite cu 90° .



1.2. POSTULATELE TEORIEI RELATIVITĂȚII RESTRÂNSE. TRANSFORMĂRILE LORENTZ. CONSECINȚE

Postulatele teoriei relativității restrânse

Concluziile analizei faptelor experimentale au fost sintetizate în anul 1905 de Einstein în cele **două postulate ale teoriei relativității restrânse**:

1. Fenomenele fizice se desfășoară identic în toate sistemele de referință inerțiale, dacă sunt identice condițiile inițiale, adică ***legile fizicii sunt aceleași față de oricare sistem de referință inerțial***.

2. ***Viteza de propagare a luminii în vid are aceeași valoare în toate direcțiile din toate sistemele de referință inerțiale***, adică nu depinde de mișcarea sursei de lumină sau a observatorului ($c = 2,997924 \cdot 10^8$ m/s).

Primul postulat generalizează principiul relativității din mecanică. Acest postulat conduce la echivalența sistemelor de referință inerțiale în raport cu toate fenomenele fizice (nici un experiment efectuat într-un sistem de referință inerțial nu permite punerea în evidență a mișcării rectilinii uniforme a acestui sistem față de alt sistem de referință inerțial).

Echivalența sistemelor de referință inerțiale o regăsim formulată și în postularea constanței vitezei luminii, deoarece al doilea postulat reprezintă concluzia experimentală că viteza luminii în vid este viteza maximă de propagare a oricărei interacțiuni fizice.

Transformările Lorentz

Trecerea de la un sistem de referință inerțial la un alt sistem de referință inerțial se obține cu transformările Lorentz, care sunt valabile și la viteze apropiate de viteza luminii. Transformările Lorentz sunt relații matematice cu ajutorul cărora trecem de la coordonatele unui eveniment observat din sistemul inerțial S , în punctul de coordonate x, y, z la momentul t , la coordonatele aceluiși eveniment observat din sistemul inerțial S' , care se deplasează cu viteza constantă v în raport cu sistemul S de-a lungul axei Ox , în punctul de coordonate x', y', z' la momentul t' .

Aceste transformări stabilite de Lorentz, ca o generalizare a transformărilor Galilei, înainte de elaborarea teoriei relativității restrânse pot fi obținute folosind postulatele lui Einstein.

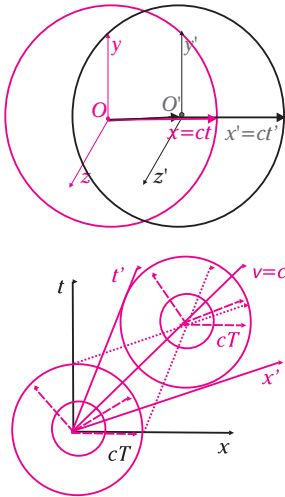


Albert Einstein – premiul Nobel (1921) „pentru serviciile aduse fizicii teoretice și mai cu seamă pentru explicarea efectului fotoelectric”. Teoria relativității a revoluționat fizica.

Obs

- Postulatele teoriei relativității restrânse susțin eliminarea eterului universal și a noțiunilor: sistem de referință absolut, timp absolut, propagare instantanee a interacțiunilor (viteză infinită), admise în mecanica clasică. Teoria relativității restrânse se referă la fenomene mecanice și electromagnetice care se analizează în raport cu sisteme de referință inerțiale (SRI). Toate sistemele de referință inerțiale sunt echivalente, în raport cu legile fizicii (în condiții identice un fenomen fizic se desfășoară la fel în SRI diferite).
- Sistemele de referință neinerțiale (care se mișcă accelerat) și fenomenele gravitaționale sunt studiate de teoria relativității generalizate, elaborată ulterior de Einstein.
- Coordonatele spațio-temporale, din cele două sisteme inerțiale, ale aceluiși eveniment depind reciproc unele de altele.
- Dacă $v < c$, din transformările Lorentz se obțin transformările Galilei.

[6]



$(ct')^2 - x'^2 = (ct)^2 - x^2$ este invariant.

O rază de lumină emisă la momentul de timp $t' = t = 0$, din originea comună $x' = x = 0$, a ajuns în punctul $x = ct$ din sistemul x, t la momentul $t = T$, iar în sistemul x', t' , în punctul

$$x' = \frac{cT - vT}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = cT \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

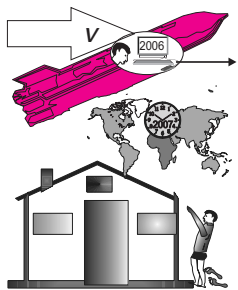
la momentul de timp

$$t' = \frac{T - \frac{v}{c^2} cT}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = T \frac{1 - \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Viteza luminii în sistemul (x', t') este

$$\frac{x'}{t'} = c.$$

[7]



Mărimile v, x, y, z, t sunt măsurate de observatorul din sistemul de referință inerțial S , legat de Pământ, iar mărimile $-v, x', y', t'$ sunt măsurate de observatorul din sistemul inerțial S' (fig. [7]).

Considerăm că originile O și O' ale sistemelor S și S' cu axele paralele coincid la momentul inițial $t = t' = 0$ și relațiile de transformare sunt liniare:

$$x = k(x' + vt') \text{ și } x' = k(x - vt), \text{ iar } y = y' \text{ și } z = z'.$$

Putem găsi factorul k dacă în momentul inițial considerăm un semnal luminos, emis de o sursă punctiformă din originea axelor (fig. [6]). Acesta se propagă cu aceeași viteză ($c = c'$) și frontul de undă sferic cu centrul în O ajunge pe axa Ox în punctul cu abscisa $x = R = ct$ pentru observatorul S și, respectiv, cel cu centrul în O' ajunge pe axa $O'x'$ în punctul cu abscisa $x' = R' = ct'$ față de observatorul S' . Dacă în relațiile de transformare înlocuim $t' = \frac{x'}{c}$ și $t = \frac{x}{c}$, obținem

$$x = k\left(x' + \frac{vx'}{c}\right) \text{ și, respectiv, } x' = k\left(x - \frac{vx}{c}\right).$$

Înmulțim aceste relații membru cu membru:

$$xx' = k^2 xx' \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right).$$

$$\text{Rezultă } k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \text{ unde } \beta = \frac{v}{c}.$$

Obținem **transformările Lorentz ale coordonatelor spațiale**:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; y = y'; z = z' \text{ și, respectiv,}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}; y' = y; z' = z - \text{sunt aceleași coordonate}$$

spațiale pentru ambii observatori.

$$\text{Din relațiile } t = \frac{x}{c} \text{ și } t' = \frac{x'}{c} \text{ obținem } \textbf{transformările}$$

Lorentz ale coordonatelor temporale:

$$t = \frac{x' + vt'}{c\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \text{ și, respectiv,}$$

$$t' = \frac{x - vt}{c\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Transformările Lorentz inverse le obținem prin schimbarea semnului vitezei de translație relative a sistemelor (v cu $-v$) și înlocuirea x cu x' și, respectiv, t cu t' .

Consecințele transformărilor Lorentz

1. *Dilatarea intervalelor de timp (lectură)

Considerăm $\Delta t_0 = t_2 - t_1$ intervalul de timp propriu sau *durata statică*, a unui proces, cronometrată de un observator care este în repaus într-un punct ($x_1 = x_2$) din același sistem S în care este localizat procesul.

Considerăm *durata cinematică* $\Delta t = t'_2 - t'_1$ a aceluiași proces (dintre două semnale luminoase, de exemplu) cronometrată de un observator în mișcare relativă, cu viteza relativistă $\bar{v}$ paralelă cu axa Ox' , față de sistemul în care se consideră că are loc procesul.

Din transformările Lorentz rezultă:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - \frac{vx_2}{c^2} - t_1 + \frac{vx_1}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

adică $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$, *durata cinematică* este mai mare decât

durata statică, deci $\Delta t > \Delta t_0$ (fig. 8), deoarece $\sqrt{1-\beta^2} < 1$.

2. Durata unui eveniment este relativă deoarece depinde de sistemul de referință din care se măsoară. Simultaneitatea evenimentelor este și ea relativă.

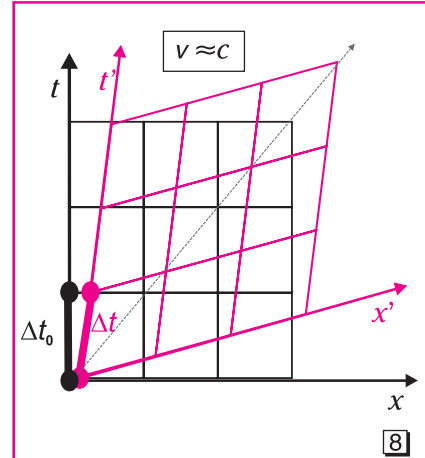
Considerăm două evenimente simultane în sistemul S (se produc la momentul $t_1 = t_2$), dar în locuri diferite ($x_1 \neq x_2$). Momentele de timp corespunzătoare pentru observatorul din sistemul S' se obțin cu relațiile Lorentz:

$$t'_1 = \frac{t_1 - \frac{vx_1}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ și } t'_2 = \frac{t_2 - \frac{vx_2}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Rezultă că $t'_1 \neq t'_2$, deoarece $x_1 \neq x_2$, deci **două evenimente simultane în locuri diferite ale unui sistem inerțial apar consecutive în alt sistem de referință inerțial S :**

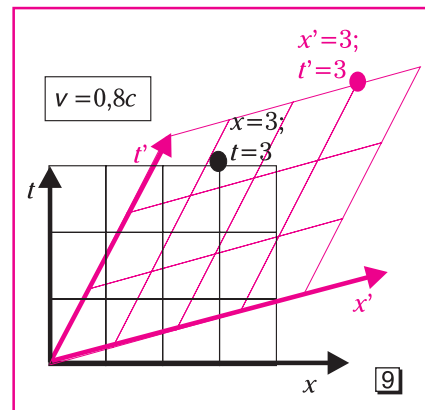
$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{-v(x_2 - x_1)}{c^2 \sqrt{1-\beta^2}} \neq 0. \text{ Apar simultane și în sistemul}$$

S' numai evenimentele simultane care s-au produs în același loc ($x_1 = x_2$) din S (fig. 9).



Dacă $v = 0,8c$ (m/s); $x = 0$ (m) și $\Delta t_0 = 1$ s obținem după înlocuiri: $\Delta t = 1,66$ s. Traectoria unui semnal luminos emis din originea O a axelor *rectangulare* x, t (pentru sistemul de referință al Pământului) și, respectiv, a axelor înclinate x', t' (pentru sistemul de referință care se deplasează cu o viteză relativistă) poate fi considerată axă de simetrie. Coordonatele unui eveniment pot fi citite ușor în aceste diagrame Minkowski, dacă se consideră unitatea de lungime egală cu c (distanța parcursă de lumină în vid în timp de o secundă, numită secunda-lumină).

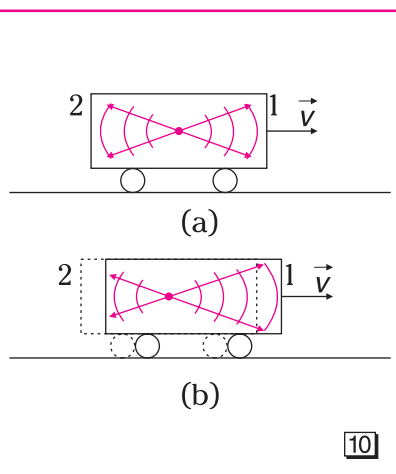
C Durata cinematică a unui proces măsurată de un observator în mișcare față de sistemul propriu este mai mare decât durata statică a aceluiași fenomen măsurată de un observator aflat în sistemul propriu.



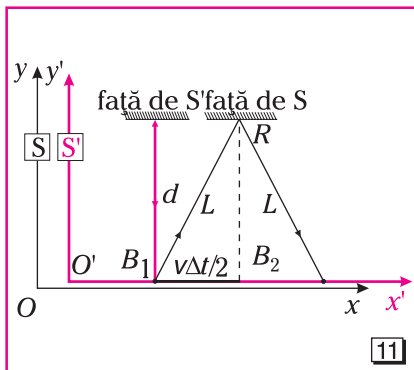
* Figurile 8 și 9 după webphysics.davidson.edu/Applets/minkowsky4/default.html

„Experimentele virtuale încearcă să stabilească legătura realității cu lumea vastă a impresiilor noastre. Așadar, aceste construcții ale minții noastre sunt justificate în măsura și în sensul în care teoriile noastre reușesc să realizeze această legătură.”

A. Einstein, L. Infeld, *Evoluția fizicii*



Viteza luminii în vid are aceeași valoare în toate direcțiile și în toate sistemele de referință inerțiale, fiind independentă de mișcarea sursei de lumină sau a observatorului.



A1. Considerăm un experiment *virtual*: un blitz al unui observator așezat în mijlocul unui vagon, care se mișcă cu viteza v , emite un semnal luminos care se propagă cu viteza c în ambele sensuri, deci fronturile de undă ajung simultan la cei doi pereți opuși (fig. 10). Pentru un observator de pe Pământ, lumina se propagă în cele două sensuri cu aceeași viteză c , dar în intervalul de timp în care un perete se depărtează, celălalt se apropie de semnalul luminos și cele două fronturi de undă nu ajung simultan la cei doi pereți.

Rezultă că evenimentul luminos se desfășoară mai rapid față de sistemul propriu decât față de alt sistem care se translatează față de acesta cu o viteză relativistă v .

Durata cinematică a unui proces apare mai mare oricărui observator „mobil” din exterior decât durata statică măsurată de observatorul „fix”, din propriul sistem, pentru care procesul se produce în același loc. Pentru fiecare observator putem considera real timpul măsurat în propriul sistem de referință. Cronometrarea se poate face cu orice fenomen periodic ce permite măsurarea duratelor.

Einstein și-a imaginat că îndepărtându-se față de un turn cu ceas, cu viteza luminii, ceasul din turn părea că s-a oprit.

A2. Considerăm un alt experiment virtual (fig. 11), în care semnalul luminos produs de un blitz în punctul B_1 din sistemul S' se propagă până la o oglindă și înapoi în intervalul de timp propriu:

$$\Delta t_0 = \Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{2d}{c}.$$

Pentru observatorul din sistemul S , acest semnal luminos parcurge lungimea $2L$ până la oglindă și înapoi în intervalul de timp:

$$\Delta t = \frac{2L}{c},$$

viteza luminii fiind aceeași, c .

Scriem teorema lui Pitagora în triunghiul B_1RB_2 :

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 \Rightarrow (\Delta t)^2 = (\Delta t')^2 + \frac{v^2}{c^2}(\Delta t')^2.$$

Obținem:

$$(\Delta t)^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = (\Delta t')^2,$$

$$\text{dar } \Delta t_0 = \Delta t'; \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ sau } \Delta t > \Delta t_0, \text{ unde } \beta = \frac{v}{c}.$$

Ajustând distanța dintre blitz și oglindă, acest sistem se poate sincroniza cu un ceas electronic. Din punctul de vedere al observatorului de pe Pământ, ceasul cu pulsuri luminoase dintr-o navetă relativistă cronometrează mai încet, adică timpul se dilată.

Observăm că în cazul în care blitzul și oglinda ar fi în sistemul S , atunci intervalul de timp propriu ar deveni

$$\Delta t_0 = \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2d}{c}.$$

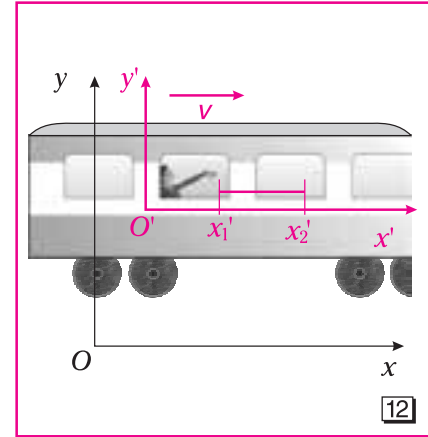
Pentru observatorul din S' , intervalul de timp în care semnalul se propagă până la oglindă și înapoi este: $\Delta t' = \frac{2L}{c}$.

Din teorema lui Pitagora obținem analog:

$$\left(\frac{c\Delta t'}{2} \right)^2 = d^2 + \left(\frac{v\Delta t'}{2} \right)^2 \text{ și}$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ deci } \Delta t' > \Delta t_0.$$

Observatorul din racheta relativistă va considera că ceasul cu pulsuri luminoase de pe Pământ cronometrează mai încet.



3. *Contrația lungimilor

Considerăm o riglă în repaus de-a lungul axei $O'x'$. Observatorul din sistemul S' va măsura lungimea proprie (de repaus):

$$l_0 = x'_2 - x'_1 \text{ (fig. 12)}.$$

Pentru observatorul din sistemul S , coordonatele capetelor riglei, măsurate simultan ($t_1 = t_2$), vor fi x_1 și respectiv x_2 , iar lungimea devine $l = x_2 - x_1$. Din transformările Lorentz rezultă:

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt_2 - x_1 + vt_1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ sau } l_0 = \frac{l}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Deoarece $\sqrt{1-v^2/c^2} < 1$, rezultă că pentru observatorul față de care rigla se mișcă cu viteza v , lungimea riglei este micșorată ($l < l_0$).

C Rigla are lungimea mai mare în sistemul față de care se află în repaus, numit *sistem propriu*, iar această lungime se numește și *lungime proprie* sau *de repaus*. În cazul în care rigla este așezată perpendicular pe direcția de mișcare, atunci $l = l_0$, deoarece $y' = y$ și $z' = z$. Contrația are loc numai după direcția de mișcare, deci un corp cu volumul V_0 în sistemul propriu va avea un volum

$$V = V_0 \sqrt{1-v^2/c^2}$$

în sistemul față de care corpul se mișcă cu viteza v .



Analizează și comentează următorul fragment din „Sărmănușul Dionis”, în care înțeleptul Ruben îl îndeamnă pe erou să călătorească departe: „...Vei trăi un secol și ți se va părea o zi... Eu sigur voi fi mort când vei reveni tu, căci orele vieții tale vor fi șir de ani întregi pentru Pământ”.
Relativitatea a fost intuită de poetul Mihai Eminescu?

Dacă se consideră rigla în repaus în sistemul S de-a lungul axei Ox , atunci lungimea proprie riglei (măsurată de un observator aflat în repaus față de aceasta) este:

$$l_0 = x_2 - x_1.$$

Pentru un observator din sistemul mobil S' , lungimea cinematică a riglei între extremitățile înregistrate simultan ($t'_1 = t'_2$) devine $l = x'_2 - x'_1$.

$$\text{Deoarece } x_2 - x_1 = \frac{x'_2 + vt'_2 - x'_1 - vt'_1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{x'_2 - x'_1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ rezultă}$$

$l = l_0 \sqrt{1-\beta^2}$, adică lungimea cinematică, măsurată din alt sistem de referință inerțial, este mai mică pe direcția de mișcare decât lungimea proprie, măsurată în sistemul de referință propriu al corpului considerat.



Considerăm ca aplicație un experiment

virtual în care observatorul din sistemul mobil S' cronometrează intervalul de timp propriu necesar propagării unui semnal luminos emis de o sursă fixată la capătul unei rigle, în repaus pe axa $O'x'$, până la oglinda fixată la celălalt capăt la distanța l_0 și înapoi:

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c}, \text{ unde } l_0 = x'_2 - x'_1 \text{ este lungimea proprie}$$

măsurată din sistemul propriu (fig. 13).

Această riglă, care se deplasează cu viteza v a sistemului S' prin dreptul observatorului din sistemul S de pe sol, are lungimea l .

În intervalul de timp Δt_1 , semnalul luminos parcurge distanța $d_1 = l + v \Delta t_1 = c \Delta t_1$, iar oglinda parcurge distanța

$$v \Delta t_1, \text{ deci } \Delta t_1 = \frac{l}{c - v}.$$

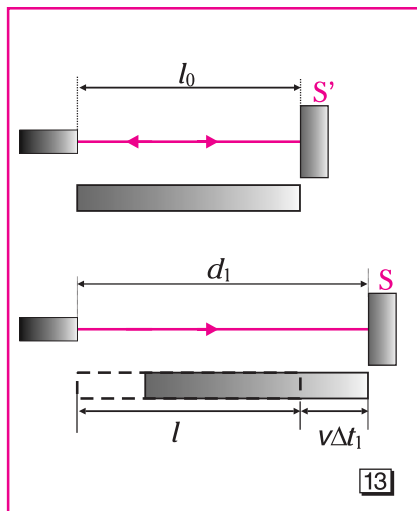
Semnalul luminos reflectat de oglindă se întoarce de la oglindă la sursă în intervalul de timp Δt_2 în care oglinda și sursa au înaintat pe distanța $v \Delta t_2$, deci $d_2 = l - v \Delta t_2 = c \Delta t_2$,

de unde $\Delta t_2 = \frac{l}{c + v}$. Obținem timpul total:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2l}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}.$$

$$\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \text{ Înlocuim și obținem: } \frac{2l_0}{c} = \frac{2l \sqrt{1-\beta^2}}{c(1-\beta^2)} \text{ sau}$$

$$l = l_0 \sqrt{1-\beta^2}.$$



13



O confirmare a consecințelor transformărilor Lorentz a fost obținută la dezintegrarea spontană a mezonilor din radiația cosmică. Timpul propriu de viață al mezonilor (la viteze mici) este $\Delta t_0 = 2,2 \mu\text{s}$. Mezonii produși la altitudini mari se deplasează cu viteza $v = 0,998c$ față de Pământ, deci în sistemul referință, legat de mezonii produși, aceștia ar parcurge distanța: $l = v\Delta t_0 \approx 658,7 \text{ m}$. Cât este altitudinea la care sunt produși mezonii?

Rezolvare

Timpul de viață al mezonilor, pentru un observator terestru, este $\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 34,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ și distanța parcursă de mezonii

față de observatorul terestru este: $l_0 = v\Delta t \approx 10420 \text{ m}$. Altitudinea la care sunt produși mezonii, măsurată în sistemul observatorului din laboratorul terestru, verifică relația:

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 10\,420 \text{ m}.$$



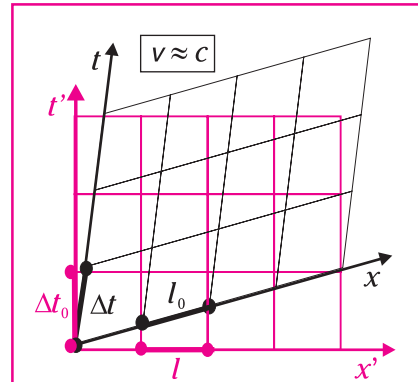
Reținem că lungimea proprie, măsurată în sistemul de referință terestru de observatorul „fix”, are cea mai mare valoare l_0 , iar lungimea cinematică l , măsurată din alt sistem de referință inerțial, este mai mică pe direcția de mișcare:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (\text{fig. [14]}).$$

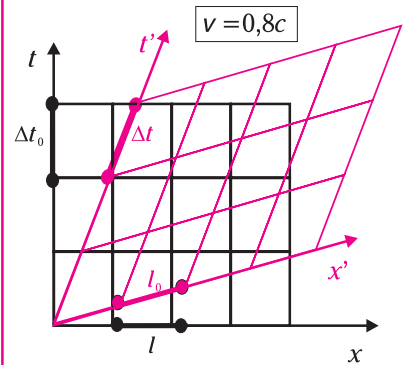
Contractia lungimilor de-a lungul direcției de mișcare arată că nici un sistem inerțial nu este privilegiat, deoarece nu se poate pune în evidență care sistem este în mișcare și care este în repaus. Distanța dintre două puncte apare mai mică observatorului din sistemul care se mișcă relativ cu o viteză relativistă față de ele.

Poți accepta o modelare intuitivă a lungimilor aparente ale corpurilor (fig. [15] a) – care depind de viteza relativă față de observator – dacă urmărești distanța dintre stâlpii plasați echidistant pe sol sau lungimile vagoanelor unui tren dintr-un sistem în repaus și apoi în mișcare (fig. [15] b)?

Durata cinematică Δt a unui proces apare mai mare oricărui observator „mobil” din exterior decât durata statică Δt_0 măsurată de observatorul „fix”, din propriul sistem, pentru care procesul se produce în același loc.

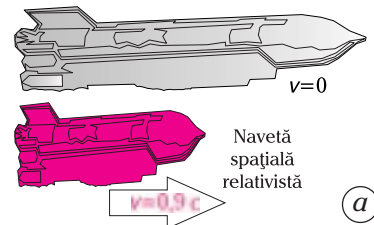


La $t'_1 = t'_2$; $l = x'_2 - x'_1$; $l < l_0$.



La $t_1 = t_2$; $l = x_2 - x_1$; $l < l_0$.
În $x_1 = x_2 \Rightarrow \Delta t_0 = t_2 - t_1$; $\Delta t > \Delta t_0$.

[14]

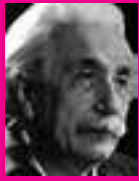


(a)



(b)

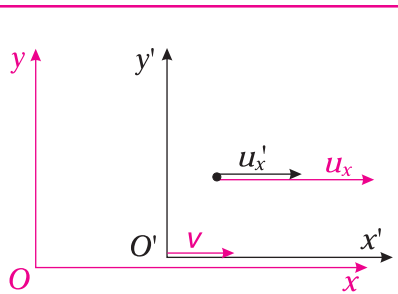
[15]



1.3. ELEMENTE DE CINEMATICĂ ȘI DINAMICĂ RELATIVISTĂ

„Ce înțelegem prin două evenimente simultane într-un sistem de coordonate? Intuitiv, fiecare dintre noi are impresia că înțelege această afirmație. Dar să încercăm să fim precauți, să încercăm să dăm definiții riguroase, căci știm cât de primejdios este să supraestimăm intuiția noastră.”

A. Einstein



$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \sqrt{b^2 - 4ac}$$

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

[16]

1.3.1. Compunerea relativistă a vitezelor (*F₂)

● Considerăm un punct material care se mișcă uniform rectiliniu de-a lungul axei $O'x'$ cu viteza relativă u'_x față de observatorul din sistemul mobil S' (fig. [16]). Originea O' a axei $O'x'$ se translatează cu viteza v față de axa Ox din sistemul S (un laborator terestru).

Trecerea de la legea mișcării uniforme $x' = u'_x t'$ față de axa $O'x'$ din sistemul inerțial S' la legea mișcării uniforme $x = u_x t$ față de axa Ox din sistemul inerțial S se obține cu ajutorul transformărilor Lorentz:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{și} \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \text{unde} \quad \beta = \frac{v}{c}. \quad \text{Înlocuim în}$$

$$\text{expresia } x' = u'_x t' \text{ și obținem } \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} = u'_x \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \text{ sau}$$

$x \left(1 + \frac{u'_x v}{c^2} \right) = (v + u'_x) t$. Deoarece $u_x = \frac{x}{t}$, rezultă că viteza relativă a punctului considerat față de axa Ox are expresia:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}.$$

Puteam obține această expresie pentru u_x sau expresia pentru u'_x folosind definițiile componentelor vitezelor:

$u_x = \frac{dx}{dt}$ și $u'_x = \frac{dx'}{dt'}$. Derivăm relațiile Lorentz și obținem:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{u_x - v}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{și} \quad \frac{dt'}{dt} = \frac{1 - \frac{vu_x}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Rezultă expresiile matematice pentru compunerea relativistă a vitezelor:

$$u'_x = \frac{dx'}{dt} \cdot \frac{dt}{dt'} = \frac{u_x - v}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1 - \frac{vu_x}{c^2}},$$

$$\text{deci } u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}.$$

Dacă $v \ll c$, obținem formula de compunere a vitezelor din mecanica clasică: $u_x = u'_x + v$.

Dacă în sistemul S' este emis un semnal luminos de-a lungul axei $O'x'$ cu viteza $u'_x = c$ și sistemul S' se translatează față de sistemul S cu viteza v sau chiar cu viteza $v = c$, atunci obții cu expresia relativistă a compunerii vitezelor că semnalul luminos se propagă cu viteza $u_x = c$ și de-a lungul axei Ox , (fig. 17):

$$u_x = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c.$$

● Considerăm un punct material care se mișcă rectiliniu uniform de-a lungul axei $O'y'$ cu viteza relativă u'_y . Ecuația mișcării în sistemul S' este:

$$y' = u'_y t'.$$

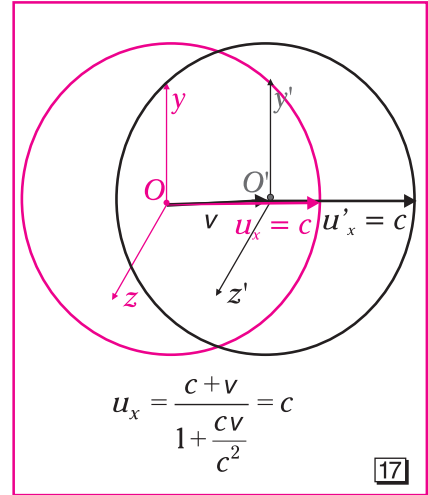
Cu ajutorul transformărilor Lorentz, $y' = y$ și $t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}$, obținem ecuația mișcării în sistemul S :

$$y = u'_y \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{u'_y t \left(1 - \frac{vx}{tc^2}\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

În acest caz, raportul $\frac{x}{t} = v$ reprezintă chiar viteza de translație a originii O' față de originea O . Rezultă:

$$y = \frac{u'_y t \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = u'_y t,$$

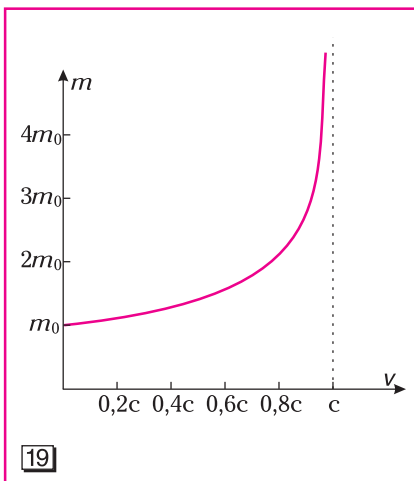
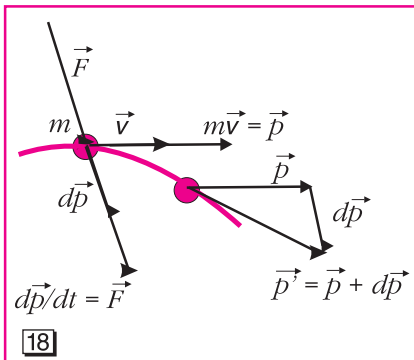
$$\text{unde: } u_y = \frac{u'_y \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1-\beta^2}} = u'_y \sqrt{1-\beta^2}.$$



C Relația pentru compunerea relativistă a vitezelor satisface principiul constanței vitezei luminii în vid, deoarece înlocuind $u'_x = c$ se obține $u_x = c$.



Într-un film S.F., astronautii care se vor deplasa cu viteze relativiste și pământeni se vor vedea reciproc îmbătrânind mai încet, se vor vedea clipind din ochi sau mișcându-se cu „încetinitorul”, deoarece durata oricărui proces este mai mică pentru observatorul din sistemul în care are loc și apare dilatată pentru orice observator față de care se deplasează cu o viteză de translație relativistă (comparabilă cu viteza luminii). Dar până vor atinge aceste viteze, se vor mișca accelerat și sistemul devine neinerțial (trebuie folosită teoria relativității generalizate), iar biologic, cum va reacționa și îmbătrâni organismul lor? Einstein afirmă în teoria relativității generalizate, care cuprinde și fenomenele gravitaționale (mișcarea unui corp într-un sistem de referință accelerat este echivalentă cu mișcarea lui într-un câmp gravitațional), că doi observatori din două sisteme constată că timpul „curge” mai încet în sistemul accelerat S' decât în sistemul inerțial S .



* O particulă cu masa de repaus $m_0 \neq 0$ începe să se miște sub acțiunea unei forțe constante F . Cât devine viteza relativistă după un interval de timp t foarte mare?

Rezolvare

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \Rightarrow mv = Ft$$

$$(v_0 = 0 \text{ la } t_0 = 0);$$

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v = Ft \Rightarrow$$

$$m_0^2 v^2 c^2 = F^2 t^2 (c^2 - v^2);$$

$$v = \frac{Ftc}{\sqrt{F^2 t^2 + m_0^2 c^2}} =$$

$$= \frac{Ftc}{Ft \sqrt{1 + m_0^2 c^2 / F^2 t^2}};$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v = c.$$

1.3.2. Principiul fundamental al dinamicii (*F₂)

Un electron poate fi accelerat de forțele electrice dintr-un câmp electric. Variația energiei cinetice ΔE_c este egală cu lucrul mecanic efectuat de forțele electrice:

$$\frac{m_e v^2}{2} - \frac{m_e v_0^2}{2} = eU,$$

unde $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, U – tensiunea electrică și $v_0 \ll v$ (viteza inițială v_0 a electronilor este neglijabilă pe lângă cea finală în urma accelerării).

Dacă tensiunea electrică are valori mai mari decât $U = 2,6 \cdot 10^5$ V, atunci viteza v a electronilor, calculată cu relația de mai sus, ar avea valori mai mari decât viteza luminii în vid, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

O forță electrică a cărei mărime este constantă nu produce o accelerație constantă dacă masa electronului în mișcare crește la viteze relativ mari, comparabile cu viteza luminii:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = v \frac{dm}{dt} + m \frac{dv}{dt} = v \frac{dm}{dt} + ma.$$

Dacă $\frac{dm}{dt} = 0$, când $m = \text{constant}$, atunci viteza electro-

nilor ar depăși viteza luminii (în contradicție cu postulatul al doilea al teoriei relativității).

În dinamica relativistă, principiul al doilea al dinamicii are următoarea formă invariantă în raport cu transformările Lorentz:

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (\text{fig. [18]}), \text{ unde:}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad m - \text{masa de mișcare și } m_0 - \text{masa de}$$

repaus a particulei considerate.

Observi că la viteze nerelativiste $v \ll c$, masa de mișcare este practic egală cu masa de repaus m_0 , (fig. [19]). La viteze comparabile cu viteza luminii în vid $c = 2,997925 \cdot 10^8$ m/s, masa corpului crește cu viteza.

Folosim aproximația: $\frac{1}{\sqrt{1-x}} \approx 1 + \frac{1}{2}x$, unde $x \ll 1$, pentru formula masei relativiste:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx m_0 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right).$$

Înmulțim cu c^2 și obținem relația:

$$mc^2 \approx m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2}, \text{ unde}$$

$m_0c^2 = E_0$ – energia totală de repaus;

$$\frac{m_0v^2}{2} = E_c \text{ – energia cinetică;}$$

$mc^2 = E$ – energia totală corespunzătoare masei de mișcare a particulei considerate.

Impusul total relativist $\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ se conservă în toate

ciocnirile.

1.3.3. Relația masă-energie

Formula $E = mc^2$ exprimă interdependența dintre energia unui corp și masa acestuia.

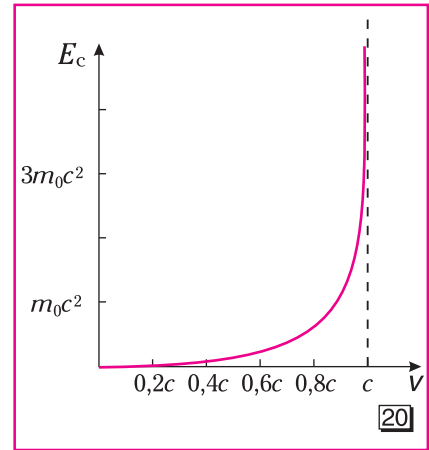
Energia cinetică a unei particule reprezintă diferența dintre energia totală E și energia de repaus E_0 (fig. 20).

Folosim aproximarea:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}, \text{ când } v < c \text{ și } v^2 \ll c^2.$$

Obținem:

$$\begin{aligned} E_c &= E - E_0 = mc^2 - m_0c^2 = \\ &= m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) \approx \\ &\approx m_0c^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} - 1 \right) = \frac{m_0v^2}{2}. \end{aligned}$$



* Care este expresia energiei cinetice a electronilor cu masa de repaus m_0 și impulsurile p ?

Rezolvare

Din expresia masei relativiste

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

obținem relația: $m^2(1 - v^2/c^2) = m_0^2$ sau $m^2c^2 - m^2v^2 = m_0^2c^2$; unde $p = mv$.
 $\Rightarrow m^2c^2 = m_0^2c^2 + p^2$.

Înmulțim ultima expresie cu c^2 și obținem relația:

$$m^2c^4 = m_0^2c^4 + p^2c^2 \text{ sau relația:}$$

$$E^2 = E_0^2 + p^2c^2.$$

Folosim relația $E = E_0 + E_c$ și vom obține:

$$p^2c^2 = E^2 - E_0^2 = E_0^2 + E_c^2 + 2E_0E_c - E_0^2;$$

$$p^2c^2 = E_c^2 + 2E_0E_c; \text{ adică}$$

$$E_c^2 + 2E_0E_c - p^2c^2 = 0 \text{ cu soluția}$$

$$E_c = -E_0 + \sqrt{E_0^2 + p^2c^2} =$$

$$= \sqrt{m_0^2c^4 + p^2c^2} - m_0c^2.$$

*** Problemă rezolvată pentru performeri și curioși**

Să demonstrăm că masa unei particule relativiste crește cu viteza când creșterea energiei acestei particule este

$$dE = c^2 dm.$$

Rezolvare

Știm că variația energiei este numeric egală cu lucrul mecanic, $dE_c = L$. Lucrul mecanic elementar efectuat de o forță F la deplasarea pe o mică distanță dx , paralelă cu direcția forței:

$$\begin{aligned} L &= F \cdot dx = \frac{dp}{dt} dx = \frac{dx}{dt} dp = \\ &= v \cdot dp = v \cdot d(mv) = vmdv + \\ &+ v^2 dm = \frac{m}{2} d(v^2) + v^2 dm. \end{aligned}$$

Rezultă:

$$c^2 dm = \frac{m}{2} d(v^2) + v^2 dm,$$

de unde obținem

$$(c^2 - v^2) dm = \frac{m}{2} d(v^2).$$

Notăm $v^2 = y$, separăm variabilele și integram expresia:

$$2 \int_{m_0}^m \frac{1}{m} \cdot dm = \int_{y_0}^y \frac{1}{c^2 - y} \cdot dy,$$

unde $y_0 = v_0^2 = 0$ când masa de repaus are valoarea m_0 pentru $v_0 = 0$ și $y = v^2$ când masa de mișcare are valoarea $m \neq m_0$. Obținem:

$$2 \ln m \Big|_{m_0}^m = -\ln(c^2 - y) \Big|_0^y \text{ și}$$

$$2 \ln \frac{m}{m_0} = \ln \frac{c^2}{c^2 - v^2},$$

$$\text{adică: } \left(\frac{m}{m_0} \right)^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

$$\text{Rezultă: } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



☑ **Legile fizicii sunt aceleași față de oricare sistem de referință inerțial.**

☑ **Viteza de propagare a luminii în vid are aceeași valoare în toate direcțiile, din toate sistemele de referință inerțiale.**

☑ Compunerea relativistă a vitezelor:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}} \text{ sau } u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}.$$

☑ **Durata cinematică Δt este mai mare decât durata statică Δt_0 ,**

$$\text{adică: } \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

☑ **Lungimea proprie l_0 este mai mare decât lungimea cinematică l , adică: $l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$.**

☑ Masa relativistă: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$

unde m_0 = masa de repaus.

☑ **Relația relativistă între masa și energia totală a unei particule libere (în mișcare sau în repaus):**

$$E = mc^2 \text{ sau } E_0 = m_0 c^2 \text{ și } \Delta E = c^2 \Delta m;$$

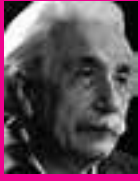
☑ **Relația relativistă energie-impuls:**

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2.$$

☑ **La viteze relativiste, energia cinetică a unei particule materiale reprezintă o parte din energia primită când este accelerată până la o viteză v de ordinul 10^8 m/s, iar restul din energia primită este stocată prin creșterea masei.**

☑ **Nicio particulă nu atinge viteza luminii $v = c$, deoarece aceasta ar trebui să ajungă la o energie infinită $\left(E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$.**

☑ **În teoria lui Einstein, lumina este considerată ca fiind formată din particule (denumite ulterior fotoni), cu masă de mișcare m_f , energia $E_f = m_f c^2$ și impulsul $p_f = m_f c$.**



1.4. PROBLEME ȘI TESTE PROPUSE

1.4.1. Probleme cu grad scăzut de dificultate

1. Viteza $\vec{u}$ a unei șalupe care traversează un râu, dacă se deplasează cu viteza relativă $\vec{u}'$ față de apă care curge cu viteza $\vec{v}$ (fig. [21]), se exprimă nerelativist prin relația clasică:

a) $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$; b) $\vec{u} = \vec{u}' - \vec{v}$; c) $\vec{u} = \vec{u}' \cdot \vec{v}$; d) $\vec{u} = \vec{u}' / \vec{v}$.

2. O particulă elementară care se deplasează cu viteza $v = 0,8c$ are timpul de viață $\Delta t_0 = 10^{-8}$ s în sistemul propriu de referință. Timpul de viață în raport cu laboratorul (sistem de referință în repaus relativ) este:

a) $\Delta t = 9 \cdot 10^{-8}$ s; b) $\Delta t = 1,66 \cdot 10^{-8}$ s;
c) $\Delta t = 9,5 \cdot 10^{-7}$ s; d) $\Delta t = 1,66 \cdot 10^{-7}$ s.

3. O particulă care se deplasează cu viteza $v = 0,99c$ are timpul de viață $\Delta t_0 = 2,5 \cdot 10^{-8}$ s în sistemul propriu de referință. Dacă nu ar fi efectul de dilatare relativistă a timpului, distanța parcursă de particulă ar fi $l_0 = v\Delta t_0 \approx 7,4$ m. În sistemul de referință al laboratorului, față de care sistemul propriu al particulei se deplasează cu viteza v , distanța parcursă devine:

a) $l \approx 15,4$ m; b) $l \approx 35,5$ m; c) $l \approx 53$ m; d) $l \approx 79$ m.

4. O particulă are diametrul mediu $d_0 = 10^{-10}$ m. Dacă particula este accelerată la viteza $v = 0,87c$, dimensiunea particulei pe direcția de mișcare (fig. [22]), devine:

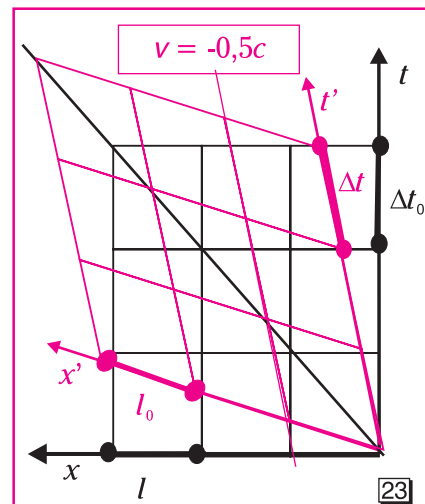
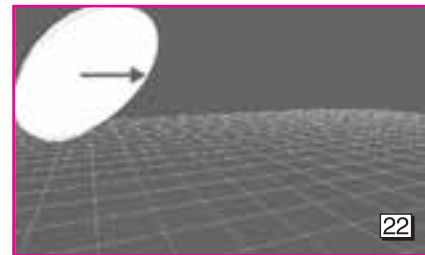
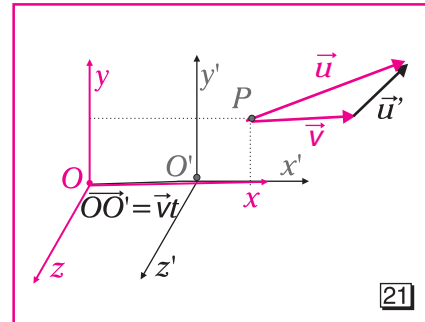
a) $d \approx 0,5d_0$; b) $d \approx 0,7d_0$; c) $d \approx 0,9d_0$; d) $d \approx 0,3d_0$.

5. O particulă are diametrul mediu propriu $d_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ m. Când se deplasează față de sistemul de referință al laboratorului cu viteza $v = 2,4 \cdot 10^8$ m/s, dimensiunea particulei pe direcția de mișcare față de acest sistem, devine:

a) $d = 3 \cdot 10^{-10}$ m; b) $d = 3 \cdot 10^{-9}$ m;
c) $d = 3 \cdot 10^{-8}$ m; d) $d = 3 \cdot 10^{-7}$ m.

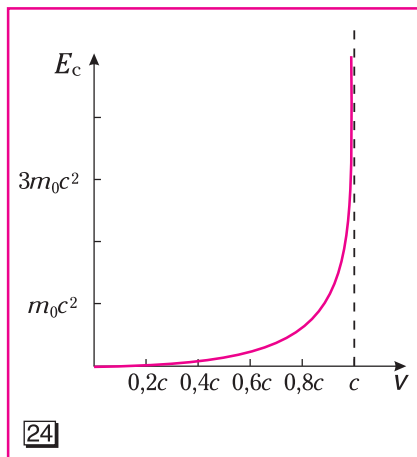
6. Mărimea lungimilor de-a lungul direcției de mișcare și durata evenimentelor este relativă (fig. [23]), deoarece depinde de:

a) sistemul de unități; b) sistemul de referință din care se măsoară;
c) calitatea instrumentelor de măsură; d) de observator.



Dacă $x = 2,9c$ (m); $t = 2,9$ (s) și $v = -0,5c$ (m/s) obținem după înlocuiri: $x' = 5c$ (m); $t' = 5$ (s).

Pentru fig. [23] vezi Webphysics. davidson.edu/Applets/minkowski4/default.html



1.4.2. Probleme cu grad mediu de dificultate

7. Dacă masa de mișcare a unei particule accelerate este de două ori mai mare decât masa de repaus, atunci viteza ei este:

- a) $v = 0,65c$; b) $v = 0,76c$; c) $v = 0,87c$; d) $v = 0,98c$.

8. Viteza maximă pe care au atins-o electronii (într-un accelerator) are valoarea $v = 0,999c$. Energia cinetică

$E_c = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right)$ corespunzătoare (fig. 24) are valoarea:

- a) $E_c = 10^{-9} \text{ J}$; b) $E_c = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ J}$; c) $E_c = 10^{-8} \text{ J}$; d) $E_c = 10^{-10} \text{ J}$.

9. Dacă energia cinetică a electronilor în mișcare este de două ori mai mare decât energia de repaus $E_0 = m_0c^2$ a acestora, atunci viteza lor reprezintă:

- a) $v = 0,61c$; b) $v = 0,72c$; c) $v = 0,83c$; d) $v = 0,94c$.

10. Relația relativistă: $E^2 = E_0^2 + p^2c^2$ permite realizarea unui „triunghi relativist” (fig. 25). Se obține din relațiile:

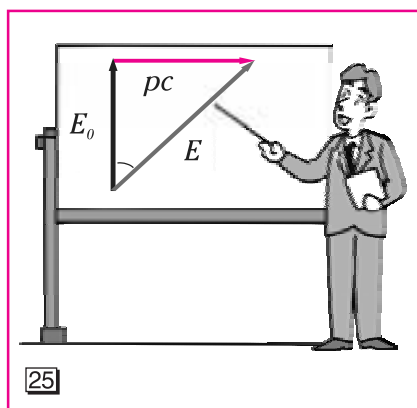
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}; m^2(1-v^2/c^2) = m_0^2; m^2c^2 - m^2v^2 = m_0^2c^2;$$

$m^2c^2 = m_0^2c^2 + p^2$, unde $p = mv$ și $v = c$.

Folosind relația $E^2 = E_0^2 + p^2c^2$ și relația $E = E_0 + E_c$, vei obține relația corectă:

a) $p^2 = \frac{E_c(E_c + 2E_0)}{c^2}$; b) $p^2 = \frac{E_c(E_c - 2E_0)}{c^2}$;

c) $p^2 = \frac{E_c(E_c + 2E_0)}{c^2}$; d) $p^2 = \frac{E_c^2 + E_0^2}{c^2}$.



11. Energia cinetică a unei particule cu masa de repaus m_0 și viteza $v = 0,8c$ este:

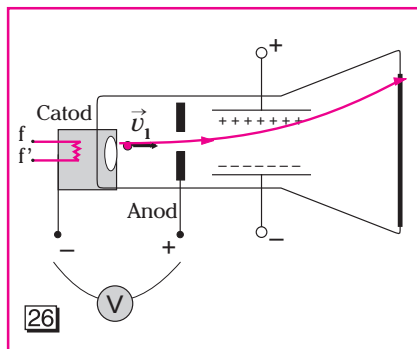
- a) $E_c = 0,5m_0c^2$; b) $E_c = 0,66m_0c^2$;
c) $E_c = 0,7m_0c^2$; d) $E_c = 0,8m_0c^2$.

12. Energia cinetică a unei particule relativiste este egală cu energia de repaus când viteza particulei are valoarea:

- a) $v \approx 0,55c$; b) $v \approx 0,66c$; c) $v \approx 0,87c$; d) $v \approx 0,99c$.

13. Electronii considerați în repaus sunt accelerați între catodul și anodul unui tun electronic (fig. 26) la tensiunea $U = 4 \cdot 10^4 \text{ V}$. Viteza relativistă are valoarea:

- a) $v \approx 0,85c$; b) $v \approx 0,67c$; c) $v \approx 0,55c$; d) $v \approx 0,99c$.



14. Un sistem de particule elementare cedează în exterior o cantitate de căldură $Q = 9 \cdot 10^9$ J, în urma unei reacții nucleare. Masa sistemului s-a modificat cu:

a) $\Delta m = 0,1$ mg; b) $\Delta m = 1$ mg; c) $\Delta m = 0,1$ g; d) $\Delta m = 1$ g.

15. O particulă cu energia de repaus $E_0 = 10^3$ J este accelerată la viteza $v = 0,9c$. Lucrul mecanic efectuat de forțele de accelerare este: a) $L = 10^4$ J; b) $L = 1,3 \cdot 10^3$ J; c) $L = 10^2$ J; d) $L = 1,3$ J.

16. Viteza de deplasare a drepte de intersecție a unui front de undă luminoasă plană care intersectează sub unghiul diedru a o suprafață plană (fig. 27), aflată în aer ($n_{\text{aer}} \approx 1$), este:

a) $v = \frac{c}{\cos \alpha}$; b) $v = \frac{c}{\sin \alpha}$; c) $v = c$; d) $v = c \cdot \sin \alpha$.

17. Un fascicul de electroni monoenergetici de energie cinetică $E_c = 40 \cdot 10^{-15}$ J se deplasează cu viteza:

a) $v = 3 \cdot 10^8$ m/s; b) $v = 2,98 \cdot 10^8$ m/s;
c) $v = 1,96 \cdot 10^8$ m/s; d) $v = 2,2 \cdot 10^8$ m/s.

1.4.3. Test pentru autoevaluare

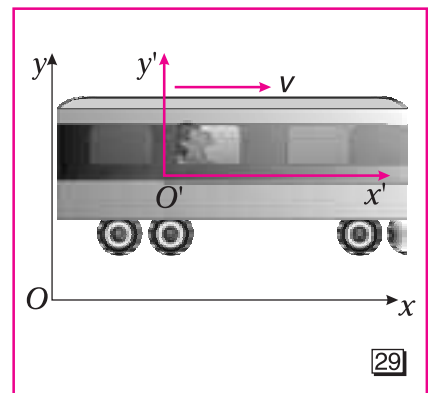
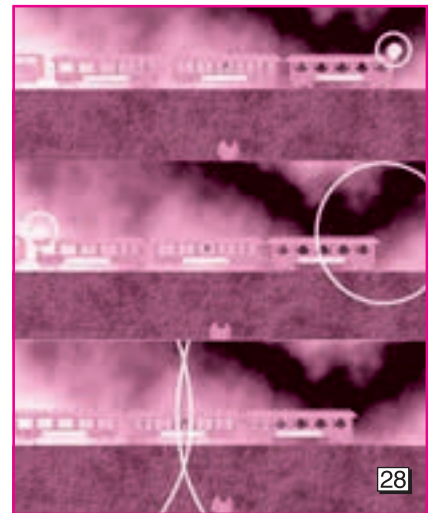
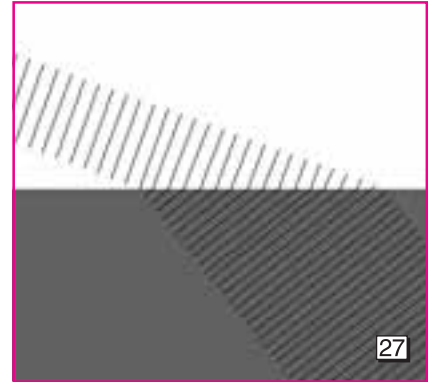
1. Două evenimente nesimultane, într-un sistem de referință (fig. 28), sunt:

- a) nesimultane în alt sistem de referință inerțial care se mișcă în același sens;
- b) nesimultane în alt sistem de referință inerțial care se mișcă în sens contrar;
- c) simultane în alt sistem de referință inerțial.

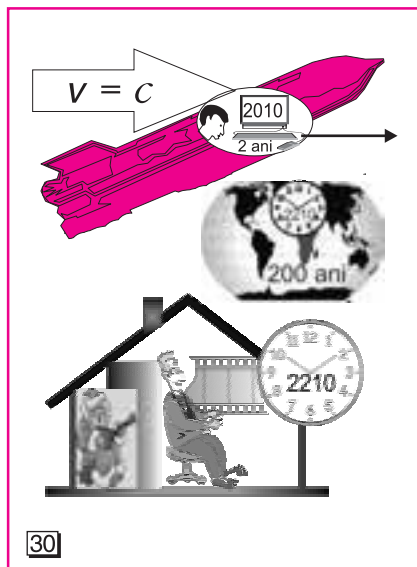
2. Există o modalitate ca o persoană dintr-un vehicul cu pereți netransparenți să deosebească starea de mișcare uniformă de starea de repaus relativ față de pământ (fig. 29)?

3. Oamenii harnici se mișcă tot timpul și li se pare că timpul trece prea repede pentru a termina ce și-au propus, iar cei comozi se plictisesc și nu știu ce să mai facă. Pentru cei comozi se dilată timpul, conform unei formule din teoria relativității, în acest caz?

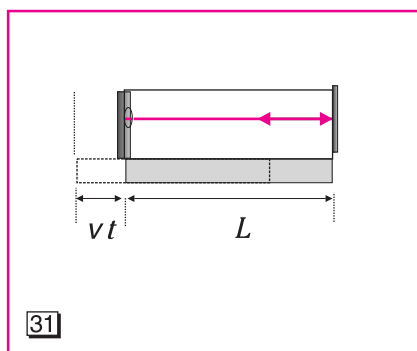
4. Savantul Langevin a expus, în anul 1911, la Congresul de filosofie de la Bologna, printr-un experiment mental speculativ, numit paradoxul gemenilor, dilatarea timpului: „Cel care se reîntoarce pe Pământ după doi ani dintr-o călătorie în cosmos îl va găsi îmbătrânit cu 200 de ani pe celălalt, dacă viteza cu care a călătorit a fost mai mică cu $1/20.000$ din viteza luminii...”.



1a; 2b; 3c; 4a; 5a; 6b; 7c; 8b; 9d; 10a;
11b; 12c; 13a; 14a; 15b; 16b; 17d.



30



31

Notăm $T_0 = 2$ ani de viață pe rachetă, $T = 200$ de ani de viață pe Pământ (fig. 30). Înlocuiește în relația pentru dilatarea timpului:

$T_0 = (1 - v^2/c^2)^{1/2} T$ și vei descoperi valoarea vitezei de deplasare $v = 299.985$ km/s. Dacă sunt puși față în față printr-un sistem video-tv și fiecare măsoară timpul său, atunci fiecare observă că celălalt îmbătrânește mai încet, iar dacă revine pe Pământ va fi afectat de accelerațiile și decelerațiile care fac să încetinească ceasornicul său, conform teoriei relativității generalizate.

Metabolismul și ritmurile biologice sunt afectate la accelerații mari?

5. Într-un experiment mental descris de Albert Michelson (fig. 31), lumina emisă de un blitz aflat într-o extremitate a unei cutii vidate de masă M transmite peretelui opus impulsul fotonilor $p = E/c$ după timpul de propagare $t = L/c$. Din conservarea impulsului obținem viteza sistemului după impact: $v = E/Mc$. Din conservarea centrului de masă obținem relația: $m_f L = Mx$, unde $x = vt$ și m_f – masa fotonilor. După înlocuiri vei obține relația care exprimă energia fotonilor:

$$\text{a) } E = m_f c^2; \text{ b) } E = \frac{m_f c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

$$\text{c) } E = m_f c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right); \text{ d) } E = \frac{p^2}{2m_f}.$$

6. Din relația $E = mc^2$ obținem: $E^2 = m^2 c^4 = m^2 c^2 (c^2 - v^2 + v^2)$.

Folosește relațiile $p = mv$ și $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ și vei obține relația

relativistă dintre energia totală E și impulsul p :

$$\text{a) } E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4; \text{ b) } E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^2;$$

$$\text{c) } E = pc + m_0 c^2; \text{ d) } E = p^2 c^2 - m_0^2 c^4.$$

7. Un electron cu masa de repaus $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg este accelerat în tunul electronic din tubul televizorului și atinge ecranul cu viteza $v = 10^8$ m/s. Înainte de impactul cu ecranul, masa electronului în mișcare are valoarea:

$$\text{a) } m = 9,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; \text{ b) } m = 10,2 \cdot 10^{-31} \text{ kg};$$

$$\text{c) } m = 12,4 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; \text{ d) } m = 15,3 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$

Răspunsuri la testul pentru autoevaluare:

1c; 2 nu; 3 nu; 4 da; 5a; 6a; 7a.

ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ



„Gândirea științifică se caracterizează prin autocorectarea cunoștințelor. Dacă vrem să înțelegem metodele științei, nu trebuie să neglijăm istoria științei”.

Ernest Hutten, *Ideile fundamentale în fizică*

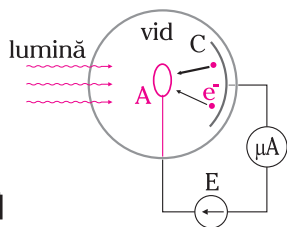
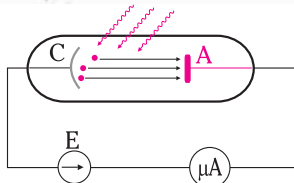
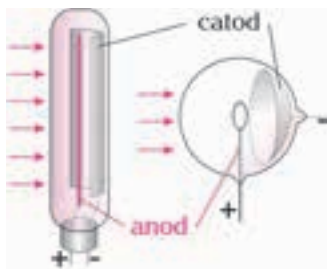
$$\varepsilon = h\nu$$

2.1. EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN

„Probabil lumina are atât caracter undulatoriu, cât și corpuscular.”
A. Einstein



[1]



[2]

2.1.1. Legile efectului fotoelectric extern

Efectul fotoelectric extern constă în emisia de electroni în exterior de către unele metale, sub acțiunea unui flux de radiații electromagnetice.

Efectul fotoelectric a fost descoperit în 1887, de fizicianul german H. Hertz, prin producerea descărcării electrice între două sfere de zinc la iluminarea uneia dintre ele cu radiații ultraviolete.

În anul 1888, fizicianul englez W. Hallwachs constată că sub acțiunea radiațiilor ultraviolete o placă de zinc conectată la un electrosco: se descarcă dacă a fost inițial încărcată negativ; se încarcă pozitiv dacă a fost inițial neutră; rămâne încărcată pozitiv dacă a fost încărcată pozitiv, dar foițele electrosco:ului se depărtează mai mult (fig. [1]).



Legile experimentale ale efectului fotoelectric, enunțate după anul 1890, pot fi verificate cu o celulă fotoelectrică, conectată într-un montaj potențiometric, căreia îi măsurăm intensitatea curentului anodic I_a pentru diferite tensiuni între anodul A și catodul C. Reprezentăm graficul caracteristicii de curent $I_a = f(U_{AC})$. Celula fotoelectrică este un mic balon de sticlă vidat, acoperit pe o porțiune interioară cu un strat metallic ce constituie catodul (fig. [2]). Anodul este un fir metalic (circular sau liniar) așezat în fața catodului. Acești electrozi sunt conectați, prin două fire metalice care trec prin peretele de sticlă, în circuitul exterior care conține microampermetru, voltmetru și generator de tensiune variabilă. Electronii obținuți prin efect fotoelectric extern sunt accelerați (dacă $U_{AC} > 0$) sau frânați (dacă $U_{AC} < 0$) în câmpul electric dintre anod și catod. Curentul de saturație reprezintă valoarea maximă a intensității care se obține începând cu o anumită valoare a tensiunii dintre anod și catod, când toți electronii obținuți prin efect fotoelectric (numiți și fotoelectroni) la un anumit flux luminos constant sunt colectați de anod (fig. [3]). Forța electrică efectuează asupra electronilor lucrul mecanic $L = qU_{AC}$ egal cu variația energiei cinetice ($L = \Delta W_c$), deci: $qU_{A-C} = \frac{mv_A^2}{2} - \frac{mv_C^2}{2}$.

La o anumită tensiune inversă, $U_0 = U'_{AC} < 0$ (anodul negativ față de catod), electronii sunt frânați și nu mai ajung la anod:

$$E_{c, max} = -eU_0 \text{ sau } \frac{m_{0,e}v_{max}^2}{2} = e|U_0|, \text{ unde } q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

E Verificarea legilor efectului fotoelectric extern se poate face cu un experiment virtual: www.walter-fendt.de/ph14ro/photoeffect_ro.htm

Metalul fotocatodului	Frecvența de prag ν_0	Lungimea de undă de prag λ_0	U_0
Cesiu	$4,54 \cdot 10^{14}$ Hz	660 nm	– 1,8 V
Calciu	$6,66 \cdot 10^{14}$ Hz	450 nm	– 2,8 V
Zinc	$10 \cdot 10^{14}$ Hz	300 nm	– 4,2 V

Legile experimentale ale efectului fotoelectric extern:

1. Intensitatea de saturație a curentului fotoelectric este direct proporțională cu fluxul radiației incidente Φ care ajunge pe catod pentru o anumită frecvență a radiației incidente (fig. [3]). Pentru anularea curentului fotoelectric se folosește o tensiune inversă, de frânare, U_0 .
2. Energia cinetică a fotoelectronilor emiși crește liniar cu frecvența radiației incidente și nu depinde de fluxul acesteia (fig. [4]).
3. Efectul fotoelectric extern se produce numai dacă frecvența radiației incidente este mai mare sau cel puțin egală cu o valoare minimă, specifică metalului din fotocatod și este numită: de prag fotoelectric, de stopare sau de roșu ca în tabelul de mai sus.
4. Efectul fotoelectric extern se produce practic instantaneu.

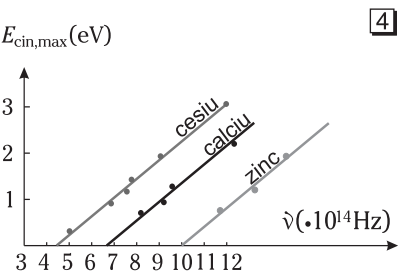
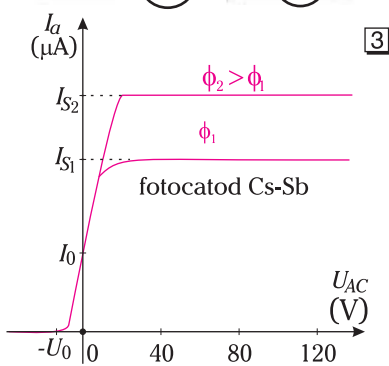
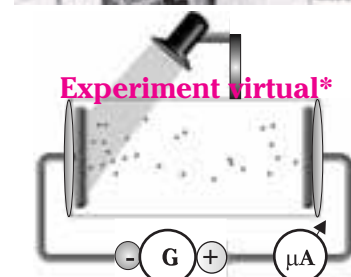
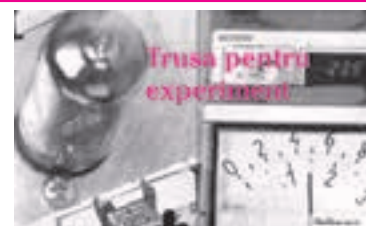
2.1.2. Ipoteza lui Planck. Ipoteza și ecuația lui Einstein

Conform teoriei cuantelor (din anul 1900) a fizicianului german Max Planck, radiațiile electromagnetice sunt emise și absorbite discontinuu, prin cuante de energie $\epsilon = h\nu$. Rezultă că fotonul transportă o cantă de energie ϵ , unde: $h\nu$ – energia fotonului radiației de frecvență ν , iar $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js – constanta lui Planck.

Albert Einstein a obținut premiul Nobel în anul 1921 pentru serviciile aduse fizicii teoretice și mai cu seamă pentru explicarea efectului fotoelectric. Într-unul din articolele publicate în anul 1905, în revista științifică germană „Annalen der Physik”, Einstein explică efectul fotoelectric, pe baza teoriei cuantelor a lui Planck. Einstein a presupus că lumina este formată din particule, denumite ulterior fotoni, care se deplasează în vid cu viteza c .

Einstein a considerat efectul fotoelectric ca un schimb de energie la nivel microscopic, între fotonul incident de energie $h\nu$ și electronul care este extras din rețeaua cristalină și părăsește metalul cu o anumită energie cinetică:

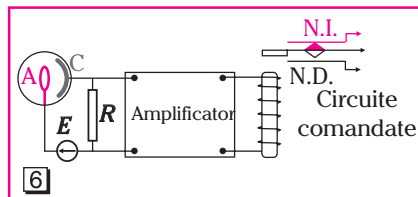
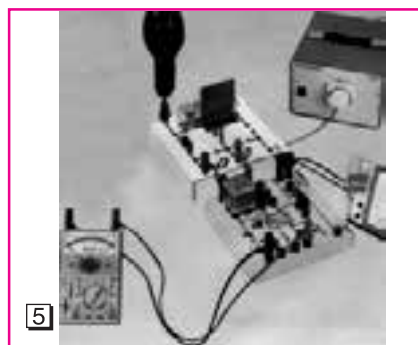
$$h\nu = L_{\text{extracție}} + E_{\text{cin, electron}}$$



Extragerea electronilor liberi dintr-un metal, prin efect fotoelectric, se face cu un consum energetic egal cu lucrul mecanic de extracție, caracteristic fiecărui metal.



Max Planck (1858-1947) – premiul Nobel (1918) „ca apreciere pentru serviciile oferite în avansarea Fizicii prin descoperirea cuantei de energie”.



Aplicații ale efectului fotoelectric extern:

— Celulele fotoelectrice permit detecția radiațiilor și măsurarea fluxurilor luminoase. Celulele fotoelectrice transformă semnalele luminoase în semnale electrice. În circuitul fotocelulei se introduce un rezistor cu rezistența R de valoare mare, de pe care semnalul de tensiune se amplifică (fig. [5]);

– Releul fotoelectric este un releu electromagnetic comandat de o fotocelulă (fig. [6]). Releul fotoelectric se poate folosi la numărarea obiectelor în mișcare, închiderea unor circuite de alarmă sau deconectarea rețelei de iluminat în timpul zilei.

2.1.3. Interpretarea legilor efectului fotoelectric extern

Acceptăm ipoteza că energia unei cuante reprezintă energia unei particule de lumină, numită foton (de N. Lewis în anul 1926), care se propagă cu viteza c a luminii în vid. Conform teoriei relativității einsteiniene, atribuim acestor fotoni o masă de mișcare m_f și energia unei cuante: $\varepsilon = h\nu = m_f c^2$, deci $m_f = h\nu/c^2$ și impulsul $p_f = m_f c$. Radiația electromagnetică este emisă, se propagă și este absorbită sub formă de cuante. Un fascicul de lumină trebuie acceptat ca un flux de fotoni de energie ε și impuls:

$$p_f = m_f c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Einstein a considerat că efectul fotoelectric constă în interacțiunea dintre un foton (particula asociată câmpului electromagnetic) și un electron (particula de substanță) din metalul iradiat. Energia fotonului absorbit de un electron din metal trebuie să fie cel puțin egală cu energia $h\nu_0$, necesară pentru extragerea electronului din rețeaua cristalină. Dacă energia $h\nu$ primită de la foton este mai mare decât lucrul mecanic de extracție L_{extr} al electronului din rețeaua cristalină a metalului iradiat, atunci acest electron părăsește suprafața metalului cu o anumită energie cinetică, verificându-se bilanțul energetic:

$$h\nu = L_{\text{extr}} + \frac{m_{0,e} v_{e,\text{max}}^2}{2},$$

$$\text{unde } \frac{m_{0,e} v_{e,\text{max}}^2}{2} = E_{\text{cin, electroni}}.$$

Pentru frecvența minimă $\nu_{\text{min}} = \nu_0$, numită și frecvență de prag, energia cinetică a fotoelectronilor este nulă: $h\nu_0 = L_{\text{extr}}$.

Rezultă că legea efectului fotoelectric se poate scrie și sub forma:

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{m_{0,e} v_{e,\text{max}}^2}{2}.$$

Legile efectului fotoelectric extern se explică ușor cu această teorie fonică (corpusculară).

1. Dacă fluxul incident de energie luminoasă este mai mare, atunci sunt mai mari atât numărul fotonilor, cât și numărul ciocnirilor foton-electron. Rezultă că numărul electronilor smulși din fotocatod, care formează curentul fotoelectric, este egal cu numărul fotonilor incidenți care au ciocnit și smuls electroni.

2. Energia cinetică a fotoelectronilor extrași depinde liniar numai de frecvența radiațiilor incidente:

$$E_{cin, electroni} = h\nu - L_{extr}.$$

3. Electronii nu pot ieși din metalul catodului dacă fotonii au energia mai mică decât lucrul mecanic de extracție, deci nu se produce efectul fotoelectric.

4. Efectul fotoelectric extern este instantaneu, deoarece un foton interacționează cu un singur electron, care părăsește imediat suprafața metalului iradiat.



(*F₂)

1. Dacă se iluminează suprafața unui fotocatod cu radiație monocromatică cu $\lambda = 450$ nm, intensitatea curentului anodic al fotocelulei se anulează pentru o tensiune inversă $U_{AC} = -1,45$ V, la care fotoelectronii sunt frânați și nu mai ajung la anod. Să găsim valoarea lucrului mecanic de extracție.

Rezolvare: $h\nu = L_{extr} + e|U_{AC}| \Rightarrow L_{extr} = \frac{hc}{\lambda} - e|U_{AC}| =$

$$= \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,45 \approx 2 \cdot 10^{-19} \text{ (J)}.$$

2. În montajul experimental al fotocelulei se stabilesc, cu ajutorul unui potențiometru, diferențele de potențial U_{AC} la care se anulează intensitatea curentului electric: $|U_{AC}| = 2,6$ V pentru frecvența $\nu_1 = 1,55 \cdot 10^{15}$ Hz și $|U_{AC}| = 0$ pentru frecvența de prag $\nu_0 = 0,92 \cdot 10^{15}$ Hz. Pe baza acestor date experimentale, să găsim valoarea constantei lui Planck.

Rezolvare

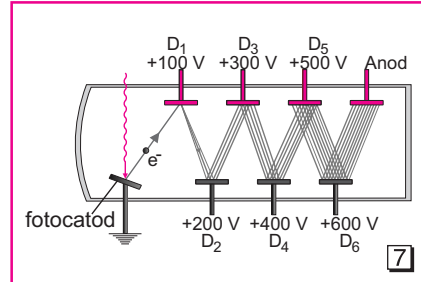
$$h\nu_1 = L_{extr} + e|U_{AC}| \text{ și } h\nu_0 = L_{extr} \Rightarrow h(\nu_1 - \nu_0) = e|U_{AC}|$$

$$\text{sau: } h = \frac{e|U_{AC}|}{\nu_1 - \nu_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,6}{0,63 \cdot 10^{15}} = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}.$$



Rezumat
Schema
de sinteză

Mărimile caracteristice fotonului	Expresia matematică
energia	$\varepsilon = h\nu$
masa de mișcare	$m_f = \frac{h\nu}{c^2}$
viteza	$v = c$
impulsul	$p = m_f c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$



– Fotomultiplicatorul are un număr de electrozi suplimentari (dinode) care emit mai mulți electroni secundari când sunt bombardați de electroni. Fiecare dinodă se află la un potențial mai mare decât precedenta, în montaj potențiometric (fig. 7). Curentul electric anodic este mult mai mare decât al fotocelulelor. Efectul fotoelectric extern a avut aplicații în cinematografia și televiziunea din secolul XX. Sistemele optoelectronice mai noi folosesc efectul fotoelectric intern (fotoconducția în semiconductoare).



Îți vei da seama de incapacitatea teoriei ondulatorii de a explica trei dintre legile efectului fotoelectric, după ce vei completa spațiile libere din textul următor:

☑ Considerând o undă electromagnetică monocromatică incidentă pe catod, electronii din metal vor fi puși în oscilație de câmpul electric variabil, iar electronii vor putea fi smulși în urma oscilațiilor forțate provocate, deci amplitudinea oscilațiilor electronilor fiind proporțională cu amplitudinea oscilațiilor intensității câmpului electric, rezultă că energia cinetică a ... ar trebui să depindă de fluxul și de intensitatea luminii incidente;

☑ Efectul fotoelectric ar trebui să apară pentru radiații de orice frecvență, știind că transferul de energie prin unde se face în mod ... până când s-ar cumula energia necesară extracției din suprafața metalică iradiată;

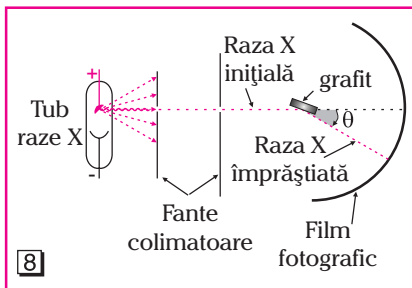
☑ Când fluxul incident este slab, ar trebui să existe un interval de timp măsurabil între acțiunea undelor electromagnetice și ... fotoelectronilor.

$$\varepsilon = h\nu$$

2.2. EFECTUL COMPTON*



Arthur Compton – premiul Nobel (1927) pentru descoperirea efectului care-i poartă numele.



Fizicianul american A. H. Compton a constatat în anul 1923 că radițiile X, împrăștiate sub diferite unghiuri θ pe electronii liberi sau slab legați (dintr-un strat de grafit sau parafină, de exemplu) au frecvențe mai mici și, respectiv, lungimi de undă mai mari decât cele incidente (fig. 8). A constatat că natura substanței care împrășteie radițiile X nu intervine în creșterea lungimii de undă:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

unde θ – unghiul de împrăștiere și

$$\lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

– lungimea de undă Compton.

Obs Efectul Compton se produce la interacțiunea unui foton cu un electron liber sau aproape liber, iar efectul fotoelectric extern se produce la interacțiunea unui foton cu un electron legat în atom.

*Interpretarea efectului Compton

Radiațiile electromagnetice luminoase pot fi împrăștiate sub diferite unghiuri de substanțele întâlnite. Radițiile electromagnetice X au energii și frecvențe mai mari și lungimi de undă mai mici decât cele din domeniul vizibil. În ciocnirea dintre un foton și un electron trebuie să se conserve energia și impulsul. Fotonul este caracterizat de:

– energia $\varepsilon = h\nu = c^2 m_{\text{foton}}$;

– masa de mișcare $m_{\text{foton}} = \frac{h\nu}{c^2}$;

– impulsul $p_{\text{foton}} = cm_{\text{foton}} = \frac{h\nu}{c}$;

– masa de repaus $m_{0,\text{foton}} = m_{\text{foton}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$.

Modificarea frecvenței radiațiilor prin efect Compton se poate explica numai prin teoria corpusculară a radiațiilor electromagnetice: fotonul împrăștiat de un electron a transmis electronului energie și impuls. Înainte de ciocnire, considerăm că fotonul are energia $h\nu$, iar electronul are energia $m_{0,e}c^2$, electronul fiind nerelativist față de sistemul de referință al laboratorului. După împrăștierea prin ciocnire, fotonul împrăștiat sub unghiul θ are energia $h\nu'$, iar electronul de recul sub unghiul φ are energia $m_e c^2$, unde masa de mișcare a electronului cu viteza v față de sistemul laboratorului o

exprimăm prin relația cunoscută: $m_e = \frac{m_{0,e}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

Pentru electronii relativști rezultă:

$$m_e^2 = \frac{m_{0,e}^2 c^2}{c^2 - v^2} \Rightarrow m_e^2 c^2 = p_e^2 + m_{0,e}^2 c^2,$$

sau: $m_e^2 c^4 = p_e^2 c^2 + m_{0,e}^2 c^4$, unde $p_e = m_e v$ și $E = m_e c^2$.

Am obținut relația relativistă energie-impuls:

$$E^2 = p_e^2 c^2 + m_{0,e}^2 c^4.$$

Pentru efectul Compton, scriem legea de conservare a energiei:

$$h\hat{\nu}_0 + m_{0,e}c^2 = h\hat{\nu} + mc^2 \Rightarrow [h(\hat{\nu}_0 - \hat{\nu}) + m_{0,e}c^2]^2 = m_e^2c^4 \Rightarrow \\ \Rightarrow h^2(\hat{\nu}_0 - \hat{\nu})^2 + m_{0,e}^2c^4 + 2h(\hat{\nu}_0 - \hat{\nu})m_{0,e}c^2 = p_e^2c^2 + m_{0,e}^2c^4.$$

Obținem relația:

$$p_e^2c^2 = h^2\hat{\nu}_0^2 + h^2\hat{\nu}^2 - 2h^2\hat{\nu}_0\hat{\nu} + 2h\hat{\nu}_0m_{0,e}c^2 - 2h\hat{\nu}m_{0,e}c^2. \quad \text{①}$$

Folosim relația dintre impulsul fotonului și frecvență

$\left(p_f = \frac{h\hat{\nu}}{c}\right)$ în legea conservării impulsului și obținem expresia impulsului electronului împrăștiat (fig. 9):

$$p_e^2 = \frac{h^2\hat{\nu}^2}{c^2} + \frac{h^2\hat{\nu}_0^2}{c^2} - 2\frac{h^2\hat{\nu}_0\hat{\nu}}{c^2}\cos\theta \Rightarrow \\ \Rightarrow p_e^2c^2 = h^2\hat{\nu}^2 + h^2\hat{\nu}_0^2 - 2h^2\hat{\nu}_0\hat{\nu}\cos\theta. \quad \text{②}$$

Folosim și relația obținută din conservarea energiei și egalăm ecuațiile ① și ②:

$2h(\hat{\nu}_0 - \hat{\nu})m_{0,e}c^2 = 2h^2\hat{\nu}_0\hat{\nu}(1 - \cos\theta)$. Împărțim cu $2h\hat{\nu}_0\hat{\nu}m_{0,e}c$ și obținem:

$$\frac{c}{\hat{\nu}} - \frac{c}{\hat{\nu}_0} = \frac{h}{m_{0,e}c}(1 - \cos\theta), \text{ unde } 1 - \cos\theta = 2\sin^2\frac{\theta}{2}.$$

$$\text{Rezultă: } \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\frac{h}{m_{0,e}c}\sin^2\frac{\theta}{2}.$$

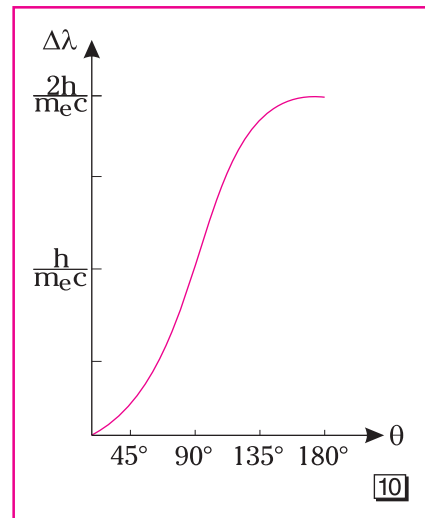
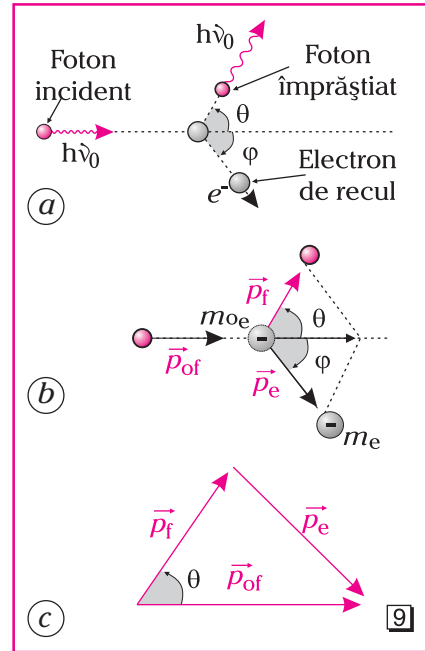
Pentru $\theta = 180^\circ$ obținem $\Delta\lambda = 2\Lambda = 2\frac{h}{m_{0,e}c}$, unde Λ -

lungimea de undă Compton (fig. 10).

Energia cinetică finală a electronului se definește relativist:

$$E_c = mc^2 - m_{0,e}c^2 = h\hat{\nu}_0 - h\hat{\nu} = h(\hat{\nu}_0 - \hat{\nu}) = \\ = hc\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right) = hc\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0\lambda} = hc\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}.$$

C În radiația împrăștiată prin efect Compton, creșterea lungimii de undă $\Delta\lambda$ nu depinde de lungimea de undă inițială și nici de natura substanței împrăștiătoare, ci doar de unghiul θ de împrăștiere.



Obs Efectul Compton are loc pe electronii slab legați în atomi, dacă energia $h\nu$ a fotonului incident este mai mare decât energia de legătură a electronului în atom.

Efectul Compton nu are loc pentru fotonii din domeniile vizibil și ultraviolet. Numai fotonii radiațiilor X și γ îndeplinesc condiția: $h\nu \gg E_{\text{legătură}}$.

Radiațiile electromagnetice se comportă ca un flux de particule cu energii și impulsuri bine determinate.

$$\varepsilon = h\nu$$

2.3. IPOTEZA DE BROGLIE. DIFRACTIA ELECTRONILOR. APLICAȚII



Louis de Broglie – premiul Nobel (1929) pentru descoperirea naturii ondulatorii a electronilor.

„Dacă în teoria luminii s-a neglijat aproape un secol aspectul corpuscular pentru a i se atașa doar aspectul de undă, oare nu s-a comis eroarea inversă în cazul substanței?”

Nu s-a greșit neglijând aspectul de undă pentru a se considera doar aspectul corpuscular al substanței?”



[11]



În general, prin radiație (sau raze) se definește emisia și propagarea în spațiu, însoțită de un transport de energie, a unor unde (radiația ondulatorie) sau particule (radiația corpusculară); oricare dintre radiații produce efecte de natură fizică, biologică sau chimică și exercită o presiune asupra corpurilor pe care ajunge.

Ipoteza de Broglie

Fenomenele luminoase de interferență, difracție, polarizare, reflexie sau refracție au putut fi explicate cu teoria ondulatorie, iar efectul fotoelectric, efectul Compton, emisia și absorbția luminii au putut fi explicate cu teoria corpusculară. Rezultă că lumina are un caracter dual, ondulatoriu și corpuscular. Proprietățile corpusculare ale radiațiilor electromagnetice devin predominante la frecvențe mari (efectul fotoelectric apare de la o anumită frecvență, specifică metalului iradiat, din domeniul vizibil sau ultraviolet; efectul Compton apare în domeniul radiațiilor X și γ).

Radiația electromagnetică prezintă și caracter discontinuu, deoarece este emisă, se propagă și este absorbită sub formă de cuante de energie sau flux de fotoni. Cua de energie a fotonului este $\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = m_f c^2$. Fiecare undă este

caracterizată de frecvența ν și lungimea de undă $\lambda = \frac{h}{m_f c} = \frac{h}{p_f}$,

iar fiecare foton este caracterizat de energia: $\varepsilon = h\nu$ și de

impulsul: $p_f = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

Iluminând foițele de la capetele tijelor orizontale, sprijinite pe un vârf ascuțit dintr-un balon vidat, ele se rotesc datorită presiunii exercitate de lumină, mai mare pe fețele lucioase decât pe fețele înnegrite (fig. [11]). În aer sistemul se rotește în sens invers, deoarece aerul din vecinătatea fețelor înnegrite, care absorb mai puternic radiația luminoasă, se încălzește mai mult și presiunea aerului pe aceste fețe este mai mare decât pe cele opuse.

În anul 1924, fizicianul francez Louis de Broglie a extins ipoteza dualismului undă-corpusul al luminii, asociind unei particule de substanță cu masa m , impulsul $\vec{p} = m\vec{v}$ și energia $E = mc^2$, o undă caracterizată de lungimea $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ și

frecvența $\nu = \frac{mc^2}{h}$. Putem observa efectele ondulatorii ale

particulelor de substanță (electroni, protoni, neutroni, ioni) dacă lungimile de undă ale undelor asociate, numite unde de Broglie, au același ordin de mărime cu dimensiunile fantelor sau obstacolelor care produc difracție.



*Difracția electronilor pe cristale

Electronii accelerați între catodul și anodul unui tun electronic câștigă energia cinetică $\frac{m_e v^2}{2} = eU$. Lungimea unei asociate are expresia: $\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e U}}$. Experimentele de difracție prin

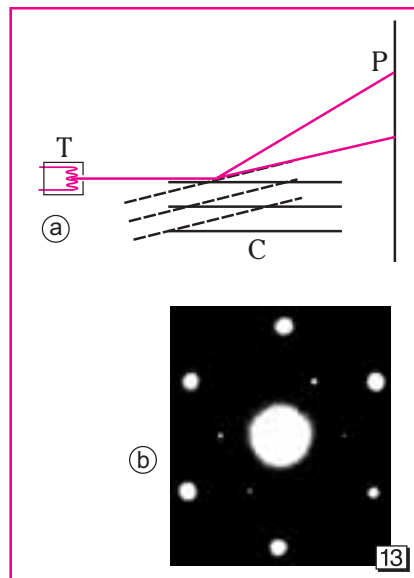
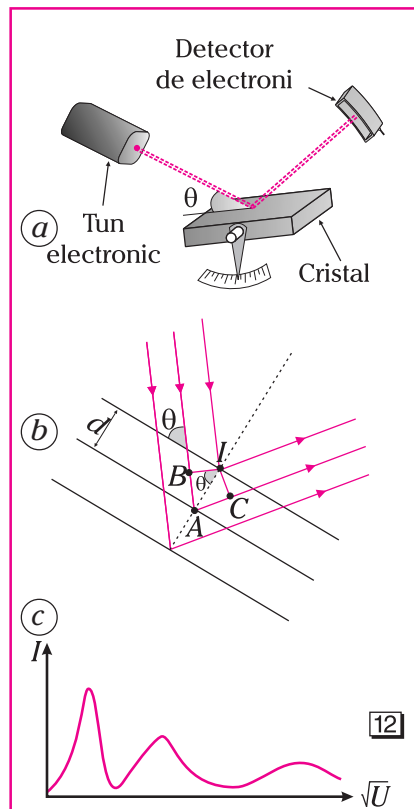
reflexie a unui fascicul de electroni, îndreptat spre un monocristal de nichel care se poate roti în jurul unei axe, efectuate de Davisson și Germer în 1927, au confirmat proprietățile ondulatorii ale electronilor (fig. 12, a). Atomii din rețeaua cristalină joacă rolul unei rețele de difracție care produce maxime de difracție pe anumite direcții care satisfac relația lui Bragg pentru condiția de maxim:

$2d \sin \theta = n\lambda$, unde $n = 1, 2, 3, \dots$ (diferența de drum a undelor care interferează este un număr întreg de lungimi de undă: $BA + AC = n\lambda$; $BA = AC = d \sin \theta$; d – distanța dintre planele atomilor și θ – unghiul dintre direcția fasciculului incident și aceste plane) fig. 12, b. S-a constatat că electronii care ajung la detector (un cilindru Faraday conectat la un galvanometru) determină intensitatea I a curentului, care prezintă valori maxime la anumite tensiuni de accelerare U corespunzătoare anumitor lungimi de undă fig. 12, c. Se obțin lungimi de undă comparabile cu ale radiațiilor X și cu distanța dintre plane.

Pentru $d = 2,15 \text{ \AA}$; $n = 1$; $U = 54 \text{ V}$; $\theta = 50^\circ$ se obține $\lambda = 1,6 \text{ \AA}$. Electronii pot fi înregistrați și pe un ecran fluorescent. Maximele de difracție ale unui fascicul de electroni și ale unui fascicul de radiații X pe un monocristal prezintă aceeași simetrie în jurul fasciculului incident (datorită dispunerii simetrice a diferitelor familii de plane atomice), fig. 13.

Energia E_c	$\lambda_{\text{electron}}$	$\lambda_{\text{proton sau neutron}}$
1 eV	$1,22 \cdot 10^{-9}$	$2,86 \cdot 10^{-11}$
10 eV	$3,88 \cdot 10^{-10}$	$9,05 \cdot 10^{-12}$
100 eV	$1,22 \cdot 10^{-10}$	$2,86 \cdot 10^{-12}$
1 keV	$3,88 \cdot 10^{-11}$	$9,06 \cdot 10^{-13}$
10 keV	$1,22 \cdot 10^{-11}$	$2,86 \cdot 10^{-13}$
100 keV	$3,70 \cdot 10^{-12}$	$9,05 \cdot 10^{-14}$

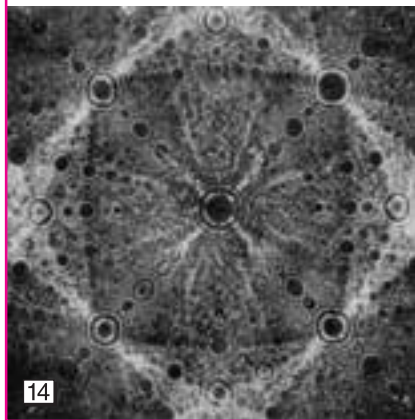
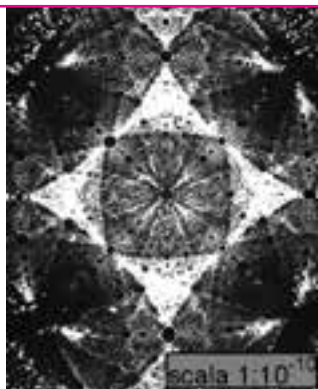
C Undele asociate se comportă analog radiațiilor X cu lungimi de undă de același ordin de mărime. Ulterior s-a verificat că și neutronii și protonii prezintă proprietăți ondulatorii. Putem considera că împrăștierea elastică ale particulelor sunt distribuite statistic, cu probabilități mai mari, la unghiul θ , iar difracția undelor prezintă maxime la unghiul θ .



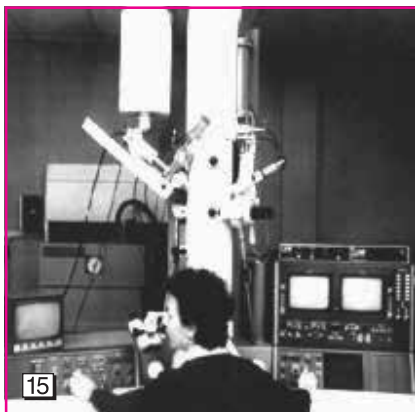
Obs Dacă se folosesc particule de substanță cu viteză foarte mare sau particule macroscopice cu masă mare, atunci lungimea de undă $\lambda = \frac{h}{mv}$ este mult prea mică pentru a fi difractată de particule atomice.



Ernst Ruska – premiul Nobel (1936) pentru construirea primului microscop electronic.



14



15

*Microscopul electronic

Puterea de rezoluție a instrumentelor optice este mai mare dacă lungimea de undă a radiației utilizate este mai mică. Lungimea de undă ale undelor asociate electronilor este mult mai mică decât lungimea de undă a radiațiilor vizibile. Microscoparele electronice dau o mărire de zeci de mii de ori. Ulterior s-au construit microscopale ionice care au condus la mărituri mult mai mari decât cele obținute cu microscopul electronic.

Microscoparele electronice ca și cele ionice permit examinarea pe un ecran fluorescent a structurilor microbiologice sau a pozițiilor atomilor în diferite structuri cristaline (fig. 14).

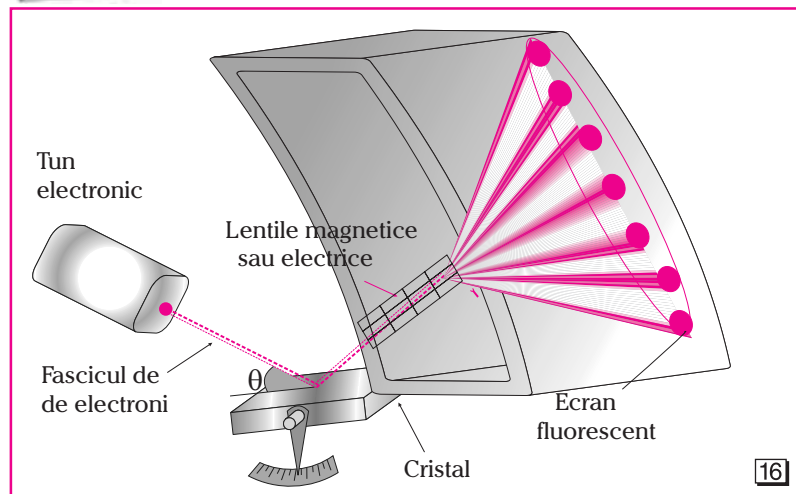
Pentru formarea imaginii obiectului se folosesc fascicule de electroni sau ioni în locul fasciculelor luminoase. Rolul lentilelor optice este îndeplinit de lentile magnetice și electrice după cum devierea fasciculului de electroni sau de ioni are loc într-un câmp magnetic sau într-un câmp electric. Imaginea electronică devine imagine luminoasă pe un ecran fluorescent. Ecranul fluorescent poate fi examinat direct sau fotografiat (fig. 15).

În microscopul electronic, electronii emiși de un filament încălzit sunt accelerați de un tun electronic vidat care lovesc proba supusă examinării.

Intensitatea fasciculului de electroni împrăștiați prezintă maxime și minime care sunt interpretate ca rezultat al interferenței undelor de Broglie, reflectate de planele cristalelor, la diferite unghiuri de împrăștiere (fig. 16).



Documentează-te și redactează un referat în care să prezinți structuri obținute cu microscopul electronic.



16

$$\varepsilon = h\nu$$

2.4. DUALISMUL UNDĂ-CORPUSCUL (*F₂)

Abordare ondulatorie sau corpusculară a unor situații*

Teoria concepută de fizicienii Heisenberg și Schrodinger pentru descrierea fenomenelor atomice și subatomice a primit numele de **mecanică cuantică**.

Ipoteza că dualismul undă-corpusul, observat în optică, trebuie să fie valabil și pentru substanță a fost verificată experimental. Unei particule de substanță cu masa m , care se mișcă liber cu viteza v , îi asociem o undă cu lungimea de undă de Broglie.

Proprietățile corpusculare ale particulelor monoenergetice sunt caracterizate de energia totală $E = m \cdot c^2$ a fiecărei particule și impulsul $p = m \cdot v$.

Proprietățile ondulatorii sunt caracterizate de lungimea de undă $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ a undei de Broglie și frecvența $\nu = \frac{mc^2}{h}$.

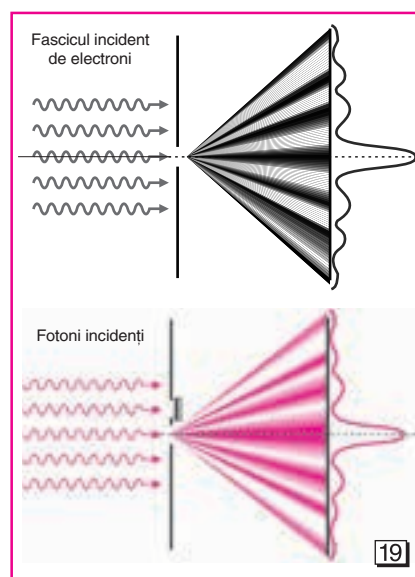
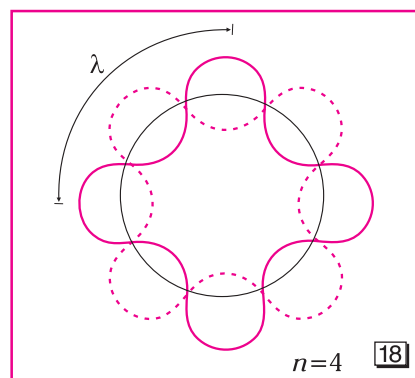
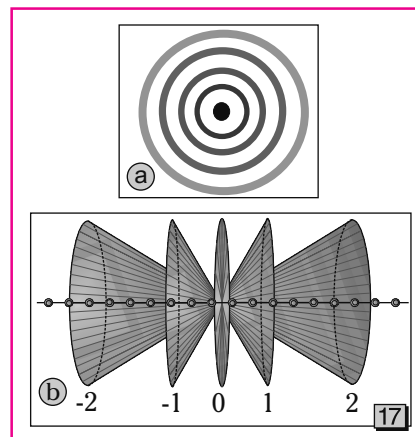
Să analizăm situațiile ilustrate:

– Figurile de difracție obținute (prin transmisie) pe mici cristale orientate haotic în pulberi – cu electroni rapizi de către Thomson sau cu radiații X monoenergetice de către Debye – prezintă cercuri concentrice (fig. [17]). Condiția de difracție Bragg este îndeplinită pentru undele difractate pe unele cristale după generatoarele unor conuri care intersectează un ecran fluorescent sau o placă fotografică și au ca axă comună un șir de atomi.

– Electronului care se deplasează cu viteza v pe orbita circulară de rază r în jurul nucleului atomic îi asociem o undă (fig. [18]). Pentru ca unda să se propage pe traiectoria circulară, cu formarea unor unde staționare, este necesar ca lungimea traiectoriei să fie un multiplu întreg de lungimi de undă:

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv}.$$

– Din mulțimea aparent haotică de puncte colorate de pe ecranul televizorului sau de pe o fotografie din ziar ne construim în minte imagini clare. Din mulțimea particulelor elementare împrăștiate aparent haotic, obținem comportări ondulatorii ca efecte statistice (fig. [19]). Comportarea ondulatorie a particulelor este folosită în optica electronică.



Aprecierea descrierii interacțiunilor din punct de vedere ondulatoriu/corpuscular*

Amintește-ți că o moleculă izolată nu are temperatură și nici nu exercită presiune, dar temperatura și presiunea aerului sunt efectul statistic al bombardamentului haotic al moleculelor de aer în cadrul mișcării de agitație. Particulele care trec printr-o fantă de lățime Δy se dispun statistic pe un ecran după o anumită distribuție de probabilitate (fig. [20]).

Pentru a ajunge într-un punct A de pe ecran, particula trebuie să capete un impuls $\Delta \vec{p}_y$ perpendicular pe direcția impulsului incident:

$$\Delta p_y = p \sin \theta = \frac{h}{\lambda} \sin \theta.$$

Pentru unda de Broglie difractată sub unghiul θ , nedeterminarea în poziție Δy este generată de impulsul de recul al atomilor din rețea care apare la împrăștierea undelor.

Scriem condiția pentru primul minim de difracție:

$$(\Delta y) \sin \theta = \lambda.$$

Produsul impreciziilor Δy și Δp_y ale unei particule este mai mare sau cel puțin egal cu constanta lui Planck:

$$\Delta y \Delta p_y = h \geq \frac{h}{2\pi}$$

(relația de nedeterminare a lui Heisenberg).

Observăm că o micșorare Δy a lățimii fantei pentru a mări precizia localizării poziției particulei conduce la o mărire a unghiului de împrăștiere θ și a componentei verticale Δp_y a impulsului, deci se mărește probabilitatea ca particula să aibă un impuls mai prost determinat pe axa verticală.

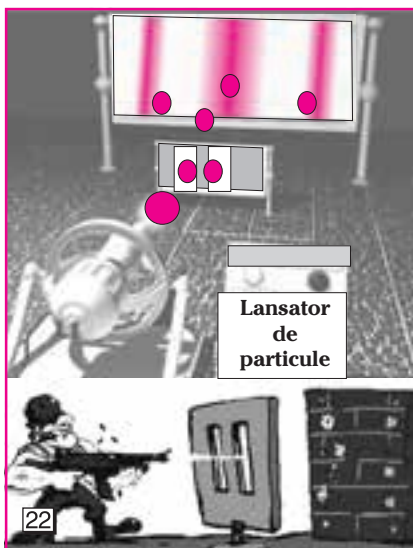
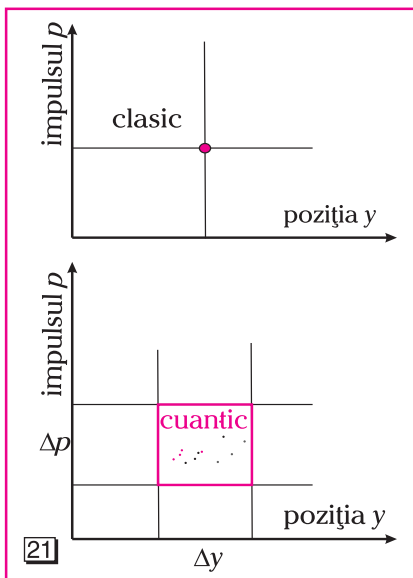
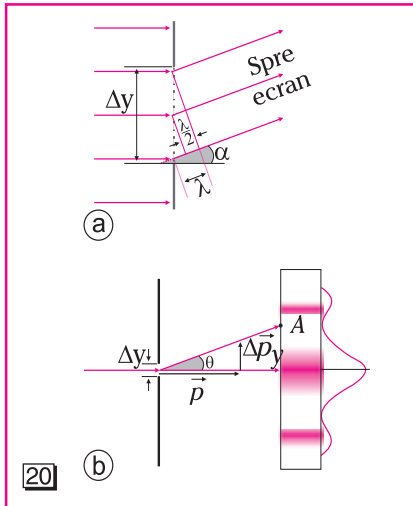
C Poziția și impulsul unei particule, din punct de vedere clasic, pot fi determinate precis și simultan.

Poziția și impulsul unei microparticule, din punct de vedere cuantic, nu pot fi determinate precis și simultan (fig. [21]).

Proprietățile ondulatorii ale unui fascicul de particule (electroni, protoni, neutroni) pot fi puse în evidență dacă acesta întâlnește obstacole (fante, rețele) cu dimensiuni comparabile ca ordin de mărime cu lungimea de undă de

Broglie asociată $\lambda = \frac{h}{p}$ (fig. [22]).

Dacă fasciculul de particule întâlnește deschideri ale fantelor sau rețele cu distanța dintre planele reticulare ale atomilor cu dimensiuni mult mai mari decât λ , atunci nu apar proprietățile ondulatorii ale particulelor.



(*F₂)

1. Un monocristal cu distanța $d = 2 \text{ \AA}$ între planele atomice, numită constantă de rețea, este iradiat cu electroni. Unghiul de difracție pentru maximul de ordin doi ($n = 2$) este $\theta = 30^\circ$. Să calculăm lungimea undelor de Broglie.

Rezolvare:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \text{ deci } \lambda = \frac{2d \sin \theta}{n} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,5}{2} = 1 (\text{\AA}).$$

2. Mișcările electronilor în jurul nucleului pot fi descrise și cu ajutorul undelor staționare de lungime de undă λ (fig. [23]). Pentru ca electronul să parcurgă o orbită stabilă de rază r , unda nu trebuie să se anuleze prin interferență, adică lungimea orbitei trebuie să fie egală cu un număr întreg de lungimi de undă: $2\pi r = n\lambda$.

Ce relație satisface momentul cinetic?

Rezolvare:

Rezultă $2\pi r = nh/mv$, deci momentul cinetic satisface relația: $mv r = nh/2\pi$.

3. Cu relațiile Heisenberg, $\Delta x \Delta p_x = h$, se poate evalua energia de legătură și raza r a orbitei atomului de hidrogen:

$$E_{\text{totală}} = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \text{ unde } m, e \text{ și } p \text{ sunt masa, sarcina și,}$$

respectiv, impulsul electronului?

Rezolvare:

Vom face o aproximație drastică înlocuind: $\Delta x = 2\pi r$ și

$$\Delta p = p \text{ și obținem } 2\pi r p = h; E_{\text{totală}} = \frac{p^2}{2m} - \frac{pe^2}{2\epsilon_0 h}.$$

Această funcție de gradul II admite minim pentru energia care corespunde evoluției atomului de hidrogen spre starea cea mai probabilă de echilibru stabil:

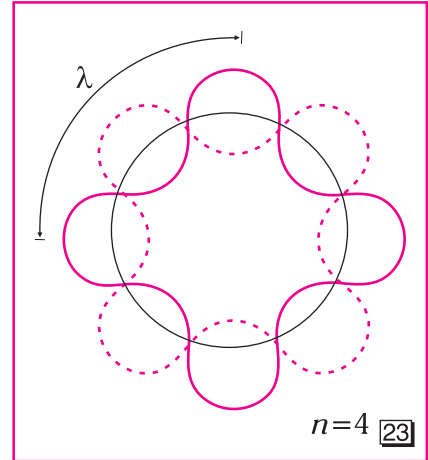
$$\frac{dE}{dp} = 0 \Rightarrow p_1 = \frac{me^2}{2\epsilon_0 h}.$$

Calculăm:

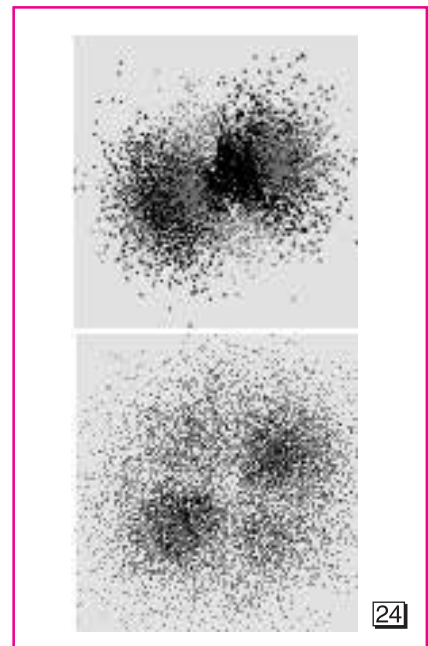
$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} (\text{m}) \text{ și, respectiv, } E_1 = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13,6 (\text{eV}),$$

iar energia de legătură $E_{\text{leg}} = -E_1 = +13,6 \text{ eV}$.

Rezultă că ideea orbitelor clasice într-un atom este incompatibilă cu imaginea ondulatorie. Incertitudinea asupra poziției electronului manifestându-se pe orice direcție ($\Delta r = \Delta x \approx r$), conduce la înlocuirea orbitei circulare cu un nor electronic în jurul nucleului (fig. [24]).

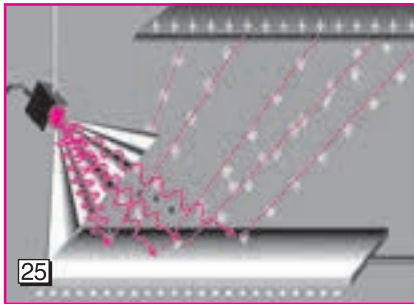


Dacă raportul dintre lungimea orbitei electronului, considerată circulară și lungimea de undă este un număr întreg, atunci după o rotație completă în jurul nucleului, unda se întoarce în punctul inițial cu aceeași fază și amplitudine. În acest caz, orbita electronului este staționară: în fiecare punct al orbitei se stabilește un regim de oscilație staționar și nu apare radiație. Dacă nu se verifică această condiție, la revenirea în punctul inițial faza și amplitudinea undei se modifică și nu se mai obține un regim staționar.



$$\varepsilon = h\nu$$

2.5. PROBLEME ȘI TESTE PROPUSE



2.5.1.* Probleme recapitulative rezolvate

1. Asupra unei plăci de zinc legate la un electroscoop neîncărcat electric este dirijat un fascicul de radiație monocromatică ultravioletă cu lungimea de undă $\lambda = 200 \text{ nm}$ (fig. 25). Lungimea de undă maximă a radiației care mai produce efect fotoelectric are valoarea $\lambda_{\max} = 234 \text{ nm}$. Exprimă energia cinetică a fotoelectronilor.

Rezolvare:

$$h \frac{c}{\lambda} = h \frac{c}{\lambda_{\max}} + \frac{mv^2}{2} \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - h \frac{c}{\lambda_{\max}}.$$

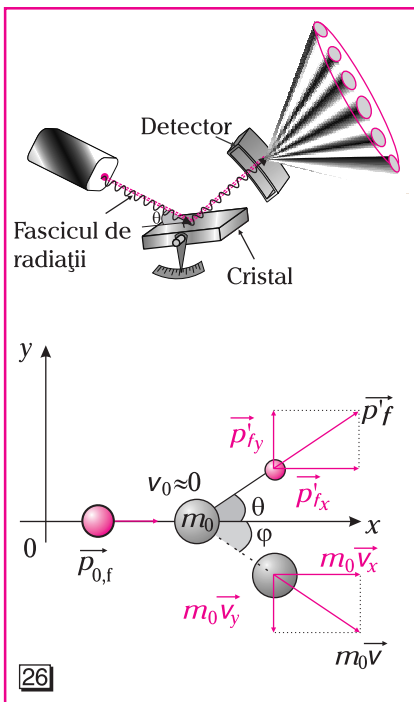
2*. Fotonii incidenți cu lungimea de undă λ_0 suferă împrăștiere Compton pe electronii grafitului sub unghiul θ . Calculează unghiul φ al electronilor nerelativiști după interacțiune (fig. 26).

Rezolvare:

Din conservarea componentelor impulsurilor pe direcțiile axelor Ox și Oy :

$$\begin{cases} \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu}{c} \cos \theta + m_{0,e} v \cos \varphi \\ 0 = \frac{h\nu}{c} \sin \theta - m_{0,e} v \sin \varphi \end{cases} \quad \text{Obținem}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sin \theta}{(\lambda/\lambda_0) - \cos \theta}, \text{ unde } \lambda = \lambda_0 + 2 \frac{h}{m_{0,e} c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$



- ✓ Energia unui foton: $E = h\nu$, unde $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$;
- ✓ Ecuația efectului fotoelectric:

$$h\nu = L_{\text{extr}} + E_c = h\nu_0 + \frac{m_e v^2}{2},$$

unde m_e – masa fotoelectronilor emiși cu viteza v ,

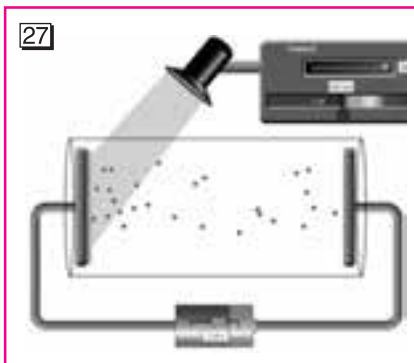
$L_{\text{extr}} = h\nu_0$ reprezintă lucrul de extracție;

- ✓ E_c – energia cinetică a electronilor: $\frac{m_e v^2}{2} = h\nu - h\nu_0 = eU_0$,

unde U_0 – tensiunea de frânare (fig. 27);

- ✓ Lungimea de undă λ asociată unei particule cu impulsul p

se definește: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$.



2.5.2. Probleme cu grad scăzut de dificultate

1. Radiațiile violete cu $\lambda = 400$ nm ajung pe o placă metalică de cesiu cu lucrul mecanic de extracție $L_{extr} = 2,95 \cdot 10^{-19}$ J. Fotoelectronii emiși au energia cinetică maximă:

- a) $E_{c, max} = 2 \cdot 10^{-19}$ J; b) $E_{c, max} = 2 \cdot 10^{-18}$ J;
c) $E_{c, max} = 2 \cdot 10^{-20}$ J; d) $E_{c, max} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ J.

2. Tensiunea de stopare U_s a fotoelectronilor emiși de un catod, cu lucrul mecanic de extracție L_{extr} , iradiat cu radiație ultravioletă de frecvență ν este obținută din relația corectă:

a) $|U_s| = \frac{h\nu + L_{extr}}{e}$; b) $|U_s| = \frac{h\nu - L_{extr}}{e}$;

c) $U_s = \frac{h\nu}{e}$; d) $U_s = \frac{L_{extr}}{e}$.

3. Energia de repaus a electronului are valoarea:

- a) $E_{o,e} = 8,2 \cdot 10^{-14}$ J; b) $E_{o,e} \approx 5$ MeV;
c) $E_{o,e} = 8,1 \cdot 10^{-19}$ J; d) $E_{o,e} \approx 5$ eV.

4. Fotonii radiațiilor cu $\lambda = 700$ nm au masa de mișcare:

- a) $m \approx 10^{-34}$ kg; b) $m \approx 2 \cdot 10^{-36}$ kg;
c) $m \approx 3 \cdot 10^{-36}$ kg; d) $m \approx 10^{-37}$ kg.

5. Masa de mișcare a fotonilor luminii albastre este:

a) egală cu a fotonilor luminii roșii; b) mai mare decât a fotonilor luminii roșii; c) mai mică decât a fotonilor luminii roșii.

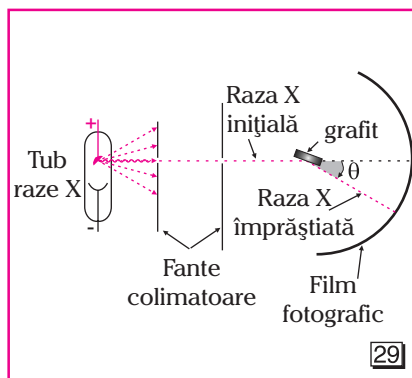
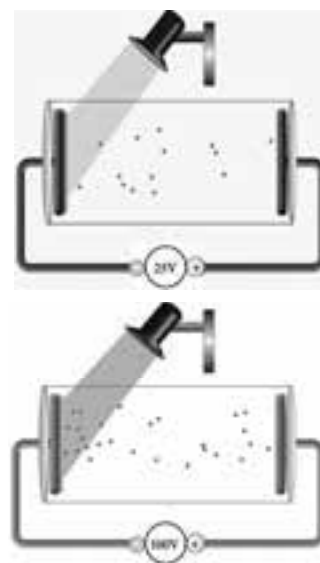
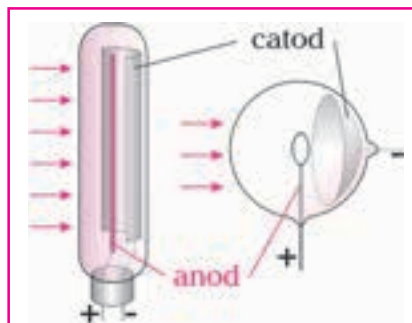
6. Viteza maximă a fotoelectronilor extrași din catodul de argint (fig. 28) cu $L_{extr} = 4,7$ eV, iradiat cu $\lambda_1 = 150$ nm are ordinul de mărime:

- a) 10^5 m/s; b) 10^6 m/s; c) 10^7 m/s; d) 10^8 m/s.

7. Dacă lungimea de undă a fotonului incident este λ_0 , iar a fotonului împrăștiat pe un electron este λ , într-un experiment Compton (fig. 29), atunci variația relativistă a masei acestui electron este:

a) $\Delta m = \frac{h}{c} \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right)$; b) $\Delta m = \frac{h}{c} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$;

c) $\Delta m = \frac{hc}{\lambda_0}$; d) $\Delta m = 0$.



În probleme se consideră știute:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C};$$

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

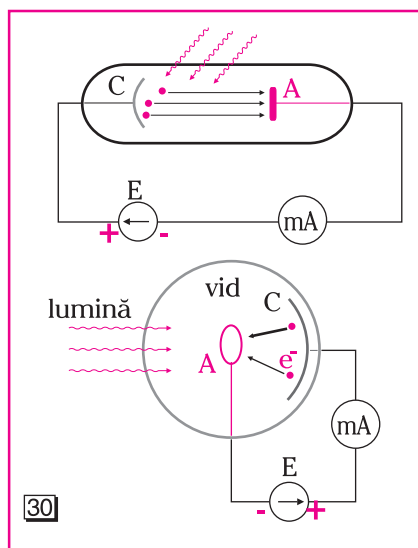
$$m_{0,e} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$



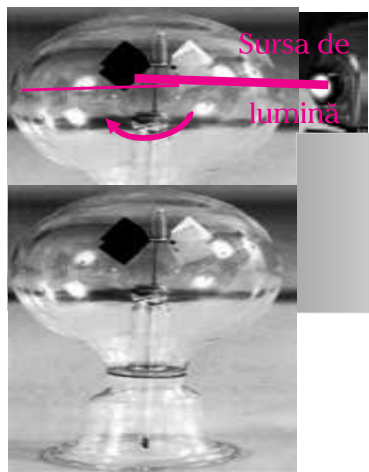
1a; 2b; 3a; 4c; 5b; 6b; 7a.



Werner Heisenberg – premiul Nobel (1932) pentru crearea mecanicii cuantice.



30



31

2.5.3. Probleme cu grad mediu de dificultate

1. Potențialul V_{max} pe care îl poate atinge o sferă de zinc prin iluminare cu radiații X de frecvențe ν se poate măsura cu un electrometru sensibil. Lucrul mecanic de extracție se poate calcula cu expresia:

a) $h\nu + eV_{max}$; b) $h\nu - eV_{max}$; c) $\frac{h\nu + eV_{max}}{2}$; d) $\frac{h\nu - eV_{max}}{2}$.

2. Una dintre afirmațiile următoare este corectă:

- a) în cazul electronilor complet liberi nu poate să apară efect fotoelectric, dar poate să apară efect Compton;
- b) în cazul electronilor legați poate să apară efect Compton;
- c) în cazul electronilor aproape liberi nu poate să apară efect Compton;
- d) în cazul electronilor legați nu poate să apară efect fotoelectric sub acțiunea razelor X.

3. Folosim schema pentru studiul experimental al efectului fotoelectric (fig. 30), dar anodul este la potențial negativ, tensiunea de stopare U_S are valoarea $U_{S1} = 1$ V pentru o frecvență $\nu_1 = 1,16 \cdot 10^{15}$ Hz a radiației folosite și respectiv $U_{S2} = 2$ V pentru o frecvență $\nu_2 = 1,40 \cdot 10^{15}$ Hz (din domeniul U.V.). Frecvența de prag a radiației incidente este:

- a) $\nu_0 = 0,24 \cdot 10^{15}$ Hz; b) $\nu_0 = 1,28 \cdot 10^{15}$ Hz;
- c) $\nu_0 = 0,92 \cdot 10^{15}$ Hz; d) $\nu_0 = 0,68 \cdot 10^{15}$ Hz.

4. Un flux de fotoni ai unei radiații din U.V. cu $\lambda = 300$ nm și cu o putere $P = 1 \mu\text{W}$ ajunge pe fotocatodul unei celule fotoelectrice. Numărul de fotoni care sosesc pe fotocatod în timp de 33 secunde este:

- a) $N = 10^{23}$; b) $N = 6 \cdot 10^{10}$; c) $N = 5 \cdot 10^{13}$; d) $N = 3 \cdot 10^{19}$.

5. Lumina exercită o presiune asupra corpurilor pe care cade (fig. 31). Pentru o suprafață $\Delta S = 1$ m², caracterizată de un coeficient de reflexie ρ , care primește în fiecare interval de timp $\Delta t = 1$ secundă o radiație monocromatică de frecvență ν , presiunea totală depinde de iluminarea energetică corespunzătoare întregului fascicul $E_e = W = Nh\nu$:

a) $p = (1 + \rho) \frac{W}{c}$; b) $p = \frac{W}{c}$; c) $p = 2\rho \frac{W}{c}$; d) $p = (1 - \rho) \frac{W}{c}$.

6*. Un fascicul monocromatic de fotoni corespunzători lungimii de undă λ_0 suferă o împrăștiere de tip Compton invers, pe un fascicul de electroni monoenergetici, liberi și în mișcare, iar după interacțiune practic electronii se opresc. Lungimea de undă l după interacțiune este dependentă de unghiul θ de împrăștiere:

a) $\lambda = \lambda_0 + \Lambda(1 - \cos\theta)$; b) $\lambda = \lambda_0 - \Lambda(1 - \cos\theta)$;

c) $\lambda = \lambda_0 \sin^2 \frac{\theta}{2}$; d) $\lambda = \lambda_0 \cos\theta$.

7. Frecvența fotonului se modifică în câmp gravitațional, deoarece masa fotonului are și proprietăți gravitaționale. Un foton cu frecvența $\nu = 10^{15}$ Hz la înălțimea $h = 10$ km va avea la suprafața Pământului, considerând accelerația gravitațională medie $g = 9,7$ m/s² pe această porțiune, o creștere de frecvență:

a) $\Delta\nu = 20$ Hz; b) $\Delta\nu = 1,1 \cdot 10^3$ Hz;

c) $\Delta\nu = 110$ Hz; d) $\Delta\nu = 4 \cdot 10^2$ Hz.

8. Un electron cu masa $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg și sarcina electrică $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C este accelerat, pornind din repaus, de tensiunea electrică U . Expresia corectă a lungimii de undă de Broglie (unda asociată electronului) este:

a) $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U}}$; b) $\lambda = \frac{2h}{\sqrt{2em_0U}}$;

c) $\lambda = \frac{2h}{\sqrt{em_0U}}$; d) $\lambda = \frac{hU}{\sqrt{em_0U}}$.

9. Impulsul fotonului radiației de frecvență n care se propagă într-un mediu cu indicele de refracție n este:

a) $p = \frac{h\nu}{nc}$; b) $p = \frac{hn}{\nu c}$; c) $p = \frac{h\nu c}{n}$; d) $p = \frac{h\nu n}{c}$.

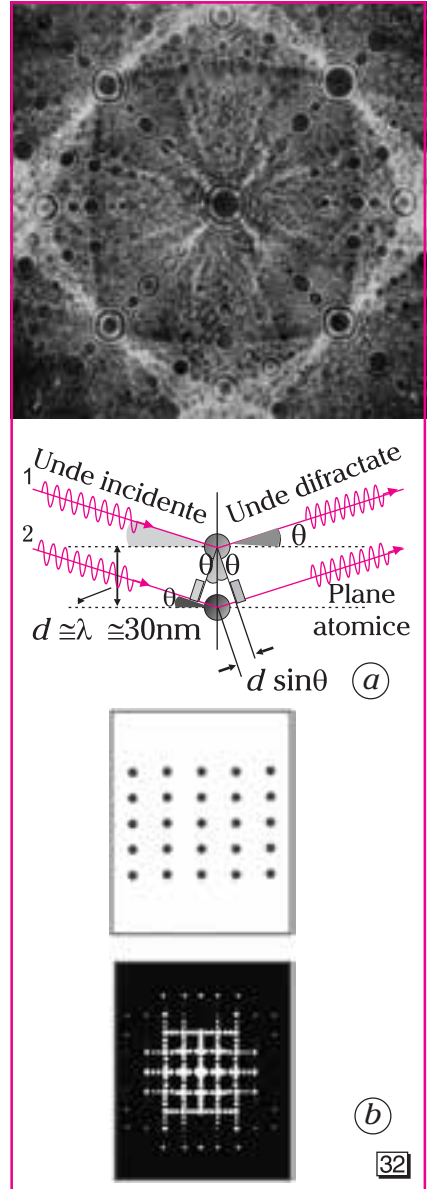
10. Să considerăm particule relativiste: $\lambda = \frac{h}{p}$, unde $p = \sqrt{\frac{E^2}{c^2} - m^2 c^2}$. Electronii accelerați sub tensiunea $U = 100$ V pun în evidență proprietățile ondulatorii ale electronilor (fig. 32a) într-o experiență de tipul Davisson-Germer, dacă monocristalul are distanța dintre planele reticulare (fig. 32b):

a) $d = 1,22$ Å; b) $d = 12,2$ Å; c) $d = 3,9$ Å; d) $d = 0,39$ Å.

2.5.4. Test pentru autoevaluare

11. Pentru ochiul uman normal, pragul energetic de la care apare senzația de lumină are valoarea $E_{min} \approx 600$ eV $\approx 9,6 \cdot 10^{-17}$ J în timp de o secundă, dacă $\lambda = 550$ nm. Care este numărul minim de fotoni?

a) $N = 160$; b) $N \approx 266$; c) $N = 444$; d) $N = 1200$.



Proprietățile ondulatorii ale unui fascicul de particule (electroni, protoni, neutroni) pot fi puse în evidență dacă acesta întâlnește obstacole (fante, rețele) cu dimensiuni comparabile ca ordin de mărime cu lungimea de undă de Broglie asociată

$\lambda = \frac{h}{p}$. Dacă fasciculul de particule întâlnește deschideri ale fantelor sau rețele cu

distanța dintre planele reticulare ale atomilor cu dimensiuni mult mai mari decât λ , atunci nu apar proprietățile ondulatorii ale particulelor.



Clinton Davisson și George Thomson – premiul Nobel (1937) pentru descoperirea experimentală a difracției electronilor, produsă de cristale.



Max Born – premiul Nobel (1954) pentru cercetările sale fundamentale în mecanica cuantică, în special pentru interpretarea statistică a funcției de undă.



1b; 2a; 3c; 4c; 5a; 6b; 7b; 8a; 9d; 10a; 11b; 12a; 13a; 14a; 15b; 16b.

12*. Un foton cu lungimea de undă λ_0 este împrăștiat de un electron liber. Dacă variația lungimii de undă a fotonului este $\Delta\lambda$, atunci energia cinetică a electronului de recul se calculează cu relația:

$$\text{a) } E_c = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}; \text{ b) } E_c = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda_0(\lambda_0 - \Delta\lambda)};$$

$$\text{c) } E_c = \frac{hc(\lambda_0 + \Delta\lambda)}{\lambda_0(\lambda_0 - \Delta\lambda)}; \text{ d) } E_c = \frac{hc(\lambda_0 - \Delta\lambda)}{\lambda_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}.$$

13. Raportul lungimilor de undă de Broglie atașate unui electron și unui corp cu masa $m = 10^{-4}$ kg care se deplasează cu aceeași viteză este:

$$\text{a) } \frac{\lambda_e}{\lambda_c} \approx 1,1 \cdot 10^{26}; \text{ b) } \frac{\lambda_e}{\lambda_c} = 1,1 \cdot 10^{27};$$

$$\text{c) } \frac{\lambda_e}{\lambda_c} = 10^{28}; \text{ d) } \frac{\lambda_e}{\lambda_c} = 10^{29}.$$

14. Lungimea de undă asociată unui electron cu energia cinetică $E_C = 100$ eV este:

$$\text{a) } \lambda = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}; \text{ b) } \lambda = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ m};$$

$$\text{c) } \lambda = 3,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}; \text{ d) } \lambda = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}.$$

15. Lungimea de undă de Broglie pentru o particulă cu masa de repaus m_0 și energia cinetică E_C se calculează cu relația:

$$\text{a) } \lambda = \frac{h}{\sqrt{E_C}}; \text{ b) } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_C}};$$

$$\text{c) } \lambda = \frac{h}{\sqrt{m_0 E_C}}; \text{ d) } \lambda = \frac{\sqrt{2m_0 E_C}}{h}.$$

16. Energia cinetică a unui electron cu lungimea de undă de Broglie λ se exprimă prin relația:

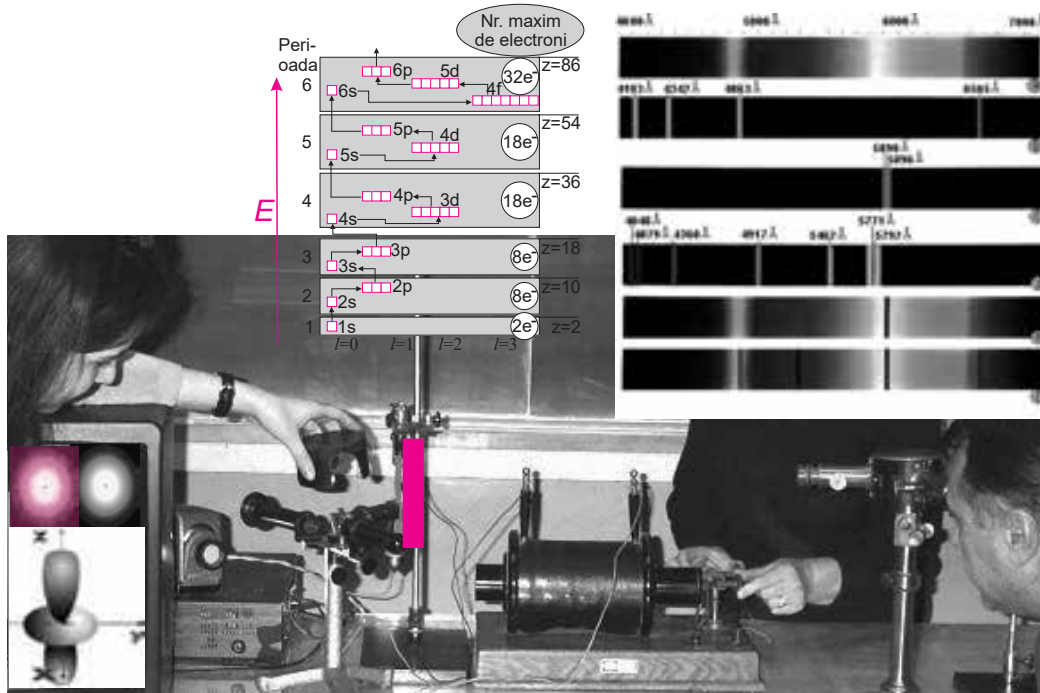
$$\text{a) } E_C = \frac{h}{2m_{0,e}\lambda}; \text{ b) } E_C = \frac{h^2}{2m_{0,e}\lambda^2};$$

$$\text{c) } E_C = \frac{h^2}{2m_{0,e}\lambda}; \text{ d) } E_C = \frac{h^2}{2m_{0,e}^2\lambda}.$$



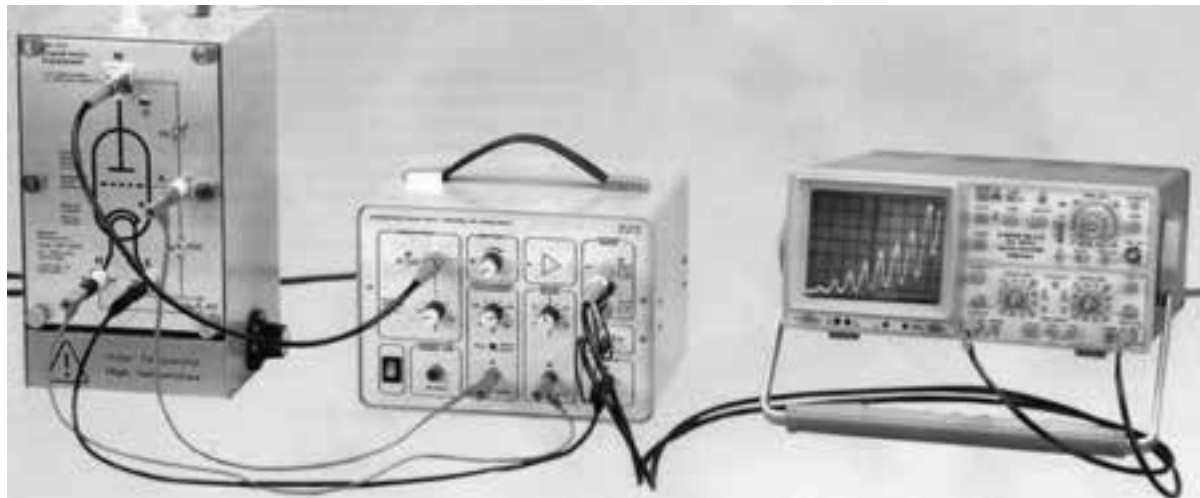
17. Scrie un eseu despre activitatea științifică a fizicienilor din imagini, după ce te documentezi.

FIZICA ATOMICĂ



„Teoria a avut și are un rol important în fizică, dar ea s-a bizuit întotdeauna pe experiment și nu este acceptată decât atunci când duce la rezultate ce pot fi verificate experimental.”

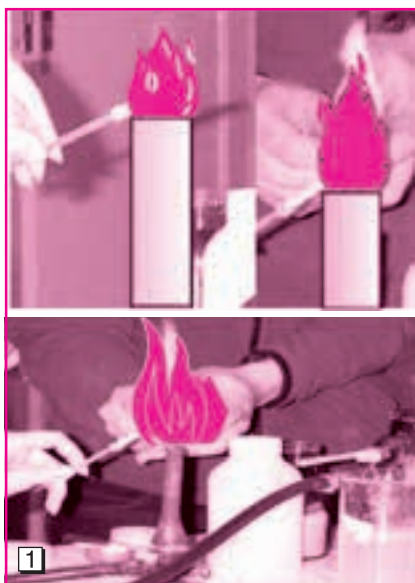
Henry Lipson





3.1. SPECTRE

Investigarea experimentală calitativă a unor spectre de emisie/absorbție

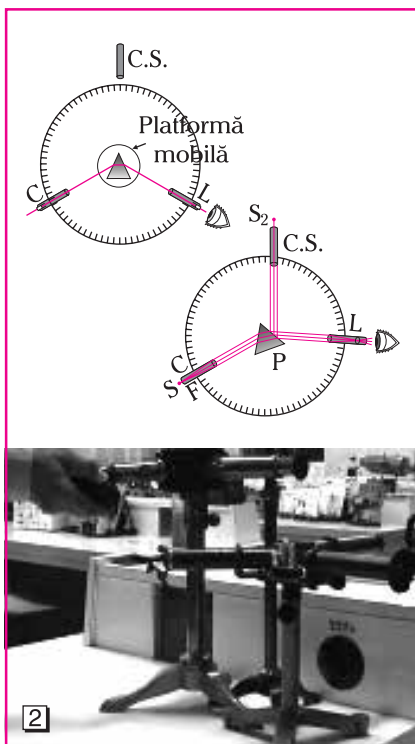


E Dacă arunci sare de bucătărie într-o flacără, vei observa că flacăra se colorează în galben. Tampoane de vată sau bucăți de azbest îmbibate cu soluție de clorură de sodiu (NaCl) sau clorură de stronțiu (SrCl_2), prinse cu un clește cu mânere termoizolatoare și introduse în vârful unei flăcări (de la o spirtieră sau bec Bunsen), unde temperatura este mai mare, au anumite culori dominante (a radiației galbene mai intense emise de sodiu și, respectiv, a radiației roșii emise de stronțiu) (fig. 1). O sârmuliță de cupru, ținută cu un clește în flacără, dă o culoare dominantă verde. Rezultă că fiecare sursă de radiații emite un spectru caracteristic.

Analiza radiațiilor se poate face cu spectroscopul cu prismă (fig. 2). Spectrul obținut cu ajutorul prisme constă dintr-o succesiune de imagini monocromatice ale unei fante, îngustă și paralelă cu muchia prisme, iluminată de sursa de radiații analizate. Linia spectrală reprezintă imaginea fantei când sursa emite o radiație monocromatică. Spectrul de emisie reprezintă totalitatea radiațiilor monocromatice emise de o substanță. Părțile spectroscopului cu prismă:

- prisma optică (P), fixată pe o masuță, dispersează radiațiile luminoase primite din colimator;
- colimatorul (C) are o fantă dreptunghiulară reglabilă spre capătul luminat de sursa analizată și o lentilă convergentă la celălalt capăt. Fasciculul luminos emergent are razele paralele dacă fanta este așezată în focarul lentilei;
- luneta (L), cu ajutorul căreia analizăm spectrele obținute la ieșirea din prismă;
- colimatorul cu scala gradată ($C.S.$), pe ale cărei diviziuni semitransparente ajunge lumina de la altă sursă și se reflectă pe fața prisme dinspre lunetă.

Prin luneta unui spectroscop se observă spectrul suprapus peste scala gradată. Atomii excitați ai substanțelor aflate în stare gazoasă sau de vapori emit un număr finit de radiații monocromatice, care formează un spectru de linii caracteristic specimenului atomic din sursa luminoasă analizată (flacără



sau descărcare electrică într-un tub care conține gaz la presiune mică) (fig. [3]). Spectrele substanțelor aflate în stare atomică sunt discrete, formate din linii spectrale (imaginea fantei în diverse culori). Structura spectrelor poate fi analizată și în afara domeniului vizibil, cu ajutorul filmelor fotografice. Rezultă că spectrul de linii produs de atomii excitați ai gazelor permite recunoașterea elementelor chimice constitutive; culorile și pozițiile acestor linii în spectru sunt caracteristice fiecărui element chimic.

Fiecare element chimic emite spectrul său caracteristic:

- gazele atomice emit un spectru de linii;
- gazele moleculare (N_2 , O_2) emit un spectru de benzi (linii numeroase care degenerează în spectre aproape continue).

Corpurile solide sau lichide incandescente (filament incandescent, metal topit) emit un spectru continuu.

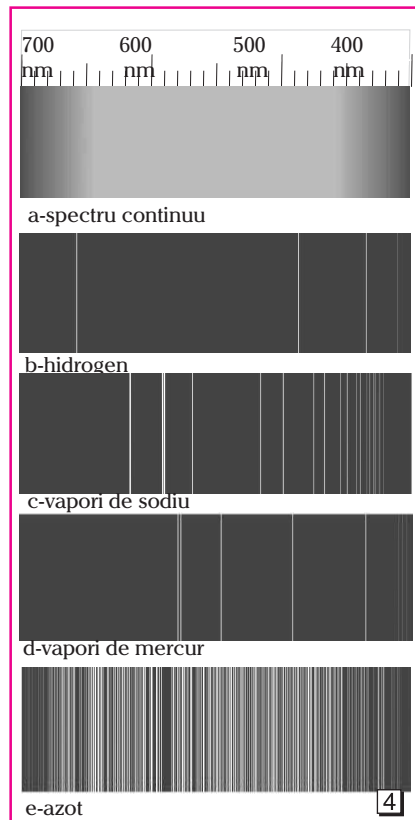
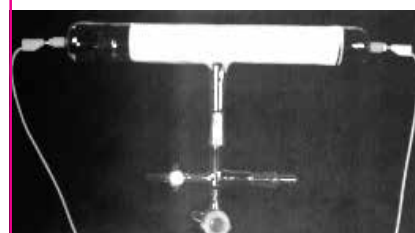
E Spectrul filamentului incandescent al unui bec este continuu, ca și spectrul luminii emise de Soare (fig. [4a]). Analizăm la spectroscop radiațiile emise de tuburi cu descărcări electrice în gaze care au presiuni mici. Când pe electrozii unui tub se aplică o tensiune ridicată, știi că au loc descărcări electrice însoțite de radiații luminoase care formează câteva linii caracteristice (culorile sunt specifice fiecărei substanțe: hidrogen (fig. [4b]), vapori de sodiu (fig. [4c]), vapori de mercur (fig. [4d]). În spectrele de bandă ale elementelor în stare moleculară, liniile sunt foarte apropiate la una din extremitățile fiecărei benzi (fig. [4e]). Un gaz va emite mai multe radiații de culori diferite și de intensități diferite dacă este mai puternic încălzit sau tensiunea dintre electrozi este mai mare, deoarece crește numărul de atomi care ajung în stări excitate.

În anul 1900, fizicianul Max Planck a introdus conceptul de cuantă de energie. **Cuanta de energie** reprezintă cantitatea de energie care poate fi absorbită sau emisă de un sistem atomic.

Fiecare linie spectrală constă în radiația emisă de mai mulți atomi identici care se dezexcită între aceleași stări energetice și emit cuante de energie $h\nu = \Delta E$, unde ΔE – diferența de energie între nivelul superior energetic și cel inferior energetic.

Excitarea atomilor sursei constă în absorbția de energie și trecerea atomilor în stări energetice superioare, din care revin practic imediat (după 10^{-8} - 10^{-9} s) prin dezexcitare, emițând cuante de energie radiantă, $\epsilon = h\nu$.

C Reține că spectrul de emisie/absorbție al substanțelor poate fi: continuu, discret sau de bandă.





Spectre de emisie-linii



Spectre de absorbție-linii



Tuburi fără descărcări în gaze



Spectru de emisie-bandă

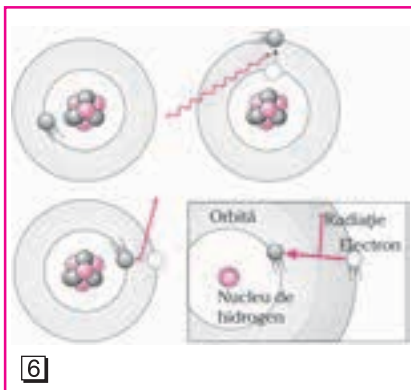


Spectre de absorbție-bandă



Cuve cu soluții

[5]



[6]



[7]

E Analizăm la spectroscop radiațiile spectrului continuu emis de un filament incandescent, care străbat tuburi în care nu se produc descărcări electrice sau străbat o cuvă cu o soluție apoasă bazică sau acidă. Observăm linii negre sau benzi întunecate (fig. [5]). Înseamnă că atomii au absorbit radiațiile pe care puteau să le emită.

C *Spectrul de emisie* este dat de totalitatea tranzițiilor radiative de pe nivelele energetice superioare ale atomilor sau moleculelor unei substanțe pe nivelele inferioare. Este caracteristic unui anumit specimen atomic și servește la identificarea lui prin analiză spectrală (în aliaje, de exemplu).

Spectrul de absorbție poate fi obținut la trecerea unui fascicul cu spectru continuu prin substanța analizată (când vor fi absorbite numai acele radiații caracteristice care trec electronii de pe nivelele energetice inferioare pe nivelele superioare ale atomilor sau ale moleculelor, iar intensitatea liniilor sau benzilor spectrale devine mai mică). Spectrele de absorbție sunt caracteristice specimenelor atomice din substanța prin care trec, care absorb acele radiații pe care le pot emite (fig. [5]).

Analiza spectrală calitativă identifică câteva linii ale spectrului substanței analizate din spectrele de linii caracteristice ale elementelor chimice cunoscute din cataloagele laboratoarelor de spectroscopie. Fiecare element chimic emite sau absoarbe un număr de linii spectrale caracteristice nivelelor de excitație din izvorul spectral folosit (flacăra, arc electric sau descărcare electrică în gaze cu presiune mică). Spectrul Soarelui poate fi comparat cu spectrele elementelor de pe Pământ?

Analiza spectrală cantitativă măsoară intensitatea liniilor spectrale caracteristice, care depinde de concentrația atomilor emițători. Spectrul solar este un spectru de absorbție. Când este analizat cu un spectroscop cu mare putere de rezoluție, se observă o serie de linii întunecate care corespund radiațiilor absorbite, din spectrul continuu emis de zona centrală a Soarelui, de către atomii gazelor mai reci din atmosfera solară.

Particula atașată câmpului electromagnetic, numită foton, transferă energia $\varepsilon = h\nu$ a unei cuante de energie la absorbția sau la emisia radiațiilor electromagnetice de către atomi, unde $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s (constanta lui Planck) și ν este frecvența radiației absorbite sau emise (fig. [6]). În anul 1885, Balmer a analizat spectrul de emisie al hidrogenului atomic dintr-un tub de descărcări electrice și a găsit o relație care permitea calcularea lungimilor de undă λ din domeniul vizibil. În anul 1890, Rydberg a stabilit relația generală care descrie toate seriile spectrale ale hidrogenului:

$$\frac{1}{\lambda} = \tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

unde numărul de undă $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$, $R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$, iar i și n sunt numere întregi. Numărul i caracterizează seria spectrală, iar n caracterizează linia spectrală.

Seriile spectrale ale hidrogenului poartă numele celor care le-au descoperit (fig. 71):

- Lyman (în anul 1906), domeniul ultraviolet ($i = 1$ și $n = 2, 3, 4, \dots$);
- Balmer (în anul 1885), domeniul vizibil ($i = 2$ și $n = 3, 4, 5, 6$);
- Paschen (în anul 1908), domeniul infraroșu ($i = 3$ și $n = 4, 5, 6, \dots$);
- Brackett (în anul 1922), domeniul infraroșu ($i = 4$ și $n = 5, 6, 7, \dots$);
- Pfund (în anul 1924), domeniul infraroșu îndepărtat ($i = 5$ și $n = 6, 7, 8, \dots$);
- Humphrey (în anul 1925), domeniul infraroșu îndepărtat ($i = 6$ și $n = 7, 8, 9, \dots$).

Obs

Frecvențele liniilor spectrale din spectrul de emisie al unei specii de atomi sunt egale cu frecvențele liniilor spectrale din spectrul de absorbție. Fiecare specimen atomic absoarbe radiațiile pe care le poate emite, adică din toate radiațiile emise de o sursă, atomii substanțelor întâlnite absorb numai acele radiații pe care le pot emite.

Relația pentru frecvențele radiațiilor emise de hidrogen aflat în stare atomică devine: $\tilde{\nu} = R'_H \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ unde i și n sunt numere întregi și pozitive ($n > i$), iar constanta lui Rydberg are în acest caz valoarea $R'_H = cR_H = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ($\lambda \tilde{\nu} = c$, unde $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).



Documentează-te și redactează un referat în care să prezinți spectrele investigate.



Spectrul radiațiilor electromagnetice al unui element în stare atomică sau moleculară se obține într-un aparat spectral (spectroscop sau spectrograf cu prismă ori cu rețea) și constă dintr-o succesiune de imagini ale fantei de intrare formate de radiațiile monocromatice componente, numite linii și benzi spectrale. Acestea corespund tranzițiilor electronilor între nivelele energetice ale atomilor sau moleculelor.

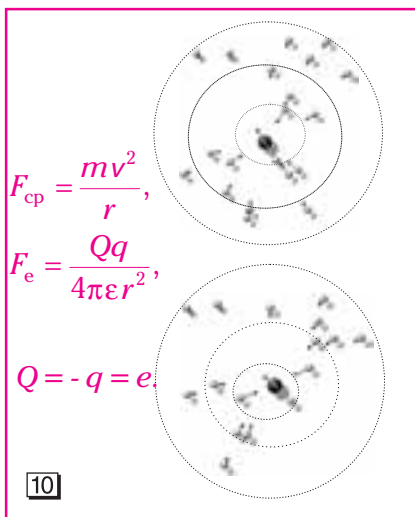
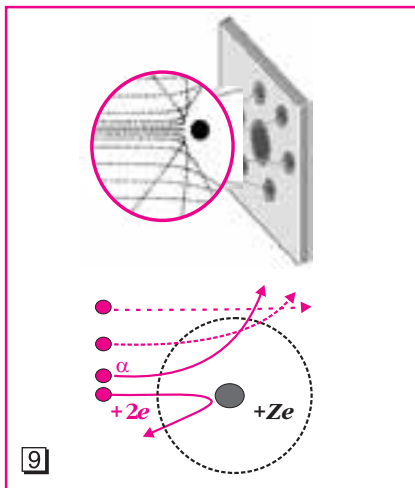
Spectrometrul este un aparat spectral cu receptori fotoelectrici (celule fotoelectrice) care măsoară intensitatea componentelor monocromatice ale spectrului radiațiilor electromagnetice (obiectivul lunetei spectroscopului proiectează radiațiile pe receptorul fotosensibil).

Spectrograful este un spectroscop modificat pentru înregistrarea fotografică a spectrelor radiațiilor din domeniile: infraroșu, vizibil, ultraviolet, radiații X. Pentru radiații ultraviolete, prisma și lentilele sunt din cuarț, pentru radiații infraroșii prisme sunt din clorură de sodiu, iar pentru radiații X prisme sunt din cristale de beriliu, ale căror rețele cristaline produc spectre de difracție.

Liniile spectrale	Lungimile de undă λ (nm) ale liniilor spectrale din domeniul vizibil					
emise de:	roșu	oranj	galben	verde	albastru	indigo și violet
• hidrogen	656				486	434; 410;
• heliu	707; 668		588	502	492; 471	447; 414
• vapori de sodiu			589,6; 589			
• vapori de mercur			577; 579	546	491	436; 408
absorbite de cromosferă	687 656 (O) (H)		588 (He)	527 (Fe)	486 (H)	434 410 (H) (H)



3.2. EXPERIMENTUL RUTHERFORD. MODELUL PLANETAR AL ATOMULUI



Energia potențială electrică pentru două sarcini electrice:

$$W_{p,e} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon r}.$$

Modelarea structurii substanței din perspectiva rezultatelor experimentului Rutherford



Între anii 1909-1911, fizicianul englez Ernest Rutherford a folosit ca proiectile particulele pozitive α , emise de surse radioactive de poloniu și radiu, pentru a explora o foiță de aur foarte subțire. A așezat în spatele foiței un ecran acoperit cu sulfură de zinc, care devine fosforescentă sub acțiunea particulelor α , (fig. [8]). A analizat fosforescența provocată pe ecran de particulele α care au străbătut foița și deviațiile acestora față de direcția inițială. A constatat că doar un număr mic de particule α sunt împrăștiate lateral și chiar către înapoi sub unghiuri mai mari de 90° (fig. [9]). Deoarece majoritatea particulelor α trec nedeviate prin foițe metalice dovedește că atomii au o structură. Rutherford a ajuns la concluzia că atomii au un miez central, nucleul, încărcat electric pozitiv și de masă mare, dar de dimensiuni mult mai mici decât ale atomului ($R_{\text{atom}} \approx 10^{-10}$ m, iar $R_{\text{nucleu}} \approx 10^{-15}$ m).

C Devierea particulelor α sugerează ciocniri cu nucleele atomilor, care au masa comparabilă cu a particulelor α .

Substanțele nu au structură continuă, ci discontinuă.

Experimentul lui Rutherford a demonstrat că atomii au o structură, particulele cu sarcini electrice sunt distribuite în regiuni spațiale distincte, deci nu sunt distribuite ca stafidele într-un cozonac. Deoarece unele particule α (nuclee de heliu) trec nedeviate prin foițe metalice subțiri a dovedit că nu sunt sfere compacte. Nu avem nici un motiv să credem că descrierile fenomenelor și interpretările din mecanica clasică sunt valabile și în domeniul fizicii atomului. Gândirea noastră are „inertția” de a folosi raționamentele făcute asupra corpurilor macroscopice.

Modelul planetar al atomului

Rutherford propune modelul planetar al atomului bazat pe concluzii experimentale, în care sarcina pozitivă, egală în modul cu a tuturor electronilor este concentrată într-un nucleu mic și dens, în jurul căruia se mișcă, în vidul interatomic, electronii atomului (fig. [10]). Nucleul joacă rolul Soarelui, iar electronii joacă rolul planetelor. Electronii se află într-un volum mult mai mare față de volumul nucleului. Forțele electrice de atracție F_e dintre electroni și nucleu joacă

rol de forțe centripete ($F_{cp} = \frac{m_e v^2}{r}$), deci $F_{cp} = F_e$. În cazul atomului de hidrogen, nucleul are sarcina Q egală în mărime cu sarcina q a electronului ($Q = -q = e$). Forța electrică are expresia $F_e = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, unde $\epsilon_0 = 8,856 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ este permitivitatea vidului. După înlocuiri obținem $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$, din care rezultă expresia $\frac{m_e v^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$. Electronii, cu valori negative ale energiei, sunt într-o stare legată în atom:

$$E = E_{cin} + E_{pot,el} = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r},$$

unde $E_{pot,el} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$.



Prin convenție, se poate considera că electronii liberi au valori pozitive ale energiei. Valorile posibile ale energiei electronului „legat” în atom se numesc nivele de energie sau nivele energetice ale atomului.

Atomii unei substanțe pot fi într-o anumită stare: fundamentală, excitată sau ionizată (fig. 11).

Starea **fundamentală** este o stare stabilă caracterizată de cea mai mică valoare a energiei și negativă. Cu cât electronul este mai îndepărtat de nucleu, cu atât nivelul energetic al electronului este caracterizat de energie mai mare. Atomii cu energii mai mari decât această valoare de referință se consideră în stări **excitate**. Orice sistem fizic evoluează spre starea cea mai stabilă caracterizată de energie minimă. Starea ionizată este starea în care unul sau mai mulți electroni sunt smulși din atom și devin liberi în urma procesului numit ionizare.

Prin convenție, atribuim valoarea zero de referință stării energetice în care electronul ar deveni liber și în repaus, în urma unui proces de ionizare a atomului. Energiile stării fundamentale și a stărilor legate sunt negative. Fiecare atom are propriile sale nivele de energie și propria energie de ionizare.

Deoarece nu știm poziția electronilor la fiecare moment de timp nu putem vorbi de traiectoriile electronilor unui atom (fig. 12).



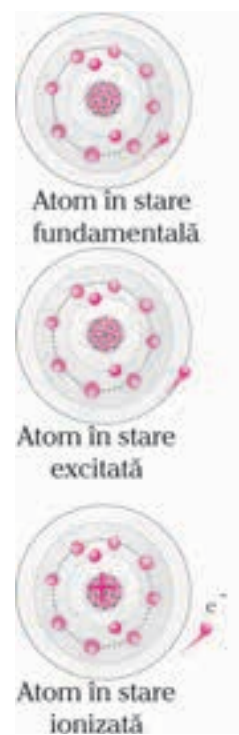
*Analiza critică a modelului planetar

Conform teoriei clasice, atomii sunt sisteme stabile în timp, dar electronii în mișcări accelerate pe traiectorii circulare ar trebui să piardă energie prin radiație electromagnetică până ar ajunge pe nucleu.

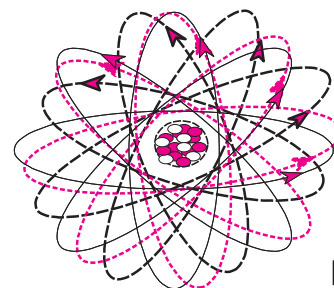
Această teorie nu permite calcularea frecvențelor radiației electromagnetice emise de atomii excitați și nu poate explica de ce atomii în stare fundamentală nu emit radiație, deci se va concepe un alt model atomic.



Ernest Rutherford (1871-1937) – premiul Nobel la chimie (1908) pentru cercetările asupra dezintegrării elementelor.



11



12

Modelele atomice nu trebuie să creeze imaginea falsă a unui nucleu înconjurat de electroni care se mișcă pe traiectorii bine definite.



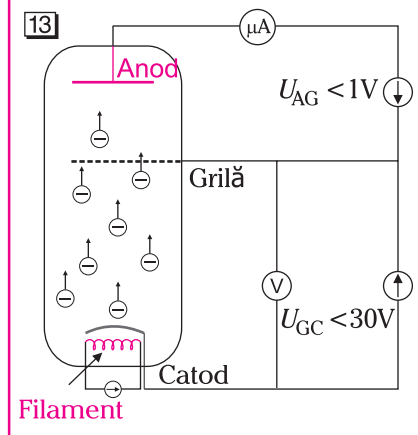
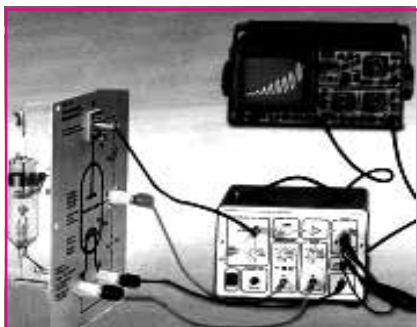
3.3. EXPERIMENTUL FRANCK-HERTZ

„La baza artei și științei se află emoția. Cel care nu poate fi curios sau nu mai poate simți uimire este asemenea unei lumânări stinse.”

A. Einstein



James Franck și Gustav Ludwig Hertz – premiul Nobel (1925) pentru descoperirea legilor care guvernează ciocnirile dintre electroni și atomi.



Interacțiunea electron - nucleu

Energiile succesive pe care le poate avea un electron „legat” în atom, până se produce ionizarea acestuia, se numesc nivele de energie. Nivelele de energie formează un șir discontinuu de valori. Atomul cu energia cea mai mică se consideră în stare fundamentală, iar atomul cu energii mai mari decât aceasta se consideră în stări excitate. Șirul continuu de valori ale nivelelor de energie corespunde electronului liber, nelegat de atom.

Oxigenul, hidrogenul, heliul și alte gaze din tuburile de descărcare sunt transparente pentru radiațiile luminoase și nu emit radiații de nici o culoare la temperatura mediului ambiant, dacă nu se aplică tensiune între electrozi. Înseamnă că nici un foton al radiațiilor luminoase nu are suficientă energie pentru a trece atomii acestor gaze din starea fundamentală într-o stare excitată.



Dispozitivul experimental construit între anii 1913-1914 de James Franck și Gustav Hertz, pentru confirmarea nivelelor de energie ale atomilor, conține un tub electronic în care se află vapori de mercur la presiune foarte scăzută (fig. 13). Atomii de mercur sunt ciocniți de electronii accelerați în câmpul electric dintre catodul **C** încălzit de filament și grila **G**, între care se aplică o tensiune variabilă $U_{GC} < 30 V$. Prin mărirea tensiunii U_{GC} , crește energia cinetică a electronilor ($\Delta E_c = eU_{GC}$). Până la o anumită valoare a energiei cinetice a electronilor (4,9 eV), ciocnirile electroni-atomii de mercur sunt elastice și electronii își conservă energia, reușind să străbată câmpul electric de frânare dintre grilă și anod. Intensitatea curentului anodic I_A , vizualizată pe ecranul unui osciloscop sau măsurată de un microampermetru, crește până când tensiunea devine $U_{GC} = 4,9 V$. La această tensiune, electronii au energia cinetică $E_c = 4,9 eV$ și curentul anodic scade brusc. Înseamnă că această energie este egală cu energia primului nivel de excitare a atomilor de mercur. Electronii care au această energie și întâlnesc atomi de mercur se ciocnesc neelastic, cedând toată energia cinetică atomilor de mercur, care trec în stare excitată, și acești electroni nu mai ajung la anod. Intensitatea curentului anodic nu devine nulă deoarece încă mai pot ajunge la anod electronii care nu au avut ciocniri neelastice cu atomi de mercur. Scăderea curentului anodic se repetă când tensiunea de accelerare atinge valorile 9,8 V; 14,7 V; 19,6 V, deci un număr de electroni a produs 2; 3; 4 ciocniri neelastice (vezi 14).

Experimentarea cu tuburi care conțin vapori de sodiu confirmă existența primului nivel de energie cuantificată la 2,12 eV.

C Atomii nu absorb decât anumite cuante de energie la trecerea din starea fundamentală într-o stare excitată.

Nivelele de energie ale atomilor sunt cuantificate. Numai atomii care absorb energia necesară pentru excitarea energetică, prin dezexcitare emit radiații cu anumite lungimi de undă. Atomii de mercur emit prin dezexcitare radiații cu lungimea de undă $\lambda = 2537 \text{ \AA}$. Fotonii asociați au energia $h\nu = h\frac{c}{\lambda} = 4,9 \text{ eV}$ și corespund tranziției electronilor de pe nivelul energetic excitat, în care au ajuns prin ciocniri neelastice, pe nivelul energetic fundamental.



Se consideră că un electron incident sau, analog, un foton incident se ciocnește elastic de atomul unei substanțe care se află în stare fundamentală atunci când nu are energia necesară pentru a trece atomul într-o stare excitată și atomul rămâne în starea inițială. Ciocnirea este neelastică dacă electronul sau fotonul are exact energia necesară pentru a trece atomul într-o stare excitată și atomul preia toată energia. În urma ciocnirii neelastice, electronul rămâne în repaus și, respectiv, fotonul este absorbit. Dacă electronul sau fotonul are mai multă energie decât cea necesară pentru a smulge un electron din atom, se obțin un ion și un electron liber în mișcare.



Un proton de masă m cu energie cinetică E_{cp} este deviat de nucleul ${}^4_2\text{He}$ de masă M sub unghiul $\theta = 90^\circ$ față de direcția incidentă. Să găsim expresiile energiei protonului și nucleului după împrăștiere.

Rezolvare

Considerăm ciocnirea elastică proton-nucleu și scriem legile de conservare pentru energie și impuls:

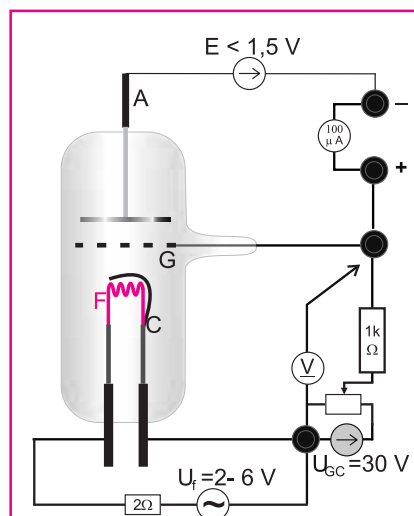
$$E_{cp} = E'_{cp} + E_{c_{Nucleu}}, \text{ de unde } E_{c_{Nucleu}} = E_{cp} - E'_{cp};$$

$$m\vec{v}_1 = m\vec{v}'_1 + M\vec{v}_2 \quad \text{sau} \quad m^2 v_1^2 = M^2 v_2^2 - m_1^2 v_1'^2, \quad \text{dar}$$

$$m^2 v^2 = 2mE_c \Rightarrow 2mE_{cp} = 2ME_{c_{Nucleu}} - 2mE'_{cp}, \quad \text{de unde}$$

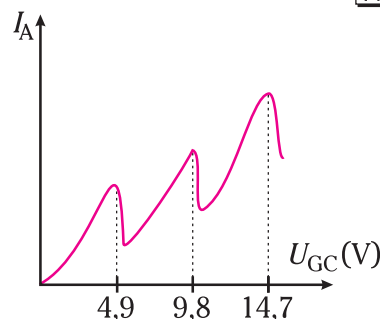
$$\Rightarrow E_{c_{Nucleu}} = \frac{m}{M}E_{cp} + \frac{m}{M}E'_{cp}. \text{ Din cele două expresii obținem:}$$

$$E'_{cp} = \frac{M-m}{M+m}E_{cp}; E_{c_{Nucleu}} = \frac{2m}{M+m}E_{cp}.$$



Dacă înlocuim microampermetrul cu un rezistor, tensiunea de pe acesta poate fi vizualizată pe osciloscop.

14



Numai pentru anumite tensiuni U_{GC} ciocnirile dintre electroni și atomi devin inelastice (I_A scade).

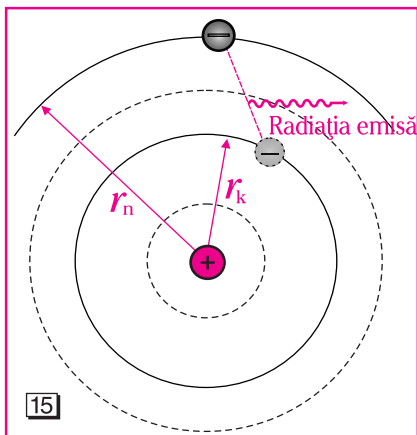
Obs În procesul de formare a atomului, forțele de atracție electrică efectuează lucru mecanic, sistemul electron-nucleu ajungând într-o stare legată, caracterizată de **energie potențială** mai mică, deci negativă. Pentru a smulge electronul de sub influența nucleului, forțe exterioare nucleului trebuie să efectueze un lucru mecanic care conduce la creșterea **energiei potențiale** până la valoarea $W_p = 0$, când electronul devine liber.



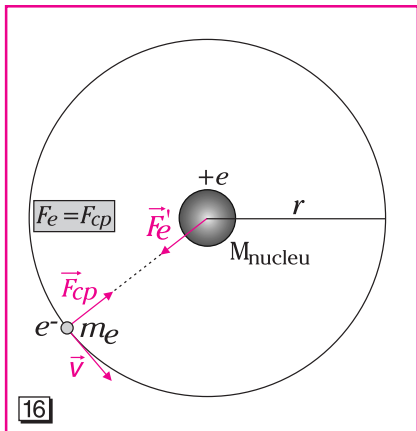
3.4. MODELUL BOHR

„În esență, modelul atomului creat în 1911 de Rutherford consta dintr-un minuscul nucleu central, cum e Soarele în cadrul sistemului planelar, încărcat cu sarcină pozitivă și electroni care se rotesc la o distanță relativ mare în jurul nucleului [...]. Contribuția profesorului Bohr, în 1913, a constatat în calcularea modului în care se distribuie electronii în jurul nucleului, adică pe orbite staționare, și a explicat de ce nu cad pe nucleu și nu emit radiație electromagnetică în aceste stări staționare.”

John Cockcroft



[15]



[16]

Modelarea cuantică a interacțiunii electron-nucleu. Interpretarea spectrelor atomice

Spectrul emis de atomul de hidrogen este un spectru discret, de linii. În cazul ciocnirilor neelastice ale atomului cu un electron (vezi experimentul Franck-Hertz), energia cinetică pierdută de electron și transferată atomului este cuantificată și produce tranziția atomului din starea fundamentală într-o stare excitată (cu energia E_n mai mare decât energia inițială, a stării fundamentale E_i).

Atomul aflat în stare excitată tinde să execute o tranziție, într-un interval de timp $\tau \approx 10^{-8}$ s, către starea energetică inferioară E_i . Energia fotonului emis de atom este: $h\nu = E_n - E_i$ (conform legii conservării energiei). Starea energetică minimă corespunde nivelului energetic normal (fundamental).

Cu modelul fizicianului danez Niels Bohr se pot interpreta teoretic liniile emise de atomul de hidrogen. Modelul elaborat de Bohr se baza pe următoarele postulate, introduse pentru a explica stabilitatea sistemelor atomice:

- atomii se pot găsi timp îndelungat numai în stări bine determinate, numite stări staționare, în care nu emit și nu absorb energie;
- atomii absorb sau emit energie electromagnetică numai la trecerea dintr-o stare staționară în altă stare staționară, adică atomii absorb sau emit o cantă de energie (fig. [15]):

$h\nu = E_n - E_i$, unde $E_n > E_i$ sunt energiile cuantificate ale stărilor staționare între care se face tranziția, $h\nu$ – energia fotonului emis sau absorbit, iar $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s (constanta lui Planck);

- electronii se mișcă în jurul nucleelor, fără să radieze energie electromagnetică, numai pe anumite orbite circulare, pentru care valoarea momentului cinetic L este un multiplu întreg al constantei lui Planck împărțită prin 2π .

Într-un atom de hidrogen, electronul se mișcă în jurul nucleului pe o orbită circulară sub acțiunea forței electrice de atracție dintre acesta și nucleu, având rolul forței centripete (fig. [16]).

Mărimi cuantificate. Determinarea orbitelor staționare, cu razele r_n , permise mișcării electronului cu vitezele v_n în atomul de hidrogen, poate fi făcută cu ajutorul unei reguli de cuantificare: mărimea momentului cinetic ($m_e v_n r_n$) al

electronului pe o orbită staționară este egală cu un multiplu întreg de $\frac{h}{2\pi}$, adică

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \text{ unde } n = 1, 2, 3, \dots$$

și m_e – masa electronului, v_n – viteza electronului pe orbita de rază r_n . Această cuantificare poate fi obținută din condiția ca unda asociată electronului să fie undă staționară, adică lungimea orbitei circulare staționare să conțină un număr întreg de lungimi de undă de Broglie:

$$2\pi r_n = n\lambda, \text{ unde } \lambda = \frac{h}{m_e v_n}.$$

Rezultă: $2\pi r_n = n \frac{h}{m_e v_n}$ sau $m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$.

Deoarece forța electrică de atracție dintre nucleu și electron joacă rol de forță centripetă: $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$ (fig. 16).

Rezultă sistemul:
$$\begin{cases} m_e v_n^2 r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \\ m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \end{cases}, \text{ care admite soluțiile:}$$

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = n^2 r_1, \text{ unde } m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; \epsilon_0 = 8,856 \cdot 10^{-12} \text{ F/m};$$

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = \frac{8,856 \cdot 10^{-12} \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m},$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ reprezintă numărul cuantic al orbitei.

Orbitele staționare au razele cuantificate: $r_1, 4r_1, 9r_1, 16r_1$ etc. (fig. 17). Valorile vitezelor cuantificate se calculează cu

relația: $v_n = \frac{1}{n} \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} = \frac{1}{n} v_1$, unde $v_1 = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} \approx 2,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$.

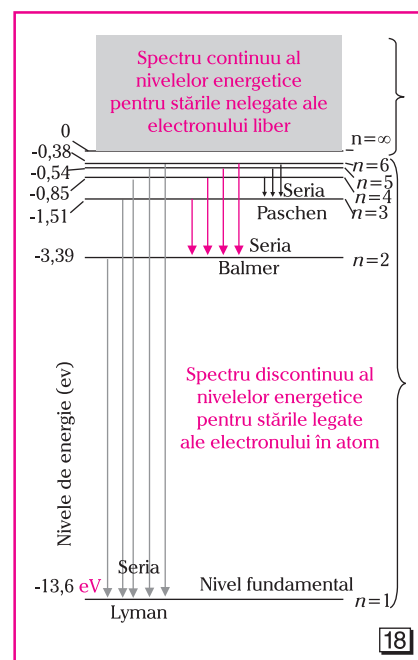
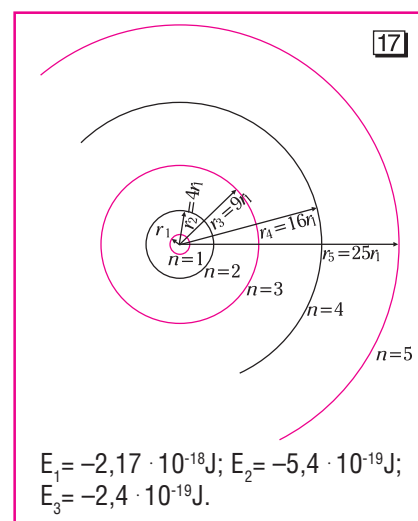
Energia totală a electronului pe o orbită staționară este egală cu suma dintre energia cinetică și energia potențială electrică:

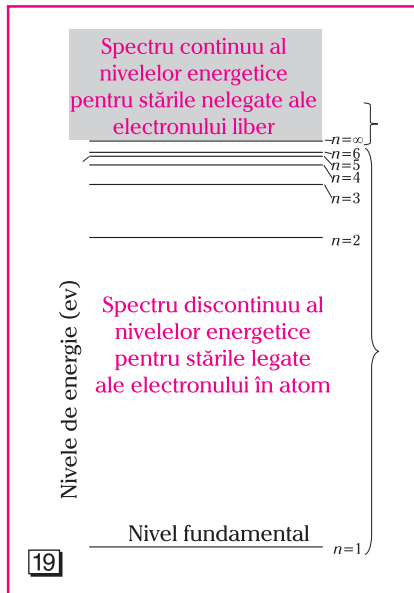
$$E_n = E_c + E_p = \frac{m_e v_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = \frac{1}{n^2} E_1,$$

unde $E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13,6 \text{ eV} = -13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (fig. 18).



Niels Bohr – premiul Nobel (1922) pentru cercetările sale asupra structurii atomilor și a radiațiilor emise de aceștia.





Energiile totale au semnul negativ deoarece corespund stărilor legate ale electronului în atom. Observăm că energiile permise, numite și nivele de energie ale atomului, formează un șir discret de valori, numit spectrul nivelelor de energii, reprezentate într-o diagramă (fig. 19). Liniile orizontale reprezintă valorile negative ale energiei totale a atomului aflat într-o stare staționară. Observăm că pentru valori mai mari ale numărului cuantic n , diferența de energie între două stări energetice alăturate este din ce în ce mai mică, iar pentru $n \rightarrow \infty$ obținem $E_\infty = 0$, când electronul devine liber și în repaus, la distanță mare de nucleu.

Sistemul nu mai este legat când se formează un ion și un electron liber (fig. 20), care se mișcă pe traiectorii deschise. Spectrul energetic al electronului care se mișcă liber este un spectru continuu. **Energia de legătură** $E_{leg} = -E_1$ este energia necesară atomului (primită sub formă de lucru mecanic L) pentru a fi adus din starea energetică fundamentală $E_1 = -13,6$ eV în starea energetică $E_\infty = 0$, deci egală cu $L = E_\infty - E_1 = 13,6$ eV, numită și energie de ionizare. Pentru stări excitate: $E_n = \frac{E_1}{n^2}$.

Dacă $n = 1$, atunci atomul este în starea fundamentală corespunzătoare stării cu cea mai mare energie de legătură a electronului: $E_{leg,max} = -E_1 = 13,6$ eV.

Stările excitate sunt stările legate cu energiile $E_2, E_3, E_4, \dots$

Dezexcitarea unui atom se poate face și în trepte, prin stări legate intermediare, cu emisia mai multor fotoni:

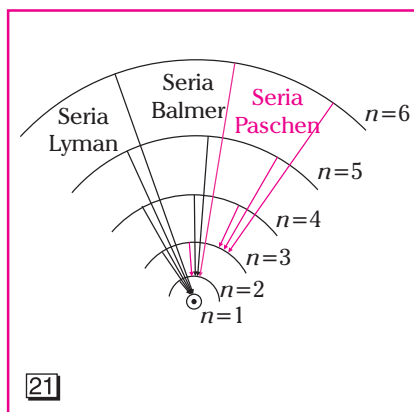
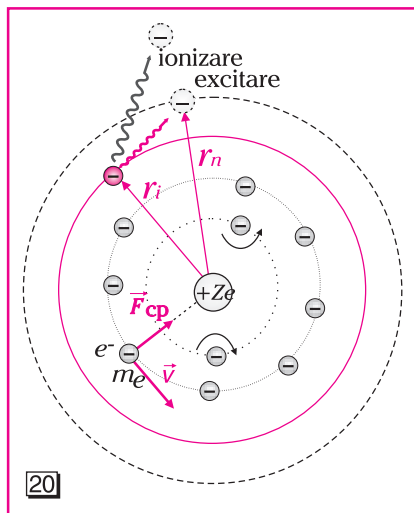
$$h\nu + h\nu' + \dots = \Delta E + \Delta E' + \dots$$

Dacă energia primită de atom din exterior are orice valoare mai mare decât valoarea energiei de legătură, sistemul nu mai este legat (electronul este separat de nucleu) și electronul va avea orice valoare a energiei cinetice egală cu diferența dintre energia primită și energia de ionizare. Procesul de ionizare prin absorbția unui foton este efect fotoelectric intern ($E_c = h\nu - E_{leg}$), deoarece numai energia cinetică a electronului liber poate avea orice valoare, atomul acceptând o cantitate de energie mai mare decât energia de legătură a electronului în atom. Pierderea de energie a atomului când acesta trece din starea excitată de energie E_n într-o stare energetică inferioară este egală cu energia $\varepsilon = h\nu$ a fotonului

emis: $E_n - E_i = h\nu$, unde $E_n = -\frac{1}{n^2}E_1$ și $E_i = -\frac{1}{i^2}E_1$. Rezultă:

$$h\nu = E_1 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ sau } h \frac{c}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$\text{unde } \lambda = \frac{c}{\nu}. \text{ Obținem } \frac{1}{\lambda} = \tilde{\nu} = \frac{m_e e^4}{8c \varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$



unde $R = \frac{m_e e^4}{8c \epsilon_0^2 h^3} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ și $n > i$. Această relație coincide cu relația empirică obținută de Balmer și generalizată

de Rydberg pentru numerele de undă ($\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$). Seria Lyman

reprezintă grupul de linii spectrale emise de electronii care trec din stări excitate ($n = 2, 3, \dots$) în starea fundamentală ($i = 1$); seria Balmer reprezintă grupul de linii spectrale emise în tranzițiile electronilor din stările excitate ($n = 3, 4, 5, \dots$) în starea cu $i = 2$ (fig. 21). **Cu modelul Bohr putem calcula nivelele energetice ale ionilor monovalenți.**



1. Demonstrează expresia razei primei orbite staționare a electronului în atomul de hidrogen cu condiția de minim a energiei totale?

Rezolvare

Energia totală a electronului în această stare legată este:

$$E = E_c + E_p = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \text{ sau}$$

$$E = \frac{p^2}{2m_e} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \text{ unde } p = mv.$$

Momentul cinetic este cuantificat: $mvr = \frac{h}{2\pi}$ (pentru $n = 1$)

$$\Rightarrow p = \frac{h}{2\pi r} \Rightarrow E = \frac{h^2}{4\pi^2 r^2} \frac{1}{2m_e} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = E(r).$$

Orice sistem fizic evoluează spre starea cu energie minimă, deci:

$$\frac{dE}{dr} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2m_e} \frac{h^2}{4\pi^2} \left(-\frac{2r}{r^4} \right) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r^2} \right) = 0 \Rightarrow r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}.$$

2. Calculează raza orbitei Bohr pe care se mișcă electronul unui atom de hidrogen care a fost excitat cu o cuantă de energie $h\nu = 12,09 \text{ eV}$, considerând că inițial se găsea în stare fundamentală.

Rezolvare

$$\Delta E = E_n - E_1, \text{ unde } E_n = \frac{E_1}{n^2} \Rightarrow \Delta E = E_1 \left(\frac{1}{n^2} - 1 \right);$$

$$\Delta E = h\nu_{1 \rightarrow n} = \frac{hc}{\lambda} = hcR \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right); -E_1 = W_{leg} = hcR.$$

$$\text{Obținem: } 12,09 = 13,6 \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \Rightarrow n = 3; r_3 = n^2 r_1 = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

*Analiza critică a modelului Bohr

✓ A reușit să explice spectrele de linii ale atomului de hidrogen și ale ionilor hidrogenoizi (cu un singur electron de valență) și a permis calcularea constantei lui Rydberg pentru acești atomi.

✓ A explicat cuantificarea nivelelor de energie, vitezelor electronilor, razelor orbitelor staționare și frecvențelor radiațiilor emise sau absorbite pentru atomul de hidrogen.

✓ Nu permite determinarea nivelelor energetice ale atomilor cu mai mulți electroni; este o combinație forțată între fizica clasică și cea cuantică (introduce legi cuantice și neagă valabilitatea legilor fizicii clasice prin postulatele introduse).

✓ A arătat incapacitatea fizicii clasice în explicarea structurii atomului și necesitatea unei teorii moderne de mecanică cuantică.

*Știi că...?



Pentru ionul He^+ folosim modelul lui Bohr ca pentru un atom hidrogenoid (cu un electron de valență în jurul nucleului cu sarcina Ze , unde $Z = 2$). Orbita stabilă se obține din condiția

$$\frac{m_{0,e} v^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Cuantificarea energiei este dată de relația:

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} \frac{m_{0,e} e^4}{8h^2 \epsilon_0}.$$



3.5.* ATOMUL CU MAI MULȚI ELECTRONI

„Deoarece primele noastre observații conștiente asupra fenomenelor fizice au fost făcute în sistemele macro- scopice, am dobândit o serie de „prejudecăți clasice” la care trebuie să renunțăm dacă dorim să studiem mecanica cuantică.”

E. Wichmann – Univ. Berkeley

*Modelul păturilor electronice

Nivelele energetice ale atomului de hidrogen sunt cuantificate prin numărul cuantic n . Spectrele atomilor cu mai mulți electroni au mai multe linii spectrale caracteristice decât atomul de hidrogen. Știi de la chimie că periodicitatea proprietăților chimice și fizice ale elementelor este determinată de periodicitatea numărului de electroni din stratul exterior. Numărul straturilor electronice ocupate (parțial sau complet) este egal cu numărul perioadei din sistemul periodic al elementelor.

Ordonarea elementelor în sistemul periodic depinde de structura învelișului de electroni al speciei atomice: cele cu același număr de electroni pe ultimul strat electronic în aceeași grupă (coloană verticală), iar cele cu același număr de straturi electronice în aceeași perioadă (șir orizontal).



22

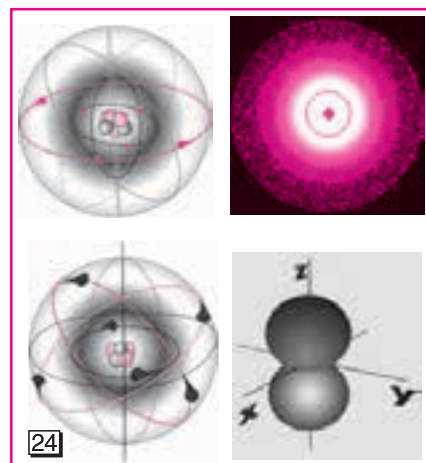


Analizează imaginile nocturne obținute cu timpi mari de expunere (fig. 22). Prin mărirea timpului de expunere, localizarea vehiculelor care circulă pe o autostradă nu este mai bună. Poți spune care este traiectoria unei particule, din norul de particule incandescente, sau care este poziția ei la un moment de timp din perioada de expunere (fig. 23)?

Traietoriile electronilor pot fi modelate grafic cu ajutorul calculatorului (fig. 24). Pozițiile succesive ale unor electroni, reprezentate prin puncte, formează un nor electronic fără contur definit. Norii electronici reprezintă zone din jurul nucleului în care se găsesc electroni (cu o anumită probabilitate).



23



24

Numărul cuantic principal n determină stratul din care fac parte electronii și cuantifică energia electronilor dintr-un atom. Electronii cu același număr cuantic n formează un strat electronic: K ($n = 1$); L ($n = 2$); M ($n = 3$); N ($n = 4$); O ($n = 5$); P ($n = 6$); Q ($n = 7$). Numărul cuantic al ultimului strat electronic ocupat chiar parțial coincide cu numărul perioadei. Numărul maxim de electroni ai unui strat complet ocupat este $2n^2$. Fiecare strat electronic este format din unul sau mai multe substraturi caracterizate de nivele energetice apropiate. Probabilitatea cea mai mare de a găsi un electron, maxim doi electroni, este într-o zonă din jurul unui nucleu (nor electronic cu o anumită formă geometrică), numită orbital atomic (fig. [25]). Substraturile sunt formate din orbitali de același tip și au aceeași energie.

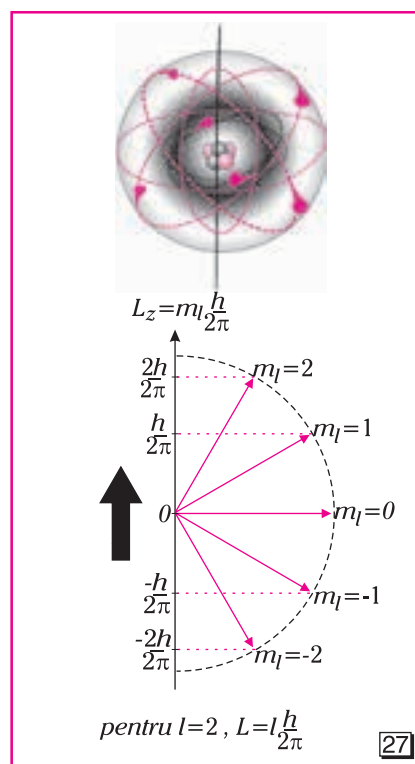
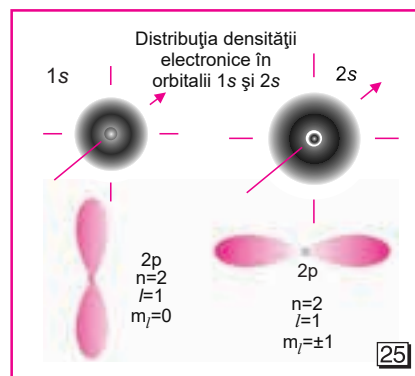
Numărul cuantic secundar sau orbital l determină tipul orbitalului (forma norului electronic), diferențiază electronii dintr-un strat și cuantifică mărimea momentului cinetic ($L = \sqrt{l(l+1)} \hbar$). Poate avea valorile $l = 0, 1, 2, 3$. Toți electronii cu același număr cuantic l , deci din orbitalii de același tip, formează un substrat electronic cu același nivel de energie: s ($l = 0$); p ($l = 1$); d ($l = 2$); f ($l = 3$). Orbitalii s sunt sferici, orbitalii p sunt lobați, iar ceilalți au forme geometrice complicate (fig. [26]). Un substrat s este format dintr-un orbital s , un substrat p este format din 3 orbitali orientați pe cele 3 axe rectangulare, un substrat d este format din 5 orbitali, iar un substrat f este format din 7 orbitali.

Numărul cuantic magnetic m_l cuantifică orientările orbitalului și vectorului moment cinetic $\vec{L}$ când atomul se găsește într-un câmp magnetic exterior (fig. [27]).

Pentru o anumită valoare a momentului cinetic sunt posibile $(2l + 1)$ orientări și, respectiv, valori L_z ale proiecției vectorului $\vec{L}$ pe o axă Oz a unui câmp magnetic exterior de inducție magnetică $\vec{B}$ (definite prin relația $L_z = m_l \hbar$), unde $m_l = 0, \pm 1, \dots, \pm l$. Numărul orbitalilor dintr-un substrat electronic este: $2l + 1$. Numărul maxim de electroni dintr-un substrat este: $2(2l + 1)$.

Numărul cuantic magnetic de spin $m_s = \pm 1/2$ caracterizează orientarea momentului cinetic propriu al electronului (în cuplaj antiparalel).

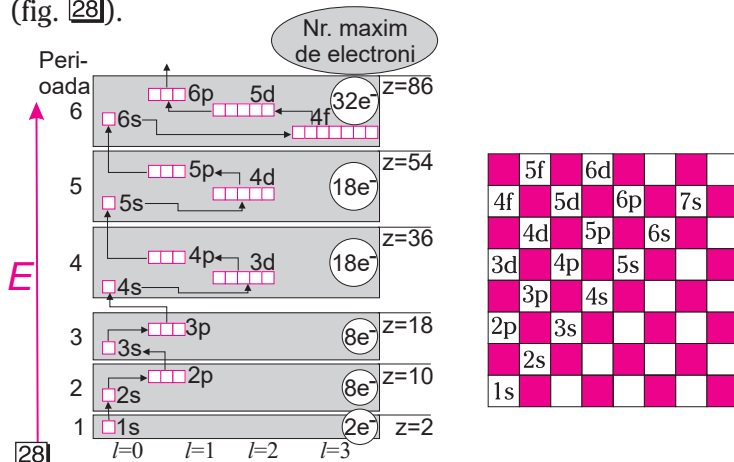
Principiul excluziunii al lui Pauli: într-un atom nu pot exista doi sau mai mulți electroni cu aceleași patru numere cuantice (n, l, m_l și m_s). Cu ajutorul mecanicii cuantice (care depășește nivelul cunoștințelor de matematică din clasa a XII-a), fizicienii teoreticieni au ajuns la concluzia că stările staționare ale unui atom sunt caracterizate de patru numere cuantice.



Pentru fiecare valoare m_l există două valori $m_s = \pm 1/2$, care corespund cuplajului a doi electroni.

* Fig. [26] după www.orbitals.com.

Ordinea de completare cu electroni a straturilor în atomi se poate citi în diagrama nivelelor energetice, în care căsuțele reprezintă orbitali care pot fi ocupați de maxim doi electroni (fig. 28).



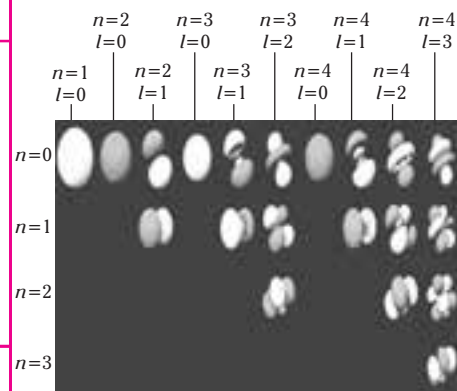
Elementul	Nr. atomic	Straturile															
		K				L				M				N			
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f						
H	1	1															
He	2	2															
Li	3	2	1														
Be	4	2	2														
B	5	2	2	1													
C	6	2	2	2													
N	7	2	2	3													
O	8	2	2	4													
F	9	2	2	5													
Ne	10	2	2	6													
Na	11	2	2	6	1												
Mg	12	2	2	6	2												
Al	13	2	2	6	2	1											
Si	14	2	2	6	2	2											
P	15	2	2	6	2	3											
S	16	2	2	6	2	4											
Cl	17	2	2	6	2	5											
Ar	18	2	2	6	2	6											
K	19	2	2	6	2	6		1									
Ca	20	2	2	6	2	6		2									
Sc	21	2	2	6	2	6	1										
Ti	22	2	2	6	2	6	2										

Completează în continuare (vezi tabelul periodic)

Distribuirea electronilor în straturi și substraturi electronice

Stratul electronic:	K (n=1)	L (n=2)		M (n=3)			N (n=4)			
nr. maxim de e ⁻	2	8		18			32			
Substratul electronic:	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f
nr. orbitalilor	1	1	3	1	3	5	1	3	5	7
nr. maxim de e ⁻	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14

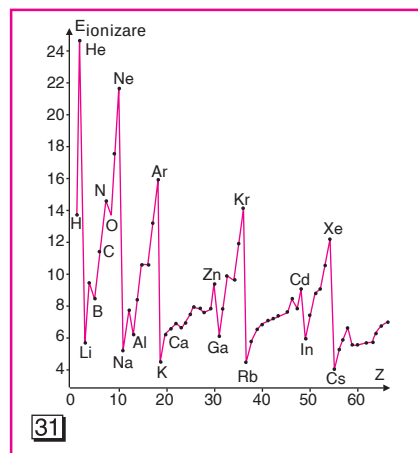
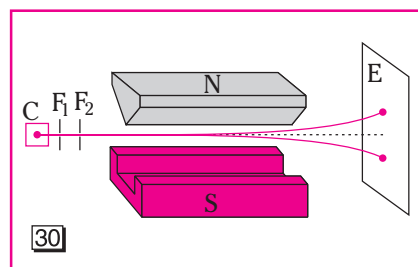
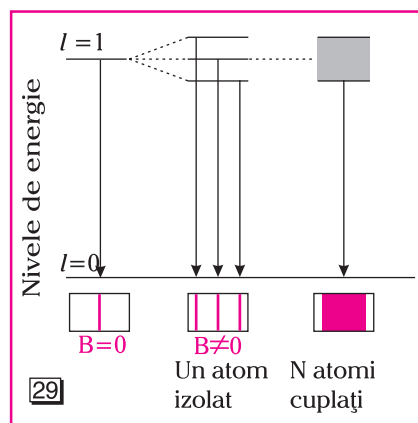
Stratul	Numere cuantice				Numărul maxim al electronilor	
	<i>n</i>	<i>l</i>	<i>m_l</i>	<i>m_s</i>	în substrat	în strat
K (<i>n</i> =1)	1	0	0	+1/2	2 electroni în 1 <i>s</i>	2
	1	0	0	-1/2		
L (<i>n</i> =2)	2	0	0	+1/2	2 electroni în 2 <i>s</i> 6 electroni în 2 <i>p</i>	8
	2	0	0	-1/2		
	2	1	+1	+1/2		
	2	1	+1	-1/2		
	2	1	0	+1/2		
	2	1	0	-1/2		
	2	1	-1	+1/2		
	2	1	-1	-1/2		
M (<i>n</i> =3)	Prin analogie, poți completa singur...				18	



Substraturile din tabelul periodic al elementelor se completează în ordinea creșterii subnivelelor energetice, care au aceeași notație cu substraturile (vezi tabelele alăturate): 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s etc. Pentru simplificarea scrierii tabelului periodic al elementelor, configurația electronică a unui atom cuprinde la bază configurația electronilor stabili ai gazelor rare și deasupra configurația electronilor din substraturile exterioare. Putem analiza ultimele substraturi ocupate și inversiunile apărute.



Erwin Schrödinger a primit premiul Nobel (1933) pentru descoperirea de noi forme ale teoriei atomice.



*Interpretarea periodicității proprietăților fizico-chimice ale elementelor

Atomii cu opt electroni exteriori au o mare stabilitate chimică. Atomii elementelor alcaline din prima grupă au un singur electron slab legat în orbitalii s ($2s^1, 3s^1, \dots, 7s^1$). Atomii halogenilor au stările p incomplete ($2p^5, 3p^5, 4p^5, 5p^5$) și realizează o configurație electronică stabilă prin capturarea unui electron, formând ioni negativi.

Perioadele a doua și a treia au câte 8 atomi în care se completează subnivelele energetice: $2s, 2p$ și respectiv $3s$ și $3p$. Perioada a patra are 18 atomi în care se completează $4s$ și continuă cu $3d$ și $4p$. Perioada a cincea are 18 atomi în care se completează: $5s, 4d$ și $5p$.

Perioadele a șasea și a șaptea încep cu completarea subnivelelor $6s$ și, respectiv, $7s$, apoi un electron în subnivelul $5d$ la atomul de lantan și, respectiv, în subnivelul $6d$, la atomul de actiniu. Urmează 14 elemente – lantanidele și, respectiv, actinidele – la care se completează $4f$ și, respectiv, $5f$.

◆ Mișcarea electronului în jurul nucleului generează un dipol magnetic, cu momentul magnetic orbital $\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_{\text{electron}}} \vec{L}$; proiecția sa pe axa Oz se scrie sub forma:

$$\mu_z = -m_l \frac{eh}{4\pi m_{\text{electron}}}$$

magnetic și câmpul magnetic exterior depinde de numărul cuantic magnetic ($E_{mg} = -\mu B \cos \theta = m_l \mu_B B$, unde

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_{\text{electron}}}$$

este magnetonul Bohr-Procopiu). Numărul cuantic magnetic m_l cuantifică subnivelele energetice, în care se despică un nivel energetic prin interacțiunea atomilor cu un câmp magnetic exterior (efect Zeeman) (fig. [29]). Multiplicarea liniilor spectrale este determinată de descompunerea nivelelor de energie în câmp magnetic.

◆ Electronii au și un moment cinetic propriu (de spin, cu două orientări posibile ale sensului de rotație) și se comportă ca un minuscul magnet de același sens sau de sens opus câmpului magnetic exterior. Numărul cuantic de spin $s = 1/2$ caracterizează momentul cinetic propriu al electronului, iar numărul cuantic magnetic de spin $m_s = \pm 1/2$ cuantifică orientarea momentului cinetic de spin. Dacă un fascicul de atomi de argint este trecut printr-un câmp magnetic neuniform, se despică în două fascicule cu deviații opuse (fig. [30]). Energia de ionizare (caracteristică fiecărei specii de atomi) variază periodic cu numărul atomic Z (fig. [31]).



3.6. RADIAȚIILE X

Clasificarea radiațiilor X

Radiațiile X sunt unde electromagnetice penetrante, cu frecvențe mari și cu lungimi de undă mici (cuprinse între 0,1 Å și 100 Å). Produc fenomene de difracție pe cristale, efect Compton, efect fotoelectric.

Radiațiile X au fost descoperite în anul 1895 de fizicianul german Conrad Röntgen. Sunt emise în tuburi vidate, de către anodul construit din metale greu fuzibile, numit și anticatod, în urma devierii și frânării puternice a electronilor puternic accelerați, sub o tensiune $U = 10-100$ kV, care pătrund până în apropierea nucleelor, sau când electroni apropiați de nucleu sunt smulși din atomi și locul lor este ocupat de electroni periferici (fig. [32]). Aceste procese sunt însoțite de emisia unor fotoni cu energie mare. Spectrul de radiații X emis de un anticatod, prin bombardarea cu electroni rapizi, este o suprapunere formată dintr-un spectru continuu și un spectru de linii caracteristice elementului chimic din care este constituit catodul (fig. [33]).

*Producerea radiațiilor X

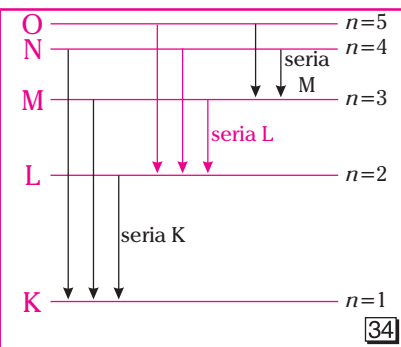
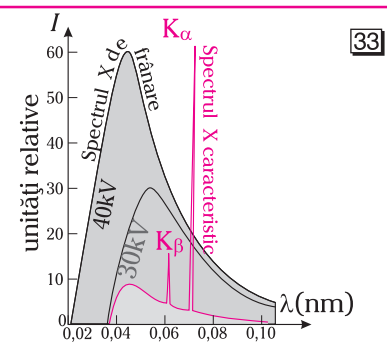
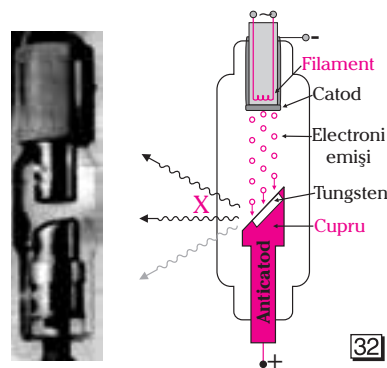
Radiațiile X de frânare (cu spectru continuu) sunt emise în procesul de frânare a electronilor-proiectil care au pătruns cu viteză mare în învelișul electronic al atomilor din anticatod. Orice electron deviat de la direcția inițială de către nucleele pozitive este mai puternic frânat când trece mai aproape de nuclee și energia fotonului emis este mai mare. Fotonii emiși prin frânarea electronilor-proiectil au energiile cuprinse între valoarea zero și valoarea maximă egală cu energia cinetică a electronilor-proiectil când aceștia sunt frânați până la oprire: $h\nu_{\max} = eU_{\text{accelerare}} = E_{c, \text{electroni}}$, deci lungimea de undă

minimă: $\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU_{\text{accelerare}}}$, nu depinde de natura anticatodului.

Radiațiile X caracteristice (cu spectru de linii caracteristice atomilor din anticatod) sunt emise dacă tensiunea de accelerare a electronilor-proiectil este mare, încât aceștia pot ioniza atomii anticatodului, scoțând electroni de pe un strat apropiat de nucleu (K, L sau M). Locurile rămase libere sunt completate de electroni de pe straturile exterioare, tranzițiile fiind însoțite de radiații X cu lungimi de undă grupate în serii, caracteristice atomilor excitați în anticatod (fig. [34]):

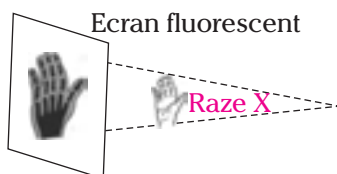
„Ne putem da seama cât de mare a fost descoperirea lui Röntgen prin faptul că foarte mulți fizicieni, adesea remarcabili, care au experimentat înaintea lui cu aceleași mijloace, nu au izbutit să descopere aceste radiații.”

Max von Laue





Wilhelm Conrad Röntgen – premiul Nobel (1901) „ca apreciere pentru serviciile extraordinare oferite prin descoperirea radiațiilor X” căroră, ulterior, li s-a atribuit numele său.



35

– seria K are liniile K_{α} , K_{β} și K_{γ} corespunzătoare tranzițiilor de pe straturile L, M și N pe stratul K;

– seria L are liniile L_{α} , L_{β} și L_{γ} corespunzătoare tranzițiilor de pe straturile M, N și O pe stratul L;

– seria M are liniile M_{α} , M_{β} , corespunzătoare tranzițiilor de pe straturile N și O pe stratul M.

În cazul anticatozilor confecționați din substanțe diferite, aceeași tranziție determină radiații X cu frecvențe și lungimi de undă diferite, caracteristice atomilor emițători, date de

legea lui Moseley: $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, unde:

$\tilde{\nu}$ – numărul de undă, R – constanta Rydberg, Z – numărul atomic, σ – constantă de ecranare, i – numărul cuantic principal al stratului de energie inferioară și n – numărul cuantic principal al stratului de energie superioară.

Radiațiile X au următoarele proprietăți:

- produc ionizarea gazelor prin care trec;
- impresionează hârtia fotografică;
- produc fluorescența unor substanțe;
- sunt absorbite puternic de substanțe cu densitate mare, ca și plumbul;
- nu sunt deviate de câmpurile electrice și magnetice.

Radiațiile X sunt atenuate exponențial în funcție de distanța străbătută: $I = I_0 e^{-\mu x}$, unde I_0 – intensitatea fasciculului incident, I – intensitatea fasciculului care a străbătut grosimea x de material absorbant, μ – coeficientul de atenuare, a cărui valoare depinde de natura materialului și de lungimea de undă a radiației.

Utilizările radiațiilor X

Radiațiile X sunt utilizate în medicină și în defectoscopie, deoarece puterea de pătrundere a lor este diferită prin substanțe de natură diferită. Sunt folosite în radiologie pentru diagnosticare și terapie medicală (fig. 35).

Radioscopia constă în examinarea vizuală, pe un ecran, a imaginii date de razele X care au străbătut o zonă a corpului. Radiografia constă în înregistrarea pe film fotosensibil la radiații X a imaginii structurale a oaselor, dinților, plămânilor, tubului digestiv.



36

După dezvoltarea filmului se observă că părțile mai dense apar ca regiuni mai întunecate. Iradierea controlată a tumorilor cu raze X produce efecte benefice. Tomograful computerizat oferă imaginea secțiunilor în structurile organismului prin modificarea poziției tubului de raze X față de bolnavul culcat pe o masă (fig. 36). Variațiile absorbției razelor X sunt înregistrate în memoria calculatorului.

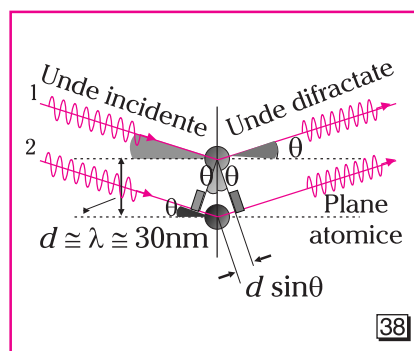
Razele X pătrund prin pereții unei valize și se poate vedea conținutul pe un monitor, la controlul din aeroporturi (fig. 37).

Sunt folosite și în cercetarea structurilor cristaline ale corpurilor prin difracție. Dacă diferența de drum este un multiplu întreg al lungimii de undă a radiației X se obțin maxime dacă este îndeplinită condiția Bragg: $2d \sin\theta = n\lambda$. Rețeaua unui cristal are ionii în nodurile planelor reticulare (fig. 38). Prin rotirea cristalului în jurul unei axe se obțin unghiurile θ pentru care se obțin maxime de difracție. Se poate calcula distanța d dintre planele rețelei cristaline dacă se cunosc: θ , n și λ . Diagrama obținută de fizicianul Laue pe un monocristal (numită lauegramă) este alcătuită din pete dispuse cu o anumită regularitate în jurul unui punct care corespunde fasciculului nedifratat (fig. 39). Diagrama obținută cu un strat de pulbere cristalină (numită debyegramă) este alcătuită dintr-un sistem de cercuri concentrice în jurul unui punct.

Imaginea Soarelui poate fi obținută pe un film fotosensibil la radiații X.



37



38



Protecția mediului și organismului uman la utilizarea razelor X

Reducerea efectului de ionizare a razelor X asupra moleculelor se obține prin: limitarea timpului de expunere; utilizarea unor articole de îmbrăcăminte în structura cărora intră fire subțiri metalice, care formează ochiuri de dimensiuni mici; folosirea ecranelor din aliaje fier-nichel la locul de muncă al personalului medical; desfășurarea activităților la distanță față de sursa de raze X.

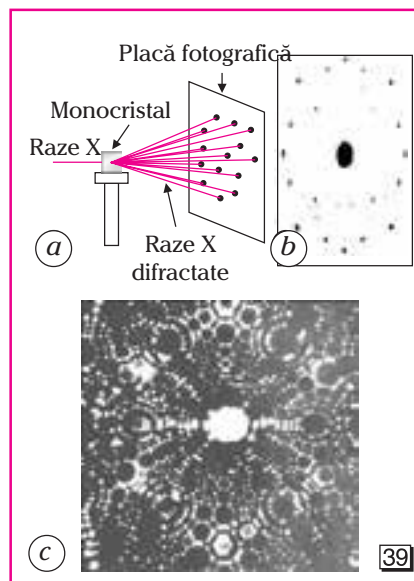


1. Liniile spectrale din spectrul caracteristic de radiații X al seriei K se obțin în urma tranziției din stratul cu $n = 2$ în stratul cu $n = 1$, începând cu elementul litiu. Scrie numărul de undă.

Rezolvare:
$$\frac{1}{\lambda} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{4} \right).$$

2. Scrie expresia lungimii de undă minimă a spectrului continuu emis de un tub de raze X pentru tensiunea de accelerare U .

Răspuns:
$$\lambda_{\min} = hc/eU;$$



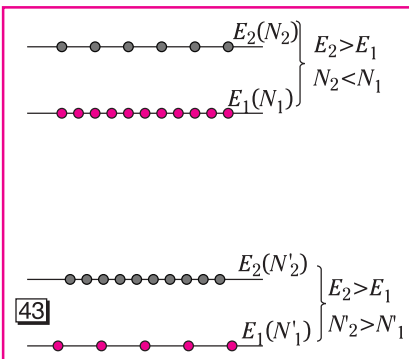
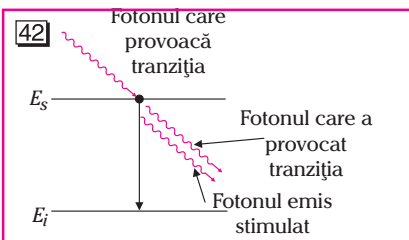
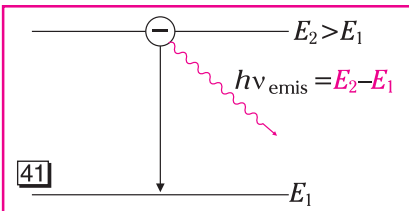
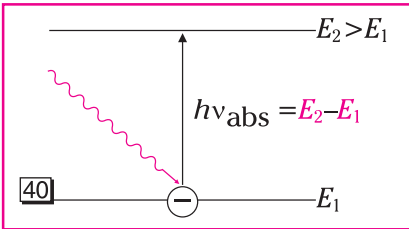
39



3.7. *EFECTUL LASER

„Numeroase descoperiri de cea mai mare importanță, după ce au fost realizate, par extrem de simple. Când afli despre ele, fără să vrei, îți vine în gând o întrebare: cum se face că nu s-a ajuns mai de mult la această descoperire?”

N.G. Basov



*Amplificarea radiației prin emisie stimulată

Probabil știi din alte surse că „laser” reprezintă inițialele cuvintelor din expresia: **light amplification by stimulated emission of radiation**, adică amplificarea luminii prin emisie stimulată de radiație. Ea se realizează în dispozitivele numite lasere. În 1964, fizicienilor N.G. Basov, A.M. Prohorov și C.H. Townes, li s-a acordat premiul Nobel pentru descoperirea efectului laser.

Radiația laser se obține în domeniile: vizibil, ultraviolet, infraroșu și al microundelor. Poate ai folosit diode laser la experimentele de optică. Știi că un atom primește cuantificat energie din exterior (prin absorbția unui foton, prin ciocnirea cu un electron sau în urma agitației termice) și trece într-o stare excitată, prin tranziția unui electron pe un nivel energetic superior E_2 (fig. 40). Majoritatea atomilor au un timp mediu de viață foarte mic ($\tau \approx 10^{-8}$ s) în stare excitată și apoi trec spontan într-o stare cu energie mai mică (prin tranziția electronului pe un nivel energetic inferior E_1) cu emisia spontană a unui foton de energie $\varepsilon = \Delta E = h\nu$ egală cu diferența de energie dintre cele două nivele (fig. 41).

Emisia unei radiații electromagnetice sub influența unei radiații de aceeași frecvență cu cea caracteristică, de dezexcitare spontană a atomului, $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$, este un proces

de emisie stimulată (fig. 42). Radiația emisă stimulat are aceeași frecvență, fază și direcție ca și fotonul care a stimulat emisia. Numărul de atomi dintr-un corp aflat în echilibru termodinamic cu mediul exterior este mai mic în stări energetice superioare decât în stări energetice inferioare (fig. 43). Printr-o anumită metodă se poate obține **inversiunea de populație (mai mulți atomi într-o stare energetică superioară decât în starea energetică inferioară)**, care este metastabilă, cu un timp de viață mare, $\tau'_m \approx 10^{-5}$ s $>$ τ . Emisia stimulată se produce într-un interval de timp mult mai mic decât τ'_m , la trecerea prin sistemul de atomi a fotonului de frecvență $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ emis spontan la dezexcitarea unui atom cu energie superioară E_2 . Se produce în scurt timp o amplificare în avalanșă a numărului de fotoni: cei doi fotoni

stimulează emisia a încă doi fotoni în fază, cu aceeași frecvență ș.a.m.d. Astfel se obține amplificarea radiației prin emisie stimulată.

Părțile constitutive ale unui laser sunt: mediul activ, sistemul de excitare și rezonatorul optic (fig. 44a).

În mediul activ se realizează inversiunea de populație prin excitarea atomilor pe nivele superioare cu absorbție de fotoni (pompați optic în impulsuri scurte) sau bombardare cu electroni. Mediul activ poate fi un cristal de rubin (conține atomi de crom) sau un amestec heliu-neon într-un tub de cuarț în care se produc descărcări electrice. Fotonii emiși prin dezexcitarea atomilor de crom și, respectiv, de neon sunt reflectați de mai multe ori de două oglinzi ale rezonatorului optic, dintre care una este semitransparentă, până când nivelul metastabil se depopulează.

Dioda laser folosește injecția electronilor în zona dintre două straturi semiconductoare. Energia necesară excitării atomilor este dată de curentul electric generat de sursa de tensiune în circuitul diodei. Rezonatorul optic este format din două lentile plan convexe prin care se obține un fascicul cu raze paralele.

Deoarece orice expunere afectează corneea, cristalul și distruge celulele retinei, nu privi direct raza laser chiar dacă provine de la un minilaser cu diodă! Pericolul pe care îl reprezintă fasciculele laser asupra retinei impune folosirea ochelarilor de protecție, care absorb radiația luminoasă cu lungimea de undă a laserului folosit și permit vederea în celelalte regiuni ale spectrului, conform Hotărârii de Guvern Nr. 1048 din 9/08/2006 privind cerințele de securitate și sănătate pentru utilizarea echipamentelor de protecție la locul de muncă.

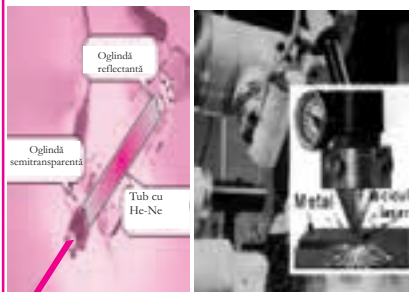
E **Proprietățile radiației laser:*

- monocromaticitate ($\nu = \Delta E / h$) ;
- coerență (este emisă în fază cu fotonii stimulatori);
- direcționalitate (fasciculul este paralel cu axa optică a rezonatorului optic și se propagă pe distanțe mari cu o divergență foarte mică);
- intensitate mare (dezexcitarea tuturor atomilor într-un interval de timp foarte mic).

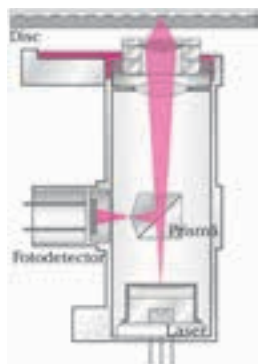
Fasciculele laser au aceste proprietăți care le diferențiază de lumina produsă de Soare sau de becul cu incandescență. Analiza acestora se poate face cu ajutorul filmelor din Lecții interactive de fizică Intuitext volumul II sau cu experimentul virtual Efectul Laser din aplicația AEL (fig. 44 b).



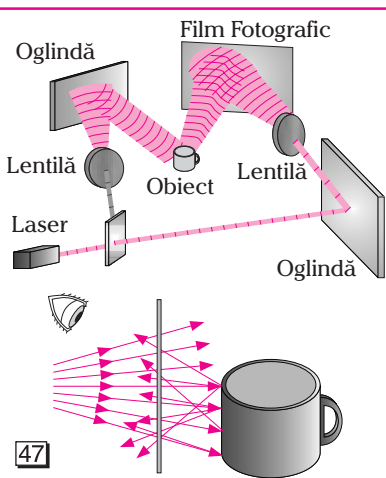
45



46



47



*Utilizările radiației laser

În medicină se efectuează operații pe retină, distrugerea unor pistrui, negi sau tumori. Medicii stomatologi pot folosi un fascicul laser în locul frezei pentru tratarea cariilor. În metalurgie se poate folosi la tăierea și sudarea metalelor dure (fig. 45). Cu ajutorul radiației laser se efectuează măsurări precise ale distanțelor sau direcțiilor în construcții, dirijarea sateliților și rachetelor către o țintă. O rază laser este direcționată de pe avionul care transportă racheta către țintă; senzorii rachetei recepționează raza reflectată pe țintă și ghidează racheta computerizat spre țintă.

Informația de pe un compact disc (C.D.), conținută în striatiile succesive din stratul de aluminiu al acestuia, se citește cu ajutorul unui fascicul laser în infraroșu. Când C.D.-ul este introdus în lectorul optoelectronic, un fascicul laser reflectat de succesiunea de scobituri decodifică informația stocată în semnale electrice, care apoi sunt reconvertite în sunete de către difuzoare (fig. 46). În înregistrarea digitală (numerică) pe un compact disc, sunetele convertite în semnale electrice codificate în secvențe numerice (0 și 1) sunt gravate pe suprafața discului sub forma unor minuscule scobituri, care sunt apoi acoperite cu o folie subțire de aluminiu reflectorizant.

Holografia reprezintă o metodă de înregistrare a franjelor de interferență obținute din unda laser reflectată de obiect (numită undă obiect) cu unda laser directă de la sursa laser (numită undă de referință), în volumul stratului fotosensibil al unui film fotografic (cu granulație fină, pentru o putere mare de rezoluție). Divizarea fasciculului laser în două fascicule se obține cu ajutorul unei oglinzi semitransparente (fig. 47): unda directă este trimisă spre filmul fotografic (printr-un sistem optic lentilă-oglină), iar unda reflectată de obiect este direcționată și ea spre filmul fotografic (prin alt sistem optic lentilă-oglină). Unda obiect, purtătoarea informației despre obiect, diferă în intensitate și fază față de unda de referință cu care interferează pe film. După dezvoltarea filmului fotografic se obține o hologramă care prezintă o rețea de difracție tridimensională de minime și maxime luminoase (straturi de argint semitransparente). Vizualizarea hologramei se obține tot cu fasciculul laser de referință folosit la înregistrarea ei. O parte din acest fascicul iluminează holograma astfel încât undele difractate, coerente cu unda de referință, reproduc imaginea în relief a obiectului, pe care ochiul o recepționează ca și cum obiectul ar fi acolo. Observatorul are senzația că privește obiectul real deoarece, schimbându-și poziția, el vede din anumite puncte detalii care din alte puncte sunt mascate, imaginea fiind tridimensională (la fotografiile stereo obișnuite, senzația de

profunzime se obține doar după o singură direcție). Franjele de pe hologramă conțin informația despre obiect (amplitudinea franjelor codifică direcția undei, distanța dintre franje codifică faza undei). Dacă o hologramă este ruptă sau tăiată, nu se pierde informația conținută, deoarece fiecare porțiune conține informația stocată (lumina reflectată de fiecare punct de pe un obiect nu a fost focalizată într-un punct de pe film, ci a interferat cu unda de referință pe toată suprafața hologramei). Holograma înregistrează schimbarea direcției și fazei undei obiect de la un corp în mișcare. Imaginea undelor de șoc din jurul unui glonte, în mișcare rapidă, devine vizibilă prin iluminarea, cu radiația laser de referință, a hologramei care conține franje de interferență (fig. [48]). Deoarece sunt greu de falsificat, hologramele se folosesc pe cărțile de credit și pe bancnotele noi. Franjele corespunzătoare hologramelor le obții prin iluminarea lor cu un fascicul laser (fig. [49]).



Dennis Gabor – premiul Nobel (1971) pentru inventarea holografiei.



- ☑ Nivelele de energie ale atomilor sunt cuantificate.
- ☑ Atomii nu absorb decât anumite cuante de energie la trecerea din starea fundamentală într-o stare excitată.

Starea **fundamentală** este o stare stabilă caracterizată de cea mai mică valoare a energiei și negativă. Cu cât electronul este mai îndepărtat de nucleu, cu atât nivelul energetic al electronului este caracterizat de energie mai mare. Atomii cu energii mai mari decât această valoare de referință sunt considerați în stări **excitate**. Starea ionizată este starea în care unul sau mai mulți electroni sunt smulși din atom și devin liberi în urma procesului numit ionizare.

- ☑ Cuantificarea momentului cinetic L al electronului pe orbitele staționare Bohr:

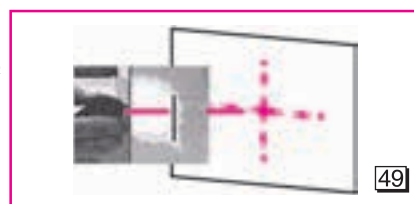
$$L = m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar,$$

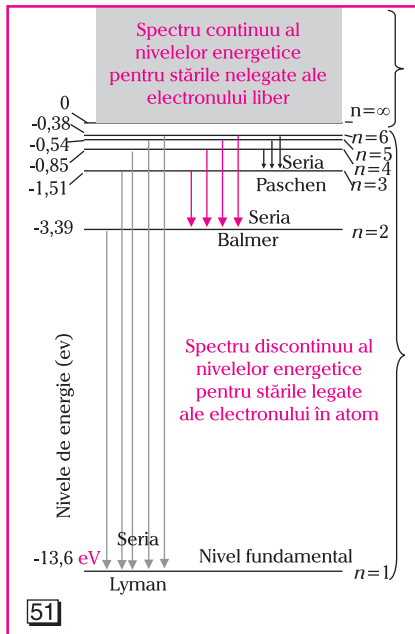
unde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg;

- ☑ Razele orbitelor staționare la atomul de hidrogen:

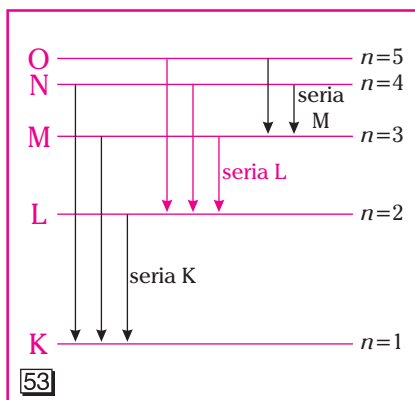
$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} \text{ (fig. [50])},$$

unde $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C;





Prin convenție, atribuim valoarea zero de referință stării energetice în care electronul ar deveni liber și în repaus, în urma unui proces de ionizare a atomului. Fiecare atom are propriile sale nivele de energie și propria energie de ionizare.



✓ Energia stărilor staționare la atomul de hidrogen (fig. 51):

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} = \frac{1}{n^2} E_1,$$

unde $E_1 = -13,6$ eV și $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$;

✓ Emisia și absorbția cuantificată de energie radiantă:

$$\Delta E = h\tilde{\nu}_{m,n} = E_m - E_n = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Spectrele se analizează cu spectroscopul (fig. 52).

✓ Numărul de undă la atomul de hidrogen:

$$\tilde{\nu}_{m,n} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

unde $R_H = \frac{m_0 e^4}{8ch^3 \epsilon_0^2} = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$.

✓ Frecvența radiației emise: $\tilde{\nu} = \tilde{\nu}c = R'_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$, unde

$$R'_H = 3,28 \times 10^{15} \text{ Hz}.$$

✓ La ionizarea atomului prin absorbția unui foton de energie mai mare decât energia de legătură rezultă (prin efect fotoelectric intern) fotoelectroni cu energia cinetică:

$$E_c = E_{foton} - E_{legătură}.$$

✓ Spectrul caracteristic de linii de radiații X (fig. 53), se obține prin rearanjarea electronilor unui atom care a fost ionizat prin pierderea unui electron de pe straturile K ($n = 1$), L ($n = 2$) sau M ($n = 3$). Dacă electronul pierdut de pe stratul K este înlocuit de un electron de pe stratul L, atunci frecvența radiației

caracteristice este: $\tilde{\nu}_{K\alpha} = \frac{E_L - E_K}{h}$.

✓ Legea lui Moseley pentru spectrul caracteristic de radiații X:

$\frac{1}{\lambda} = \frac{\tilde{\nu}_{K,n}}{c} = \tilde{\nu}_{K,n} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{K^2} \right)$, unde Z – numărul atomic al atomului emițător și σ – constanta de ecran.

✓ Frecvența maximă a spectrului continuu pentru radiații X

se obține din relația: $h\tilde{\nu}_{max} = eU$, iar $\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}$,

unde U – tensiunea de accelerare dintre electrozi.



3.8. PROBLEME ȘI TESTE PROPUSE

3.8.1. Probleme cu grad scăzut de dificultate

1. În experimentul Franck-Hertz, la o energie cinetică a electronilor de 4,9 eV, aceștia suferă împrăștiere elastică cu atomii de mercur ($A = 200$, $\rho = 13,6 \text{ kg/m}^3$). În ipoteza că lungimea de undă asociată electronilor este egală cu diametrul atomilor de mercur, obținem:

- a) $2r \approx 5,5 \text{ \AA}$; b) $2r \approx 8,3 \text{ \AA}$;
c) $2r \approx 105 \text{ \AA}$; d) $2r \approx 11,5 \text{ \AA}$, unde $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

2. Curba de dispersie a unui spectroscop cu prismă a fost trasată prin utilizarea unor surse etalon (fig. [54]). Lungimea de undă corespunzătoare diviziunii $x = 60$ pe curba de dispersie corespunde liniei hidrogenului atomic cu $\lambda = 4100 \text{ \AA}$ din seria:

- a) Lyman; b) Balmer; c) Paschen; d) Pfundt.

3. Energia totală a electronului de pe o orbită circulară de rază r_n în modelul Bohr pentru atomul de hidrogen este definită în funcție de energia stării fundamentale $E_1 = -13,6 \text{ eV}$:

- a) $E_n = \frac{1}{n^2} E_1$; b) $E_n = -\frac{1}{n^2} E_1$; c) $E_n = n^2 E_1$; d) $E_n = -n^2 E_1$.

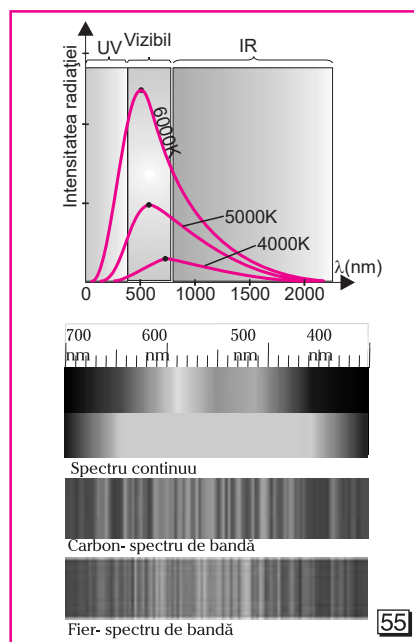
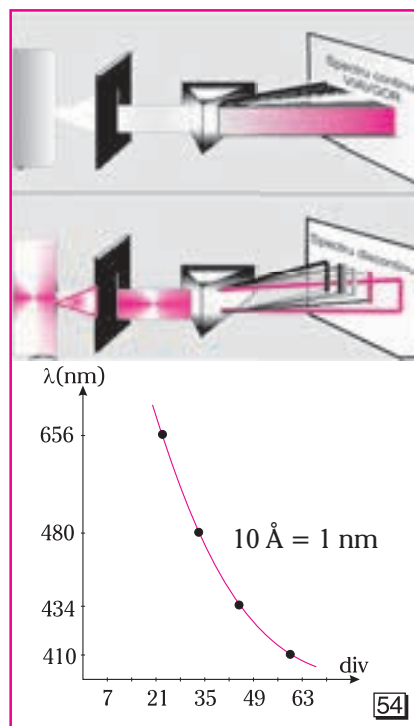
4. În modelul Bohr pentru atomul de hidrogen, energia totală $E_n = -E_{\text{cinetică}}$, iar energiile potențială și cinetică îndeplinesc condiția:

- a) $E_{\text{potențială}} = -2E_{\text{cinetică}}$; b) $E_{\text{potențială}} = 2E_{\text{cinetică}}$;
c) $E_{\text{potențială}} = E_{\text{cinetică}}$; d) $E_{\text{potențială}} = -E_{\text{cinetică}}$.

5. Un corp solid încălzit emite radiații infraroșii și roșii, iar dacă este încălzit la temperaturi din ce în ce mai mari emite radiații oranj, galbene și apoi lumina radiată devine albă (fig. [55]). Se poate aprecia temperatura oțelului topit după spectrul lui?

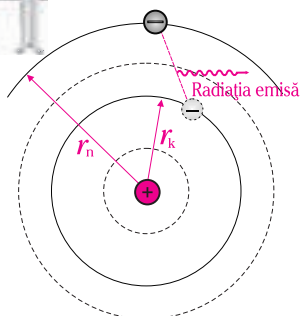
6. O particulă α cu sarcina $q = 2e$ și energia cinetică $E_c = 5 \text{ MeV}$ este frânată de forțele electrice ale unui nucleu de zinc cu sarcina $Q = 30e$, considerat în repaus. Dacă ciocnirea este centrală în vidul interatomic, distanța minimă la care ajunge particula α față de nucleul de zinc este:

- a) $r_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-14} \text{ m}$; b) $r_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$;
c) $r_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}$; d) $r_{\min} = 1,7 \cdot 10^{-13} \text{ m}$.





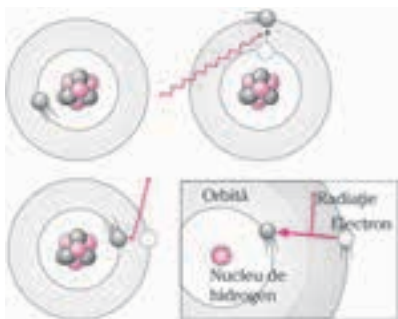
Recapitulează teoria și comentează reprezentările grafice de mai jos!



Un electron sau un foton excită un atom.



...și atomul emite un foton sau mai mulți fotoni prin dezexcitare



7. Razar a atomilor din rețeaua cristalină a fierului, cu densitatea $\rho_{Fe} = 7900 \text{ kg/m}^3$, $\mu_{Fe} = 56 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ se obține cu relația aproximativă $V_\mu = \frac{\mu}{\rho} \approx N_A \frac{4}{3} \pi r^3$, unde $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$:

- a) $r = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}$; b) $r = 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$;
c) $r = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ m}$; d) $r = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ m}$.

8. Un atom se află într-o stare legată când energia totală a acestuia este negativă: $E_{totală} = E_n < 0$. Energia de legătură E_{leg} a sistemului atomic (electron-nucleu) este egală cu lucrul mecanic efectuat de forțe exterioare pentru a desface sistemul în părțile componente (electron și nucleu) în repaus și izolate (la distanță mare, încât nu mai interacționează): $E_{leg} + E_n = E_{finală}$, unde $E_{finală} = 0$ deoarece $E_{cin, finală} = 0$ și $E_{pot, finală} = 0$. Rezultă că $E_{leg} = -E_n > 0$. Dacă atomul primește din exterior energia $E > E_{leg}$, se obține ionizarea atomului. Electronul liber obținut în acest proces are energia cinetică E_{cin} :

- a) $E_{cin} = E - E_{leg}$; b) $E_{cin} = E + E_{leg}$; c) $E_{cin} = E - E_n$; d) $E_{cin} = E$.

9. Pentru ionul He^+ folosim modelul lui Bohr ca pentru un atom hidrogenoid (cu un electron de valență în jurul nucleului cu sarcina Ze , unde $Z = 2$). Orbita stabilă se obține

din condiția $\frac{m_{0,e} v^2}{r} = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_0 r^2}$. Cuantificarea este dată de relația:

a) $E_n = -\frac{Z^2 m_{0,e} e^4}{n^2 8 h^2 \epsilon_0}$; b) $E_n = +\frac{Z^2 m_{0,e} e^4}{n^2 8 h^2 \epsilon_0}$;

c) $E_n = -\frac{Z m_{0,e} e^4}{n^2 8 h^2 \epsilon_0}$; d) $E_n = +\frac{Z m_{0,e} e^4}{n^2 8 h^2 \epsilon_0}$.

10. Una din relațiile următoare de cuantificare în modelul lui Bohr este scrisă incorect. Condiția de cuantificare: a momentului cinetic orbital, a energiei, a razelor orbitelor circulare sau a vitezei electronului pe orbite este greșită?

a) $L_n = nh$; b) $E_n = \frac{E_1}{n^2}$; c) $r_n = n^2 r_1$; d) $v_n = \frac{v_1}{n}$,

unde $E_1 = \frac{m_{0,e} e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} = -13,6 \text{ eV}$; $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_{0,e} e^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$;

$v_1 = \frac{e^2}{2 h \epsilon_0} = 2,19 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ și $n = 1, 2, 3, \dots$.

11. Energia minimă de ionizare a atomului de hidrogen aflat în starea fundamentală se definește prin relația:

- a) $E_{\text{ionizare}} = -E_1 = hcR$; b) $E_{\text{ionizare}} = E_1 = -hc^2R$;
c) $E_{\text{ionizare}} = -2E_{\text{legătură}}$; d) $E_{\text{ionizare}} = -E_1 + E_{\text{legătură}}$.

12. Ultima linie ($n \rightarrow \infty$) a seriei Balmer a atomului de hidrogen are numărul de undă:

- a) $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{2}$; b) $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{3}$; c) $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{4}$; d) $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{5}$.

13. Un atom de hidrogen se află într-o stare excitată cu energia de legătură de 0,85 eV, suferind o tranziție care îl aduce într-o stare a cărei energie de excitare față de nivelul fundamental este 10,2 eV. Numerele cuantice care caracterizează cele două stări sunt:

- a) $n_i = 2$; 3; b) $n_i = 4$; 2; c) $n_i = 3$; 4; d) $n_i = 3$; 5.

14. Un atom de hidrogen excitat revine dintr-o stare staționară cu energia totală E_k într-o altă stare staționară cu energia totală E_n ($n < k$) sau în starea fundamentală ($E_1 = -E_{\text{ionizare}}$) după ce emite (fig. 56) radiațiile cu lungimea

de undă $\lambda = \frac{hc}{E_k - E_n}$. Numerele cuantice ale stărilor se pot

determina cu relațiile $n = \sqrt{\frac{-E_{\text{ionizare}}}{E_n}}$ și $k = \sqrt{\frac{-E_{\text{ionizare}}}{E_k}}$?

15. Pentru atomul de hidrogen, seriile Paschen și Brackett se suprapun parțial. Se pot determina frecvențele extreme în cadrul fiecărei serii și intervalul spectral corespunzător, în funcție de numărul cuantic n al nivelului inferior?

16. Lungimile de undă din seria Lyman se găsesc în intervalul spectral: a) $\lambda \in [911; 1215] \text{ \AA}$; b) $\lambda \in [3645; 6560] \text{ \AA}$;
c) $\lambda \in [8200; 18750] \text{ \AA}$; d) $\lambda \in [14573; 40522] \text{ \AA}$.

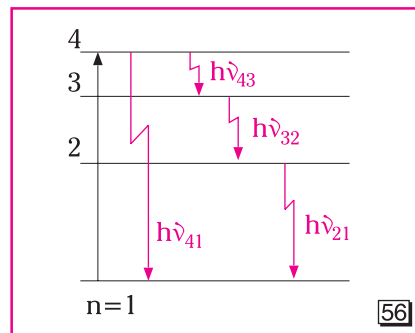
Se cunoaște relația

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

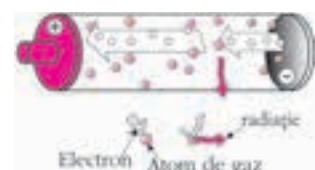
unde $R = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$.

17. Într-un tub de descărcare în atmosferă de hidrogen (fig. 57), electronii bombardează atomii de hidrogen aflați în stare fundamentală. Atomii de hidrogen încep să emită fotoni atunci când tensiunea de accelerare aplicată tubului este:

- a) $U_x = 10,2 \text{ V}$; b) $U_x = 20,4 \text{ V}$; c) $U_x = 30,6 \text{ V}$; d) $U_x = 13,6 \text{ V}$.



Se cunosc: lungimile de undă ale radiațiilor λ , viteza luminii în vid c , constanta Planck h și energia de ionizare a atomului de hidrogen aflat în starea fundamentală E_{ioniz} .

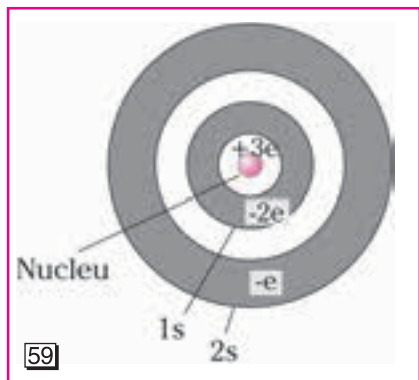


Tabel pentru recapitulare

Înscrie în spațiile libere ale coloanei din dreapta unitatea de măsură și simbolul corespunzător mărimilor fizice din stânga:

Mărimea fizică	Unitatea de măsură (S.I.) și simbolul respectiv
Cantitatea de electricitate	
Frecvența	
Accelerația	
Energia	
Puterea	
Tensiunea electrică	
Lungimea	
Masa	
Timpul	
Temperatura termodinamică	
Cantitatea de substanță	
Forța	
Impulsul	
Lungimea de undă	

	5f	6d			
4f		5d	6p	7s	
	4d	5p	6s		
3d		4p	5s		
	3p	4s			
2p		3s			
	2s				
1s					



18. Un tub de radiații X are aplicată între electrozi tensiunea de accelerare U . Diferența $\Delta\lambda$ dintre lungimea de undă a radiației caracteristice obținută la tranziția de pe nivelul $k = 2$ pe nivelul fundamental $n = 1$ și lungimea de undă λ_{min} corespunzătoare limitei inferioare a spectrului continuu, dacă știm constanta de ecran $\sigma = 1$ și Z – numărul atomic al elementului emițător, se exprimă prin relația:

$$\text{a) } \Delta\lambda = \frac{4}{3R(Z-1)^2}; \text{ b) } \Delta\lambda = \frac{hc}{eU};$$

$$\text{c) } \Delta\lambda = 0; \text{ d) } \Delta\lambda = \frac{4}{3R(Z-1)^2} - \frac{hc}{eU}.$$

19. Completează spațiile libere:

Nivelul $3d$ are energia mai mare decât nivelul $4s$, astfel că, mai întâi, se completează nivelul $4s$, după care urmează completarea nivelului $3d$ (fig. 58). Elementul potasiu ($Z = 19$) are configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 4s^1$.

Elementul... ($Z = 20$) are configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 4s^2$, iar elementul scandiu, Sc ($Z = \dots$), are configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 4s^1$. În continuare, nivelele se completează normal, până la elementul Kr cu configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 4s^2 4p^6$ (configurația de gaz ...).

Următorul element, rubidiul ($Z = 37$), are nivelul $5s$ mai coborât decât nivelul ..., astfel că se completează mai întâi nivelul $5s$, după care urmează completarea nivelului $4d$ și configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 4s^2 4p^6 5s^1$.

Elementul stronțiu Sr ($Z = \dots$) are configurația electronică $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4 4s^2 4p^6 5s^2$, iar începând cu elementul ytriu, Y ($Z = 39$), începe completarea stării $4d$ până la elementul ... ($Z = 57$), după care urmează o serie de excepții (vezi tabelul periodic al elementelor).

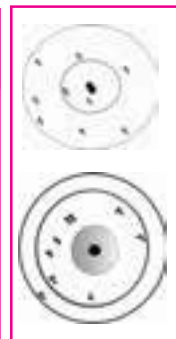
20. La atomul de litiu, nucleul are sarcina $3e$ (fig. 59); cei doi electroni $1s$ sunt mai apropiați de nucleu decât electronul de valență $2s$, care se mișcă într-un câmp aproximativ egal cu cel al unei sarcini elementare punctiforme ($3e - 2e = e$). Fiecare atom pierde ușor electronul exterior. Toate metalele alcaline au un electron de valență, slab legat (sunt electropozitive). Halogenii (fluorul, clorul, bromul, iodul) au un loc vacant într-un orbital p din ultimul strat (sunt electronegative). Pot forma compuși ionici?

21. Demonstrează relația stabilită pentru atomii hidrogenoizi (He^+ , Na etc.) de către Rydberg și Ritz:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H Z^2 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

22. Zincul are numărul atomic $Z = 30$ și patru straturi electronice K, L, M, N. Stările energetice ale electronilor în atom, sintetizate în tabelul de mai jos, se scriu sub forma: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$.

Configurația electronică în straturi și substraturi								
Numere cuantice:								
n	K 1	L 2		M 3			N 4	
l	$0(s)$	$0(s)$	$1(p)$	$0(s)$	$1(p)$	$2(d)$	$4s$	libere
m_l	0	0	$-1, 0, +1$	0	$-1, 0, +1$	$-2, -1, 0, +1, +2$	0	
m_s	$\pm 1/2$	$\pm 1/2$	$\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$	$\pm 1/2$	$\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$	$\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2$	$\pm 1/2$	
Nr. stări posibile:	2	2	6	2	6	10	2	
Nr. total de stări:	2	8		18			2	

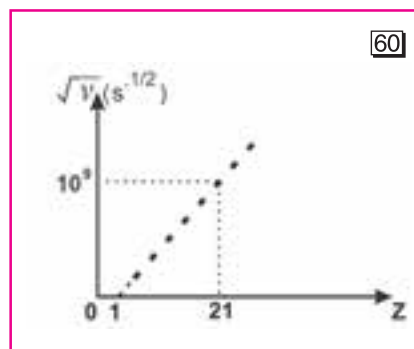


În reacțiile chimice, zincul poate ceda:

- a) 2 electroni de valență din stratul N; b) 10 electroni;
c) 6 electroni; d) 4 electroni.

23. Lungimile de undă ale radiațiilor X produse prin frânarea pe un anticatod a unui flux de electroni accelerați sub o tensiune U nu pot fi mai mici decât o anumită valoare. Scrie expresia lungimii de undă minime a radiațiilor X de frânare.

24. Graficul din figura 60 a fost obținut în urma măsurării frecvențelor n ale radiațiilor X emise de atomii elementelor cu numărul atomic Z , la tranziția între nivelele 2 și 1. Calculează, cu ajutorul graficului, constanta de ecran s .



25. Atomii de hidrogen dintr-o incintă, aflați în starea fundamentală $E_1 = -13,6\text{eV}$ sunt excitați după ce absorb succesiv două cuante cu valorile energiei $\varepsilon_{1k} = 10,2\text{ eV}$ și $\varepsilon_{kn} = 2,55\text{ eV}$. Determină numărul cuantic principal n al stării excitate.

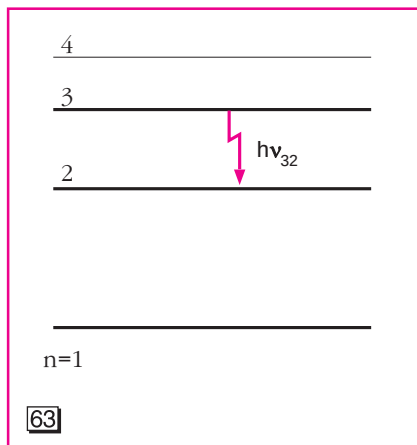
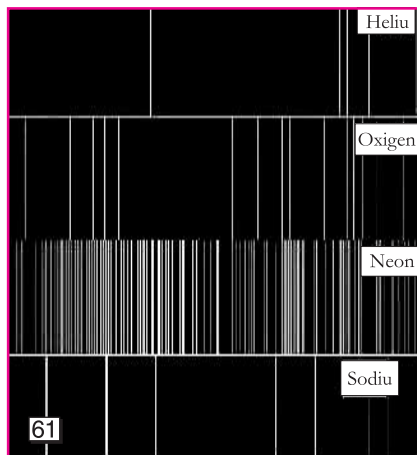


1.a; 2.b; 3.a; 4.a; 5.da; 6.a; 7.b; 8.a; 9.a;
10.a; 11.a; 12.c; 13.b; 14.da; 15.da; 16.a;

17.a; 18.d; 22.a; 23. $\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$; 24. $\sigma = 1$ (se determină din intersecția dreptei cu axa orizontală); 25. $h\nu_{1n} = E_n - E_1$;

$$E_n = E_1 + \varepsilon_{1k} + \varepsilon_{kn}; \quad \nu_{1n} = \frac{\varepsilon_{1k} + \varepsilon_{kn}}{h};$$

$$n = \sqrt{\frac{E_1}{E_1 + \varepsilon_{1k} + \varepsilon_{kn}}} = 4.$$



3.8.2. Probleme cu grad mediu de dificultate

1. Forțele care mențin electronii în vecinătatea nucleului atomic sunt de natură:

- a) gravitațională; b) elastică; c) electrică; d) magnetică.

2. Caracterizează spectrele din figura 61. Atomii pot absorbi sau emite anumite cantități de energie pe baza:

- a) forțelor electrice; b) cuantificării stărilor de energie; c) continuității stărilor de energie; d) forțelor gravitaționale.

3. Atunci când arunci sare de bucătărie pe cărbuni incandescenti sau în flacără (fig. 62), radiația emisă în domeniul vizibil de către atomii de sodiu este:

- a) roșie; b) galbenă; c) verde; d) albastră.

4. Pe măsură ce temperatura unui gaz crește, tot mai mulți atomi pot ajunge, ca urmare a ciocnirilor puternice, în:

- a) stări excitate; b) stări staționare dezexcitate; c) starea fundamentală.

5. Frecvențele și culorile luminii emise de atomii unui gaz care se întorc în starea fundamentală:

- a) acoperă tot spectrul luminii din domeniul vizibil; b) sunt caracteristice elementului chimic; c) sunt numai în domeniul infraroșu.

6. Starea fundamentală a unui atom este starea în care se află (în mod normal) atomul: a) înainte de a primi energie de excitare (prin ciocniri sau iradiere); b) după ce a primit energie de excitare; c) după ce a primit energie de ionizare.

7. Calculează lungimea de undă a radiației emise la tranziția de pe nivelul energetic E_3 pe nivelul E_2 corespunzătoare saltului electronului de pe orbita staționară cu $i = 3$ pe orbita staționară cu $n = 2$ în atomul de hidrogen (fig. 63).

8. În cazul atomului de hidrogen, $E_{pe} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$. Momentul

cinetic este cuantificat: $L = n\frac{h}{2\pi}$. Pentru prima orbită obținem:

$$mvr = \frac{h}{2\pi} \text{ (valoarea minimă pentru } n = 1) \Rightarrow r = \frac{h}{2\pi p}, \text{ unde}$$

$p = mv$. Orice sistem fizic evoluează spre starea cea mai stabilă caracterizată de energie minimă. Să se estimeze energia nivelului fundamental și dimensiunea atomilor de hidrogen, folosind expresia energiei totale:

$$E_{tot} = E_c + E_{p,electrică} = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{p^2}{2m} - \frac{pe^2}{2\epsilon_0 h} = f(p).$$

9. Lungimea de undă cea mai mică din seria Balmer a atomului de hidrogen (fig. 64) se calculează cu relația corectă:

a) $\lambda_{min} = \frac{4}{R}$; b) $\lambda_{min} = \frac{3}{R}$; c) $\lambda_{min} = \frac{2}{R}$;

d) $\lambda_{min} = \frac{5}{R}$ (unde R este constanta lui Rydberg).

10. Lungimea de undă cea mai mare din seria Lyman a atomului de hidrogen se calculează cu relația:

a) $\lambda_{max} = \frac{1}{3R}$; b) $\lambda_{max} = \frac{2}{3R}$; c) $\lambda_{max} = \frac{2}{3R}$; d) $\lambda_{max} = \frac{4}{3R}$.

11. Lungimea de undă cea mai mare din seria Balmer a atomului de hidrogen se calculează cu relația:

a) $\lambda_{max} = \frac{36}{5R}$; b) $\lambda_{max} = \frac{25}{9R}$; c) $\lambda_{max} = \frac{16}{5R}$; d) $\lambda_{max} = \frac{9}{5R}$.

12. Dacă electronul aflat pe nivelul fundamental în atomul de hidrogen are energia de legătură $E_{leg} = 13,6$ eV și absoarbe un foton cu $\lambda = 828$ Å și energia $\varepsilon = 15$ eV, atunci energia cinetică a acestui electron este:

a) $E_{cin} = 15$ eV; b) $E_{cin} = 13,6$ eV;
c) $E_{cin} = 28,6$ eV; d) $E_{cin} = 1,4$ eV.

13. Energia fotonului absorbit de un atom de hidrogen, pentru ca electronul să treacă de pe nivelul fundamental pe nivelul energetic cuantificat cu $n = 4$, are valoarea:

a) $\varepsilon \approx 0,9$ eV; b) $\varepsilon \approx 12$ eV; c) $\varepsilon \approx 120$ eV; d) $\varepsilon = 1200$ eV;

14. Lungimea de undă a radiației emise, la trecerea electronului din starea energetică cu $i = 4$ în starea cu $n = 2$ (fig. 65), are valoarea:

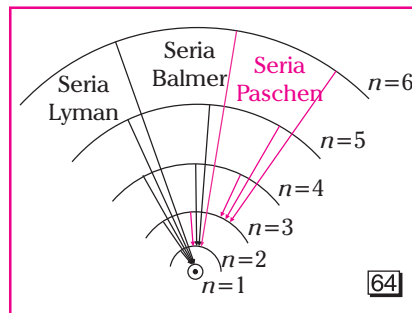
a) $\lambda = 123$ nm; b) $\lambda = 243$ nm;
c) $\lambda = 486$ nm; d) $\lambda = 47$ nm.

15. Frecvența fotonului absorbit de atomul de hidrogen, ca să treacă din starea cu $n_1 = 3$ în starea cu $n_2 = 5$, are valoarea:

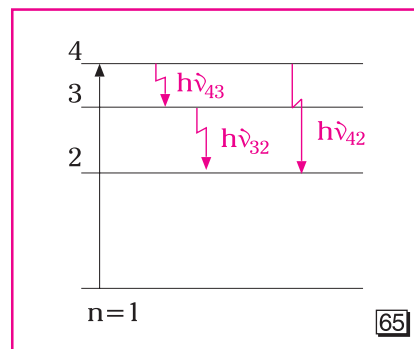
a) $\nu_{3,5} = 2,3 \cdot 10^{14}$ Hz; b) $\nu_{3,5} = 2,3 \cdot 10^{15}$ Hz;
c) $\nu_{3,5} = 7,8 \cdot 10^5$ Hz; d) $\nu_{3,5} = 1287$ Hz.

16. Folosește principiul de excluziune al lui Pauli pentru a găsi numărul total de electroni dintr-un atom care au aceleași numere cuantice n, l și m_l :

a) 1 electron; b) 2 electroni;
c) $2(2l + 1)$ electroni; d) $2n^2$ electroni.



Stările excitate apar când atomul absoarbe selectiv porții de energie care satisfac legea conservării energiei.



Wolfgang Pauli – premiul Nobel (1945) pentru descoperirea principiului de excluziune.

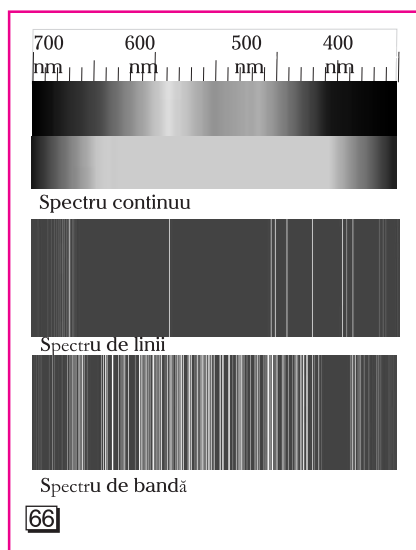


1) c; 2) b; 3) b; 4) a; 5) b; 6) a;
7) $\lambda = 660$ nm; 9) a; 10) d; 11) a;
12) d; 13) b; 14) c; 15) a; 16) b.

3.8.3. Test pentru autoevaluare

1. Găsește și completează coloana în care nu este trecut numărul cuantic:

Numărul cuantic	Valorile posibile și notațiile spectroscopice	Mărimile pe care o cuantifică	Relația de cuantificare pentru atomii hidrogenoizi
...	[1, 2, 3, ...]	Energia K, L, M, ...	$E_n = -\frac{Z^2 m_0 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$
...	[0, 1, ... n-1] s, p, d, f, ...	Momentul cinetic orbital	$L^2 = l(l+1)\hbar^2$
...	[-l, ..., -1, 0, 1, ..., l]	Proiecția pe Oz a momentului	$L_z = m\hbar$, unde $\hbar = h/2\pi$



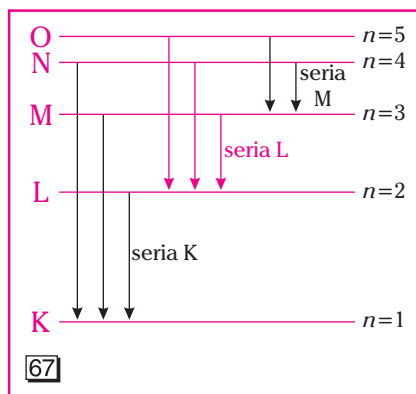
2. Un gaz aflat la presiune înaltă emite spectru continuu dacă este încălzit la temperaturi mari (fig. 66). Același gaz aflat la presiune mică emite altfel de spectre dacă este încălzit. Înseamnă că atomii își perturbă orbitalii reciproc, salturile electronilor sunt mai multe când atomii interacționează mai puternic la presiuni și temperaturi mari și „se pierd” frecvențele caracteristice? Justifică răspunsul dat.

3. Flacăra albastră a aragazului devine galbenă când ajung în ea picături de apă dintr-un vas deoarece: a) apa conține săruri de sodiu care o colorează în galben; b) apa conține săruri de fier care o colorează în galben; c) apa conține oxigen care o colorează în galben.

4. Un corp cu o anumită culoare nu poate fi văzut decât în radiație de aceeași culoare cu a lui. Dacă iluminăm un corp verde cu lumină roșie, acesta apare:
a) verde; b) roșu; c) negru.

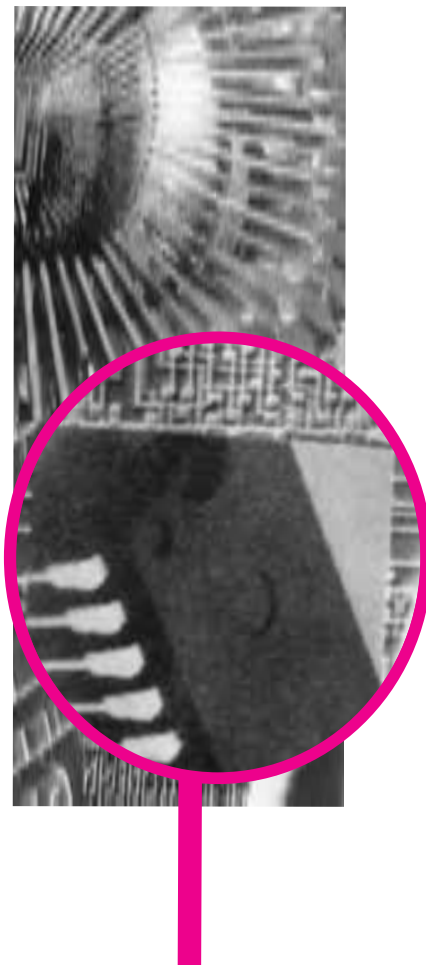
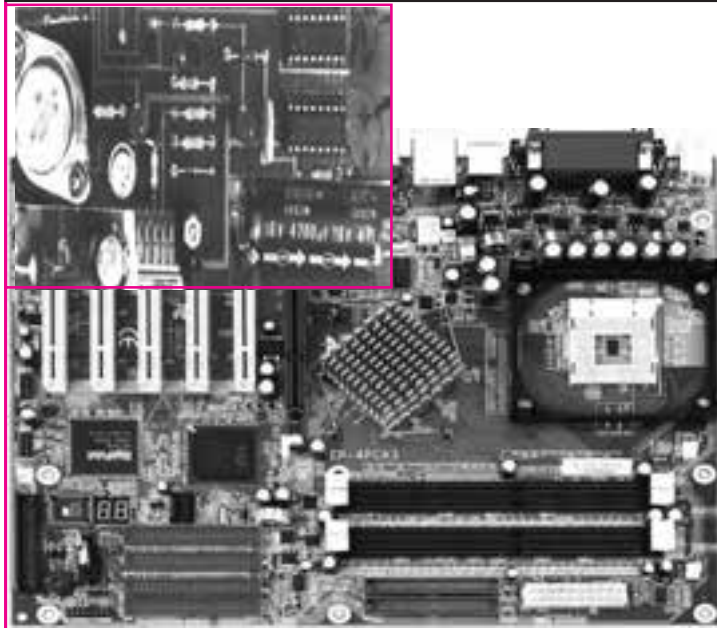
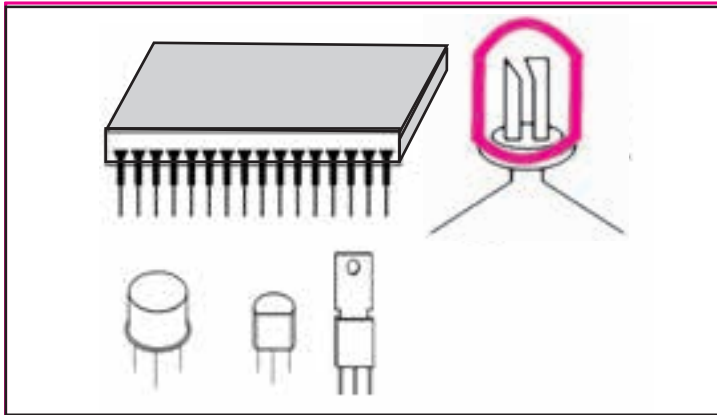
5. Culoarea corpurilor depinde de frecvențele radiațiilor reflectate din cele folosite la iluminare. Lumina emisă de becul cu filament incandescent este bogată în radiații roșii-galbene, iar lumina tuburilor luminescente (care sunt și mai economice) are compoziția spectrală: a) bogată în radiații oranj; b) bogată în radiații verzi-albastre; c) apropiată de lumina zilei.

6. Radiațiile X generate prin frânarea bruscă a electronilor care bombardează ecranul televizorului sau monitorului (absorbite de plumbul din sticla flint a filtrului de protecție) au spectru de linii obținut ca în schema 67? Justifică răspunsul.



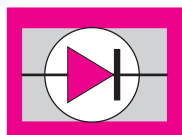
Răspunsuri: 1) n, l, m ; 2) da; 3) a; 4) c; 5) c; 6) nu.

SEMICONDUCTOARE. APLICAȚII ÎN ELECTRONICĂ



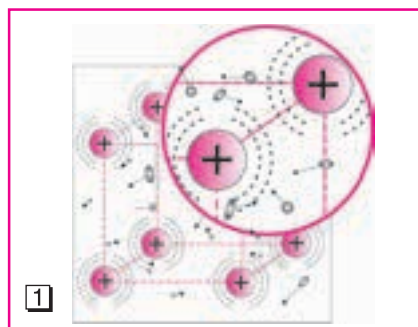
„Dacă dorim să evităm o prezentare eronată a metodelor și realizărilor fizicii, trebuie să luăm în considerație relațiile fizicii cu celelalte științe.”

Ernest Hutten, *Ideile fundamentale în fizică*



4.1. CONDUCTŢIA ELECTRICĂ ÎN METALE ŞI SEMICONDUCTORI. SEMICONDUCTORI INTRINSECI ŞI EXTRINSECI

Conducţia electrică în metale

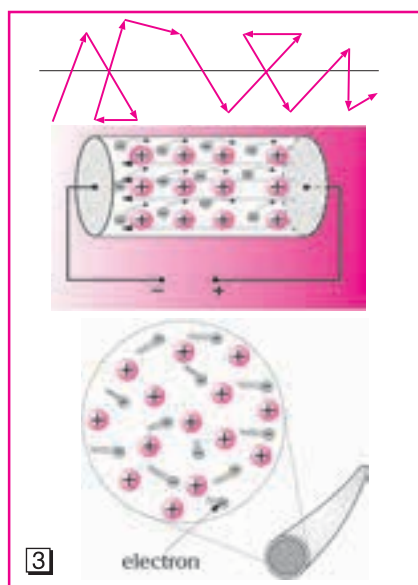


La atomii metalelor, forţa de atracţie dintre nucleu şi electronii de valenţă este mică şi aceşti electroni – practic liberi – se deplasează printre ionii dispuşi regulat în nodurile reţelei cristaline. Atomii constituenţi devin ioni pozitivi, legaţi în reţea, deoarece pierd unul sau mai mulţi electroni de valenţă care trec de la un atom la altul (fig. [1]). Aceşti electroni sunt numiţi *electroni liberi* sau *electroni de conducţie*.



Deplasarea dezordonată a electronilor liberi în interiorul metalului se face în toate direcţiile printre ionii pozitivi (fig. [2]).

Ionii pozitivi sunt nucleeele atomilor cu electronii care rămân în jurul lor. Ei vibrează în nodurile reţelei cristaline.

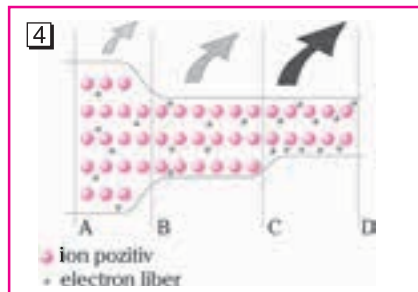


Electronii de conducţie aparţin deci metalului care rămâne neutru din punct de vedere electric, deoarece sarcina electrică a tuturor electronilor liberi este egală în mărime cu sarcina electrică a tuturor ionilor „legaţi”. Dacă la capetele unui conductor metalic se aplică o tensiune electrică, electronii liberi sunt antrenaţi de forţele electrice ale câmpului electric care se stabileşte în conductor într-o mişcare parţial ordonată către capătul pozitiv al conductorului, suprapusă peste mişcarea dezordonată, în zig-zag (fig. [3]).

Curentul electric reprezintă deplasarea ordonată a purtătorilor de sarcină liberi printr-un mediu conductor. Electronii de conducţie au o deplasare de ansamblu către borna pozitivă a sursei electrice.

Curentul electric este o circulaţie de electroni de conducţie în corpurile conductoare. Circulând printre ioni, aceşti electroni suferă numeroase ciocniri. Între două ciocniri consecutive câştigă energie, dar la fiecare ciocnire pierde energie şi se degajă o cantitate mică de căldură (fig. [4]).

Efectul termic al curentului depinde de numărul de interacţiuni suferite de electronii de conducţie cu ionii pozitivi. Cu cât un conductor este mai subţire, cu atât electronii de conducţie sunt mai apropiaţi, deşi intensitatea curentului rămâne aceeaşi. Ciocnirile fiind mai numeroase, rezultă că zona subţire se încălzeşte mai puternic decât zona groasă a firului, atunci când sunt străbătute de un curent de o anumită intensitate.



Obs Sensul de mişcare al electronilor prin conductoare este invers faţă de sensul convenţional. Deplasarea electronilor într-un sens este echivalentă deplasării sarcinilor pozitive în sens invers.

Conducția electrică în semiconductori

Cristalele de germaniu și de siliciu sunt semiconductoare (au rezistivitatea cuprinsă între cea a metalelor și cea a izolatoarelor). Atomii de siliciu și de germaniu au câte patru electroni de valență. În rețeaua cristalină, fiecare atom formează patru legături covalente cu patru atomi vecini (fig. [5]).

Mărimea vectorială $\vec{E}$ numită intensitate a câmpului electric, definită prin relația $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, reprezintă forța electrică ce acționează asupra unității de sarcină pozitivă.

Sub acțiunea unui câmp electric de intensitate $\vec{E}$, unii electroni primesc energia necesară eliberării lor din legăturile covalente. Cu cât temperatura este mai mare, numărul de electroni eliberați este mai mare.

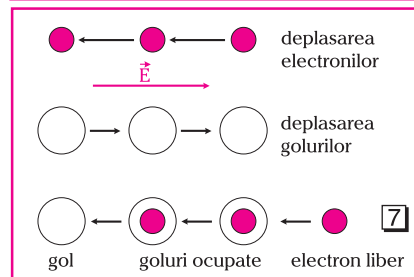
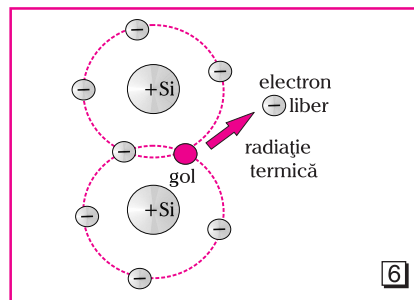
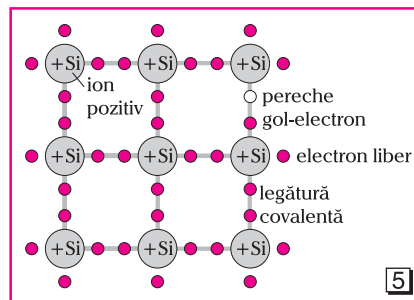
În fenomenul de generare de perechi electron-gol în atomii de siliciu excitați, numărul de electroni liberi este egal cu numărul de locuri libere (goluri) rămase în legăturile covalente (fig. [6]). Golurile sunt echivalente unor sarcini electrice pozitive.

În semiconductoarele pure supuse acțiunii unui câmp electric există deci o dublă conducție, realizată prin electroni liberi (în sens contrar sensului convențional) și prin goluri (în sensul convențional), numită **conducție intrinsecă** (fig. [7]). Conducția în semiconductoare crește sub acțiunea luminii sau la încălzire.

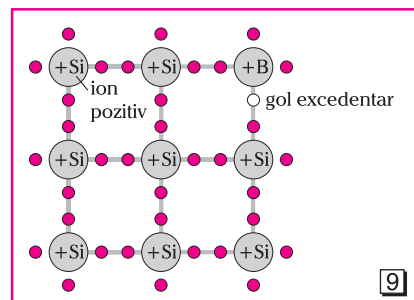
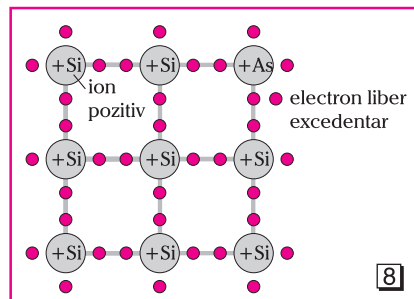
Proprietățile electrice se modifică atunci când cristalele sunt impurificate. Semiconductoarele impurificate sau dopate sunt de tip *n* (când impurificarea se face cu atomi pentavalenți, ca fosforul) sau de tip *p* (când impurificarea se face cu atomi trivalenți, ca borul sau arseniul). Cristalul rămâne însă neutru. Când impurificarea se face cu atomi pentavalenți, apare un număr suplimentar de electroni.

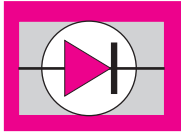
Conducția extrinsecă, numită de tip n, se face pe seama purtătorilor mobili majoritari (excedentari) – electronii – și a celor minoritari – golurile. Numărul electronilor din unitatea de volum (concentrația de electroni), n_n , este mult mai mare decât al golurilor, n_p , ($n_n > n_p$) la temperatura camerei (fig. [8]).

Când impurificarea se face cu atomi trivalenți, apare un număr suplimentar de goluri. În acest caz, **conducția extrinsecă, numită de tip p**, se face pe seama purtătorilor mobili majoritari (excedentari) – golurile – și a celor minoritari – electronii ($n_p > n_n$), (fig. [9]).



Liniile de câmp electric sunt orientate în sensul deplasării unei sarcini electrice, $q = +1 \text{ C}$, doar sub acțiunea forțelor câmpului electric.





4.2. DIODA SEMICONDUCTOARE. REDRESAREA CURENTULUI ALTERNATIV

Joncțiunea *pn*

Dioda semiconductoră se obține prin doparea (prin difuzie), la capete, a unei plachete monocristaline de siliciu sau germaniu cu atomi acceptori trivalenți (zona *p*) și, respectiv, cu atomi donori pentavalenți (zona *n*). În regiunea de tranziție dintre cele două zone, numită joncțiune *pn*, electronii liberi din zona *n* difuzează către zona *p* și se recombina cu golurile la joncțiunea celor două zone (fig. 10).

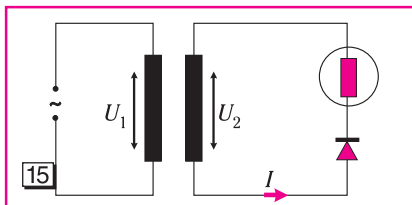
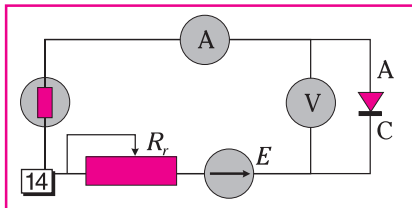
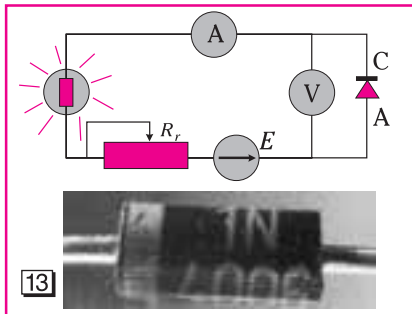
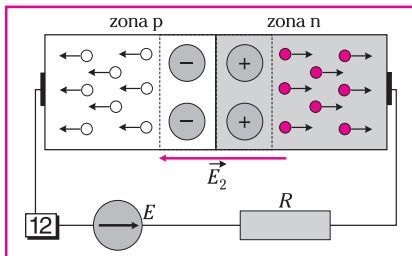
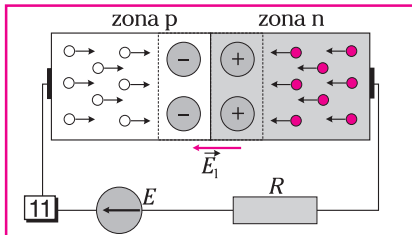
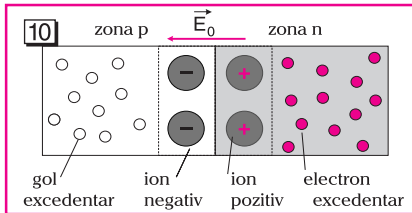
Apare un strat dublu de sarcină spațială: a ionilor pozitivi, în zona *n*, și, respectiv, a ionilor negativi, în zona *p*, aceștia rămânând legați în rețeaua cristalină. Această joncțiune, dintre cele două zone, cu grosimea $d \approx 1 \mu\text{m}$, este săracită în purtători mobili de sarcină, așa cum se întâmplă între armăturile unui condensator electric plan, unde apare un câmp electric, $\vec{E}_0$, care se opune difuziei. Sub acțiunea acestui câmp electric, orientat de la zona *n* către zona *p*, apar curenți electrici de antrenare a electronilor și golurilor, cu intensități foarte mici, egale și opuse celor de difuzie; la echilibru, curentul total prin joncțiune se anulează (transportul de electroni și goluri încetează).

Dacă pe electrozii de la capetele zonelor *p* și *n* se aplică din exterior o tensiune de polarizare directă, $U_{PN} > 0$ (plus la zona *p* și minus la zona *n*), atunci un număr de purtători mobili capătă energie suficientă pentru a învinge câmpul electric de frânare, cu intensitatea E_1 diminuată ($E_1 < E_0$), și joncțiunea devine astfel conductoare (fig. 11). Electronii liberi, majoritari, din zona *n* sunt injectați și accelerați către electrodul pozitiv, deci curentul I prin circuit crește pentru că joncțiunea se prezintă ca un condensator străpuns sau ca o rezistență mică.

Dacă pe electrozii diodei se aplică o polarizare inversă, adică o tensiune $U_{PN} < 0$, atunci electronii liberi din zona *n* sunt atrași către electrodul pozitiv, iar golurile din zona *p* sunt atrase către electrodul negativ. Joncțiunea se comportă ca un condensator ideal, deci nu conduce chiar dacă este încărcată electric la o tensiune mai mare, care generează un câmp electric mai intens ($E_2 > E_0$), deoarece zonele *p* și *n* sunt conductoare (fig. 12).

Atunci când tensiunea de alimentare a circuitului este alternativă, diodele redresează curentul alternativ (se obține curent electric într-un singur sens). Diodele redresoare conduc numai când sunt polarizate direct, adică atunci când anodul se leagă la polul pozitiv al unei surse de tensiune și catodul la polul negativ al sursei (fig. 13). În polarizare inversă (anodul este legat la polul negativ al sursei de tensiune, iar catodul la cel pozitiv), diodele semiconductoră nu conduc (fig. 14, 15).

În circuitele alimentate cu tensiune alternativă (fig. 15), în timpul alternanței negative, dioda nu conduce curentul



(este blocată din punctul de vedere al conducției) deoarece prezintă rezistență mare la polarizare inversă.

E Studiul calitativ al redresării curentului alternativ cu diode semiconductoare

În practică, aparatele ce conțin montaje electronice se alimentează de la rețeaua electrică de curent alternativ (c.a.) prin intermediul unui redresor care produce conducția într-un singur sens. Acesta este compus din:

- transformator coborât de tensiune;
- redresor cu diode semiconductoare;
- un sistem de filtrare (de reducere a pulsațiilor) cu ajutorul condensatoarelor electrice.

Curentul care circulă prin dipolul consumator are un singur sens, dar este pulsatoriu. În practică se folosesc mai mult diodele cu siliciu.

Dacă se reprezintă grafic valorile intensității curentului citite pe ampermetru, în funcție de valorile tensiunii citite pe voltmetru, se obține o caracteristică de curent $I = f(U)$ neliniară și nesimetrică.

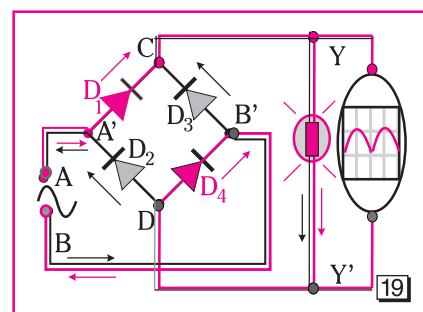
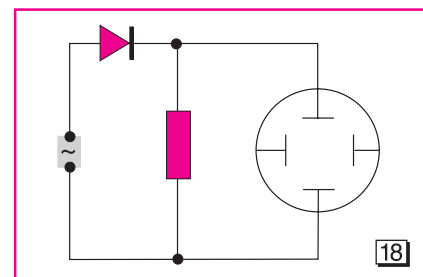
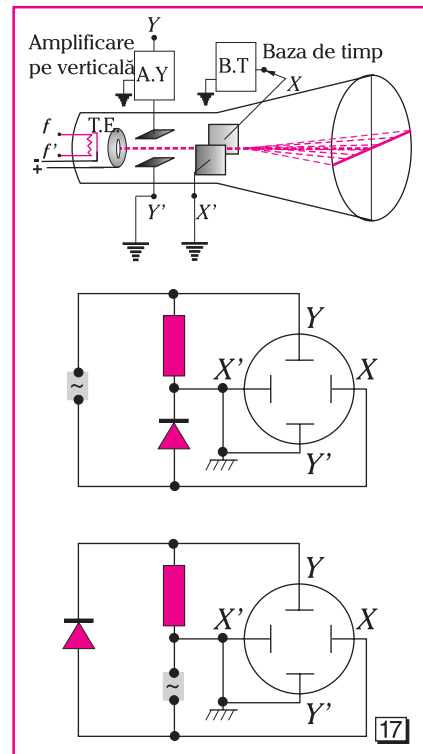
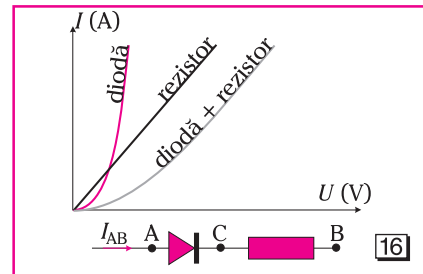
Dioda este un dipol care suportă un curent de intensitate maximă admisibilă $I_{\max}$, fără să se deterioreze. Se constată experimental că la polarizare directă dioda conduce ($I_{AC} > 0$) numai dacă $U_{AC} \geq 0,6$ V la diodele cu siliciu, sau dacă $U_{AC} \geq 0,3$ V la diodele cu germaniu. Dacă tensiunea anod-catod, U_{AC} , este mai mică decât această tensiune de deschidere (din punct de vedere al conducției), dioda practic nu conduce. Mai putem observa că dioda nu conduce ($I_{AC} = 0$) atunci când este polarizată invers ($U_{AC} < 0$), adică se comportă ca un întrerupător deschis în circuitul considerat.

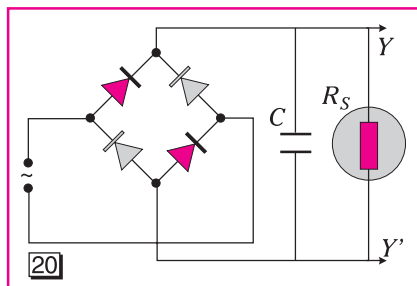
Din măsurări, rezultă că o diodă și un rezistor conectate în serie se comportă ca un dipol echivalent, parcurs de același curent (fig. 16). Pentru diverse valori constante ale intensității curentului ($I_{AB} = \text{const.}$), se verifică relația cunoscută: $U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$.

Putem să vizualizăm pe ecranul osciloscopului (fig. 17) caracteristica de curent $I = f(U)$.

Redresarea poate fi monoalternanță (a unei singure alternanțe), când curentul poate circula prin rezistența de sarcină numai în timpul semiperioadei în care dioda conduce (fig. 18).

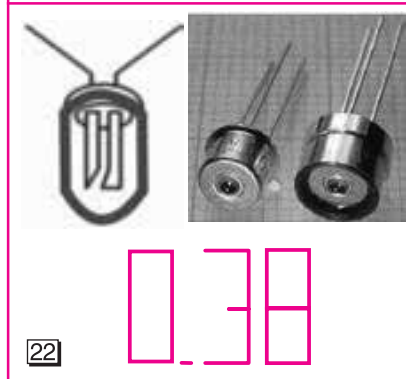
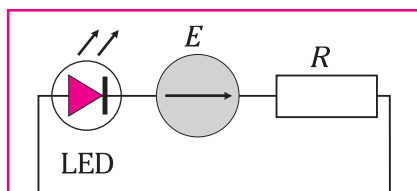
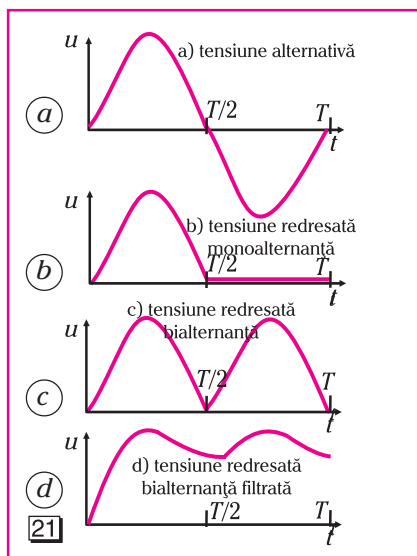
Redresarea ambelor alternanțe se obține, de obicei, cu ajutorul unei punți redresoare cu patru diode (fig. 19). Curentul redresat circulă prin rezistența de sarcină în timpul ambelor semiperioade ale tensiunii alternative. În fiecare semiperioadă, curentul circulă prin două diode, marcate cu aceeași culoare.





În semiperioada următoare, tensiunile din primarul și secundarul transformatorului își schimbă sensul și se schimbă și traseul urmat de curent prin celelalte două diode. Netezirea (reducerea) pulsațiilor se face cu un condensator C , montat în paralel cu R_S (fig. 20).

Pe ecranul unui osciloscop (fig. 21) pot fi analizate tensiunile: a) alternativă; b) redresată monoalternanță; c) redresată bialternanță; d) redresată bialternanță filtrată.



LED-urile emit lumină când sunt parcurse de curent electric. Sunt folosite la dispozitive de afisaj (ceas, radiu digital). Cele șapte LED-uri sunt aranjate sub forma cifrei 8 și poate indica cifre de la 1 la 9.

Diodele electroluminescente (LED), polarizate direct, sunt folosite pentru a semnaliza prezența curentului electric în circuitul din care fac parte. Ele se folosesc pentru afișarea caracterelor alfa-numerice, în diverse culori și moduri de conectare. Suportă curenți mici ($I = 20-30 \text{ mA}$), dar au nevoie de anumite tensiuni minime: $U_D \cong 1,5 \text{ V}$ pentru cele roșii, $U'_D = 1,8 \text{ V}$ pentru cele verzi și tensiuni cuprinse între cele menționate pentru alte culori. Se conectează în serie cu un rezistor ohmic (fig. 22) pentru limitarea curentului (numit „rezistență” în limbajul uzual al tehnicienilor), a cărui valoare se determină din legea lui Ohm: $R = \frac{E - U_D}{I}$, unde E este tensiunea sursei de alimentare a circuitului.

Electronii unei diode luminescente polarizate direct trec din zona n prin joncțiune și se recombina cu golurile din zona p , cu eliberare de energie sub formă de căldură și lumină. Un strat de material semiconductor emite radiații atunci când dioda este parcursă de curent (arseniură de galiu pentru radiații infraroșii sau fosfură de galiu pentru radiații roșii sau verzi).



Benzi de energie (extindere)

Știi că fiecare orbită a electronilor unui atom corespunde unui nivel energetic. Nivelele energetice ale unui atom sunt grupate în *benzi de energie*, numite *pături* (notate: K pentru $n=1$, L pentru $n=2$, M pentru $n=3$, N pentru $n=4$ ș.a.m.d.). Diferențele energetice din cadrul unei pături sunt mult mai mici decât cele dintre două pături vecine. Fiecare pătură poate conține un anumit număr maxim de electroni pe nivelele energetice permise ($N=2n^2$). Electronii de valență sunt mai slab legați de nucleu, au nivelele de energie cele mai mari, plasate în ultima pătură numită *de valență*. Toate păturile unui anumit atom sunt completate cu numărul maxim de electroni, cu excepția păturii de valență.

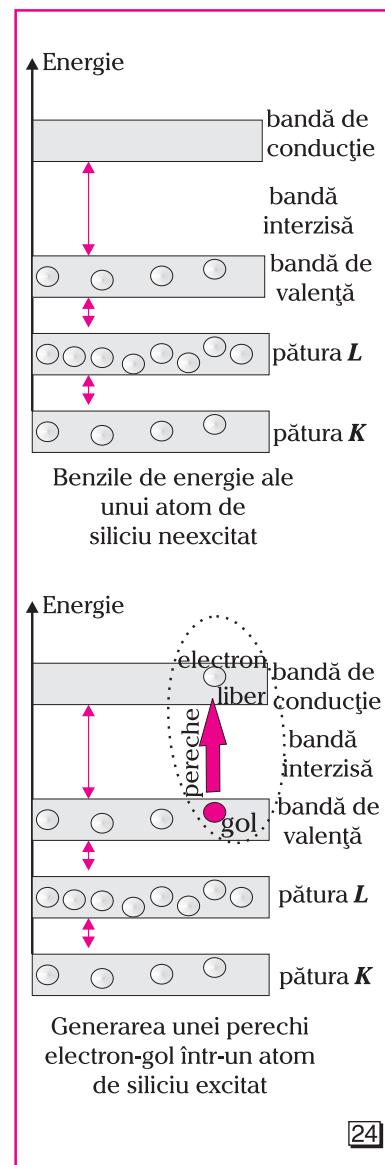
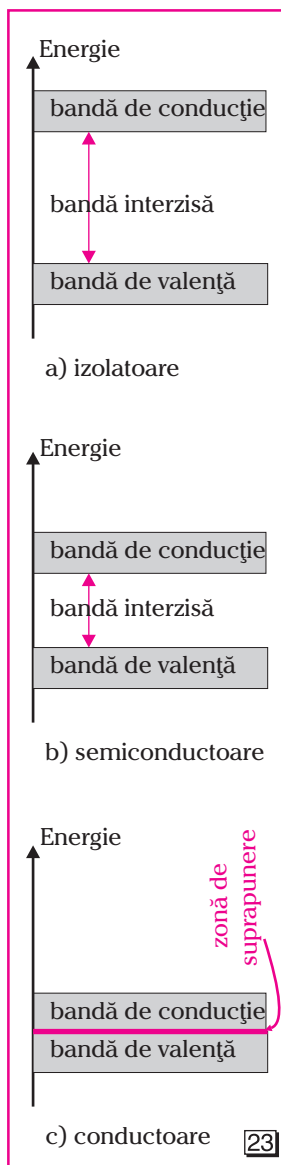
Când un electron primește energie din exterior, cel puțin egală cu diferența energetică dintre banda de conducție și banda de valență numită **bandă interzisă**, acesta poate părăsi pătura de valență, devenind electron liber în banda de

conducție (fig. [23]). Cele două benzi se suprapun în cazul conductoarelor. Semiconductoarele au banda interzisă mai îngustă decât izolatoarele. La izolare, electronii de valență pot face saltul în banda de conducție în condiții de străpungere, dacă li se aplică tensiuni mari.

Căldura primită din mediul ambiant de un cristal de siliciu pur, aflat la o temperatură T , permite unui număr de electroni de valență să acumuleze energia necesară pentru a face saltul din banda de valență în banda de conducție (fig. [24]). Când un număr de electroni fac saltul în banda de conducție, rămân tot atâtea locuri libere în banda de valență numit goluri, adică se generează perechi electron-gol. Recombinarea se poate produce atunci când un electron din banda de conducție pierde energie și revine într-un gol din banda de valență.

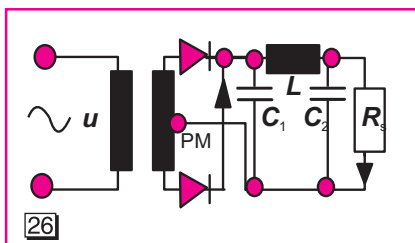
Dacă la capetele unei plachete de siliciu pur se aplică o tensiune electrică, atunci electronii liberi generați pe cale termică în banda de conducție capătă o deplasare ordonată către capătul pozitiv. Electronii de valență se pot deplasa către golurile apropiate, generând un gol în poziția din care au plecat, deci curentul de goluri se deplasează în sens invers curentului de electroni.

Vom vedea ulterior, că într-un tranzistor bipolar, din emitor sunt injectați purtători majoritari care ajung în regiunea bazei, unde devin minoritari. Majoritatea acestora traversează această regiune ajungând în colector și formează curentul de colector, aproximativ egal cu cel de emitor. O mică parte din ei se recombina în regiunea bazei cu purtătorii majoritari de acolo, determinând apariția unui curent mic prin terminalul bazei. Senzorul aparatelor de fotografiat digitale conține fototranzistori a căror conducibilitate depinde de iluminare (fig. [25]).





Circuite electronice simple cu tranzistoare* (extindere cu aplicații practice)



Pentru diminuarea componentei pulsației din tensiunea redresată sunt folosite filtre de netezire LC . Proprietatea condensatoarelor de a acumula sarcină electrică prin încărcare și a se descărca atunci când tensiunea la bornele sale scade sub o anumită valoare, este folosită pentru filtrarea componentei pulsației din tensiunea redresată

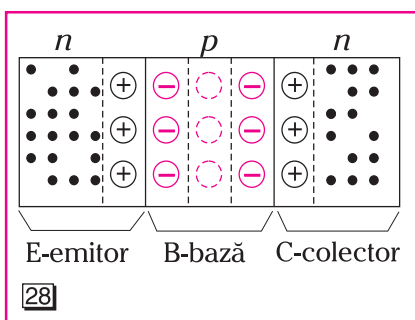


*Știi că...?



Atingem un senzor și schimbăm starea unui sistem electronic: în final, trece sau nu trece curent prin dispozitivul comandat. Este ca și cum am spune da sau nu, ceea ce, în cod binar, corespunde cifrelor 0 și 1.

Ca să înțelegem ultimele generații de circuite integrate și de microprocesoare, va trebui să începem cu montaje electronice cu o anumită funcționalitate: redresare, comutație, amplificare, generare de oscilații etc.



Pentru alimentarea circuitelor electronice sunt necesare redresoare ce transformă tensiunea alternativă în tensiune continuă (fig. [26]).

Circuitele electronice trimit la distanță comenzi pentru acționarea unor dispozitive. Un circuit electronic conține:

- ☑ un circuit de intrare, al cărui traductor transformă o informație primită din exterior, adică un semnal neelectric (optic la fotorezistor, termic la termistor etc.) în semnal electric;
- ☑ un circuit care amplifică semnalul electric primit din circuitul de intrare;
- ☑ un circuit de ieșire care comandă alte circuite, direct sau printr-un releu (ale cărui contacte închid sau deschid alte circuite), acele circuite incluzând, la rândul lor, sisteme optoelectronice (alarme, afișaj optic) sau motoare electrice;
- ☑ o sursă de alimentare electrică.

Inventarea tranzistorului bipolar (în 1948) a fost evenimentul care a pus bazele electronicii moderne, tranzistoarele înlocuind tuburile electronice. Astăzi, ele continuă să domine piața de componente, alături de circuitele integrate. Circuitele integrate se conectează într-o rețea electrică prin mai mulți „pini” și sunt constituite din sute sau chiar mii de tranzistoare și rezistoare montate pe același suport, de dimensiuni foarte mici, numit „cip” (fig. [27]).

Tranzistorul se obține prin doparea diferită a unei plăcuțe monocristaline de siliciu sau de germaniu, astfel încât să apară trei zone ce formează două joncțiuni $p-n$, între emitor și bază ($E-B$) și între bază și colector ($B-C$) (fig. [28]). Considerăm un tranzistor $n-p-n$ în montaj cu emitorul comun. Dacă tensiunea dintre bază și emitor (U_{BE}) este pozitivă, din emitor sunt injectați spre bază electroni, ca la o diodă, aceștia formând curentul de emitor, I_E , deci joncțiunea emitor-bază conduce (fiind polarizată direct, ea prezintă rezistență mică). Electronii liberi – majoritari în zona emitorului – străbat ușor joncțiunea $E-B$, ajung în baza subțire și slab dopată, unde un număr mic de electroni se recombina cu golurile majoritare aici, iar cei mai mulți electroni pătrund în colectorul conectat la polul pozitiv al generatorului electric din circuit. Joncțiunea $B-C$ este polarizată invers, deci $U_{CB} > 0$. Curentul de colector, $I_C \approx 0,9I_E$. Puținii purtători majoritari din bază care se recombina cu majoritarii injectați din emitor sunt completați prin curentul de bază, I_B , de intensitate foarte mică.

Orice montaj se poate transfigura într-un montaj echivalent, dacă dorim să utilizăm doar un anumit tip de tranzistor ($n-p-n$

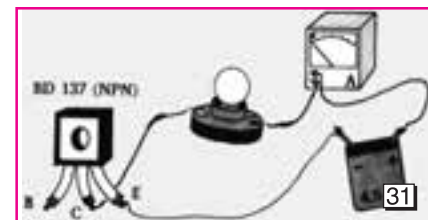
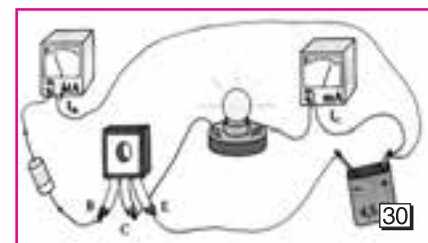
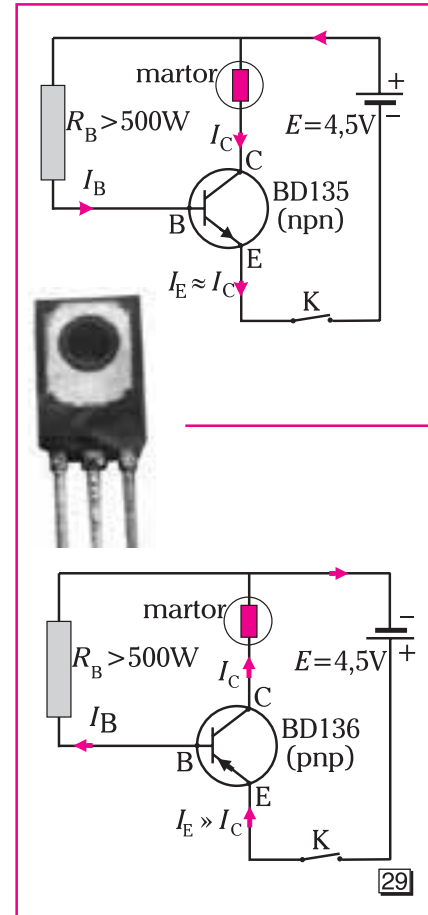
sau $p-n-p$) (fig. 29). La echivalarea circuitelor trebuie să ținem cont de polarizarea tranzistoarelor la conectarea sursei de alimentare, deoarece sensurile curenților prin terminalele E , B , C se inversează. În simbolul tranzistorului, săgeata indică sensul conducției în prima joncțiune ($E-B$), în montaj cu emitorul comun (circuitelor de intrare și de ieșire).

Este preferabil să folosim la primele montaje experimentale tranzistoare robuste, care nu se deteriorează ușor la o conectare greșită, cum sunt tranzistoarele cu siliciu BD, care au indicativ impar, dacă sunt de tip $n-p-n$ (BD 135, 137, 139, 435), sau indicativ par, dacă sunt de tip $p-n-p$ (BD 136, 138, 140, 436) și suportă valorile maxime: $P_{\max} = 6,5 \text{ W}$, $T = 150^\circ \text{ C}$, $|U_{BE}| = 0,6 \text{ V}$ la $I_B \approx 120 \text{ mA}$, ajungând la saturație la tensiunea $|U_{CE,\text{sat}}| \approx 0,7 \text{ V}$ pentru $I_C = 250 - 300 \text{ mA}$ la un câștig (amplificare) în curent $\beta_{\max} = \frac{I_C}{I_B} \approx 250$.

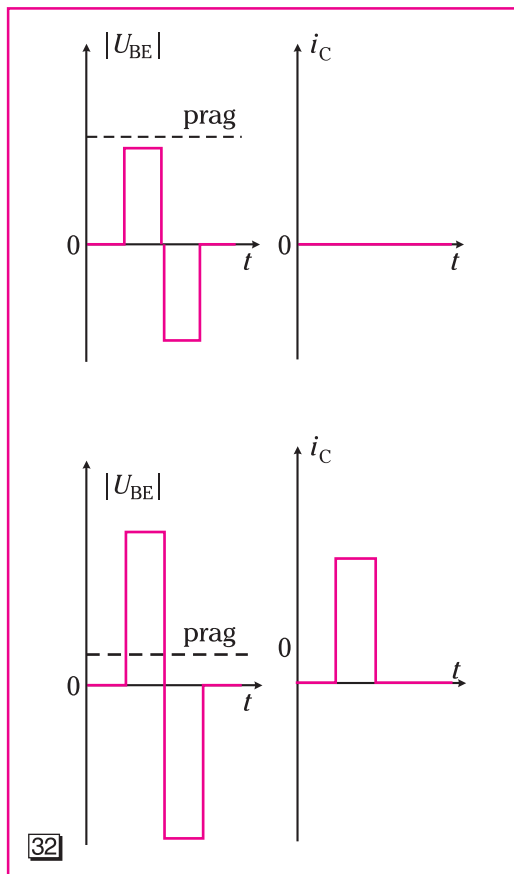
E Realizăm montajul din figura (fig. 30). Constatăm că beculuț (cu care suportă tensiunea $U_n = 3,5 \text{ V}$ sau $U_n = 6,3 \text{ V}$) luminează dacă rezistența de protecție, conectată în serie cu un microampermetru la borna pozitivă a bateriei, are valoarea $R \approx 1 \text{ k}\Omega$. Microampermetrul indică un curent foarte mic în raport cu intensitatea citită la miliampermetrul conectat între colector și borna pozitivă a bateriei. Dacă întrerupem latura cu microampermetrul, observăm că becul nu mai luminează și miliampermetrul nu mai indică trecerea unui curent electric (fig. 31). Când nu conectăm baza B printr-un rezistor de ordinul kilohmilor la borna pozitivă a bateriei, becul nu luminează și miliampermetrul indică, pentru I_C , o valoare practic neglijabilă. Curentul care intră în baza tranzistorului, de intensitate I_B – mică –, permite curentului I_C – cu intensitate mult mai mare – să circule prin joncțiunea colector-emitor, deci tranzistorul se comportă ca un întrerupător K , comandat prin curenți mici ($I_B < 2 \text{ mA}$) la tensiunea $|U_{BE}| = 0,6 \text{ V}$ aplicată între bază și emitor, fiind parcurs de curenți mari ($I_C > 100 \text{ mA}$). Caracteristica $I_B = f(U_{BE})$ este ca aceea a unei diode.

Dacă vei conecta un rezistor a cărui rezistență electrică are valori mici sau un fir metalic ($R = 0$) între baza B și emitorul E , becul se stinge deoarece baza și emitorul au fost aduse la același potențial.

Dacă atingem baza și borna pozitivă a bateriei cu degetele umede de la aceeași mână, becul luminează. Cu cât contactul este mai bun, cu atât becul luminează mai intens. Atenție, dacă faci contact direct, fără o rezistență de protecție, distrugi tranzistorul! Dacă legi baza la borna negativă printr-o rezistență de protecție, becul nu luminează.



Curentul principal circulă între emitor și colector și sensul săgeții situate în emitor indică sensul fizic al acestui curent (pentru tranzistorul $n-p-n$ este spre exterior, iar pentru tranzistorul $p-n-p$ este spre interior).



Dar dacă înlocuiești tranzistorul acesta cu un tranzistor complementar, BD 138 ($p-n-p$), conexiunile la bornele bateriei trebuie inversate.

Dacă tensiunea $|U_{BE}|$ este mai mică decât valoarea de prag (0,6 V pentru tranzistoarele cu plachetă din siliciu sau 0,2 V pentru cele din germaniu), (fig. 32) tranzistorul rămâne blocat ($I_C = 0$).

C Tranzistorul prezintă două stări de funcționare distincte (blocat sau saturat), cărora le putem atașa cifrele 0 și 1.

Funcțiile tranzistorului:

✓ întrerupător electronic (conduce, în regim de saturație, sau nu conduce, în regim de blocare). Trecerea dintr-o stare în alta ($I_C = 0$ sau $I_C \neq 0$) este comandată de tensiunea aplicată între bază și emitor care produce variații mici ale curentului de bază.

✓ amplificator de curent (variații mici ale curentului de bază, ΔI_B , produc variații mari ale curentului de colector, ΔI_C).

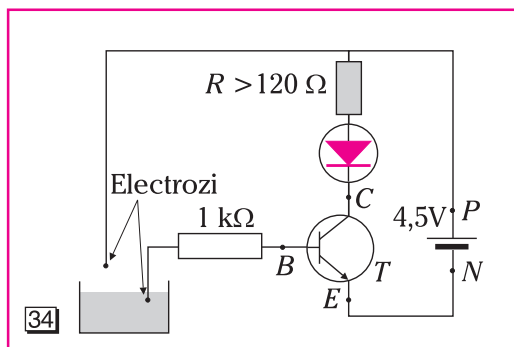
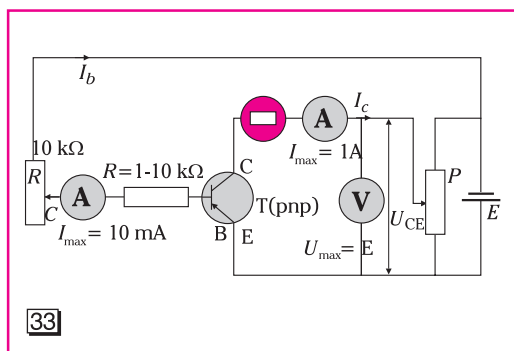
Dacă un tranzistor conduce (se „deschide” din punctul de vedere al conductibilității), atunci rezistența dintre colector și emitor (R_{CE}) scade foarte mult, tensiunea între bază și emitor ($U_{BE} \cong +0,6$ V la tranzistoarele cu siliciu, de tip $n-p-n$ și $U_{BE} \cong -0,6$ V la tranzistoarele $p-n-p$) rămâne practic constantă, iar U_{CE} devine neglijabilă (zecimi de volt) când curentul I_C atinge valorile maxim admise (notate în cataloagele de dispozitive semiconductoare) fără efect distructiv.

Teme experimentale

1. Realizăm montajul cu emitorul comun pentru circuitele de intrare și ieșire ale tranzistorului T, după schema electrică din fig. 33. În circuitul colectorului se conectează ampermetrul A, voltmetrul V și potențiometrul P (cu $R = 30 - 100 \Omega$).

În circuitul bază-emitor, selectăm o valoare a intensității curentului $I_B < 10$ mA prin modificarea poziției cursorului C. Modifică tensiunea U_{CE} , între colector și emitor, din volt în volt, cu ajutorul potențiometrului P și notează valorile tensiunii U_{CE} și intensității I_C , citite la voltmetrul, respectiv la ampermetrul din circuitul de colector. Reprezintă grafic caracteristica $I_C = f(U_{CE})$, când $I_B = \text{const.}$

2. Montajul din fig. 34 se poate folosi pentru a testa continuitatea filamentelor becurilor, a firelor electrice,



a rezistoarelor. Circuitul este bine realizat dacă, la scurtcircuitarea sondelor, LED-ul luminează. LED-ul luminează și dacă atingem cele două sonde cu degetele umede de la aceeași mână. Montajele de acest gen se aplică la detectoarele de nivel al unui lichid conductor, la verificarea continuității unui conductor sau senzor de inundații (LED-ul se înlocuiește cu un sistem de alarmă, cuplată direct sau printr-un releu).



Într-un etaj de amplificare cu un tranzistor în montaj cu emitorul comun este folosit un tranzistor $n-p-n$ (fig. 35). Pentru polarizarea bazei tranzistorului se folosește un divizor de tensiune compus din rezistoarele R_1 și R_2 . În lipsa semnalului electric de la bornele de intrare 1 – 1', punctul static de funcționare este situat pe porțiunea liniară a caracteristicii de curent $I_C = f(U_{CE})$. Se aplică un semnal electric de tensiune $u_i = U \sin \omega t$, unde $U \ll E$, la bornele de intrare 1–1' ale etajului de amplificare (peste valoarea U_{BE} , de regim static, se suprapune componenta de tensiune variabilă în timp). Să se exprime dependența tensiunii de la bornele de ieșire 2–2' în funcție de valorile instantanee ale curentului de colector, i_C , când K este închis. Condensatoarele electrice lasă semnalul variabil să treacă.

(Olimpiada națională de fizică, 1998)

Rezolvare

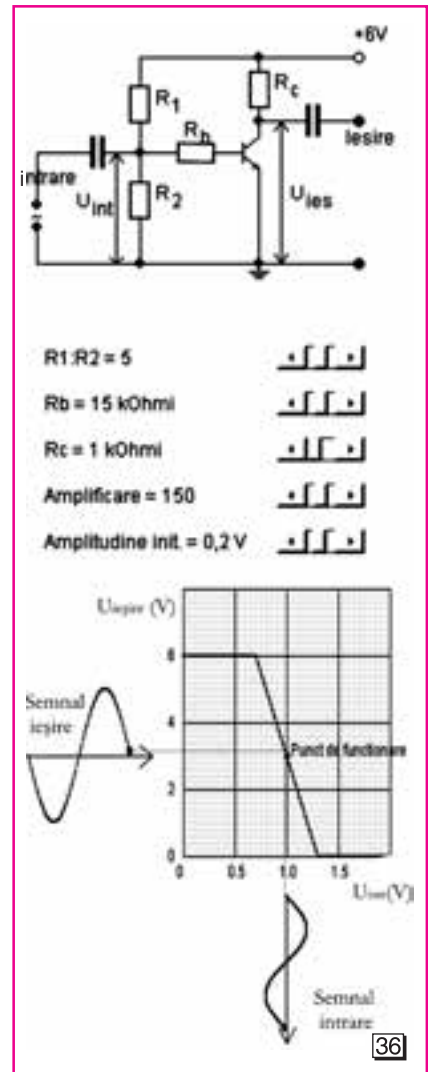
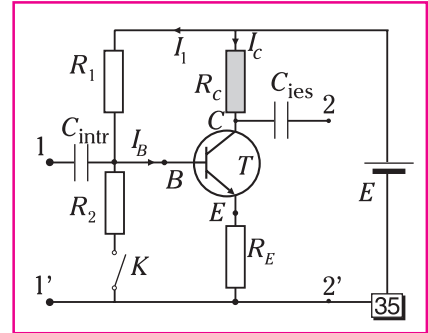
Considerăm două momente de timp, t_1 și t_2 , foarte apropiate, când la intrarea amplificatorului, la bornele 1–1', se aplică un semnal (peste valorile de regim static) pentru care sunt satisfăcute ecuațiile de regim dinamic:

$$\begin{cases} E = R_C(I_C + i_{C,1}) + u_{CE,1} + R_E(I_E + i_{E,1}) \\ E = R_C(I_C + i_{C,2}) + u_{CE,2} + R_E(I_E + i_{E,2}) \end{cases}$$

Ultimul termen din cele două ecuații ale sistemului se reduce dacă scădem cele două ecuații membru cu membru. Obținem:

$$R_C \Delta i_C \approx -\Delta u_{CE} \Rightarrow u_{22'ies} = -R_C \Delta i_C.$$

Semnalul electric de ieșire (tensiunea variabilă culeasă după condensatorul $C_{ieșire}$, la bornele 2-2') este defazat cu π radiani față de semnalul de intrare (este în opoziție de fază) și amplificat în tensiune (fig. 36).



La un montaj potențiometric (divizor de tensiune al t.e.m. E):

$$I_{div} = \frac{E}{R_1 + R_2},$$

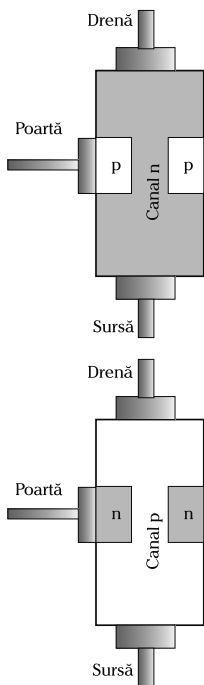
$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E.$$



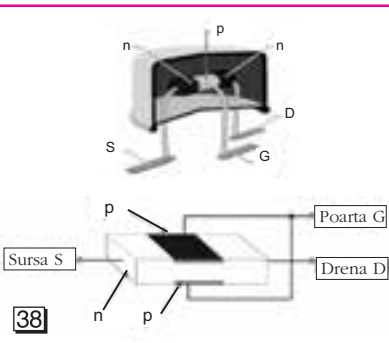
4.3. *TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP. APLICAȚII



William Shockley, John Bardeen și Walter Brattain – premiul Nobel (1956) pentru cercetările lor asupra semiconductorilor și pentru tehnologia tranzistoarelor bipolare.



[37]



[38]

Funcționarea tranzistorului cu efect de câmp

Tranzistorul cu efect de câmp – TEC, (în engleză FET – Field Effect Transistor), **este un dispozitiv electronic unipolar, la care conducția este asigurată de un singur tip de purtători de sarcină**, electroni sau goluri. Acesta are 3 terminale din sârmă (fig. [37]):

- sursa S – terminal de la care pleacă purtătorii de sarcini electrice;
- drena D – terminal către care se îndreaptă purtătorii de sarcini electrice;
- poarta G (în engleză, gate= poartă) – terminal care comandă comportarea tranzistorului.

Conducția purtătorilor de sarcină între sursă – drenă are loc prin **canalul** semiconductorului, dintre drena-**D** și sursa-**S**. Tranzistoarele cu efect de câmp controlează intensitatea curentului, care circulă prin canal, prin câmpul electric determinat de tensiunea de comandă aplicată între terminalul porții-**G** și cel de sursă-**S**. Există două tipuri constructive de tranzistoare cu efect de câmp:

- cu poartă joncțiune **TEC J** (în engleză **JFET**) realizate cu canal conductor inițial;
- cu poartă izolată, tip **Metal-Oxid-Semiconductor, TEC-MOS** (în engleză **MOSFET**) realizate cu canal inițial sau cu canal indus.

Tranzistoare cu efect de câmp cu poartă joncțiune (TEC-J) sunt clasificate după tipul de dopare: cu canal tip *n* și cu canal tip *p*. Cele două tipuri sunt complementare atât ca structură internă cât și ca funcționare.

La tranzistoarele **TEC-J** cu canal tip *n*, acesta se creează prin difuzia a două regiuni de tip *p* conectate la terminalul poartă (fig. [38]). În schemele electrice, terminalul apare conectat numai la una din cele două regiuni pentru simplitatea reprezentării. Intensitatea I_D a curentului între drenă și sursă este de ordinul zecilor de nanoamperi atunci când tensiunea dintre poartă și sursă are valoarea $U_{GS}=0$.

Tranzistoarele **TEC-J** cu canal tip *n* sunt frecvent utilizate în aplicații. Polarizarea inversă a joncțiunii *pn* dintre poartă-sursă ($U_{GS}<0$) mărește rezistența electrică prin îngustarea canalului, în urma difuziei electronilor și golurilor.

Intensitatea I_D a curentului între drenă și sursă scade prin aplicarea unei tensiuni U_{GS} care polarizează invers joncțiunea dintre poartă și canalul conductor (fig. 39). Tensiunea poartă-sursă, pentru care curentul de drenă devine nul, se numește tensiune de blocare $U_{blocare}$.

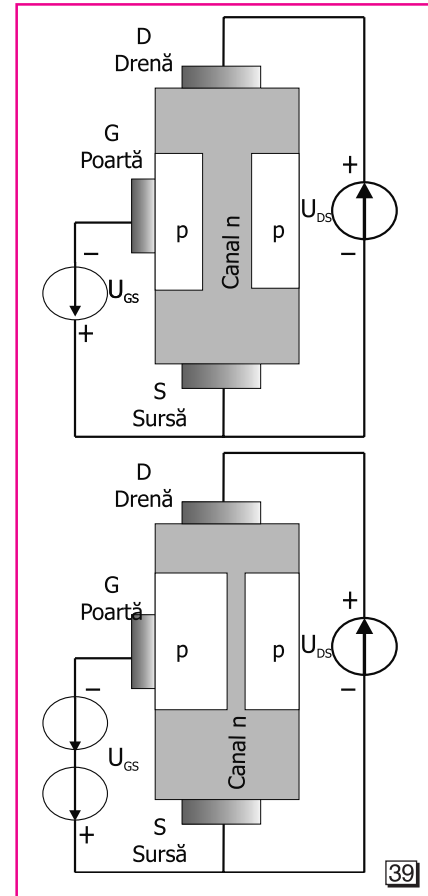
Simbolurile folosite în schemele electronice pentru **TEC-J** sunt prezentate în figura 40. Săgeata din poartă arată sensul direct al joncțiunii.

Cea mai utilizată conexiune este aceea **cu sursa comună** porturilor de intrare și ieșire, unde portul de intrare este între poartă și sursă, iar portul de ieșire este între drenă și sursă.

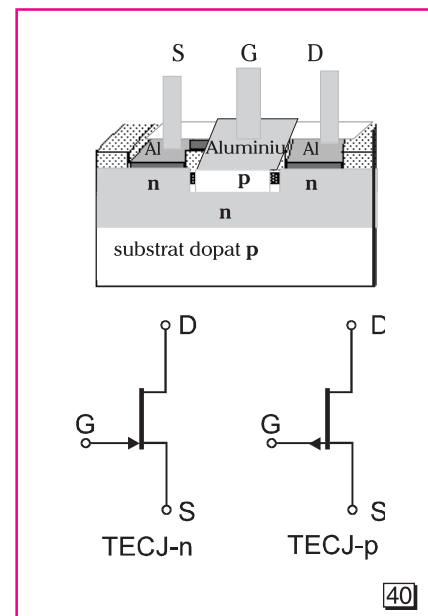
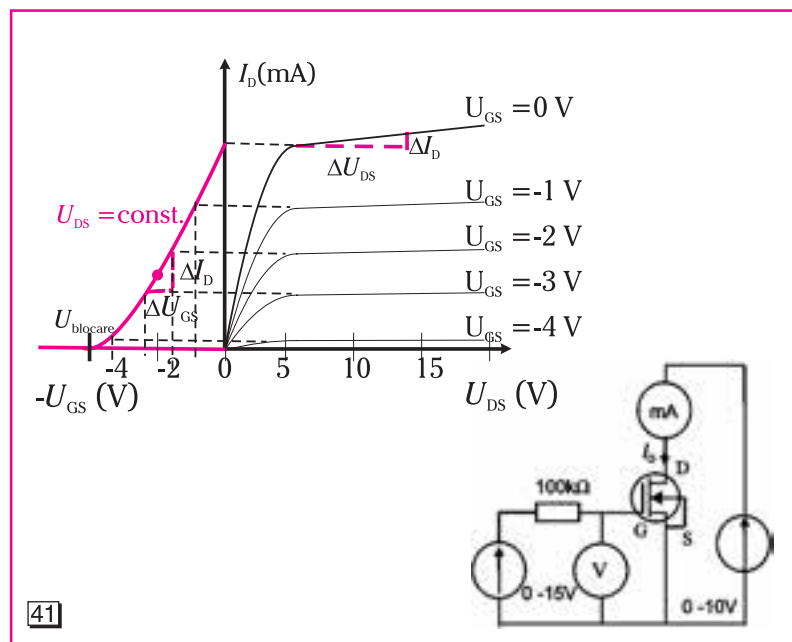
Parametrii necesari în proiectarea circuitelor electronice (amplificatoare, oscilatoare etc.) sunt: *panta de semnal mic* (transconductanța g_m), în vecinătatea punctului prezentat în stânga figurii 41, și *rezistența de ieșire* (sau rezistența de drenă r_d) definite de relațiile:

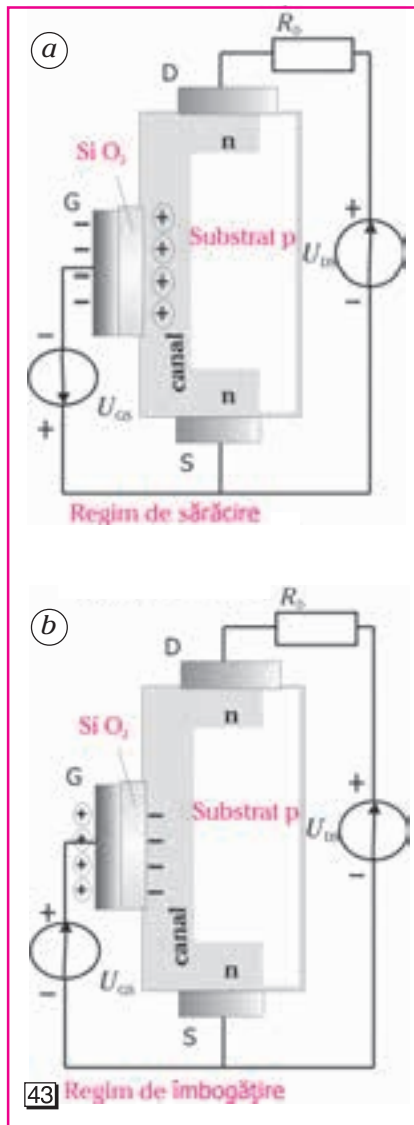
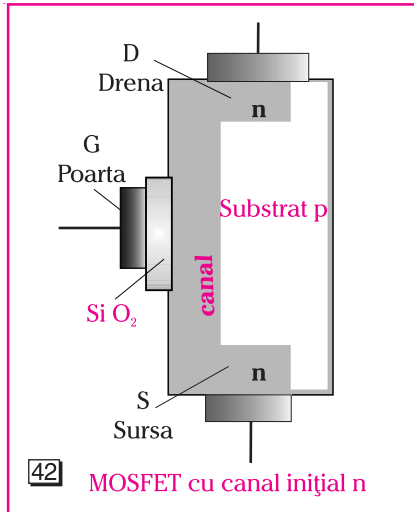
$$g_m = \left(\frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right)_{U_{DS}=const.} \quad \text{și} \quad r_d = \left(\frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \right)_{U_{GS}=const.}$$

O familie de caracteristici $I_D = I_D(U_{DS})$ este prezentată în figura 41. Analizând o curbă corespunzătoare unei valori date a tensiunii U_{GS} , se observă că la valori mici ale tensiunii U_{DS} tranzistorul se comportă ca o rezistență ohmică, dependența $I_D = I_D(U_{DS})$ fiind liniară. La tensiuni U_{DS} mai mari, curentul de drenă rămâne aproape constant pe un interval mare al valorilor tensiunii U_{DS} .



Creșterea valorii tensiunii U_{GS} îngustează canalul, deci crește rezistența acestuia și scade I_D .





Tranzistoare cu efect de câmp cu poartă izolată

Tranzistoarele cu efect de câmp de tip **TEC-MOS** se deosebesc de cele de tip **TEC-J** :

- nu au o joncțiune *pn*, dar au poarta izolată față de canalul conductor printr-un strat de dioxid de siliciu (SiO_2), astfel încât intensitatea curentului de poartă este practic nulă, iar a curenților de drenă și sursă este practic aceeași;

- mai au un terminal, **substratul**, legat la materialul semiconductor pe care a fost realizat tranzistorul.

Poarta G este o sârmă din aluminiu. Conducția se realizează la suprafața substratului de siliciu, între două zone de tip opus substratului, *sursa* (S) și *drena* (D).

Drena și sursa de tip *n* de obțin prin difuzie în materialul substratului.

Când se aplică diferite tensiuni U_{GS} între poartă și sursă, se generează un câmp electric între poartă și canal, ca într-un condensator plan.

Tranzistoarele cu efect de câmp de tip **TEC-MOS** sunt:

- **cu canal inițial** (în regim de sărăcire/îmbogățire). Tranzistoarele cu efect de câmp **TEC-MOS** tip *n* au structura din figura 42. **TEC-MOS** de tip *p* sunt similare.

Drena și sursa sunt se obțin prin difuzie în materialul substratului și apoi sunt unite printr-un canal îngust, adiacent porții izolate.

Când tensiunea dintre poartă și sursă este negativă ($U_{GS} < 0$), apare regimul de sărăcire a canalului cu electroni de conducție (fig. 43, a).

Condensatorul format are armăturile: poarta negativă și canalul cu ioni pozitivi (golit de electroni). Intensitatea curentului electric între sursă și drenă se anulează la o anumită valoare $U_{blocare}$ a tensiunii U_{GS} , numită *tensiune de blocare sau de prag* ($I_D = 0$ pentru $U_{GS} < U_{blocare}$).

Când tensiunea dintre poartă și sursă este pozitivă ($U_{GS} > 0$), apare regimul de îmbogățire a canalului cu electroni de conducție (fig. 43, b). Conductivitatea canalului crește deoarece în canal sunt atrași mai mulți electroni de conducție. Valoarea intensității curentului electric I_D prin tranzistor este controlată de tensiunea U_{GS} dintre poartă și sursă:

$$I_D = K(U_{GS} - U_{blocare})^2 \text{ pentru } U_{GS} \geq U_{blocare}.$$

Constanta *K* depinde de tipul tranzistorului.

– **cu canal indus** (în regim de îmbogățire) tip n (NMOS) sau tip p (PMOS). La acest tip de **TEC-MOS**, substratul se întinde până la stratul de dioxid de siliciu, adică nu există un canal inițial (fig. 44, a).

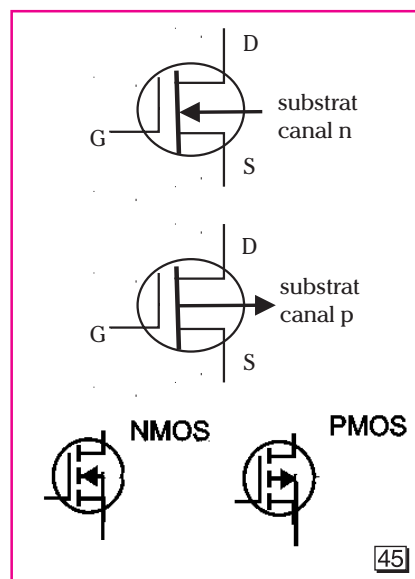
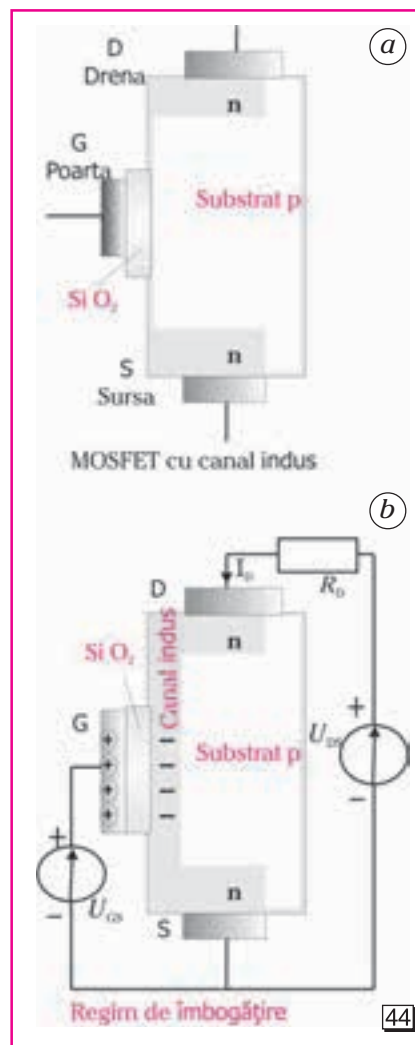
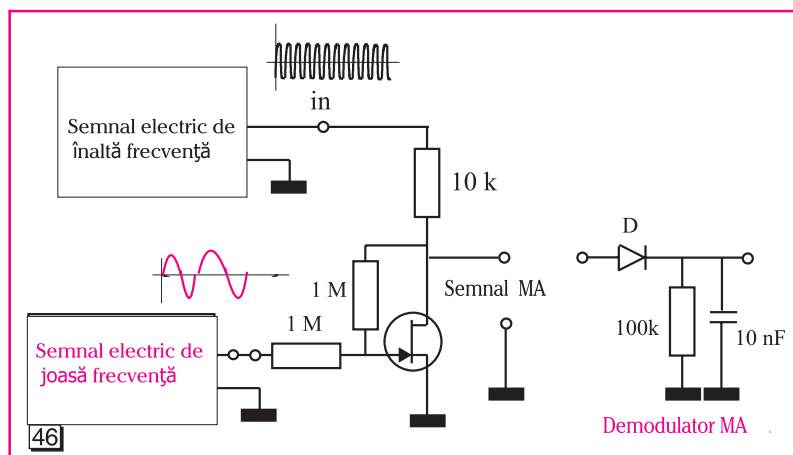


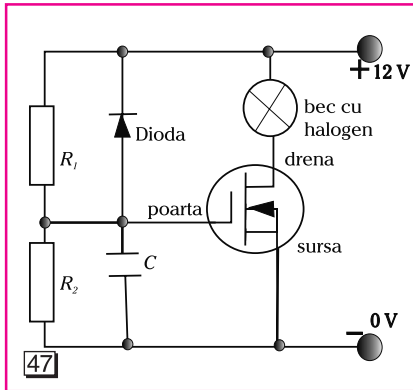
Când tensiunea electrică între poartă-sursă este pozitivă ($U_{GS} > 0$), în stratul de dioxid de siliciu de sub electrodul poartă ia naștere un câmp electric orientat dinspre terminalul metalic G spre substrat, câmp care mărește concentrația electronilor de conducție în regiunea de substrat de lângă stratul de dioxid de siliciu. Dacă această tensiune U_{GS} este mai mare decât o anumită valoare $U_{blocaje}$, numită *tensiune de blocare*, induce un canal prin generarea unui strat subțire de electroni în regiunea de substrat din vecinătatea stratului de dioxid de siliciu (fig. 44, b). Concentrația electronilor la interfață devine mai mare decât concentrația golurilor, adică s-a inversat tipul de conductibilitate în *canalul indus* sub acțiunea câmpului electric. Având același tip de conductibilitate între drenă și sursă, se obține un curent I_D cu sensul corespunzător polarității U_{DS} .

Simbolurile pentru tranzistoarele **TEC-MOS** cu canal inițial și cu canal indus sunt reprezentate în figura 45. Substratul indicat de săgeată este de obicei conectat intern la sursă. Uneori există un terminal separat pentru substrat.

Aplicații ale tranzistorului cu efect de câmp

1. Modulația în amplitudine (MA) stă la baza transmiterii radiofonice în benzile de unde lungi, medii și scurte. Un semnal sinusoidal, cu frecvența de câțiva MHz, numit **purtătoare** este modulat în amplitudine de către semnalul sonor cu frecvențe $\nu < 20$ kHz (fig. 46). La recepție, trebuie efectuată operația inversă, **demodulația în amplitudine**.





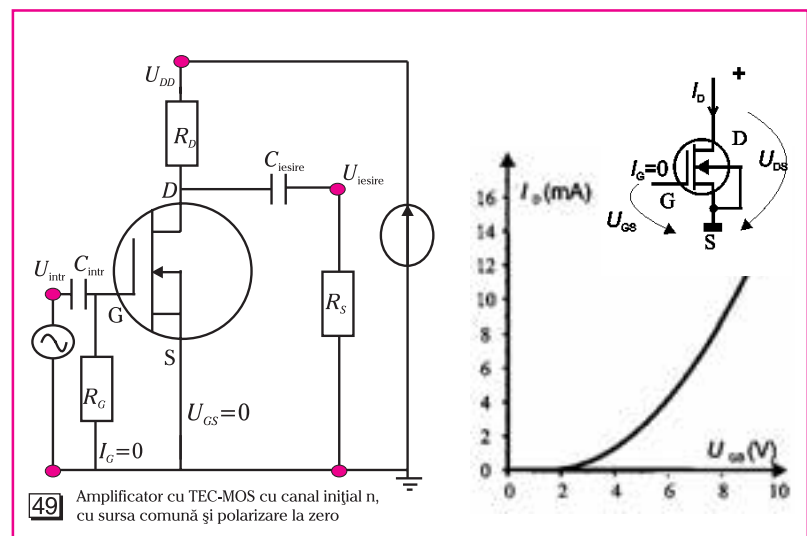
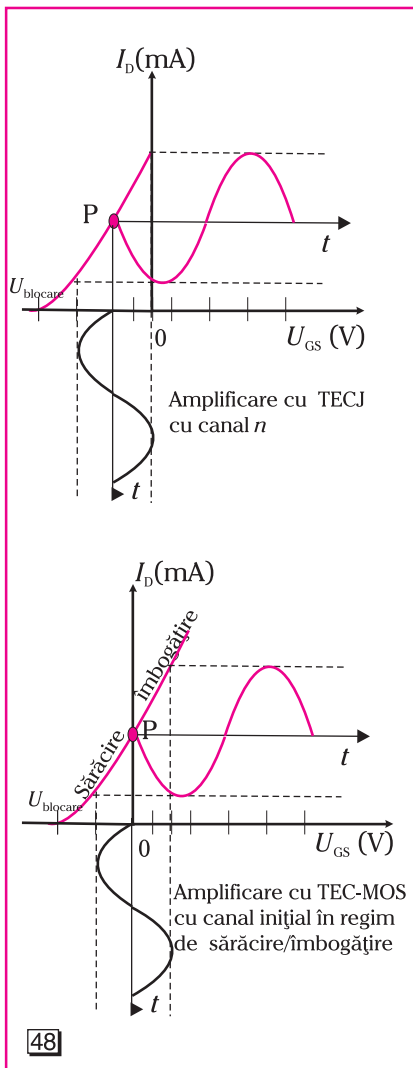
2. Comanda tensiunii pe poarta unui tranzistor TEC, în momentul conectării becurilor cu halogen pentru automobile (fig. 47), mărește durata de utilizare a acestora, deoarece intensitatea curentului nu mai depășește intensitatea curentului nominal. Tensiunea crește lent, în intervalul de timp $t = R_1 C$ determinat de rezistența R_1 și capacitatea condensatorului C , ca și curentul drenă-sursă prin tranzistorul cu efect de câmp conectat în serie cu becul. Condensatorul se descarcă prin diodă, bec și TEC la întreruperea alimentării.

3. Amplificarea unui semnal electric de intrare — o tensiune variabilă aplicată între poartă și sursă — produce variația tensiunii U_{GS} , de o parte și de cealaltă a valorii tensiunii punctului static de funcționare ales (P), obținându-se variația intensității I_D a curentului de drenă din figura 48, deci tensiune variabilă mare pe rezistența de sarcină, ca semnal de ieșire.

Proiecțiile extremităților tensiunii din portul de intrare, între poartă și sursă, pe axa I_D delimitează extremitățile intensității curentului din drenă.

Cea mai utilizată conexiune este aceea **cu sursa comună** porturilor de intrare și ieșire (fig. 49). În această conexiune, portul de intrare este între poartă și sursă, iar portul de ieșire este între drenă și sursă.

În circuitele cu tranzistoare TEC, se notează tensiunea cea mai ridicată a alimentării cu U_{DD} , iar tensiunea cea mai coborâtă a alimentării cu U_{SS} . Diferența $U_{GS} - U_{blocaje}$ joacă un rol important în comanda porții tranzistorului **MOSFET**. Tranzistorul este considerat „complet” deschis (în starea ON) la o anumită valoare a tensiunii U_{GS} , uzual de 10 V, unde se definește intensitatea $I_{D(on)}$ a curentului.



4. Comutatorul electronic cu tranzistor MOS este un dispozitiv de comandă prin intermediul căruia se aplică sau nu se aplică un semnal de tensiune pe o sarcină. Rezistența comutatorului trebuie să fie cât mai mică în starea ON și cât mai mare în starea OFF.

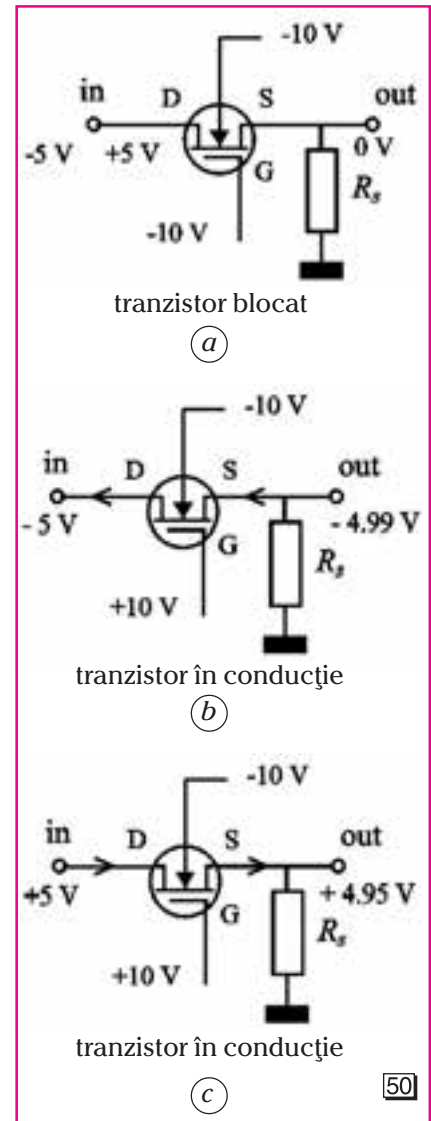
Să presupunem că tensiunea sursei de semnal evoluează între -5 V și $+5\text{ V}$, rezistența de sarcină are valoarea $R_s = 50\text{ k}\Omega$ și intensitatea curentului prin sarcină evoluează între $-0,1\text{ mA}$ și $+0,1\text{ mA}$.

Conectăm substratul la un potențial mai coborât decât oricare potențial din circuit, de exemplu -10 V și modificăm potențialul porții între -10 V și $+10\text{ V}$. Cu poarta conectată la -10 V , potențialul acesteia este în orice moment mai coborât decât potențialele drenă și sursei, care pot fi aduse de către sursa de semnal numai până la -5 V (fig. 50, a). În aceste condiții, tranzistorul este tot timpul blocat, rezistența între drenă și sursă având valori mari, de ordinul $\text{G}\Omega$. Rezultă că tensiunea pe sarcină este practic nulă.

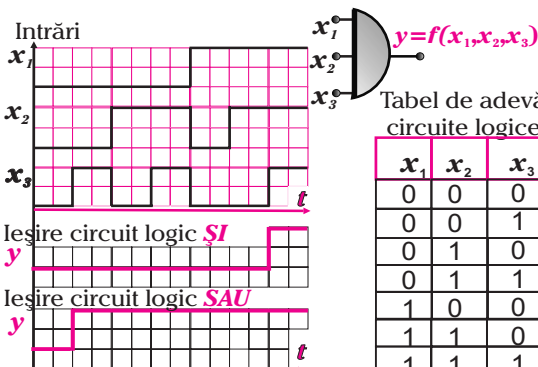
Conectăm poarta la potențialul de $+10\text{ V}$. În momentul în care tensiunea semnalului ajunge la -5 V (fig. 50, b), atunci tensiunea poartă-sursă are valoarea $+15\text{ V}$, iar când tensiunea semnalului este $+5\text{ V}$, atunci tensiunea poartă-sursă scade la $+5\text{ V}$ (fig. 50, c).

La tensiuni mici între drenă-sursă, tranzistoarele TEC-MOS se comportă ca rezistoarele, putând fi utilizate ca și comutatoare analogice. Prin cuplarea a două tranzistoare complementare (**NMOS** și **PMOS**) se realizează un comutator analogic performant (**CMOS**), disponibil ca circuit integrat, care va fi analizat în cadrul temei următoare.

În tehnologia **CMOS** se realizează **circuite logice (digitale)**.



Circuitele logice au mai multe intrări și o singură ieșire. Funcția de transfer este o funcție booleană de mai multe variabile. În tabelul de adevăr sunt valorile tensiunii de ieșire care depind numai de combinația existentă la un moment dat între semnalele de intrare x_i . Fiecărei variabile binare (0 sau 1) îi corespunde un nivel de semnal (tensiune sau intensitate de curent). În logica pozitivă, cifra 1 binar se exprimă prin nivelul de semnal mai mare în valoare algebrică, iar cifra 0 binar se exprimă prin nivelul mai mic în valoare algebrică.



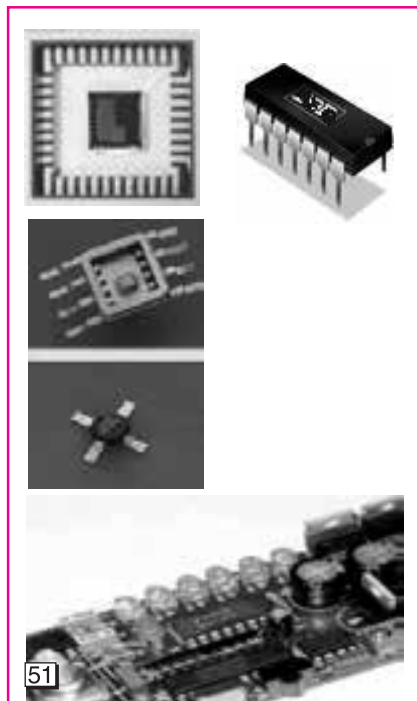
Obs

Circuitele **CMOS** au consum de energie mic față de circuitele cu tranzistoare bipolare.

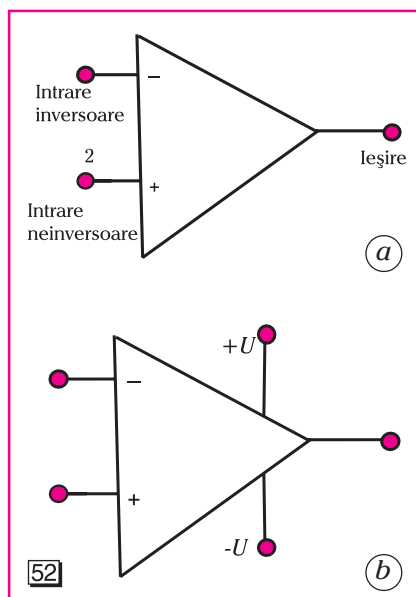
Tranzistoarele **MOS** de putere suportă tensiuni de ordinul a 1000 V și intensități de curent până la 70 A , sunt stabile termic.



4.4. *CIRCUITE INTEGRATE



Primul cip (0,7 mm grosime și latura de 30 mm) a fost conceput cu tehnologia planară de Robert N. Noyce în 1958. Cele mai mici cipuri obținute au dimensiuni de ordinul 0,1 microni.



*Aplicații ale circuitelor integrate

Circuitul integrat este un dispozitiv electronic constituit din mii sau chiar milioane de tranzistoare, diode, condensatoare și rezistoare montate pe o plachetă minusculă de material semiconductor, numită „cip” (fig. [51]). Acesta este introdus într-o capsulă. Circuitele integrate se conectează într-o rețea electrică prin „pini”.

Amplificatoarele operaționale (AO) sunt cele mai utilizate circuite integrate.

Amplificatorul operațional cu circuit integrat are două borne de intrare (intrarea inversoare notată cu $-$, denumire impusă de defazajul de 180° dintre semnalul de ieșire și cel de intrare și intrarea neinversoare notată cu $+$) și o bornă de ieșire (fig. [52], a). Circuitul mai are două borne de alimentare la tensiuni continue, care sunt reprezentate în figura [52], b. Pentru simplificare, aceste borne nu vor fi reprezentate în simbolul utilizat pentru AO, dar prezența lor va fi întotdeauna subînțeleasă. Ne interesează comportarea circuitului în ansamblu și nu a componentelor. Circuitul unui AO este format din două sau mai multe etaje de amplificare diferențiale.

Caracteristicile amplificatoarelor diferențiale :

– Amplificatorul diferențial are două ieșiri. Dacă semnalul util se aplică pe o singură intrare, 1 sau 2, observăm că semnalele culese sunt în opoziție la cele două ieșiri, 1 și respectiv 2, în ambele cazuri (fig. [53], a);

– Semnalele parazite (radiații provenite din rețeaua de alimentare) apar cu aceeași polaritate, în fază, pe ambele intrări și se anulează prin compunere, la fiecare ieșire (fig. [53], b). Dacă amplitudinea semnalului util de intrare ar fi egală cu amplitudinea semnalului parazit, atunci amplitudinea semnalului util la ieșire este de mii de ori mai mare decât amplitudinea semnalului parazit;

– Dacă pe cele două intrări, 1 și 2, se aplică două semnale în opoziție de fază (defazate cu 180°), observăm că semnalele culese sunt compuse, dar cu aceeași fază la cele două ieșiri (fig. [53], c);

– Curenții de intrare I_+ și I_- sunt neglijabili, deoarece rezistența de intrare este foarte mare;

– Amplificatorul diferențial realizează amplificare mare a semnalelor mici și permite realizarea unor operații matematice (comparare, mediere, derivare, integrare).

Aplicând o tensiune U_+ pe intrarea neversoare și o tensiune U_- pe cea inversoare, tensiunea diferențială de intrare în AO va fi:

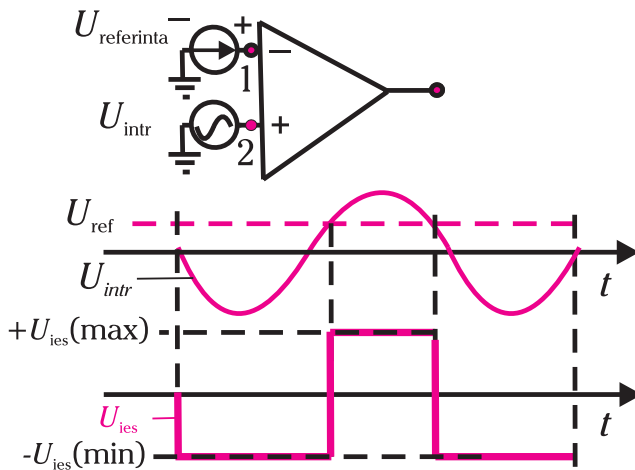
$U_d = U_+ - U_-$, iar tensiunea pe ieșire va avea expresia:

$U_{ies} = A \cdot U_d = A \cdot (U_+ - U_-)$, unde A este *amplificarea*.

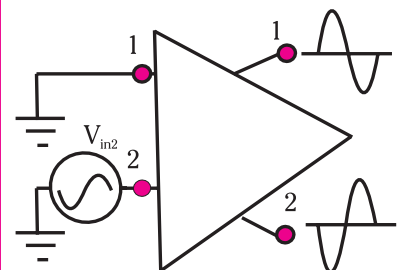
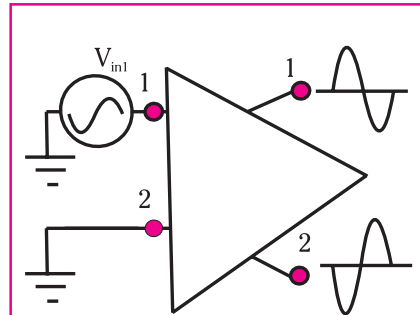
Dacă $U_+ = U_-$, atunci $U_{ies} = 0$.

AO în montaj de comparator detectează dacă o tensiune aplicată la intrare depășește un anumit nivel. La intrarea inversoare se conectează o sursă de tensiune constantă, de referință, iar la intrarea neinversoare se conectează o sursă de tensiune sinusoidală. Atâta timp cât tensiunea de intrare U_{intr} este mai mică decât tensiunea de referință U_{ref} , la ieșire se obține tensiunea minimă, negativă. La alternanțele negative ale sinusoidei, la ieșire se obține nivelul maxim al tensiunii negative deoarece o mică diferență de tensiune între cele două intrări aduce AO, la saturație amplificarea având valori mari (fig. 54). Când tensiunea de intrare U_{intr} este mai mare decât tensiunea de referință U_{ref} , la ieșire se obține tensiunea maximă pozitivă.

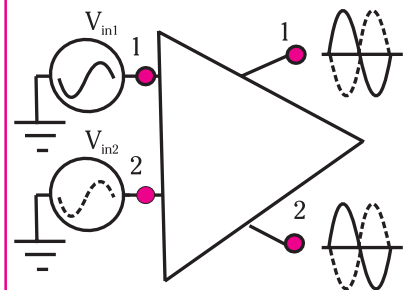
Conversia analogic-digitală este un procedeu de transpunere a unui semnal analogic (descriș printr-o funcție liniară, a cărei variabilă ia valori într-un domeniu continuu) în semnal digital (descriș printr-o funcție a cărei variabilă ia alternativ numai două valori). Această conversie poate fi realizată cu mai multe comparatoare conectate în paralel și compară semnalul liniar de intrare cu diferite tensiuni de referință culese de pe un divizor de tensiune. Când tensiunea de intrare este mai mare decât tensiunea de referință a unui comparator, atunci apare un semnal cu nivel mare la ieșirea celui comparator.



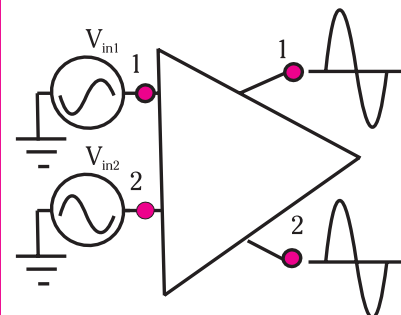
54



(a)

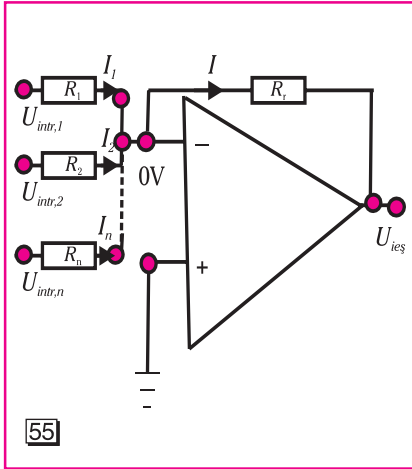


(b)



(c)

53



AO poate fi folosit ca amplificator sumator cu n intrări, pe care se aplică tensiunile $U_{intr,1}, U_{intr,2}, \dots, U_{intr,n}$ și generează curenții cu intensitățile $I_1, I_2, \dots, I_n$ (fig. 55). Intrarea inversoare, (notată cu -), este la 0 V.

Curentul total de intensitate I , care circulă prin rezistorul de rezistență R_r , este egal cu suma intensităților $I_1, I_2, \dots, I_n$, care circulă prin rezistorii de rezistențe $R_1, R_2, \dots, R_n$:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Observăm că tensiunea de ieșire $U_{ies} = -IR_r$ și

$$U_{intr,1} = -I_1 R_1; U_{intr,2} = -I_2 R_2; \dots; U_{intr,n} = -I_n R_n.$$

Obținem relația:

$$U_{ies} = -(I_1 + I_2 + \dots + I_n)R_r = -\left(\frac{U_{intr,1}}{R_1} + \frac{U_{intr,2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{intr,n}}{R_n}\right)R_r.$$

Dacă toate rezistoarele au aceeași rezistență electrică:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_r = R,$$

atunci obținem

$$U_{ies} = -(U_{intr,1} + U_{intr,2} + \dots + U_{intr,n}).$$

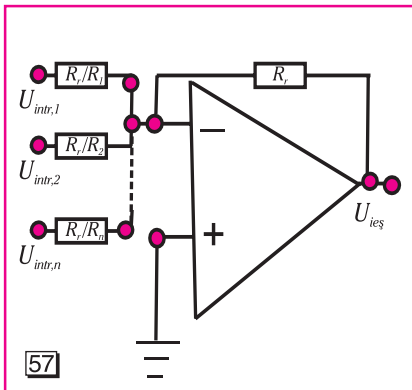
Suma tensiunilor de intrare are aceeași valoare ca tensiunea de la ieșirea AO, dar de semn opus.

Dacă numai rezistoarele din intrări sunt identice (fig. 56)

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n, \text{ iar } R_r = \frac{R}{n},$$

atunci tensiunea de la ieșirea AO are valoarea egală cu media aritmetică a tensiunilor de intrare, dar de semn opus:

$$\begin{aligned} U_{ies} &= -\left(\frac{U_{intr,1}}{R} + \frac{U_{intr,2}}{R} + \dots + \frac{U_{intr,n}}{R}\right)R_r = \\ &= -\frac{U_{intr,1} + U_{intr,2} + \dots + U_{intr,n}}{n}. \end{aligned}$$



Dacă se folosesc rezistoare de valori diferite pentru intrări atunci fiecare intrare are o anumită pondere, în suma din expresia tensiunii de ieșire, care depinde de raportul rezistențelor R_r și rezistența intrării considerate (fig. 57):

$$U_{ies} = -\left(\frac{R_r}{R_1} U_{intr,1} + \frac{R_r}{R_2} U_{intr,2} + \dots + \frac{R_r}{R_n} U_{intr,n}\right).$$

Una dintre metodele de conversie digital-analogic a sunetului folosește un sumator ponderat ale cărui rezistoare de intrare au valori ce reprezintă ponderea cifrelor binare.

Rezistorul cu cea mai mică valoare R corespunde intrării $n-1$, ponderate binar cu cel mai înalt nivel (2^{n-1}). Dacă $n=4$, celelalte rezistoare au valorile $2R, 4R, 8R$ deoarece corespund ponderilor binare $2^2, 2^1, 2^0$. Comutatoarele cu săgeți de la intrări reprezintă comutatoare realizate cu tranzistoare (fig. 58).

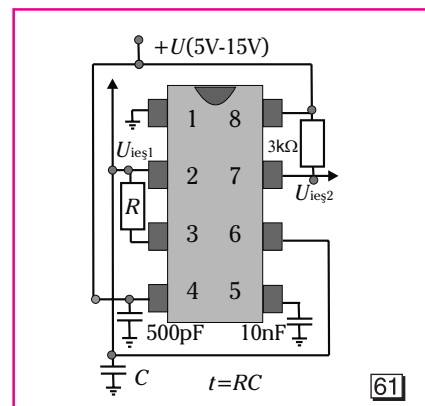
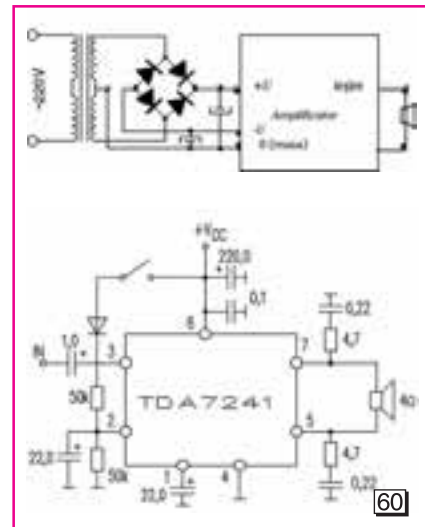
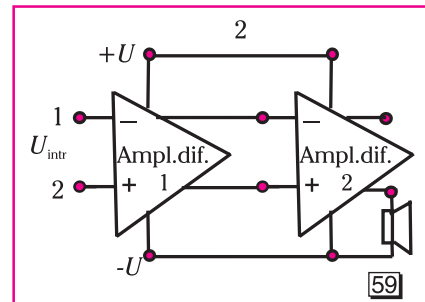
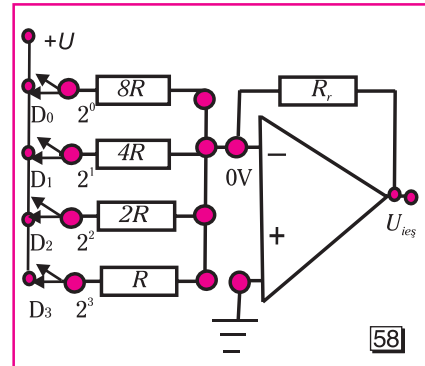
$$\begin{aligned} U_{ies,D_0} &= -R_r I_0 = -R_r \frac{U}{8R}; & U_{ies,D_1} &= -R_r I_1 = -R_r \frac{U}{4R}; \\ U_{ies,D_2} &= -R_r I_2 = -R_r \frac{U}{2R}; & U_{ies,D_3} &= -R_r I_3 = -R_r \frac{U}{R}. \end{aligned}$$

Un **AO** poate avea două amplificatoare diferențiale conectate între ele (fig. 59). Primul amplificator diferențial primește semnalul care va fi amplificat la ieșire. Ieșirile primului amplificator diferențial sunt cuplate cu intrările celui alt amplificator diferențial.



**Rezumat
Schema
de sinteză**

Circuitele integrate sunt utilizate în diverse aplicații: scheme care amplifică semnale audio (fig. 60) sau generează oscilații cu diferite forme și frecvențe (care depind de timpul în care se încarcă și se descarcă condensatorul C prin rezistorul R, ca în figura 61).



****Tehnologii de realizare a circuitelor integrate***

Tehnologiile de realizare a circuitelor integrate urmăresc dezvoltarea într-o structură tridimensională de suprafețe conductoare și izolatoare a unui număr de straturi suprapuse, cu anumite proprietăți, prin diverse procedee: fotolitografie, implantare de ioni, difuzie. Realizarea componentelor electronice și conexiunilor în cazul unei tehnologii, se face prin repetarea de mai multe ori a următoarelor etape:

- realizarea unor plachete de siliciu subțiri (0,5 – 1mm);
- realizarea componentelor electronice pe plachetele de siliciu (plachetele se acoperă cu un strat fotosensibil pe care se desenează componentele, sunt expuse la lumină ultravioletă, apoi se spală cu o soluție care îndepărtează materialul fotosensibil care nu a fost expus luminii);
- realizarea conexiunilor electrice între componente;
- separarea cipurilor de pe fiecare plachetă;
- conectarea cipului cu fire de aluminiu sau de aur cu diametre de circa 0,025 mm la pinii (vârfurile metalice) capsulei și încapsularea;
- testarea dispozitivelor electronice.

Obs Circuitele integrate sunt numite cipuri deoarece sunt realizate pe cristale mici de siliciu. Aceste tehnologii permit crearea microprocesoarelor.



4.5. PROBLEME ȘI TESTE PROPUSE

4.5.1.* Probleme rezolvate (pentru curioși)

1. Sistemele digitale folosesc semnale cu două niveluri pentru a reprezenta cifrele unor numere binare sau comenzile de tipul *deschis / închis* (fig. [62]). Fiecărui nivel logic i se asociază un nivel de tensiune. Tensiunea mică, de obicei 0 V, reprezintă „0” logic și corespunde cifrei binare 0, iar tensiunea mare (5 V sau 15 V, pozitivă sau negativă) reprezintă nivelul „1” logic și corespunde cifrei binare 1.

Considerăm conversia digital analogică cu succesiunile de valori codate binar cu 4 cifre (fig. [63]). Cifra cea mai puțin semnificativă este D_0 .

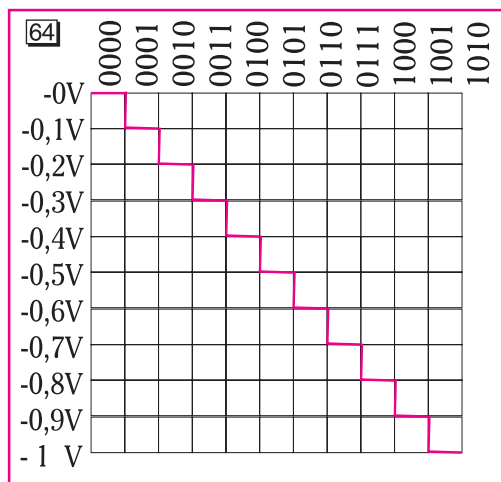
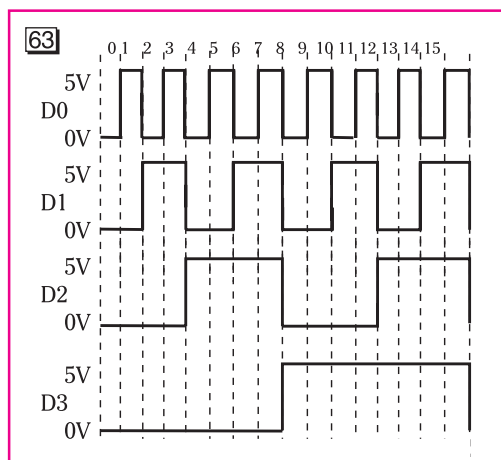
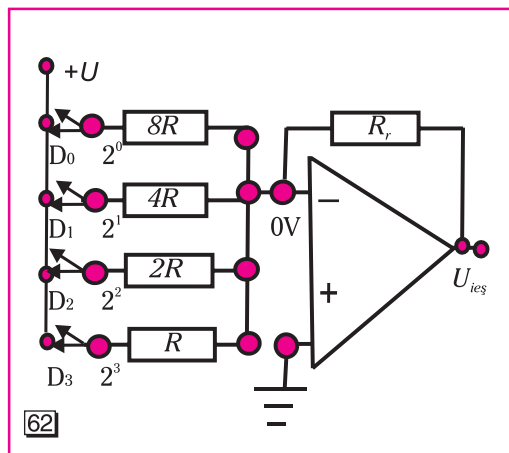
Dacă fiecare valoare binară succesivă, în conversia digital analogică, modifică tensiunea de ieșire cu $-0,1V$ și, respectiv, cu $-0,01V$ semnalul de ieșire poate fi aproximat printr-o dreaptă?

Rezolvare

Trecem datele din figura [63] în tabelul de mai jos:

Valorile corespunzătoare		tensiunii de ieșire
în sistem binar	în sistem zecimal	
0000	0	0
0001	1	-0,1
0010	2	-0,2
0011	3	-0,3
0100	4	-0,4
0101	5	-0,5
0110	6	-0,6
0111	7	-0,7
1000	8	-0,8
1001	9	-0,9
1010	10	-1

Folosim datele din tabel pentru reprezentarea grafică a semnalului de ieșire (fig. [64]). Dacă treptele graficului au dimensiuni mici, semnalul de ieșire poate fi considerat liniar (fig. [65]).



2. Considerăm un amplificator de tensiune cu sursa comună realizat cu un tranzistor **TECMOS** cu canal indus, cu sursa comună și polarizare prin divizor de tensiune (fig. 66). Calculează U_{GS} , U_{DS} și amplitudinea tensiunii de ieșire $U_{ieș}$ dacă $U_{DD}=20V$; $R_D=5\text{ k}\Omega$; $R_1=1\text{ M}\Omega$; $R_2=860\text{ k}\Omega$; $I_D=2\text{ mA}$; amplitudinea tensiunii de intrare $U_{intr}=25\text{ mV}$ și amplificarea în tensiune $A_U=69$.

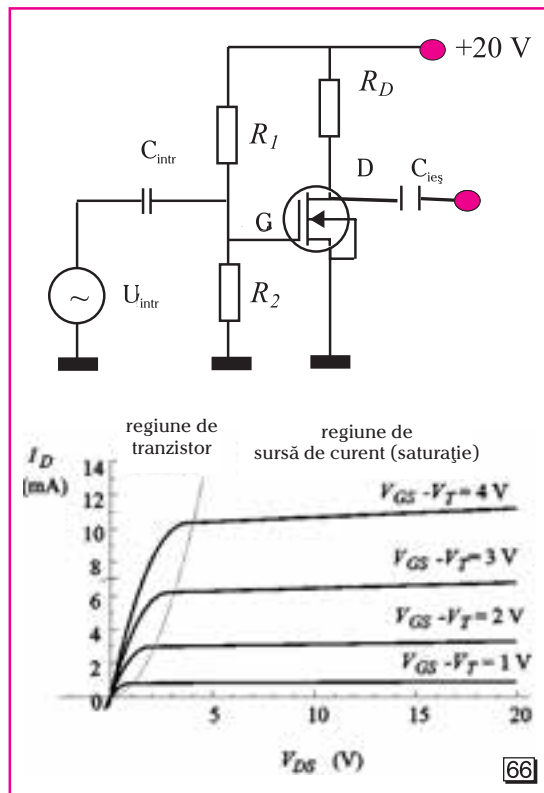
Rezolvare

$$U_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{DD} = 9,25V;$$

$$U_{DS} = U_{DD} - R_D I_D = 20 - 10 = 10V;$$

$$U_{ieș} = A_U U_{intr} = 69 \cdot 25V = 1,73V.$$

Dacă aplicăm pe poartă o tensiune mai mare decât tensiunea de blocare, la valori mici ale tensiunii drenă-sursă U_{DS} , curentul de drenă este aproximativ proporțional cu tensiunea drenă-sursă, deci tranzistorul se comportă ca un rezistor.



În semiconductoare, conducția se realizează prin electroni liberi și prin goluri (fig. 67). Recapitulează aplicațiile!

4.5.2. Teste cu grad mediu de dificultate

I. Pentru enunțurile de mai jos scrie litera corespunzătoare răspunsului corect.

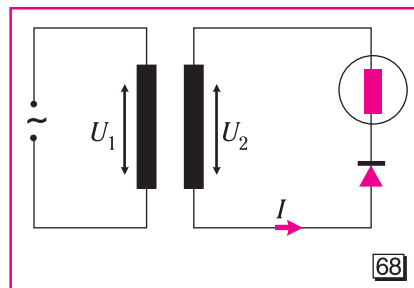
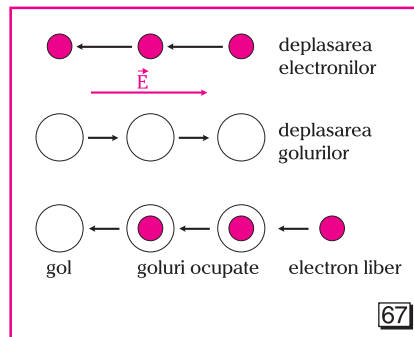
1. Printr-o joncțiune *pn* polarizată invers curentul invers este:
a) foarte mic; b) foarte mare; c) egal cu zero;
d) identic cu cel din polarizarea directă.

2. Convențional, unui gol i se atribuie o sarcină electrică:
a) egală cu a electronului și de același semn;
b) egală cu a electronului, dar de semn contrar;
c) mai mare decât a electronului și de același semn;
d) nulă.

3. La măsurarea tensiunii la bornele unui circuit, voltmetrul utilizat indică 10,5 V în loc de 10 V. În acest caz eroarea absolută este:

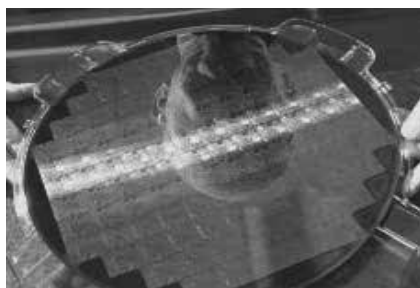
a) 0,5 V; b) -0,5 V; c) 0 V; d) -1 V.

II. Precizează tipul redresorului din figura 68.

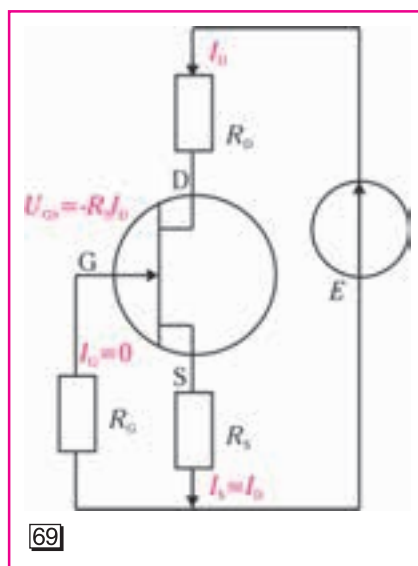




J.S. Kilby – premiul Nobel (2000) pentru „contribuția sa la realizarea primului circuit integrat”.



1A; 2A; 3F; 4F; 5F; 6A; 7A; 8A; 9A; 10A; 11A.



III. Pentru afirmațiile de mai jos selectezi A, dacă apreciezi că afirmația este adevărată, și F, dacă apreciezi că afirmația este falsă.

1AF. Golurile sunt echivalente unor sarcini electrice pozitive.

2AF. În semiconductoarele pure supuse acțiunii unui câmp electric, conducția intrinsecă se realizează prin electroni liberi și goluri.

3AF. Semiconductoarele impurificate cu atomi penta-valenți, numite de tip n , sunt negative.

4AF. Semiconductoarele impurificate cu atomi trivalenți, numite de tip p , sunt pozitive.

5AF. Conducția în semiconductoare scade la creșterea temperaturii.

6AF. Conducția în semiconductoare crește sub acțiunea luminii.

7AF. În semiconductoarele impurificate cu atomi trivalenți conducția extrinsecă de tip p este realizată de purtătorii de sarcină mobili: golurile majoritare și electronii minoritari.

8AF. În semiconductoarele impurificate cu atomi pentavalenți conducția extrinsecă de tip n este realizată de purtătorii de sarcină mobili: electronii majoritari și golurile minoritare.

9AF. Diodele redresoare conduc numai când sunt polarizate direct: potențialul anodului este pozitiv față de cel al catodului.

10AF. Diodele redresoare nu conduc atunci când sunt polarizate invers: potențialul anodului este negativ față de cel al catodului.

11AF. Circuitele integrate pot fi operaționale sau logice, dar sunt constituite dintr-un număr mare de tranzistoare și rezistoare montate pe același suport de dimensiuni mici, numit cip.

4.5.3. Test pentru autoevaluare

1. Reprezintă simbolurile pentru un tranzistor **TEC-J** și, respectiv, **TEC-MOS**.

2. Ce reprezintă inițialele **TEC-J** și **TEC-MOS**?

3. Care sunt denumirile terminalelor?

4. Ce este punctul static de funcționare?

5. Răspunde cu **A** (adevărat) sau cu **F** (fals):

a. La tranzistoarele **JFET** cu canal de tip n , tensiunea poartă-sursă trebuie să fie negativă.

b. Negativarea porții față de sursă micșorează curentul de drenă.

c. Tensiunea de blocare a tranzistorului este valoarea tensiunii poartă-sursă care, polarizând invers joncțiunea poartă-canal, produce anularea curentului de drenă.

d. Relația $U_{GS} = -R_S I_D$ din figura 69 corespunde polarizării automate a unui **TEC-J**.

FIZICA NUCLEARĂ



„Orice descoperire făcută într-o țară capătă imediat dezvoltări noi în celelalte țări, astfel încât toate marile descoperiri științifice recente sunt rezultatul unei colaborări internaționale.”

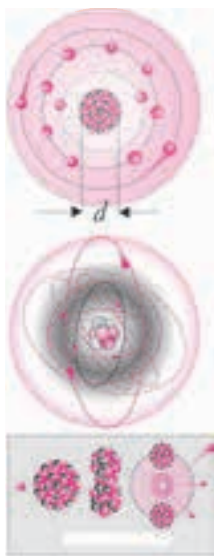
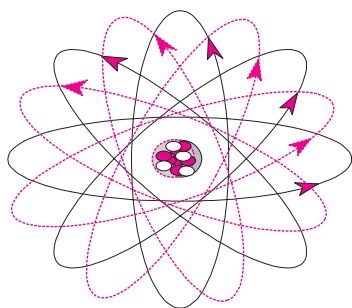
Irène Joliot-Curie





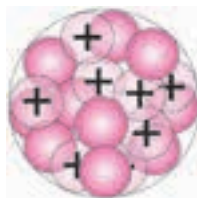
5.1. PROPRIETĂȚI GENERALE ALE NUCLEULUI

„Să facem țândări atomul.”
E. Rutherford



1

2



Fiecare nucleon, lipit unul de altul, participă la volumul sferic al nucleului cu volumul propriu incompresibil V_0 .

Caracterizarea nucleelor utilizând proprietățile generale ale acestora

Amintește-ți! Nucleul este miezul atomului, alcătuit din Z protoni și $N = (A - Z)$ neutroni, unde Z este numărul atomic, iar A este numărul de masă care reprezintă numărul de nucleoni (neutroni și protoni). Se folosesc mai multe modelări grafice pentru structura nucleelor (fig. 1).

Nucleul este încărcat pozitiv cu sarcina

$$Q = Ze = Z \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

În urma experiențelor de împrăștiere a particulelor α pe foițe metalice subțiri, Rutherford a calculat diametrele nucleelor: $d = 10^{-15} - 10^{-14} \text{ m}$.

Speciile nucleare ${}_Z^AX$ (nuclizii diferiților atomi) diferă prin numerele de nucleoni. Izotopii sunt nuclizi cu același număr atomic Z , dar cu numere de neutroni N diferite, deci și cu numere de masă A diferite (ex: ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{6}^{13}\text{C}$, ${}_{6}^{14}\text{C}$; ${}_{1}^{1}\text{H}$, ${}_{1}^{2}\text{H}$, ${}_{1}^{3}\text{H}$; ${}_{8}^{16}\text{O}$, ${}_{8}^{17}\text{O}$, ${}_{8}^{18}\text{O}$).

Izobarii sunt nuclizi cu același număr de masă A , dar cu numere atomice Z diferite (ex: ${}_{6}^{14}\text{C}$, ${}_{7}^{14}\text{N}$)

Izotonii sunt nuclizi cu același număr N de neutroni, dar cu numere atomice Z diferite (ex: ${}_{6}^{14}\text{C}$, ${}_{8}^{16}\text{O}$, ${}_{7}^{15}\text{N}$).

Forțele nucleare sunt forțele de atracție dintre oricare nucleoni, mult mai mari decât cele electrice, dar cu rază mică de acțiune ($\approx 10^{-15} \text{ m}$). La distanțe mai mari devin neglijabile față de forțele de respingere electrică dintre protoni. Rezultă că un nucleon interacționează numai cu vecinii apropiați, deci forțele nucleare sunt forțe de saturație. Aceste constatări au condus la conceperea modelului nucleului atomic numit „modelul picăturii de lichid” (fig. 2).

Volumul nucleului este proporțional cu numărul de nucleoni, deci cu numărul de masă A , adică $v_0 A = 4\pi R^3 / 3$. Rezultă că raza R a unui nucleu depinde de numărul său de masă A prin relația $R = R_0 \sqrt[3]{A}$, unde $R_0 = 1,45 \cdot 10^{-15} \text{ m}$, iar densitatea nucleelor ($\approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$) nu depinde de numărul de nucleoni.

Unitatea atomică de masă:

$$1 \text{ u.a.m.} = 1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

Masa nucleelor este practic egală cu masa atomilor corespunzători acestora, deoarece masa electronilor dintr-un atom este neglijabilă.

Spectrograful de masă folosește fascicule de ioni cu sarcina q , obținuți de la o incintă încălzită, care comunică printr-o deschidere îngustă, cu supapă, cu un tub vidat prevăzut cu doi electrozi.

Ionii cu sarcina q sunt accelerați spre electrodul perforat, apoi sunt selectați cei cu aceeași viteză în zona în care acționează un câmp electric și un câmp magnetic, care au liniile de câmp perpendiculare între ele și pe viteza de deplasare (fig. [3]).

Ies nedeviați doar ionii care au viteza $v = E/B$, dacă $F_{\text{electrică}} = F_{\text{Lorentz}}$, adică $qE = qvB$, continuându-și deplasarea într-o zonă unde acționează doar un câmp magnetic, cu liniile de câmp perpendiculare pe planul desenului.

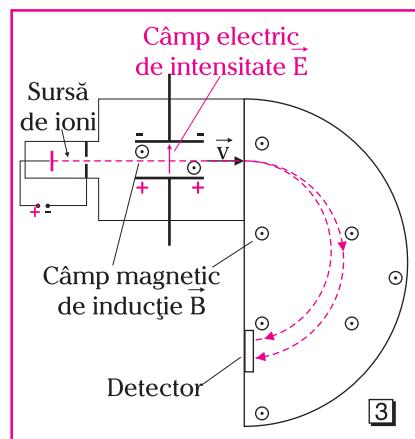
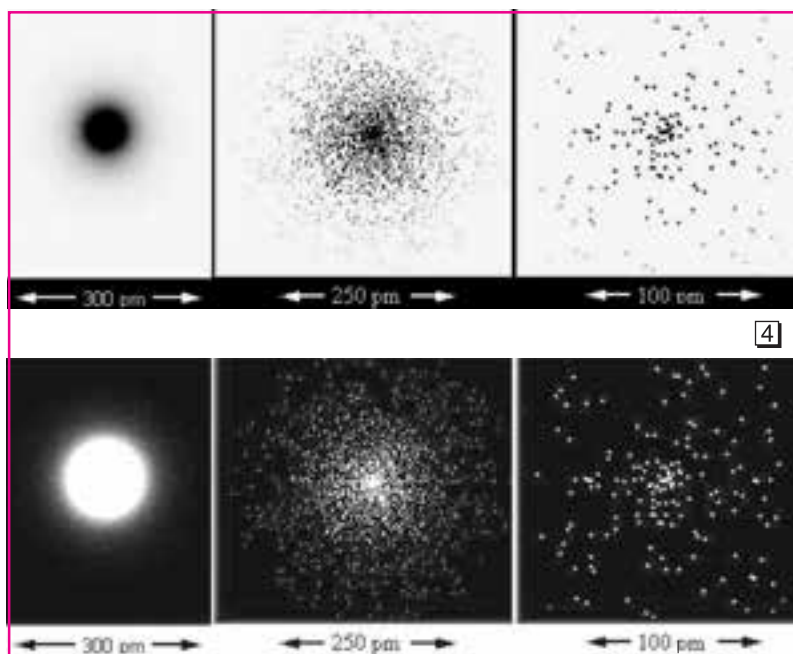
Ionii izotopilor au mase diferite m_i , deci se vor deplasa pe traiectorii de raze diferite și vor ajunge în puncte diferite ale detectorului. Abundența relativă a izotopilor se observă din studierea transparenței plăcii fotografice sau curenților din detectoare plasate în puncte de pe traiectoriile izotopilor.

Masele de repaus ale nucleonilor sunt aproximativ egale: masa protonului $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg, iar a neutronului $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg.



Pozițiile electronilor dintr-un orbital atomic, în care se găsesc cu anumite probabilități, sunt reprezentate prin puncte, la diferite scări (fig. [4]). Nucleul are dimensiuni mult mai mici decât zona cu dimensiunile reprezentării grafice? Știi că

$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$.



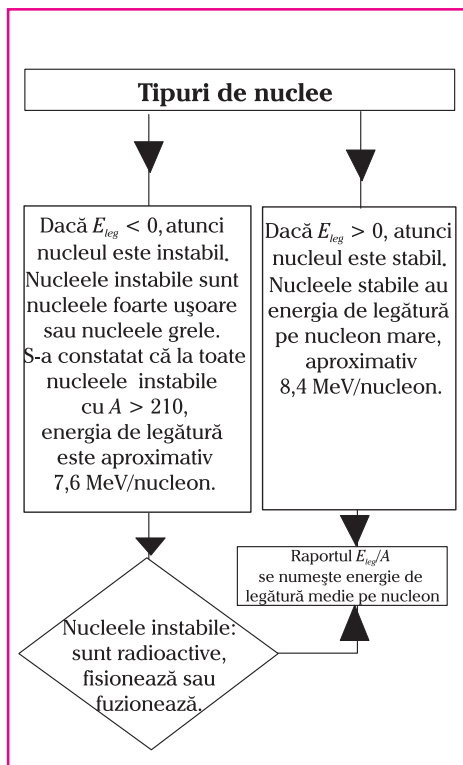
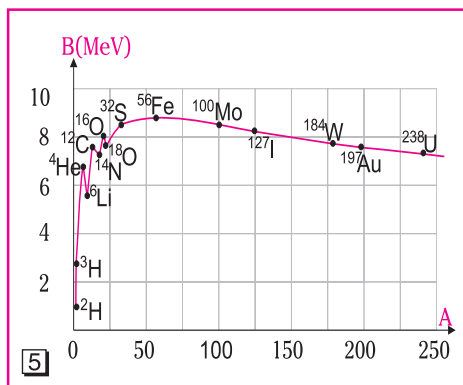
Forța cu care un câmp magnetic de inducție $\vec{B}$ acționează asupra unei particule cu sarcina q_1 , aflată în mișcare cu viteza $\vec{v}$, se numește *forță Lorentz*. Reținem expresia scalară, $f_L = q_1 \cdot v \cdot B \sin \alpha$,

și expresia vectorială, $\vec{f}_L = q_1 (\vec{v} \times \vec{B})$, a forței Lorentz.

Simbol	Nr. de masă A	Masa atomică M_A (în u.a.m.)
${}_0^1\text{n}$	1	1,008665
${}_1^1\text{H}$	1	1,007825
${}_1^2\text{H}$	2	2,014102
${}_1^3\text{H}$	3	3,016049
${}_2^3\text{He}$	3	3,016030
${}_2^4\text{He}$	4	4,002604
${}_6^{12}\text{C}$	12	12,000000
${}_6^{13}\text{C}$	13	13,003354
${}_6^{14}\text{C}$	14	14,003242
${}_7^{13}\text{N}$	13	13,005739
${}_7^{14}\text{N}$	14	14,003074
${}_8^{16}\text{O}$	16	15,994915
${}_8^{17}\text{O}$	17	16,999133
${}_8^{18}\text{O}$	18	17,999160



5.2. ENERGIA DE LEGĂTURĂ A NUCLEULUI. STABILITATEA NUCLEULUI



Energia de legătură a nucleului*

S-a constatat că masa unui nucleu M_N (cu Z protoni și din $N = A - Z$ neutroni, este mai mică decât suma maselor nucleonilor $Zm_p + (A - Z)m_n$.

Diferenței de masă

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_N$$

(numită și defect de masă) îi corespunde, conform formulei lui Einstein, energia

$$\Delta E = c^2 \Delta m$$

necesară desfacerii unui nucleu considerat în repaus în nucleoni izolați în repaus. Această energie numită energia de legătură a nucleonilor în nucleu sau energia de legătură a nucleului poate fi definită ca energia eliberată la formarea nucleului din nucleonii componenți.

Lucrul mecanic efectuat pentru a desface un nucleu în repaus în nucleoni izolați în repaus reprezintă energia de legătură a nucleului.

Dacă $E_{leg} > 0$, atunci nucleul este stabil, iar dacă $E_{leg} < 0$, nucleul este instabil și se dezintegrează spontan.

Rezultă:

$$\begin{aligned} E_{leg} &= Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - M_{Nucleu} c^2 = \\ &= c^2 [Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - Zm_e - M_{Nucleu}] = \\ &= c^2 [Zm_{Hidrogen} + (A - Z)m_n - M_{Atom}], \end{aligned}$$

unde $m_{Hidrogen} = m_p + m_e$,

m_e – masa de repaus a electronului ($m_p \approx 1840m_e$),

$$M_{Atom} = Zm_e + M_{Nucleu}.$$

Deoarece masele atomice în repaus M_{Atom} (vezi tabelul) sunt exprimate în unități atomice de masă ($1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg), se calculează produsul:

$$c^2 u = 9 \cdot 10^{16} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ J} = 931,5 \text{ MeV},$$

unde $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

În fizica nucleară, energiile se exprimă în MeV (megaelectron-volți):

$$E_{leg} = 931,5 [Zm_{Hidrogen} + (A - Z)m_{neutron} - M_{Atom}].$$

Raportul E_{leg}/A dintre energia de legătură E_{leg} și numărul nucleonilor A dintr-un nucleu, notat cu B , reprezintă **energia de legătură medie pe nucleon** (fig. [5]).

Stabilitatea nucleului

Nucleele stabile au energia de legătură pe nucleon mai mare, aproximativ 8,4 MeV/nucleon.

Nucleele instabile sunt nucleele foarte ușoare sau nucleele grele. S-a constatat că la toate nucleele instabile cu $A > 210$, energia de legătură este aproximativ 7,6 MeV/nucleon.

Nucleele instabile sunt radioactive (emit spontan particule alfa, electroni), fisionează sau fuzionează (fig. [6]).

Considerăm că nucleul X se descompune în particulele b și Y (protoni, neutroni, nuclee de heliu etc):



Nucleul este un sistem legat bY , în repaus relativ, căruia îi corespunde o energie de repaus negativă față de nivelul de referință în care particulele b și Y sunt separate una de alta și în repaus.



Folosind diagrama stărilor energetice (fig. [7]), obținem:

① Sistemul bY legat, aflat inițial în repaus la nivelul energetic $c^2 M_{0,bY}$, este ridicat la nivelul energetic $(M_{0,b} + M_{0,Y})c^2$ dacă primește din exterior energia de legătură E_{leg} pentru a separa particulele b și Y , în repaus:

$$E_{leg} + c^2 M_{0,bY} = c^2 M_{0,b} + c^2 M_{0,Y}.$$

Rezultă: $E_{leg} = c^2(M_{0,b} + M_{0,Y} - M_{0,bY}) = c^2 \Delta M.$

② Dacă sistemul legat aflat inițial în repaus la nivelul $c^2 M_{0,bY}$ primește o energie mai mare $E > E_{leg}$, atunci particulele b și Y vor fi separate și în mișcare:

$$E + c^2 M_{0,bY} = c^2 M_{0,b} + c^2 M_{0,Y} + E_{c,b} + E_{c,Y} = c^2 M_b + c^2 M_Y.$$

③ Observăm că legea clasică a conservării energiei:

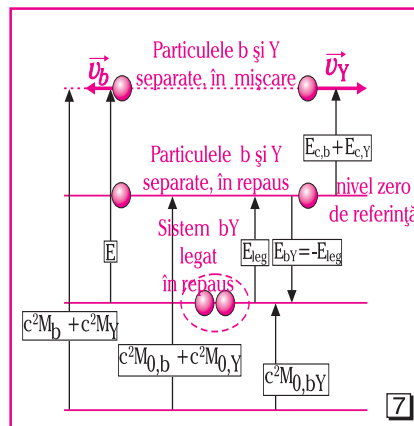
$$E = E_{c,b} + E_{c,Y} + E_{leg}$$

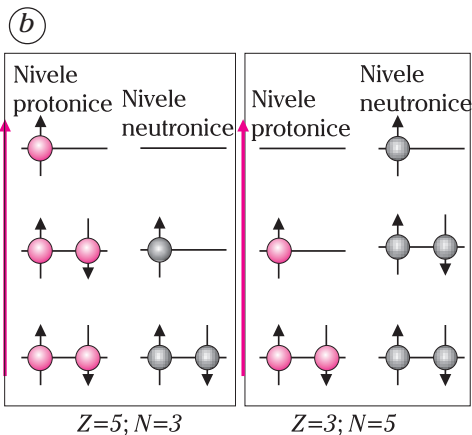
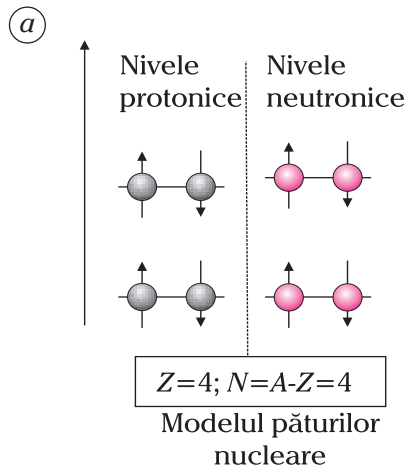
se obține din scăderea relațiilor de mai sus.



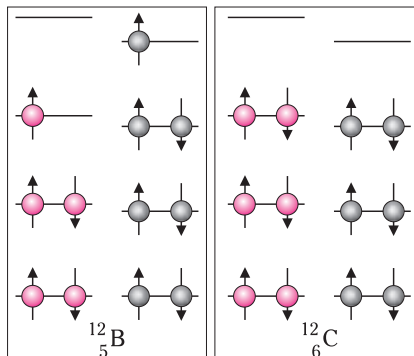
Dacă $E_{leg} > 0$, atunci nucleul este stabil față de descompunerea lui în particula b și particula sau noul nucleu Y .

Dacă $E_{leg} < 0$ atunci nucleul este instabil și fisionează, spontan în particulele b și Y care vor avea energia cinetică $E_{c,b} + E_{c,Y} = |E_{leg}|$.





[8]



[9]

Obs

Nu confundăm cantitatea de substanță (numărul de nucleoni) care se conservă cu masa totală care nu se conservă (masa poate fi considerată măsura cantității de substanță numai în procesele însoțite de variații mici de energie, deci nu în fizica nucleară).

Dacă în cazul atomului $E_{leg, Atom} \ll c^2 M_{0, Atom}$ (energia de repaus a atomului), atunci obținem conservarea masei:

$$M_{0, Atom} \approx M_{0, Nucleu} + M_{0, electroni}, \text{ adică } \Delta M \approx 0.$$

În cazul nucleelor:

$$E_{leg Nucleu} \gg E_{leg Atom} \text{ și } \Delta M \neq 0.$$

*Știi că...?



◆ În **modelul păturilor nucleare** se consideră că nucleonii sunt grupați în straturi succesive de energii diferite, asemănător electronilor în atom (fig. [8]a).

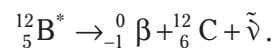
Pe o pătură nucleară pot fi doi protoni sau doi neutroni (în cuplaj spin – antispin). Nucleul cu $A=8$ este stabil dacă păturile sunt complete, începând cu nivelele energetice mai mici.

Energia de legătură pe nucleon a unui nucleu cu pături incomplete este mai mică decât a unui nucleu cu pături complete (fig. [8]b).

Datele experimentale confirmă stabilitatea nucleelor răspândite cel mai mult în natură, ^4_2He , $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$,

$^{208}_{82}\text{Pb}$, la care numărul de protoni și/sau neutroni este egal cu unul din numerele (magice): 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, găsite teoretic cu acest model. Nucleele instabile se notează cu asterisc.

◆ Nuclidul $^{12}_5\text{B}^*$ obținut artificial este instabil:



Prin transformarea unui neutron într-un proton ($^1_0n \rightarrow ^1_1p + ^0_{-1}\beta + \tilde{\nu}$), după ce sunt expulzați din nucleu un electron și particula $\tilde{\nu}$, numită antineutrino, se ajunge în starea cu 6 protoni și 6 neutroni, cuplați câte doi, pe nivelele energetice cele mai mici, (fig. [9]). Se eliberează energia:

$$\begin{aligned} \Delta E &= c^2(m_B - m_C) = \\ &= (12,01437 - 12,00000) \cdot 931,5 \text{ MeV} \approx 13 \text{ MeV}. \end{aligned}$$



5.3. RADIOACTIVITATEA. LEGILE DEZINTEGRĂRILOR RADIOACTIVE

Caracterizarea tipurilor de radiații nucleare

Majoritatea nucleelor sunt stabile și nu emit radiații electromagnetice sau radiații corpusculare. **Substanțele cu nuclee instabile care emit spontan radiații și pierd energie nucleară se numesc radioactive.**

Radioactivitatea este proprietatea unor nuclee de a se dezintegra spontan prin emisia unor radiații alfa, beta sau gama. În anul 1896, Henri Becquerel a descoperit că sărurile de uraniu emit radiații capabile să impresioneze o placă fotografică învelită în hârtie neagră. Soții Pierre și Marie Curie constată că și alte elemente chimice sunt radioactive și că procesele radioactive nu depind de condițiile de presiune și de temperatură.

Din analiza deviațiilor în câmpuri electrice și magnetice s-a tras concluzia că particulele deviate într-un sens sunt încărcate cu două sarcini elementare pozitive și au masa egală cu a nucleelor de heliu (simbol α sau ${}^4_2\alpha$), particulele deviate în sens invers au deviația egală cu cea a electronilor (simbol β sau ${}^0_{-1}\beta$), iar cele nedeviate (simbol γ) sunt radiații electromagnetice cu frecvențe și energii mari (fig. 10a).

Dezintegrarea radioactivă este procesul spontan prin care nucleul instabil se transformă într-un nucleu mai stabil, caracterizat de energie mai mică, în urma emisiilor de radiații (corpusculare sau electromagnetice).

În procesele de dezintegrări radioactive ale nucleelor se conservă: sarcina electrică, numărul total de nucleoni, impulsul și energia totală a sistemului.

Atomul rezultat își schimbă poziția în sistemul periodic al elementelor conform unor legi „de deplasare”.

Legile dezintegrării radioactive

① **Legea deplasării pentru dezintegrările ${}^4_2\alpha$** : dacă un nucleu A_ZX emite radiație ${}^4_2\alpha$, se obține un specimen nuclear cu numărul de masă mai mic cu patru unități și cu numărul atomic mai mic cu două unități (${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{A-4}_{Z-2}Y$) (fig. 10b).

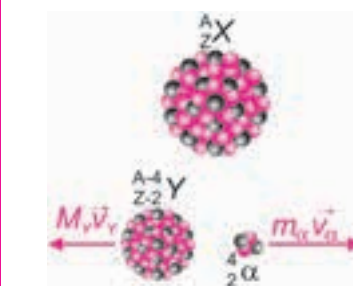
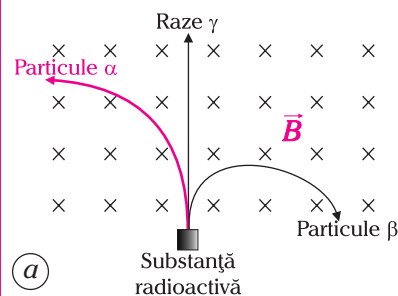
Noul nuclid este deplasat cu două căsuțe la stânga în tabelul periodic al elementelor.

„Eu fac parte din rândul acelor care gândesc, ca și Nobel, că oamenii vor folosi noile descoperiri mai curând spre binele decât spre răul omenirii.”

Pierre Curie



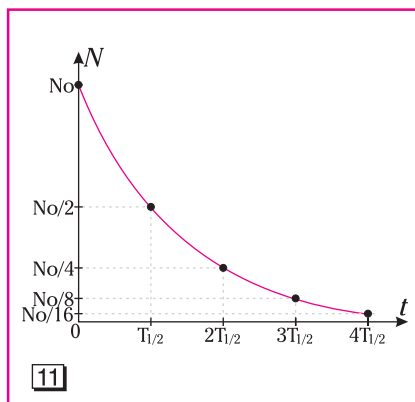
Antoine Henri Becquerel, Marie Skłodowska Curie și Pierre Curie – premiul Nobel (1903) „ca apreciere pentru serviciile extraordinare aduse prin descoperirea radioactivității spontane și implicațiile asupra dezvoltării fizicii”.



10



Frederick Soddy a enunțat în anul 1913 legile deplasării (în același timp cu Fajans Kasimir) și a primit premiul Nobel în 1921 pentru „contribuțiile sale la chimia substanțelor radioactive și în domeniul izotopilor”.



Obs Momentul în care se va dezintegra un anumit nucleu atomic nu poate fi prevăzut sau influențat.

În materialele radioactive, numărul nucleelor care se dezintegrează într-un anumit interval de timp depinde de natura și cantitatea inițială a izotopului radioactiv.

Timpu de înjumătățire reprezintă perioada după care numărul de nuclee radioactive se reduce, prin dezintegrare, la jumătate din valoarea sa inițială.

Un anumit izotop radioactiv poate fi identificat prin determinarea timpului propriu de înjumătățire, care nu poate fi modificat în niciun mod.

Radioactivitatea este practic constantă pentru izotopii radioactivi care au timpul de înjumătățire foarte mare, de ordinul miilor de ani.

Nucleele radioactive obținute din dezintegrări formează serii radioactive.

② **Legea deplasării pentru dezintegrările ${}_{-1}^0\beta$:** dacă un nucleu ${}_Z^AX$ emite radiație ${}_{-1}^0\beta$, se obține un specimen nuclear cu numărul de masă nemodificat (deoarece nu este expulzat un nucleon), dar cu sarcina pozitivă mai mare cu o unitate (${}_Z^AX \rightarrow {}_{-1}^0\beta + {}_{Z+1}^AY$).

Deoarece nucleul nu conține electroni, în dezintegrarea ${}_{-1}^0\beta$ trebuie să acceptăm ipoteza că un neutron se transformă într-un proton, care rămâne în nucleu, în electronul care este expulzat din nucleu cu diferite energii și într-o particulă expulzată $\tilde{\nu}$, cu masa de repaus nulă și fără sarcină electrică, numită antineutrino: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0\beta + \tilde{\nu}$. Și prin dezintegrarea ${}_{-1}^0\beta$ se obține un nuclid cu masa și energia mai mică decât a nuclidului inițial.

③ **Legea generală a dezintegrării radioactive** permite calcularea numărului N de nuclee radioactive rămase nedezintegrate la momentul de timp t față de momentul inițial ($t_0 = 0$), când au fost N_0 nuclee nedezintegrate:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Această lege exponențială se obține din proporționalitatea vitezei de scădere a numărului de nuclee nedezintegrate cu numărul nucleelor nedezintegrate:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N,$$

unde λ – constanta de dezintegrare radioactivă.

Separăm variabilele și integrăm între momentele $t_0 = 0$, când au fost N_0 nuclee nedezintegrate, și t , când mai sunt N

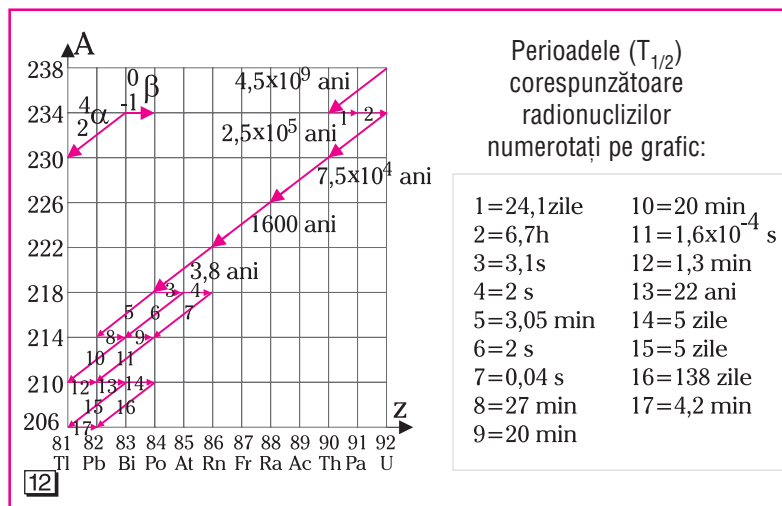
nuclee nedezintegrate: $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$; $\int_{N_0}^N \frac{1}{N} dN = -\lambda \int_0^t dt$. Rezultă

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

adică o descreștere exponențială în timp a numărului de nuclee radioactive (fig. 11).

Acest număr devine $N = \frac{N_0}{2}$ după un interval de timp numit timp de înjumătățire, $T_{1/2}$, proprie fiecărui radionuclid (fig. 12).

$$\text{Rezultă } \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \text{ și } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$



Tranzițiile care încep cu un radionuclid și se termină după mai multe dezintegrări α și β cu un izotop stabil formează o serie radioactivă (fig. 12).

Activitatea radioactivă $\Lambda = \lambda N$ este măsura numărului de nuclee radioactive care se dezintegrează în unitatea de timp, unde $[\Lambda] = 1$ dezintegrare/s, numită și Becquerel. Frecvent se folosește unitatea de măsură

$$[\Lambda] = 1 \text{ Curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ dezintegrări/s.}$$

Observăm că și activitatea radioactivă scade exponențial în timp:

$$\Lambda = \Lambda_0 e^{-\lambda t}.$$

Radioactivitatea naturală este caracteristică nucleelor cu $A > 200$ și mai rar întâlnită la celelalte.

Reacția nucleară (scrisă simbolic $a + X \rightarrow Y + b$) este un proces de interacțiune dintre o particulă sau nucleu proiectil a și un nucleu țintă X , din care rezultă un nucleu Y și o particulă sau nucleu b , între care se redistribuie protonii și neutronii.

Într-o reacție nucleară se conservă:

- sarcina electrică: $(Z_a + Z_X = Z_Y + Z_b)$,
- numărul de nucleoni: $(A_a + A_X = A_Y + A_b)$,
- impulsul: $(\vec{p}_a + \vec{p}_X = \vec{p}_Y + \vec{p}_b)$,

– energia totală relativistă:

$$(m_{0,a}c^2 + E_{cin,a} + m_{0,X}c^2 + E_{cin,X} = m_{0,Y}c^2 + E_{cin,Y} + m_{0,b}c^2 + E_{cin,b}).$$

Energia de reacție:

$$\Delta E = c^2 \Delta m = c^2(m_{0,a} + m_{0,X} - m_{0,Y} - m_{0,b}).$$

În anul 1934, Frédéric și Irène Joliot-Curie au obținut pentru prima dată radioactivitatea artificială a unei foițe de aluminiu iradiată cu particule α , emise în mod natural de o sursă radioactivă, prin reacția nucleară: ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\alpha \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P}^* + n$.

*Știi că...?



James Chadwick – fizician englez (1891-1974) a primit premiul Nobel (1935) pentru descoperirea neutronului.



Victor Franz Hess a primit premiul Nobel (1936) pentru descoperirea radiației cosmice.



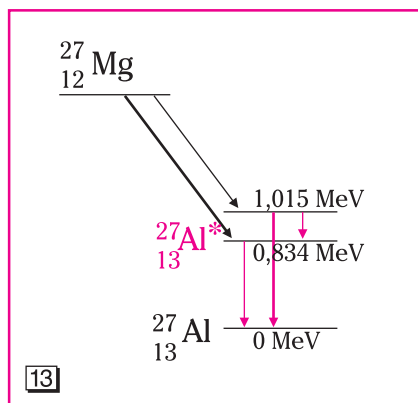
Carl David Anderson a primit premiul Nobel (1936) pentru descoperirea pozitronului.



Ernest Walton și John Cockcroft (1951) au primit premiul Nobel pentru transmutația nucleelor.



Contribuția lor la dezvoltarea fizicii secolului al XX-lea a fost uriașă. Documentează-te asupra altor fizicieni laureați ai Premiului Nobel.



Tranzițiile dintr-o serie radioactivă încep cu un radionuclid și se încheie cu un izotop stabil de plumb după mai multe dezintegrări α și β . De ce se fisurează recipientele în care se închid etanș substanțe radioactive de tip α ?

La întrebarea pusă se poate da următoarea explicație:

Presiunea crește datorită heliului gazos care ia naștere în interior. Prin scăderea numărului atomic Z cu două unități, atomul nucleidului obținut eliberează doi electroni care se pot deplasa liber prin substanță până întâlnesc o particulă α , ajunsă în repaus după ce a pierdut energia cinetică prin ionizări, cu care formează un atom de heliu.

Radionuclidul de fosfor P^* emite spontan o particulă pozitivă, antiparticula electronului, cu masa și sarcina egale în mărime cu cele ale electronului, numită pozitron (simbol ${}^0_{+1}\beta$ sau β^+): ${}^{30}_{15}P^* \rightarrow {}^0_{+1}\beta + {}^{30}_{14}Si + \bar{\nu}$. Prin transformarea unui proton din nucleu în neutron și cu expulzarea unui pozitron și neutrino (simbol $\bar{\nu}$): ${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}\beta + \bar{\nu}$, numărul de nucleoni rămâne constant în nucleu, dar Z scade, în acest caz, cu o unitate.



1. La nucleele grele este necesar un număr mai mare de neutroni decât de protoni, pentru a mări distanțele dintre protoni și a micșora forțele de respingere. De ce radiațiile γ sunt emise uneori după emisii α , iar alteori după emisii β ?

Rezolvare:

Deoarece astfel se obține un nucleu într-o stare stabilă (cu energie mai mică, fig. 13). Energia radiației γ emise este egală cu diferența energiilor celor două stări.

2. Un miligram de uraniu ${}^{238}_{92}U$ emite 12 particule pe secundă, deci are activitatea $\Lambda = 12$ dezintegrări/s. Considerăm masa atomului $m_1 \approx 238$ u. Calculează numărul de nuclee și perioada de înjumătățire:

Rezolvare:

Numărul de nuclee și de atomi radioactivi:

$$N = \frac{m}{A \cdot u} = \frac{10^{-6} \text{ kg}}{238 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \approx 2,5 \cdot 10^{18}.$$

$$\lambda = \frac{\Lambda}{N} = \frac{12 \text{ dez/s}}{2,5 \cdot 10^{18}} \approx 4,8 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} \Rightarrow$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \approx 4,5 \cdot 10^9 \text{ ani}.$$

3. De ce nuclizii unei serii radioactive coexistă în natură?

Rezolvare:

Nuclizii unei serii radioactive coexistă deoarece se ajunge la un echilibru radioactiv secular când fiecare radionuclid din serie se dezintegrează cu o viteză de dezintegrare egală cu cea cu care el se formează, adică activitatea fiecărui nuclid al seriei radioactive considerate este aceeași: $\Lambda = \lambda N = \lambda' N' = \lambda'' N'' = \text{const.}$, adică $\frac{N}{T_{1/2}} = \frac{N'}{T'_{1/2}} = \text{const.}$ Rezultă că radio-

nuclidul care se obține, în echilibru cu radionuclidul din care provine, are perioada de înjumătățire mai mică ($T'_{1/2} < T_{1/2}$), deoarece $N > N'$. Obținem relația $T'_{1/2} = T_{1/2} \frac{N'}{N}$.



5.4. INTERACȚIUNEA RADIAȚIILOR NUCLEARE CU SUBSTANȚA. DETECȚIA RADIAȚIILOR NUCLEARE. DOZIMETRIE

Efectele interacțiunii radiațiilor nucleare cu substanța

Radiațiile nucleare sunt particule elementare și fragmente nucleare (protoni, neutroni, electroni, pozitroni, particule α) emise prin dezintegrări radioactive și reacții nucleare sau radiații electromagnetice γ (cu lungimi de undă $\lambda < 1 \text{ \AA}$) emise în tranzițiile nucleelor de pe nivele energetice superioare pe nivele inferioare.

Toate tipurile de radiații își pierd energia cinetică (sunt atenuate) mai mult sau mai puțin în urma interacțiunilor cu substanța. Energia cedată determină încălzirea mediului străbătut, ca în cazul Soarelui (fig. 14).

Efectele radiațiilor nucleare, produse în urma interacțiunii lor cu substanțele în care pătrund, sunt: ionizarea și excitarea atomilor, acțiunea biologică, impresiunea filmelor fotografice și reacțiile chimice (descompunerea substanțelor, formarea de noi compuși etc.). Pentru reducerea acestor efecte, sursele radioactive sunt stocate în incinte metalice de plumb parafinat (fig. 15).

Din tabelul de mai jos se poate constata că penetrația este mai mică în plumb. Intensitatea I_0 a radiațiilor g incidente scade exponențial cu distanța parcursă x și devine $I = I_0 e^{-kx}$, unde k este coeficientul de atenuare al substanței prin care trece. Interacțiunea cea mai importantă a radiațiilor încărcate electric cu substanța sunt ionizarea și excitarea atomilor mediului. În aceste procese energia cinetică pierdută $|\Delta E_c|$ de particule se convertește în energie de ionizare sau excitare și se generează un număr de perechi ioni-electroni liberi sau, respectiv, atomi excitați. La recombinarea ionilor pozitivi cu electronii se emit radiații electromagnetice. După ce energia cinetică a particulelor α devine mai mică decât energia de ionizare, acestea captează electroni și formează atomi neutri de heliu. Atomii excitați se dezexcită direct sau printr-o succesiune de nivele intermediare și emit radiații în exterior (caracteristice substanței respective) sau acestea sunt absorbite de atomii vecini (tranziții neradiative în exterior), substanța încălzindu-se.

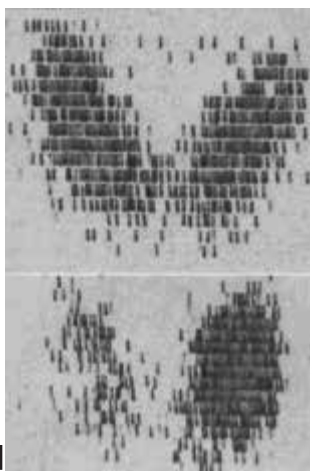
C Acțiunea biologică (somatică și genetică) a radiațiilor depinde de intensitatea acestora, de timpul de iradiere, de mărimea suprafeței iradiate, de tipul de radiații.

„Camera cu ceață a fost cel mai original și mai minunat dispozitiv în istoria științei.”

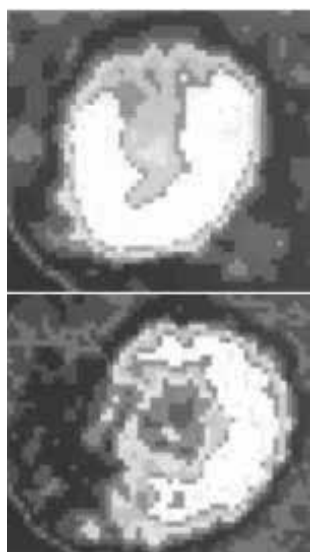
E. Rutherford



Tipul de radiații	Penetrația maximă a straturilor de:		
	aer	apă, parafină	plumb
X	100 m	10 cm	1 mm
α	10 cm	0,1 mm	0,01 mm
β	1 m	1 mm	0,1 mm
γ	1 km	1 m	10 cm
n	$\gg 1 \text{ km}$	1 m	$\gg 10 \text{ cm}$



16



17

Organismul uman este expus iradierilor naturale, profesionale, medicale (diagnosticări sau tratamente cu izotopi radioactivi) și efectelor în lanț ale poluării radioactive. Radionuclizii ajunși în atmosferă, apă și sol afectează biosfera prin lanțurile trofice. Prin alimente introducem radionuclizi în organism. Există radionuclizi care sunt absorbiți preferențial (stronțiu în oase, cesiu în mușchi, iod în glanda tiroidă). Activitatea biochimică a moleculelor cu atomi ionizați sau excitați este perturbată. Efectele somatice sunt imediate dacă iradierile depășesc o anumită doză maximă (apar tulburări metabolice, înroșirea pielii, hemoragii, infecții), iar după o perioadă de timp apare leucemie sau cancer. Efectele genetice depind de mutațiile produse în celulele reproducătoare.

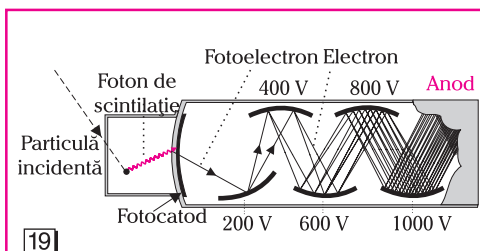
În diagnosticarea cu radionuclizi care au perioade mici de înjumătățire, obținuți prin reacții nucleare, se realizează tomografia (radiografierea structurii dintr-un singur plan de profunzime a plămânilor, oaselor etc.). Localizarea izotopilor radioactivi este „marcată” pe scintigrafia organului investigat. Scintigrafia este o metodă de diagnostic a modificărilor de structură ale organului sau țesutului examinat (care prezintă radioactivitate modificată, în cazul unor boli), în urma injectării intravenoase cu o soluție care conține izotopi radioactivi cu perioade mici de înjumătățire. Aparatul utilizat este compus dintr-un detector cu scintilații conectat la un traductor care produce scintigrame în culori. Țesuturile tumorale fixează foarte slab izotopii radioactivi. În scintigrafia glandei tiroide normale, radioizotopul de iod ^{131}I este uniform fixat, iar dacă există un nodul în lobul stâng al glandei, atunci se observă că izotopul nu mai este fixat în acesta (fig. 16). Imaginea pe monitor a scintigrafiei infarctului de miocard (prin administrare intravenoasă a radioizotopului de talu ^{201}Tl) nu mai are culoarea deschisă (în zona ventriculului din stânga) (fig. 17). Radiațiile emise de unii izotopi radioactivi se folosesc în tratamentul cancerului.

Detecția și măsurarea radiațiilor nucleare

Detectoarele de radiații nucleare înregistrează și contorizează interacțiunile radiațiilor cu diferite substanțe sau prelucrează cu un calculator (prevăzut cu interfață și un program special) semnalele furnizate de traductoarele detectoarelor (fig. 18).



18



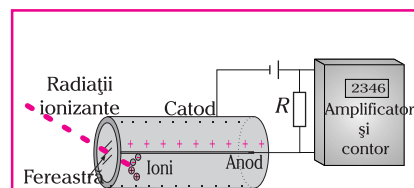
19

Contorul cu scintilații se bazează pe emisia unor cuante de lumină la dezexcitarea atomilor ciocniți de particule încărcate electric. Fotonii emiși ajung pe catodul unui fotomultiplicator din care smulg electroni (fig. 19). Aceștia se multiplică prin smulgerea altor electroni de către electronii accelerați în câmpul electric dintre electrozi (dinode) și pe anod ajunge un fascicul intens de electroni. Fiecare scintilație produce un impuls electric. Intensitatea semnalului electric detectat și înregistrat depinde de energia radiației incidente.

Contorul Geiger-Müller se bazează pe fenomenul de ionizare în gaze. La trecerea unei particule încărcate prin gazul cu presiune mică ($p < 100$ torr), din cilindru de sticlă cu doi electrozi (anodul – firul central, catodul – pelicula metalică depusă pe peretele interior al cilindrului de sticlă) conectați la o diferență de potențial de câteva sute de volți, se produc perechi ion-electron (fig. 20). Electronii sunt puternic accelerați de câmpul electric radial și se produc alți electroni în avalanșă, astfel încât prin circuit apar un impuls de curent și un impuls de tensiune (de durată scurtă) pe rezistența R , care este amplificat, înregistrat de un numărător electronic sau detectat la un difuzor (sub formă de pocnete). Neutronii sunt detectați indirect dacă în contor se găsește bor (prin particulele α rezultate din reacția neutroni-bor: ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^7_3\text{Li}$).

Detectorii cu cristale semiconductoare se bazează pe fenomenul de formare a perechilor electron-gol în joncțiunile din cristale semiconductoare. Durata impulsului prin joncțiune este $\Delta t \approx 10^{-9}$ s. Prin aplicarea unei tensiuni mici se obține un semnal electric a cărui amplitudine este proporțională cu energia particulelor înregistrate. Acești detectori au dimensiuni mici, se pot folosi pentru studiul proceselor nucleare rapide, au o bună rezoluție pentru determinarea spectrului energetic al radiațiilor cu ajutorul calculatorului (prevăzut cu interfață și un program special (fig. 21)).

Emulsiile nucleare detectează radiațiile prin efectul fotochimic produs la trecerea particulelor încărcate electric prin stratul de bromură de argint, mai gros ($50\text{--}300\ \mu\text{m}$) decât al filmelor fotografice ($2\text{--}3\ \mu\text{m}$), dar cu granulație mai mică ($0,1\ \mu\text{m}$ față de $1\text{--}2\ \mu\text{m}$ al filmelor fotografice). Urmele particulelor ionizante apar după dezvoltare sub forma unui șir de puncte negre: cu cât traiectoria este mai lungă, cu atât particula a avut energie cinetică mai mare (fig. 23). Urmele lăuate de particulele α sunt mai groase decât ale particulelor β .



Personalul tehnic trebuie să poarte un dozimetru de control.



Înegrirea filmului, dezvoltat periodic, de la dozimetru cu film dă informații asupra iradierii purtătorului.



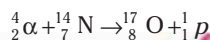
Charles Wilson – premiul Nobel (1927) pentru camera cu ceață.



(a)



(b)



(c)

[24]



[25]

Camera cu ceață (inventată de Charles Wilson pentru care a primit premiul Nobel în 1927) vizualizează traiectoriile particulelor ionizante prin picăturile de apă sau alcool care se formează prin condensarea vaporilor suprasaturanți din incinta închisă, pe ionii produși. Ionii joacă rol de centri de condensare (vezi manualul de fizică din clasa a X-a). Aerul devine supra-saturat cu vaporii prin cuplarea la o pompă cu piston și destinderea adiabatică însoțită de răcire. Dacă șirurile de picături au aceeași lungime, atunci particulele ionizante au aceeași energie. Traiectoriile particulelor ionizante pot fi fotografiate sau observate clar dacă incinta este iluminată lateral. Dacă se așază camera într-un câmp magnetic perpendicular pe direcția de mișcare a particulelor încărcate electric, acestea vor fi deviate. În 1919, Rutherford a fotografiat în camera cu ceață prima reacție nucleară (${}^4_2\alpha + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$) în locul de bifurcare (fig. [24]). Urma scurtă și groasă este produsă de nucleul greu al izotopului de oxigen, iar urma lungă și subțire este produsă de proton.

Camera cu bule vizualizează traiectoriile particulelor ionizante prin bulele care apar într-un lichid care devine supra-încălzit prin scăderea bruscă a presiunii vaporilor de deasupra lichidului încălzit peste punctul său de fierbere (fiind sub presiune mare). Bulele apar în jurul ionilor produși, care joacă rolul centrilor de fierbere (fig. [25]). A fost inventată de Donald Glaser pentru care a primit premiul Nobel în 1960.

Radioprotecția

Radioprotecția reprezintă sistemul mijloacelor de reducere a dozei de iradiere umană sub valoarea permisă de normele internaționale prin: ecranarea surselor radioactive cu substanțe puternic absorbante de radiații, mărirea distanțelor față de sursele radioactive, micșorarea timpilor de expunere la iradiere, echipamente speciale de lucru etc.

Dozimetria se ocupă cu studiul măsurării radioactivității din punct de vedere fizic și biologic. Dozimetrele sunt aparate pentru măsurarea dozelor de radiații.

Activitatea unei substanțe radioactive este definită prin numărul de dezintegrări radioactive în unitatea de timp, măsurate în S.I. în *becquereli* (Bq), care reprezintă o dezintegrare/sec. O unitate tolerată este *curie*-ul (Ci), care este definită prin activitatea unui gram de radiu de $3,7 \cdot 10^{10}$ dezintegrări/sec. *Roentgenul* (R) este definit pentru o capacitate de producere a $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg aer.

Efectele radiațiilor asupra celulelor biologice depind de capacitatea de ionizare a radiațiilor (X, γ etc.), deci de sarcina electrică apărută în aerul ionizat.

Tipul radiației	Q (factorul de calitate)
Raze X, γ și particule β	1
Neutroni cu energii mai mici de 10 keV	3
Protoni și neutroni cu energii mai mari de 10 keV	10
Particule α	20

Doza absorbită D este definită prin energia primită de unitatea de masă dintr-un corp de la radiațiile ionizante absorbite. Unitatea de măsură în S.I. a dozei este *gray*-ul ($\text{Gy} = 1 \text{ J/kg}$). O altă unitate folosită pentru măsurarea dozei este *rad*-ul ($1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$).

Echivalența efectelor biologice (gradul de afectare a țesuturilor biologice) se măsoară prin mărimea H , numită **doza echivalentă**, definită ca produsul dintre mărimea dozei absorbite D și **factorul de calitate Q** , care ia în seamă efectul biologic al fiecărui tip de radiații, după experimentări și statistici: $H = DQ$, unde: $[H]_{\text{S.I.}} = [D]_{\text{S.I.}} Q = 1 \text{ Sv (Sievert)}$. Rezultă că 1 Sv de radiații produce aceleași efecte asupra organismului, oricare este natura acestor radiații, dar numai 1 Gy de radiații β , γ , sau X produce aceleași efecte biologice (deoarece numai ele au același Q).

Doza echivalentă se măsoară și în Rem (echivalentul roentgenului la om): $1 \text{ Rem} = 0,01 \text{ Sv}$. Iradierea unui român este limitată de doza echivalentă anuală $H = 1 \text{ mSv/an}$ (jumătate din valoarea datorată iradierii naturale), iar a unui angajat din medii radioactive $H = 20 \text{ mSv/an}$.



Poluarea radioactivă (accidentală sau sistematică) este legată de produsele radioactive rezultate și antrenate de circulația atmosferică. Poluarea accidentală apare în urma defectării sau folosirii incorecte a sistemelor de protecție fizică (ecranări cu straturi absorbante din beton și plumb ale instalațiilor nucleare). Substanțele chimice radioprotectoare, administrate înaintea iradierii medicale, au rolul de a micșora cantitatea de apă din organele radiosensibile ale organismului uman. Preparatele biologic active sunt administrate după o iradiere medicală controlată, pentru refacerea celulelor. Iradierea medicală, prin intermediul radioizotopilor folosiți în diagnosticul și tratamentul medical, se întrerupe în cazul unei iradiere tehnice de nivel ridicat a oamenilor. Iradierea tehnică provine de la sursele de radiații nucleare: reactoare nucleare, acceleratoare de particule, armament nuclear. La un accident nuclear, organismele tinere sunt cele mai sensibile la iradiere, înregistrându-se mai multe cazuri grave în rândul tinerilor.

Reducerea speranței de viață este provocată de boala de iradiere, care se manifestă prin: stare de șoc, astenie, diaree, anemie, leucemie, infecții, deformații osoase.



Radiațiile sunt aceleași, indiferent de sursă: radiații electromagnetice γ și radiații corpusculare (alfa, beta, neutroni, ioni). Aceste radiații invizibile pătrund în toate corpurile până acolo unde își pierd energia în urma interacțiilor cu substanța (prin ionizări). Sursele naturale de radiații sunt: substanțele radioactive din subsol, apele potabile și radiația cosmică.

Există un fond natural de radiații în care trăim și la care organismele s-au adaptat în perioade lungi de timp. Unele elemente radioactive pot ajunge în organismul uman prin apa potabilă, prin alimente sau prin aerul pe care îl respirăm. Dacă intră în circuitul metabolic este necesar să se folosească substanțe care le elimină sau le fac insolubile.

Industria nucleară poate contamina solul, apa și aerul: prin scurgerile de deșeuri radioactive depozitate impropriu sau cu ocazia avariilor la reactoarele nucleare de la centralele electronucleare, când reacția de fisiune nu mai este controlată și se eliberează în mediul natural izotopi radioactivi. Riscurile se reduc dacă sunt luate măsuri eficiente de protecție la amplasarea centralelor electro-nucleare și stocarea deșeurilor radioactive.

Radioprotecția este necesară oamenilor care lucrează cu surse radioactive (care produc radiații ionizante) și viețuitoarelor care trăiesc în zone cu centrale electronucleare în care, în mod accidental, cresc mărimile fizice (caracteristici radiațiilor) peste valorile standardizate.

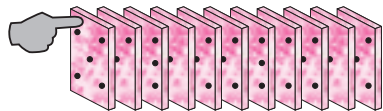
Mediul în care trăim conține surse naturale și artificiale de radiații.



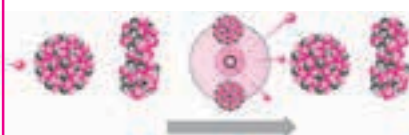
5.5. FISIUNEA NUCLEARĂ. REACTORUL NUCLEAR

„Orice teorie pe care o putem construi, pe baza unui model simplu, este folositoare ca o treaptă în căutarea unei teorii mai cuprinzătoare.”

E. Wichmann, Univ. Berkeley



[26]



[27]



P

Enrico Fermi – premiul Nobel (1938) pentru descoperirea reacțiilor nucleare induse de neutronii lăni.

Modelarea fisiunii nucleare și a reacției în lanț

Nucleele instabile fisionează sau emit spontan radiații, până când se transformă în nuclee stabile. Aceste dezintegrări sunt reacții nucleare spontane. Anumite reacții nucleare pot fi provocate.

Știi că pentru a-și putea face o idee despre fenomenele neperceptibile prin simțuri, oamenii își creează modele. Dar există pericolul de a concepe fenomenele nucleare ca fenomene mecanice și de a încerca tratarea lor cu metodele mecanicii clasice.

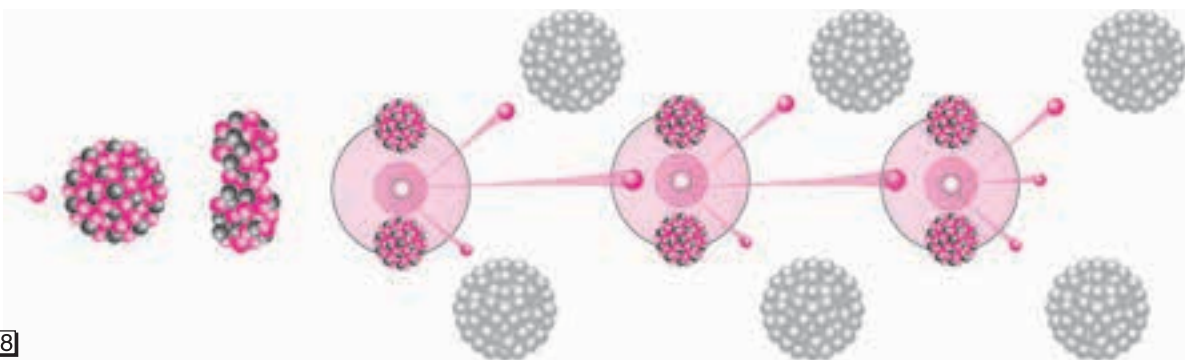
Analogia nu trebuie luată ca o identitate, deci trebuie să fim conștienți de limitele reprezentării prin modele.

Aranjează 15–20 de piese ca cele ale jocului de domino din figura [26]. Piesa care lovește are rol de proiectil. Folosind mai multe piese, procesul se autoîntreține.

Analog, nucleul de uraniu poate fi ciocnit de particula neutron și se obțin nuclee mai ușoare și alți neutroni (fig. [27]). Neutronul joacă rolul de proiectil care produce ciocnirea următorului nucleu de uraniu. Încep deosebiri!

Neutronul poate fi „capturat” de nucleu, deoarece este neutru și nu interacționează electric. Nucleul devine instabil, deoarece are o energie suplimentară și se „sparge” în două nuclee mai mici și doi-trei neutroni (fig. [28]).

Fisiunea nucleară stimulată este reacția nucleară în care un nucleu cu masă mare este ciocnit de un neutron și se divide în două nuclee mai ușoare, cu energie de legătură pe nucleon mai mare, și doi sau trei neutroni.



[28]

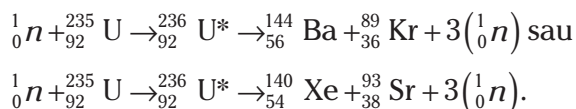
Enrico Fermi a folosit particule α pentru a obține o sursă de neutroni cu care să provoace fisiune nucleară.



Să considerăm că în fiecare proces de fisiune a nucleelor de uraniu rezultă trei neutroni. Dacă după fiecare proces de fisiune doi dintre ei sunt absorbiți de nucleele unor substanțe care nu fisiunează și doar un neutron produce fisiunea unui alt nucleu de uraniu, atunci procesele se repetă în timp până când sunt fisionate foarte multe nuclee, deci reacția se întreține în lanț (fig. 28). Reacția de fisiune dintr-un reactor nuclear se autoîntreține controlat până când se consumă uraniul.

Reactorul nuclear

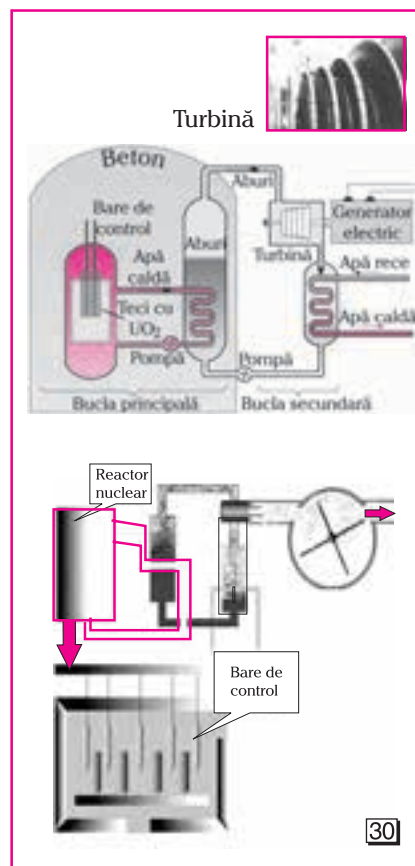
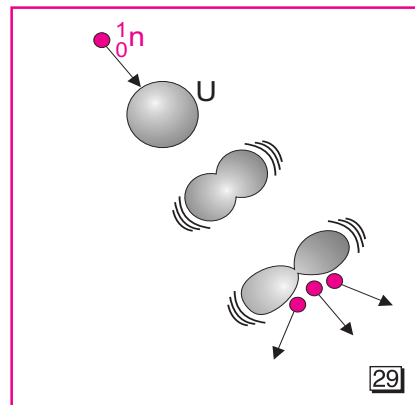
Primul reactor nuclear a fost construit în anul 1942 de către Enrico Fermi. În reacția de fisiune stimulată a izotopului de uraniu $^{235}_{92}\text{U}$ rezultă un nucleu compus instabil, prin captura unui neutron lent, din care se rup nuclee cu numărul atomic cuprins între 54-56 și, respectiv, 36-38:



Prin captura unui neutron lent, nucleul de uraniu se transformă într-un nucleu intermediar (compus) care oscilează ca o picătură de formă alungită, se gâtuie și se rupe în două nuclee și trei neutroni rapizi, cu energii cinetice mari (fig. 29). Nucleele rezultate sunt instabile și emit radiații β și γ . După un timp, într-un reactor nuclear se vor găsi nuclee radioactive de bariu, kripton, stronțiu etc.

Reacția în lanț se întreține numai dacă masa uraniului fisionat depășește o valoare critică ($m_{U, \text{critică}} \approx 1 \text{ kg}$). Neutronii rapizi, cu energii cinetice mari ($E_c > 10^4 \text{ eV}$) devin lenți când energia cinetică scade mult ($E'_c < 10^2 \text{ eV}$) în straturile moderatorilor (apă, parafină, grafit), care se încălzesc în urma ciocnirilor. Prin fisiunea fiecărui nucleu se eliberează energie ($\approx 200 \text{ MeV}$). Un reactor nuclear este un sistem complex în care se produce energie prin reacții în lanț și controlate, de fisiune stimulată cu neutroni.

O centrală nucleare-electrică are un reactor nuclear în care se dezvoltă căldură prin fisiune nucleară, un schimbător de căldură, generator de aburi, turbine cuplate cu generatoare electrice (fig. 30). Combustibilul folosit în centrala termoelectrică este cărbunele sau petrolul, iar în cea nucleare-electrică este uraniul.





Printre țevile (tecile) care conțin pastile de combustibil fisionabil se implantează și bare de control (fig. 31). Acestea sunt fabricate din materiale care conțin nuclee absorbante de neutroni (bor, cadmiu). Dacă miezul reactorului se supraîncălzește, atunci barele sunt introduse mai adânc și pot opri reacția în lanț deoarece absorb, practic, toți neutronii și reacția nu se mai autoîntreține. Combustibilul fisionabil din reactor este introdus în apă grea, care este folosită ca moderator și ca agent termic. Apa grea (D_2O) absoarbe mai puțini neutroni decât apa obișnuită. Are în structură nucleul de deuteriu, format dintr-un proton și un neutron, în locul nucleului de hidrogen. Energia de reacție nucleară conduce la ridicarea temperaturii acestui agent termic. Prin răcirea agentului termic se transferă căldură apei obișnuite dintr-un generator de aburi. Aburii reprezintă un sistem de vapori invizibili și picături mici de apă în suspensie care rezultă din condensarea vaporilor prin răcire. Prin conducte, aburii cu presiune mare sunt dirijați către paletele unor turbine pe care le pun în mișcare. Fiind cuplate pe același ax, turbogeneratoarele electrice (alternatoare) vor produce energie electrică.

Reactorul este prevăzut cu sisteme de protecție (ziduri groase de beton) și sisteme de siguranță pentru prevenirea accidentelor nucleare. Pastilele de dioxid de uraniu (UO_2) folosite în reactoarele de tip CANDU rețin 99% din producții de fisiune solizi chiar la temperaturi înalte, iar teaca combustibilului nuclear reține producții de fisiune care difuzează din pastilele de combustibil. Atât circuitul cu apă grea folosit pentru transportul căldurii, cât și anvelopa de beton pot reține producții de fisiune radioactivi.

C Fisiunea nucleară este o reacție exoenergetică în care nucleele se scindează. Reactorul nuclear este un sistem în care se produce o reacție de fisiune nucleară controlată. Pierderea controlului asupra reacției nucleare conduce la accidente nucleare cu efecte dezastruoase, ca la explozia unei bombe atomice. În reactorul nuclear al unei centrale electro-nucleare se autoîntreține o reacție de fisiune nucleară în lanț, iar energia eliberată prin fisiunea nucleelor este folosită pentru a obține energie electrică.

*INFO + Centrala nuclearo-electrică de la Cernavodă

(lectură) Pe plan mondial, resursele de combustibili clasici (gaze naturale, cărbune, petrol) sunt limitate. Opțiunea pentru centrale nucleare reprezintă aproximativ 20% din producția mondială de energie electrică. Producerea energiei electrice în centrale nuclearo-electrice (C.N.E.) se bazează pe o tehnologie nepoluantă, deoarece nu se mai degajă cantități uriașe de dioxid de carbon în mediul înconjurător, ca la termocentralele electrice unde căldura se obține în urma arderii combustibililor clasici.

În anul 1996, a fost conectată la rețeaua energetică națională prima unitate, din cele cinci, a centralei nucleare-electrice de la Cernavodă (fig. 32). În anul 2007 s-a mai conectat o unitate. Cu fiecare unitate în funcțiune obținem: 700MW (9% din producția de energie electrică a țării noastre); evitarea importării a 1,4 milioane tone păcură (echivalentul a peste 100 milioane \$ anual); diminuarea semnificativă a poluării mediului; stabilitatea energetică a țării față de sursele externe de combustibili.

Centrala nucleare-electrică Cernavodă folosește un reactor nuclear performant de concepție canadiană (CANDU) care utilizează uraniu natural drept combustibil și apă grea ca moderator și agent termic. Sistemul CANDU are o reputație internațională prin performanțele atinse și conferă un nivel ridicat de securitate în exploatare. România este singura țară din fostul sistem socialist est-european care utilizează tehnologie occidentală de vârf pentru C.N.E. (fig. 33).

Combustibilul nuclear uzat este stocat pe o perioadă de opt ani în bazinul special de lângă clădirea reactorului unu. În anul 2002, lângă Cernavodă (la Saligny) a început construcția unui depozit intermediar de combustibil uzat, pentru o perioadă de 50 de ani, utilizând tehnologia de stocare uscată (fig. 34). După scurgerea celor 50 de ani, deșeurile vor fi depozitate definitiv în pământ.

În anul 2001, apa grea produsă în România a fost cotate ca fiind cea mai bună din lume, având o puritate de 98,7%. Combustibilul nuclear este produs la Institutul de Combustibil Nuclear Pitești. Fasciculele de combustibil sunt testate în reactorul de tip Triga (de concepție americană). Din 1998 s-a defectat numai o teacă (un fascicul) de combustibil din cele 4428 încărcate în reactor. Cu ajutorul reactorului Triga se realizează radioizotopi (prin reacții nucleare cu neutroni) și radiosterilizarea produselor medicale (seringi, proteze vasculare, pansamente etc.). Din cauza accidentelor nucleare din ultimii ani, în rândul opiniei publice mondiale a luat naștere un curent de opinie care se opune dezvoltării energiei nucleare.



Față de alte tipuri de C.N.E., conceptul CANDU prezintă multe avantaje:

- ◆ folosirea uraniului natural (combustibil ce există din abundență, fără alte întrebuințări, și al cărui preț este scăzut);
- ◆ necesarul de combustibil este de numai 2600 tone de uraniu natural sub formă de pastile de dioxid de uraniu UO_2 (compactate) pe durata vieții garantate (30 de ani fără reparații capitale);
- ◆ încărcarea cu combustibil se face periodic fără oprirea centralei nucleare;
- ◆ controlul reactorului se face prin introducerea sau scoaterea barelor de control (din cadmiu, bor, argint) care absorb neutroni și reglează funcționarea la putere nominală și oprirea (în caz de avarie);
- ◆ răcirea reactorului nuclear în orice condiții, chiar la pierderea surselor de alimentare cu energie electrică, prin cele două bucle independente din interior;
- ◆ asigurarea securității nucleare printr-un ansamblu de măsuri tehnice și organizatorice destinate să asigure funcționarea instalațiilor nucleare fără riscul de accidente nucleare. Rezultă protecția: personalului tehnic, a populației, a mediului înconjurător împotriva iradierii sau contaminării radioactive;
- ◆ sistemul primar de transport al căldurii realizează circulația apei grele sub o presiune de 100 de ori mai mare decât presiunea atmosferică, la ieșirea din reactor. Acesta este agentul primar de răcire, cu o temperatură de 310°C la ieșirea din reactor și 266°C la intrarea în reactor, care circulă prin canalele de combustibil nuclear în scopul preluării căldurii degajate prin fisiunea nucleelor de uraniu.

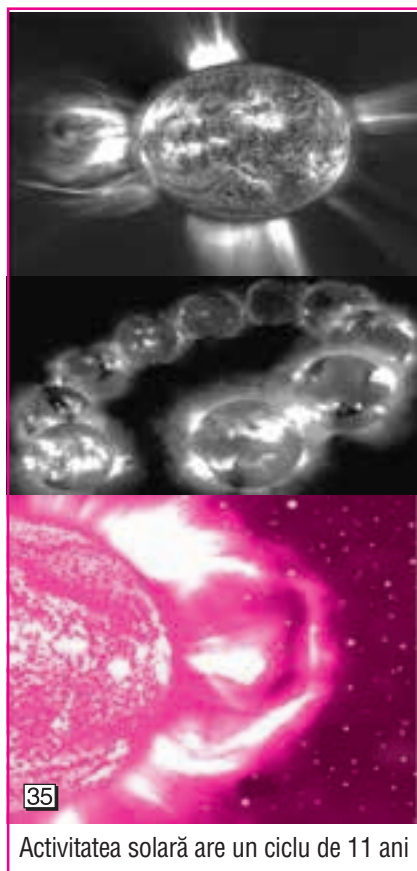




5.6. FUZIUNEA NUCLEARĂ

„Omul de știință este ca muncitorul
și ca artistul care încep o catedrală,
dar terminarea ei nu o pot vedea.”

F. J. Curie



Activitatea solară are un ciclu de 11 ani



Hans Bethe

Fuziunea nucleară. Evoluția stelelor

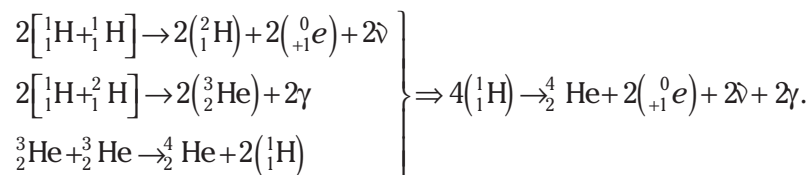
Energia de legătură pe nucleon este mai mică la nucleele ușoare decât la nucleele cu $A = 40-140$. Procesul prin care se formează un nucleu mai greu din unirea nucleelelor mai ușoare, cu eliberare de energie, se numește **fuziune nucleară**.

Energia radiată de stele (fig. 35) se obține prin reacții de fuziune la temperaturi foarte mari (10^7-10^9 K).

Analiza spectrală arată că stelele, ca și Soarele conțin mult hidrogen, heliu și cantități mici din celelalte elemente chimice. Teoriile astrofizicienilor susțin ipoteza că în Univers pot apărea stele noi (la 500-1000 de ani, când norii de gaz și praf cosmic se contractă prin efect gravitațional, devin fierbinți și radiază).

Procesul de fuziune nucleară nu poate fi spontan în condițiile întâlnite pe Pământ din cauza acțiunii forțelor mari de respingere electrică între nucleele pozitive, dar a putut fi obținut în bomba cu hidrogen, unde încălzirea inițială pentru fuziunea termonucleară se realizează prin amorsarea unei bombe de fisiune.

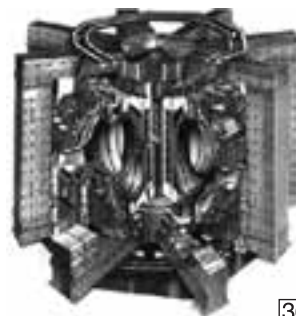
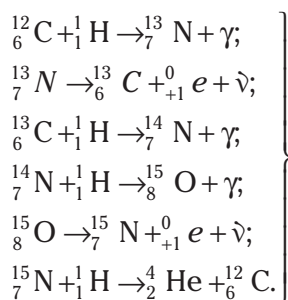
În plasmă fierbinte (stare în care atomii sunt ionizați), ciocnirile violente între nuclee produc fuziunea termonucleară, cu eliberarea energiei corespunzătoare defectului de masă ($\Delta E = c^2 \Delta m$). Nucleele rezultate o preiau ca energie cinetică, dar o pierd prin ciocniri cu particulele plasmă și astfel temperatura plasmă se menține ridicată. În stelele de tipul Soarelui, nucleele de hidrogen se apropie unele de altele deoarece au energii cinetice foarte mari la temperaturi foarte mari și fuzionează în lanț cu formarea nucleelelor de heliu:



Se eliberează energia:

$$\Delta E = c^2 \Delta m = 931,5[4 \cdot 1,007825 - 4,002604] \text{ MeV} \approx 26,7 \text{ MeV}.$$

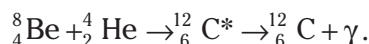
Un alt mecanism de combustie nucleară în stelele mai fierbinți decât Soarele, propus de Hans Bethe, pentru care a primit premiul Nobel în 1967, a fost denumit **ciclul carbon-azot** deoarece nucleul de carbon are rol de catalizator al reacției nucleare de fuziune a patru protoni pentru formarea unui nucleu de heliu cu emisia a doi pozitroni:



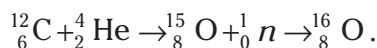
Când nucleele de hidrogen se vor epuiza, vor fuziona nucleele de heliu pentru obținerea beriliului:



În urma ciocnirii nucleelor de beriliu cu nuclee de heliu se poate forma carbonul:



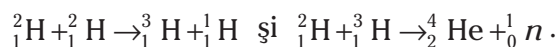
Analog: ${}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O}^*$. Pe măsură ce cantitatea de heliu se consumă, steaua ajunge la temperaturi și densități uriașe prin contracții gravitaționale. Sinteza celorlalte elemente poate avea loc prin reacții de captură a neutronilor, urmate de dezintegrări β . Neutronii apar în exces în stele, prin bombardarea celorlalte nuclee cu nuclee de heliu:



Perspectivile utilizării fuziunii nucleare ca sursă de energie a viitorului

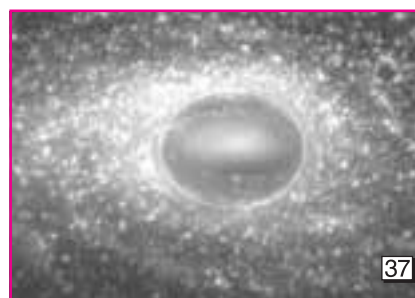
În laboratoare se încearcă găsirea geometriei optime a unui câmp magnetic puternic variabil care să realizeze comprimarea plasmei, ca să nu atingă pereții incintei care o conține (fig. [36]). Plasma este obținută prin încălzirea bruscă a unei picături de hidrogen lichid cu un fascicul laser, astfel încât nucleele să învingă forțele de respingere electrostatice și să fuzioneze.

C Reacțiile de fuziune pot constitui o sursă inepuizabilă de energie pe Pământ, deoarece din apă se poate extrage deuteriu:



La fuziunea unui amestec ${}^2_1\text{H}$ și ${}^3_1\text{H}$ cu masa de 1 kg se degajă energia $E = 9 \cdot 10^4$ MWh.

Munca de cercetare a 2000 de fizicieni și ingineri pentru realizarea, din programul European ITER, are loc sub auspiciile Agenției Internaționale pentru Energia Atomică.



Noțiuni de astrofizică pentru curioși

Când în centrul unei stele nu mai există suficient hidrogen, miezul ei se contractă. Hidrogenul din zona exterioară se transformă, în continuare, în heliu (prin reacții de fuziune), steaua se mărește și devine gigantă roșie. Când „combustibilul nuclear” se epuizează, steaua se contractă și devine o pitică albă. Această stea se răcește, strălucirea ei scade și poate deveni o pitică neagră.

Stelele supragigantice sfârșesc printr-o implozie (materia cade pe miezul foarte fierbinte al stelei) urmată de o explozie numită *supernovă* (fig. [37]). Materia, văzută în raze γ , este aruncată în spațiul cosmic și formează, în final, o nebuloasă de gaz. Ultima supernovă a fost observată la 12.02. 2006, la distanța de 5000 ani-lumină față de Pământ. În locul stelei dispărute rămâne miezul acesteia – cu diametrul de ordinul kilometrilor și cu densități uriașe – denumit stea de neutroni (deoarece atomii, puternic comprimați, sunt reduși la neutroni). *Pulsarul* este o stea neutronică de la care sunt recepționate pulsuri regulate de unde radio. Dacă masa ei depășește trei mase solare atunci devine o gaură neagră, câmpul gravitațional intens al acesteia nu mai lasă fotonii emiși să o părăsească.

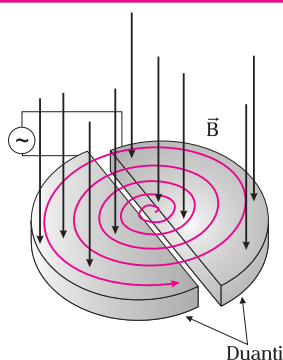
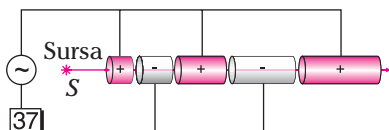


5.7. *ACCELERATOARE DE PARTICULE



„Nivelul ridicat al cercetărilor experimentale este o condiție necesară pentru dezvoltarea fizicii.”

Piotr Kapița – premiul Nobel (1978) pentru cercetări fundamentale în domeniul fizicii temperaturilor joase.



*Descrierea acceleratoarelor de particule

Reacțiile nucleare pot fi provocate cu particule emise de substanțele radioactive. Particulele încărcate electric pot fi accelerate cu ajutorul câmpurilor electrice, pentru a ajunge la energii suficient de mari încât să producă noi reacții nucleare din care să rezulte alte particule.

Acceleratoarele de particule sunt instalații complexe cu ajutorul cărora se mărește energia cinetică a particulelor încărcate electric. După forma traiectoriilor descrise de aceste particule accelerate de câmpuri electrice, acceleratoarele pot fi liniare sau ciclice.

Acceleratorul liniar este format dintr-un tub lung, vidat, în care se găsesc o serie de cilindri metalici montați pe axa tubului și conectați alternativ la una din bornele unui generator electric de înaltă frecvență ν (fig. 37). Între doi cilindri există tensiunea $U = U_0 \cos 2\pi \nu t$. Particulele emise de sursa S sunt accelerate în spațiul dintre doi cilindri consecutivi. Lungimea L_n a cilindrilor trebuie să fie calculată astfel încât timpul de parcurgere al acestora, cu viteza v_n , să fie egal cu jumătatea perioadei tensiunii oscilante:

$$\frac{L_1}{v_1} = \frac{L_2}{v_2} = \dots = \frac{L_n}{v_n} = \frac{T}{2} = \frac{1}{2\nu} \Rightarrow v_n = 2\nu L_n.$$

Energia particulelor de masă m și sarcină electrică q nu se modifică în timpul mișcării prin interiorul cilindrului metalic, unde câmpul electric este practic nul (ca într-o cușcă Faraday). Energia lor crește numai în câmpul din spațiul dintre cilindri:

$$\frac{mv_1^2}{2} = qU_0; \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = qU_0; \dots; \frac{mv_n^2}{2} - \frac{mv_{n-1}^2}{2} = qU_0.$$

Rezultă $\frac{mv_n^2}{2} = nqU_0$ și $v_n = \sqrt{\frac{2nqU_0}{m}}$, deci

$$2\nu L_n = \sqrt{\frac{2nqU_0}{m}} \Rightarrow L_n = \frac{\sqrt{n}}{\nu} \sqrt{\frac{qU_0}{2m}} = \sqrt{n} L_1.$$

Energia cinetică $E_c = NqU_0$ a electronilor care bombardează ținte din metale grele, după ce parcurg N cilindri (dispuși pe o lungime totală de 3,2 km la acceleratorul Stanford din California, de exemplu), are valoarea 20 GeV. O regăsim ca energie a radiațiilor X de frânare, care sunt utilizate în defectoscopie nedistructivă sau sterilizare.



Ciclotronul este format din două jumătăți ale unei cutii cilindrice din metal, cu raza de ordinul metrilor (fig. 38). Au forma literei D și sunt numite duanți. Sunt așezate într-un rezervor vidat. Pe cei doi duanți se aplică o tensiune oscilantă de înaltă frecvență ω . Sursa de particule încărcate electric este situată între duanți. Perpendicular pe suprafața duanților acționează un câmp magnetic, de inducție magnetică B , produs de un electromagnet puternic. În interiorul duanților câmpul electric este nul. Particulele încărcate electric sunt accelerate numai în câmpul electric dintre duanți. În interiorul duanților traiectoria este circulară de rază r . Deoarece viteza crește după fiecare accelerare între duanți, raza devine din ce în ce mai mare. Forța Lorentz joacă rol de forță centripetă:

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \text{ și rezultă } r = \frac{mv}{qB}.$$

Dacă în timp de o jumătate de perioadă particula parcurge un semicerc în interiorul unui duant, câmpul electric dintre duanți se inversează și particula va fi din nou accelerată între duanți. Viteza unghiulară și perioada rămân constante până la viteze relativiste:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}.$$

Dacă raza exterioară a duanților este R , atunci viteza maximă a particulelor la ieșirea din duanți este dată de relația:

$$v_{\max} = \omega R = \frac{qBR}{m}.$$

Cu ajutorul ciclotronului nu se pot imprima viteze mari particulelor încărcate electric, deoarece masa se va modifica relativist și particulele încărcate electric vor ajunge între duanți într-un moment în care câmpul electric va acționa în sens invers și vor fi frânate (nu mai este satisfăcută condiția de sincronism).

Betatronul este un accelerator ciclic pentru electroni. Principiul de funcționare este al unui transformator de curent alternativ, cu secundarul format dintr-o singură spiră circulară. Spira este un colac sau balon vidat în care se injectează un fascicul de electroni, cu o energie de ordinul zecilor de keV, produși de un tun electronic (T.E.) orientat astfel încât electronii ies cu viteza v_0 perpendiculară pe direcția liniilor unui câmp magnetic (fig. 39).



Ernest Lawrence a inventat ciclotronul pentru care a primit premiul Nobel în anul 1939.



**Știi că...?* Studiul traiectoriei electronilor în betatron poate fi realizat prin așezarea balonului vidat între două bobine plate parcurse de un curent electric variabil. Câmpul electric indus de câmpul magnetic variabil al bobinelor este rotațional și electronii vor fi accelerați de-a lungul unei traiectorii circulare. Aceștia ajung, după un număr de rotații, la energii de ordinul zecilor de MeV. Electronii accelerați în betatron nu pot atinge energii foarte mari, deoarece o parte din energie este pierdută prin radiații electromagnetice. La o energie de 50-100 MeV, radiația de sincrotron (emisă de electronii accelerați circular), situată în domeniul vizibil, poate fi observată pe o direcție tangențială la traiectoria fasciculului. Pentru ca electronii să păstreze aceeași orbită circulară în timpul accelerării, câmpul magnetic este generat de un electromagnet de formă specială, alimentat de la o sursă de curent alternativ. Accelerarea are loc pe sferturi de perioadă, electronii fiind captați la începutul fiecărui ciclu.



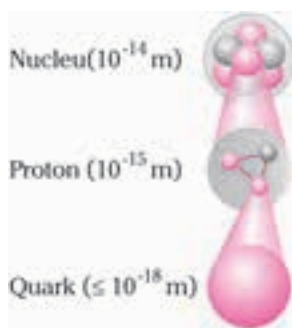
5.8. *PARTICULE ELEMENTARE

„În fiecare etapă de dezvoltare a fizicii, s-au numit elementare acele particule a căror structură nu era cunoscută și care erau considerate punctiforme.”

Enrico Fermi, *Lecții de fizică*



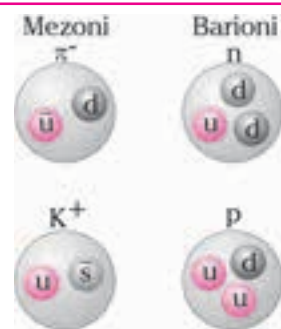
40



a



41



42

*Caracterizarea și clasificarea particulelor elementare

O particulă poate fi caracterizată prin proprietățile ei, măsurate prin mărimi fizice: masa, sarcina electrică, spinul, timpul mediu de viață. Descoperirea radioactivității și studiul reacțiilor nucleare au dovedit că atomul este alcătuit din nucleu și electroni. După descoperirea neutronului în 1932, de către Chadwick, se considerau particule fundamentale cele din structura atomului: protonii, neutronii (în nucleu) și electronii (care formează învelișul acestuia).

Particulele și antiparticulele noi descoperite în radiația cosmică și cele obținute în laborator, prin reacții nucleare cu particule de energii mari, au fost împărțite în familii, în funcție de masa lor de repaus: **leptoni**, **mezoni** și **barioni**. Atunci când o particulă se ciocnește cu antiparticula sa (de sarcină electrică opusă), acestea se anihilează reciproc, generând doi fotoni γ (fig. 40). Fizicianul Gell-Mann a propus în anul 1963 un model pentru care s-a acordat premiul Nobel în 1969, prin care proprietățile particulelor elementare cunoscute (peste 200), cu excepția leptonilor, pot fi explicate dacă acceptăm ipoteza că sunt alcătuite din quarcuri (fig. 41 a). Cuvântul „quark” este lipsit de vreo semnificație, deoarece Gell-Mann a considerat că denumirile folosite anterior s-au dovedit improprii cu trecerea timpului. Protonul și neutronul se consideră combinații ale acestor particule elementare ipotetice, cu sarcini electrice fracționare, $e/3$ sau $2e/3$, numite quarcuri. Interacțiunile dintre quarcuri sunt mediate prin schimbul unor particule ipotetice, numite gluoni (fig. 41 b).

Bosonii (fotonul, gluonul și mezonii) sunt particule de câmp cu spinul întreg ($s = 1$ sau $s = 0$). Nu li se aplică principiul lui Pauli. În afară de bosoni, toate celelalte particule au spinul semiîntreg ($s = 1/2$) și sunt numite **fermioni** (li se aplică principiul lui Pauli).

Până în 1975, când s-au descoperit particulele τ , leptonii erau cele mai ușoare particule (*leptos* – ușor, în limba greacă). Au spinul $s = 1/2$. **Barionii** au masă mare și sunt formați din 3 quarcuri (*baros* – greu, în limba greacă).

Mezonii au masa intermediară și sunt formați dintr-un quarc și un antiquarc (fig. 42).

Hadronii (mezonii și barionii) interacționează prin forțe tari.

Fiecare hadron este compus din 2-3 quarcuri și antiquarcuri.

1 MeV este energia care corespunde unei mase de repaus $m_0 = 1,77 \cdot 10^{-30}$ kg.



Antiparticulele și antiquarcurile au sarcină electrică de semn schimbat față de particulele și quarcurile pereche. Sarcina quarcurilor este o fracție din sarcina elementară. Când se combină două quarcuri u , fiecare având sarcina $+2e/3$ și un quarc d cu sarcina $-e/3$, rezultă un proton cu sarcina $+e$.

O pereche quarc-antiquarc se combină într-un mezon și nu se anihilează ca perechile particulă-antiparticulă.

Teoriile fizice folosite în studiul fenomenelor fizice explică interacțiunile cunoscute prin patru tipuri de forțe:

- ① **Forțele tari** acționează între nucleoni și între quarcuri (leagă neutronii și protonii în nuclee și quarcurile în particule elementare), au rază de acțiune $< 10^{-15}$ m; particula de schimb virtual în cuplajul nucleonilor este mezonul π , iar între quarcuri este **gluonul**.
- ② **Forțele electromagnetice** acționează între toate particulele cu sarcini electrice, au rază de acțiune infinită, scad invers proporțional cu pătratul distanței, asigură legătura între atomi și între nuclee și învelișurile electronice ale acestora; interacțiunea între două particule este mijlocită de **fotonul** emis și absorbit de acestea.
- ③ **Forțele slabe** acționează între leptoni și sunt responsabile de dezintegrările radioactive de tip β în care apar neutrini; au raza de acțiune $< 10^{-18}$ m; particulele de schimb virtual sunt **bosonii** $W^\pm$ și Z^0 , detectați prin produsele dezintegrării (1983).
- ④ **Forțele gravitaționale** acționează între toate particulele, au rază de acțiune infinită, scad invers proporțional cu pătratul distanței; se presupune că particula de schimb virtual este **gravitonul** (particulă de câmp ipotetică).

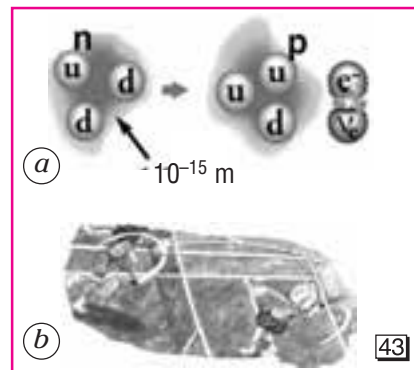
Interacțiunea slabă determină dezintegrarea β , care nu implică nucleul în întregime, ci doar nucleonii individuali. Procesele de dezintegrare β pot fi descrise prin analogie cu procesul de emisie de fotoni de către atomi sau nuclee, în sensul că leptonii emiși (pozitronul și electronul) se formează chiar în momentul emisie lor din nucleu (vezi [43] a):

$${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0\beta + \tilde{\nu}_e; \quad {}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_1^0\beta + \nu_e.$$

Neutrinii sunt particule considerate fără masă, foarte greu de detectat. Există trei tipuri de neutrini sau „neutrino”: electronic, miuonic și taonic.



Hideki Yukawa – premiul Nobel (1949) pentru descoperirea mezonilor.



În anul 1934, Yukawa a explicat interacțiunea tare (dintre doi nucleoni) printr-un schimb de pioni virtuali. Interacțiunea la distanță dintre două particule de substanță se face prin intermediul unei particule virtuale, pe care o particulă de substanță o emite, iar cealaltă o absoarbe (analog jocului de tenis, unde mingea transferă energie și impuls de la un jucător la altul, fig. [43]b). Particulele asociate unui câmp se numesc particule de câmp sau cuante de câmp.

Ipoteza că hadronii sunt combinații de quarcuri și antiquarcuri cere să existe o cuantă de câmp, numită gluon, analoagă fotonului din interacțiunile electromagnetice. Schimbul de gluoni între quarcuri asigură legătura acestora în interiorul unui hadron. Gluonii nu există în stare liberă. Fiecare quarc emite gluoni care sunt absorbiți de un alt quarc.

Particulele de schimb virtual asociate câmpurilor, care mijlocesc cele patru tipuri de interacțiuni dintre fermioni (particule cu spinul $1/2$) se numesc bosoni. Bosonii cu masa de repaus nulă sunt: fotonul, gluonul și gravitonul, iar cei cu masa nenulă sunt mezonii. Gluonul este o particulă virtuală (bosonul asociat câmpurilor de forțe tari).

Sistematica particulelor și antiparticulelor elementare*							
Familia	Numele		Simbolul	Sarcina	Masa m_0 (MeV/c ²)	Timpul de viață (s)	
Bosoni (fără masă de repaus; au spinul întreg)	foton		γ	0	0	∞	
	gluon		g	0	0	∞	
	$W^+; W^-; Z^0$		$W^+; W^-; Z^0$	+; -; 0	$8 \cdot 10^4;$ $9 \cdot 10^4$	$< 10^{-24}$ $< 10^{-24}$	
	graviton			0		?	
Leptoni (au spinul $s = 1/2$)	Neutrino:						
	• electronic;		$\nu_e, \bar{\nu}_e$	0	0	∞	
	• miuonic;		$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0	0	∞	
	• taonic.		$\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$	0	0	∞	
	Electron		$e^\pm$	$\pm e$	0,5110	∞	
	Miuon		$\mu^\pm$	$\pm e$	105,7	$2,20 \cdot 10^{-6}$	
	Taon		$\tau^\pm$	$\pm e$	1784	$2,91 \cdot 10^{-13}$	
Hadroni: • mezoni (bosoni cu masă de repaus; au spinul $s = 0$)	Pion		$\pi^\pm$ π^0	$\pm e$ 0	39,6 135,0	$2,60 \cdot 10^{-8}$ $0,84 \cdot 10^{-16}$	
	Kaon		$K^\pm$ K^0	$\pm e$ 0	493,7 497,7	$1,24 \cdot 10^{-8}$ $0,89 \cdot 10^{-10}$	
	Delta		$\Delta^\pm$ Δ^0	$\pm e$ 0	1869 1865	$10,6 \cdot 10^{-13}$ $4,2 \cdot 10^{-13}$	
	• barioni (au spinul $s = 1/2$)	Proton	nucleoni	p	+e	938,3	$> 1,6 \cdot 10^{32}$ ani
		Neutron		n	0	939,6	
Lambda		hiperoni	Λ^0	0	1116	$2,63 \cdot 10^{-10}$	
Sigma			Σ^+	+e	1189	$0,8 \cdot 10^{-10}$	
			Σ^0	0	1193	$7,4 \cdot 10^{-20}$	
			Σ^-	-e	1197	$1,48 \cdot 10^{-10}$	
Xi	Ξ^0		0	1315	$2,90 \cdot 10^{-10}$		
	Ξ^-	-e	1321	$1,64 \cdot 10^{-10}$			
Omega		Ω^-	-e	1672	$0,82 \cdot 10^{-10}$		
Quarcuri	sus (up)		u	+2e/3	340	EXEMPLE mezoni $\pi^+ \quad u\bar{d}$ $\pi^- \quad \bar{u}d$ $K^+ \quad u\bar{s}$ $K^- \quad \bar{u}s$	
	jos (down)		d	-e/3	340		
	farmec (charm)		c	+2e/3	1500		
	straniu (strange)		s	-e/3	520		
	vârf (top)		t	+2e/3	22500		
	bază (bottom)		b	-e/3	circa 5000	barioni $p \quad uud$ $n \quad udd$	

* după Jones/Childers (Physics – Contemporary college 2001 update)

S-a reușit unificarea teoriei interacțiunii electromagnetice și a celei slabe, sub numele de interacțiune electro-slabă. În anul 1979, S. Glashow, A. Salam și S. Weinberg (fig. 44) au considerat că la distanțe mici interacțiunea slabă este comparabilă ca intensitate cu cea electromagnetică. Conform acestei teorii, raza ei mică de acțiune implică o particulă de câmp (mediatoare de interacțiune) de masă mare. În 1983 au fost descoperite particulele $W^\pm$ și Z^0 , cu energii apropiate de valoarea 100 GeV, care au confirmat teoria. Particula care își așteaptă confirmarea sau infirmarea este gravitonul, particulă care ar media interacțiunea gravitațională, dar care încă nu a putut fi detectată și deci rămâne ipotetică.

În concluzie, în acest secol așteptăm alte teorii și experimente din domeniul particulelor elementare.



*INFO + Impactul utilizării tehnologiilor nucleare asupra societății și naturii (lectură)

„Ne putem pune întrebarea dacă omenirea are faloase de pe urma aflării secretelor naturii, dacă este matură pentru a profita de binefacerile acestora sau dacă aceste cunoștințe îi pot dăuna.”

Pierre Curie – premiul Nobel 1903

Ai sentimentul de bucurie pentru încă o cucerire științifică sau de frică față de un potențial efect distrugător al acesteia? **Experimentele nucleare** au fost limitate prin convenții internaționale. Armamentul nuclear consumă sume uriașe din bugetele țărilor. Bomba nucleară face parte din grupa armelor de distrugere în masă. Explozia este produsă de o reacție de fisiune nucleară în lanț, necontrolată.

Dacă mase mai mici (subcritice) de elemente radioactive fisionabile sunt puse în contact prin acțiunea unui focos chimic, se ajunge la depășirea masei, numită *critică*, a elementului radioactiv folosit, ceea ce declanșează o explozie nucleară în lanț necontrolată. Se degajă o energie comparabilă cu cea a exploziei a mii de tone de dinamită (fig. 45).

O **explozie nucleară** este însoțită de:

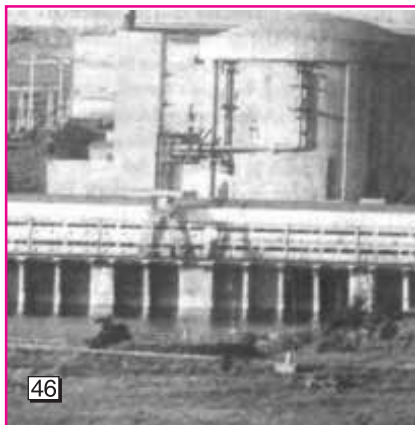
- lumină orbitoare în cele mai întunecate unghere;
- căldură care topește acoperișurile caselor;
- undă de șoc, care distruge totul pe o rază de zeci de kilometri;
- ploaie radioactivă;
- contaminare radioactivă a aerului, solului și apelor (cenușa și praful radioactiv ale „ciupercii nucleare” sunt împinse la mari distanțe contaminând biosfera).

Substanțele radioactive ca stronțitul, cesiul, iodul, ajung în apa mărilor, oceanelor, lacurilor, râurilor și sunt concentrate ulterior în plante și animale (alge, plancton, pești, moluște, crustacee), care devin radioactive. Tulburări importante apar în urma contaminării ierburilor păscute de vite, oi, care concentrează în laptele lor izotopii radioactivi. Legumele și zarzavaturile (roșiile, varza,



Murray Gell-Mann – premiul Nobel (1969) „pentru contribuțiile și descoperirile cu privire la clasificare particulelor elementare și a interacțiunilor acestora”.





Suedezul Alfred Nobel este fondatorul premiilor anuale pentru realizări remarcabile în cinci domenii de activitate: fizică, chimie, medicină, literatură și promovarea păcii în lume. Știai că Nobel a descoperit dinamita? Nobel a crezut că invențiile lui vor fi folosite în scopuri exclusiv pașnice. Prin testamentul întocmit în 1895, el își lasă întreaga avere fundației ce-i poartă numele. Contribuția fizicienilor laureați ai premiului Nobel la dezvoltarea tehnologiei a fost importantă.

salata, ridichile) concentrează și ele substanțe radioactive. Stronțul se fixează în oase și provoacă leucemii, cesiul se fixează în mușchi, iodul în glanda tiroidă.

Creșterea radioactivității mediului în urma experiențelor nucleare a dus la modificarea florei și faunei actuale (maturizările sunt încetinite, scade longevitatea etc.). Din cauza acumulărilor lente, efectele pe plan genetic și morfo-fiziologic sunt resimțite chiar și după 2–3 generații.

Degradarea solului este legată și de depozitarea deșeurilor radioactive și a reziduurilor de la decontaminările radioactive (ale armamentului și echipamentelor de protecție folosite de armată sau de populația civilă), care ajung după un timp în apa freatică. Problema vitală a omenirii este legată de reducerea riscului nuclear prin eliminarea armamentului nuclear. Omul a creat armele nucleare, iar reversul poate fi acela că ele îl pot desființa ca specie. Într-un război nuclear nu există învingători, ci doar învinși. La ce concluzie ai ajuns?

Ai auzit de **accidente nucleare** de mai puține ori decât de accidente de circulație. Se întâmplă rar, dar atunci când se întâmplă sunt implicați mulți oameni și multe țări. Creșterea riscului de contaminare radioactivă a mediului este legată de sursele de contaminare din instalațiile nucleare energetice (reactoare nucleare folosite pentru cercetare și producere de izotopi radioactivi sau centrale nucleare, fig. [46]). În cazul unei explozii nucleare, reacția de fisiune devine necontrolată.

Efectele pierderii controlului reacției de fisiune dintr-o centrală nucleară sunt reduse prin: folosirea tehnologiilor noi care asigură sisteme de etanșare, răcire a miezului și oprirea reactorului în caz de avarie; procurarea echipamentelor de protecție și aparaturii de control al nivelului de radiații; cercetarea științifică la nivel de vârf pentru utilizarea corectă a produselor radioactive, de supraveghere, monitorizare (fig. [47]).

Prin **securitate nucleară** se înțelege ansamblul de măsuri tehnice și organizatorice destinate să asigure funcționarea instalațiilor nucleare în condiții de siguranță, să prevină și să limiteze deteriorarea echipamentelor și să ofere protecție împotriva iradierii sau contaminării radioactive: personalului tehnic, populației, mediului înconjurător și bunurilor materiale. Conceptul CANDU are la bază strategia de „apărare în adâncime”, care constă în conceperea unui sistem de bariere fizice în calea emisiilor de radiații.

Personalitatea fizicienilor laureați ai premiului Nobel pentru fizică, amintiți în manual, au avut un efect în motivația pentru întocmirea de potofoliu individual? Contribuția lor la dezvoltarea fizicii și a tehnologiilor secolului al XX-lea a fost uriașă.



*INFO +
(lectură)

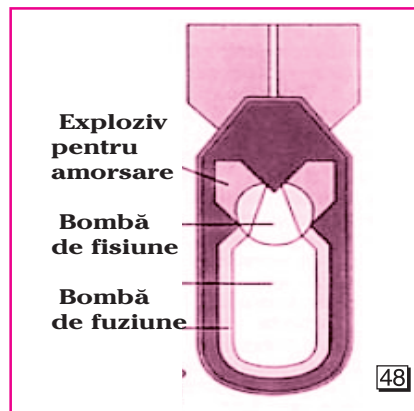
Posibile efecte ale utilizării armamentului nuclear de fuziune (lectură)

Pentru a iniția reacțiile de fuziune în bomba cu hidrogen, cunoscută și sub numele de bomba termonucleară, sunt necesare temperaturi ridicate obținute prin amorsarea unei bombe de fisiune (vezi [48]). Armele nucleare (bomba atomică, bomba cu hidrogen și bomba cu neutroni) au cel mai puternic efect distructiv, dintre armele de distrugere, determinat de energia obținută prin reacția nucleară de fisiune sau prin reacția nucleară de fuziune. Întrebuințarea lor într-un eventual război periclitează existența vieții pe Pământ (vezi [49]).

Specialiștii militari din S.U.A., Rusia, Franța au susținut că experimentele nucleare sunt necesare pentru realizarea unor noi arme nucleare pentru distrugerea unor buncăre sau pentru a informa lumea despre capacitatea lor. China, India și Iran argumentează că sunt o modalitate de utilizare pașnică a energiei nucleare. În 1954, o bombă cu hidrogen de 15 megatone a fost detonată de Statele Unite pe insula Bikini din Oceanul Pacific, provocând cea mai puternică contaminare radioactivă. A fost de 1000 de ori mai puternică decât bombele atomice care au căzut asupra orașelor Hiroshima și Nagasaki în anul 1945, iar norul produs de bombă a ajuns la un diametru de 100 de kilometri, în 10 minute. Amenințarea cu războiul nuclear a crescut datorită proliferării acestor arme. **Până în prezent s-au efectuat peste 2.000 de teste nucleare:**

- S.U.A — 1.030 (Nevada, Oceanul Pacific- Bikini);
- Uniunea Sovietică (Rusia) — 715 (Novaia Zemlia);
- Franța — 210 (sudul Oceanului Pacific);
- Marea Britanie — 45 (Australia, sudul Oceanului Pacific);
- China — 43 (Tibet, sudul Oceanului Pacific);
- Pakistan — 6;
- India — 4.

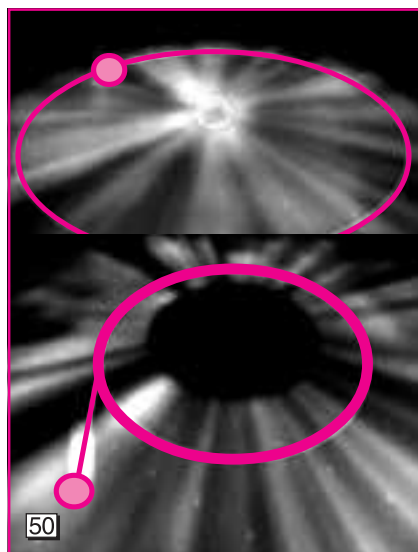
Tratatul de interzicere totală a experiențelor nucleare, adoptat de Adunarea Generală a Națiunilor Unite la 10 septembrie 1996, a fost ratificat și de România.





*INFO +
(lectură)

Informații actuale referitoare la particulele elementare (lectură)*



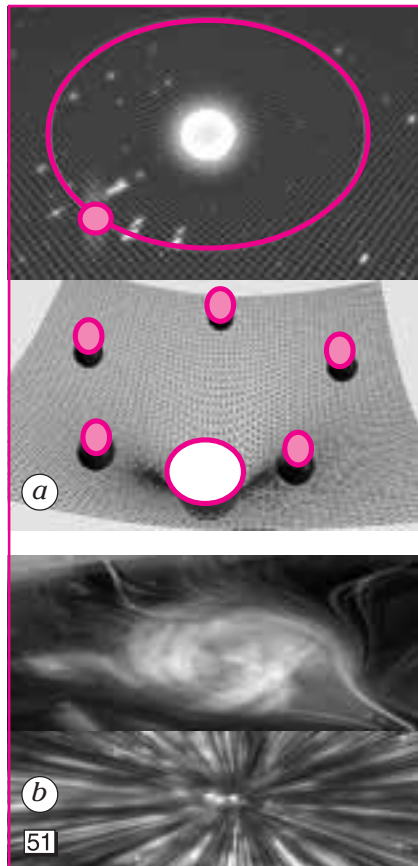
Scopul teoriilor fizicii este de a explica mai multe fenomene fizice diferite cu ajutorul unui număr redus de principii simple. Teoria gravitației unifică cerul cu pământul – prin ideea că aceleași legi guvernează și planetele în mișcarea lor și căderea pe Pământ. Imaginează-ți că brusc, Soarele dispare complet. Din teoria lui Newton rezultă că planetele ar începe brusc mișcarea în spațiu pe direcția tangentă la orbitele lor, deoarece **forța gravitațională** se considera că acționează **instantaneu** de-a lungul oricărei distanțe.

Razele Soarelui parcurg în câteva minute aproximativ 150 milioane de km până la Pământ. Deoarece nici gravitația nu se propagă mai repede decât viteza luminii, Pământul poate părăsi orbita înainte ca întunericul rezultat din dispariția Soarelui să ajungă la ochii noștri (fig. 50) ?

Einstein a susținut că cele trei dimensiuni ale spațiului și dimensiunea timpului sunt unite într-o singură structură de spațiu-timp. Deformarea sau curbarea structurii spațiu-timp, în geometria cu patru dimensiuni, creează gravitația. Pământul se menține pe orbită pentru că urmează curbura din structura spațiului cauzate de prezența Soarelui. Einstein a numit această imagine nouă a gravitației „relativitatea generală”. Catastrofa dispariției Soarelui produce unde gravitaționale care se deplasează până la Pământ, cu viteza luminii, și atunci se schimbă traiectoria. Teoria relativității generale (1916) a lui Einstein, ilustrează macrouniversul ca o țesătură elastică pe care o pot deforma și întinde stelele și planetele (fig. 51 a). Aceste deformări și curburi creează ceea ce simțim a fi gravitație. Atracția gravitațională ce ține Pământul pe orbită în jurul Soarelui este consecința faptului că planeta noastră urmează curbura și contururile pe care Soarele le creează în structura spațială. Considera chiar o structură neobișnuită a spațiului, numită „gaură de vierme” (un tunel ce poate lega regiuni îndepărtate ale spațiului, ca în fig. 51 b).

Maxwell a unificat electricitatea și magnetismul în 4 ecuații care descriu interacțiunile electrice și magnetice cu singură forță, numită **electromagnetică**.

După anul 1920, fizicienii au dezvoltat teoria numită mecanică cuantică, care putea doar să calculeze probabilitatea uneia din posibilități, la nivel atomic sau cuantic. Imaginea spațiului în care totul se comportă în mod definit este înlocuită cu o structură imprecisă a spațiului.



*după scenariul lui Brian Greene al filmului The Elegant Universe Strings theory

Mecanica cuantică descrie **forța nucleară tare** care leagă nucleonii (protonii și neutronii) în nucleul fiecărui atom și **forța nucleară slabă** cu raza de acțiune de ordinul 10^{-18}m , care permite transmutarea nucleonilor, în cazul dezintegrărilor radioactive. La nivel cuantic, forța de gravitație este neglijabilă în raport cu aceste forțe.

Găurile negre ale cosmosului sunt regiuni din zona stelelor cu o cantitate enormă de materie concentrată într-o zonă mică, cu un câmp gravitațional de intensitate așa de mare, încât nici fotonii luminii nu pot scăpa de forța sa gravitațională (fig. 52).

Einstein a încercat să unifice aceste patru forțe fundamentale într-o singură teorie, dar nu a reușit.

Forțele pot fi explicate prin particulele de forță schimbate între particule de materie. De exemplu, pentru forțele electromagnetice, această particulă de forță este fotonul. Cu cât se transferă mai repede fotonii, cu atât mai puternică este interacțiunea. Acest schimb al particulelor mesagere creează ceea ce simțim a fi forța.

Experimentele au confirmat aceste concepte noi legate de particulele elementare atât pentru forța nucleară puternică cât și pentru cea slabă.

Fizicienii S. Glashow, A. Salam și S. Weinberg au obținut premiul Nobel (1979) „pentru elaborarea teoriei de unificare a interacțiunilor slabe și electromagnetice ale particulelor elementare”, iar G. Hooft și M. Veltman (1999) „pentru lucrările teoretice în direcția unificării tuturor forțelor fizicii”.

Teoriile unificării celor patru forțe fundamentale ale naturii se bazează pe modele matematice.

Fizicienii care au studiat coliziunile particulelor microscopice cu viteze mari au descoperit noi particule rezultate: mezonul ρ , particula Ω , particula B_1 , particula B_2 , etc (fig. 53).

În toate teoriile clasice, atomii și cele mai mici particule din interiorul atomului au fost reprezentate prin mici sfere sau puncte.

În teoria standard a particulelor elementare sunt exprimate și forțele fundamentale ale naturii. Teoria standard a pus în evidență 61 de particule elementare care se transformă una în alta, în natură, ca și în acceleratoarele de mare energie.

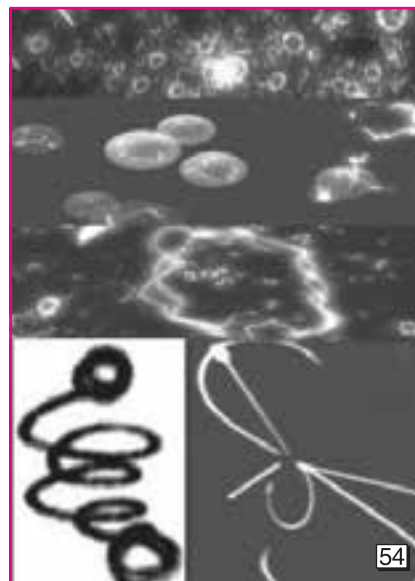
Teoria stringurilor (corzilor) pleacă de la premisa că particulele elementare sunt de fapt minuscule corzi vibrante de energie, închise sau cu capete libere (fig. 54). Dimensiunea aproximativă este 10^{-33}cm (de 10^{18} ori mai mică decât a unui proton), fiecare mod de vibrație reprezentând o particulă elementară. Dacă atomul ar fi mărit la diametrul sistemului solar, un string ar fi mărit la înălțimea unui copac!



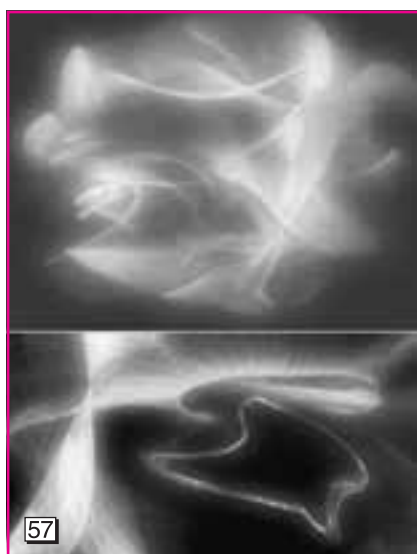
52



53



54



Așa cum corzile unui violoncel pot vibra la frecvențe diferite, generând toate sunetele muzicale, stringurile vibrează, se răsucesc și se ondulează în moduri diferite, generând toate particulele elementare (fig. 55).

Gândește-te la cele patru dimensiuni ale experiențelor obișnuite: stânga-dreapta, înainte-înapoi, sus-jos și timp. Stringurile în mișcare au nevoie de încă șase sau chiar șapte extra dimensiuni, atât de minuscul răsucite și ondulate în forme complexe, încât sunt complet invizibile (fig. 56).

Dimensiunile se asociază cu direcțiile independente în care te poți mișca, uneori numite „grade de libertate”.

Extra dimensiunile sunt înfășurate pe lungimea unei coarde. Numărul mare de dimensiuni sau grade de libertate crește complexitatea stringurilor.

Fizicianul suedez Oskar Klein sugerează să ne uităm la cablurile ce țin semaforul. De la distanță nu poți vedea grosimea, deci au o singură dimensiune. Să presupunem explorarea de aproape a fiecărui cablu, din punctul de vedere al unei furnici. Acum devine vizibilă o a doua dimensiune, care înfășoară cablul. Din punctul ei de vedere, furnica se poate mișca înainte și înapoi și de asemenea în sensul acelor ceasului sau opus lor. Klein a făcut presupunerea că țesătura Universului nostru ar fi ca suprafața unui cablu, care are atât dimensiuni extinse, cele trei pe care le cunoaștem, cât și dimensiuni mici, ondulate, atât de mici în comparație cu atomul, încât nu le putem vedea (fig. 57).

Klein a sugerat că, dacă ne-am putea micșora de miliarde de ori, am găsi dimensiunile minuscule, ondulate în fiecare punct al spațiului, la fel cum o furnică ar putea explora dimensiunile ce înconjoară un cablu.

Savanții au descoperit că există 20 de constante fundamentale care descriu caracteristicile cunoscute ale Universului. Ce anume din natură reglează atât de precis valorile acestor 20 de constante? Răspunsul ar putea fi extra dimensiunile din teoria stringurilor. Pentru că aceste configurații minuscule, ondulate, cu șase dimensiuni din teorie, fac un string să vibreze într-un mod foarte precis care produce un foton, iar un alt string să vibreze într-un alt mod care produce un electron.

Conform teoriei stringurilor, gravitonii responsabili cu gravitația, sunt ochiuri închise, fără terminații cu care să se fixeze și pot trece în alte dimensiuni, slăbind forța gravitației în raport cu celelalte forțe.

Teoria stringurilor a fost botezată „Teoria Totului”.

În anul 1984, Michael Green și John Schwarz erau convinși că teoria stringurilor era corectă, că stringurile pot descrie gravitația și celelalte forțe, deci pot unifica forțe diferite.

Fizicienii teoreticieni ca Ed Witten consideră în 1995 că extra dimensiunile adăugate permit unui string să se întindă, formând ceva ca o membrană (fig. 58a).

C Unificarea înțelegerii diferitelor forțe și particule se obține dacă se consideră că provin din diferite moduri de vibrații ale stringurilor.

Stringurile interacționează unele cu altele în spațiu și timp, rezultând particule elementare (fig. 58b). Diferitele forme de interacțiune dintre stringuri dau proprietățile fizice ale particulei. Pentru introducerea fermionilor, în această teorie trebuie să existe o simetrie specială numită supersimetria: oricărui boson îi corespunde un fermion. Această supersimetrie (cuplu boson-fermion) nu a fost observată încă în experimentele efectuate în acceleratoare de particule.

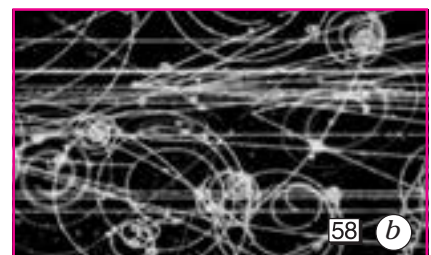
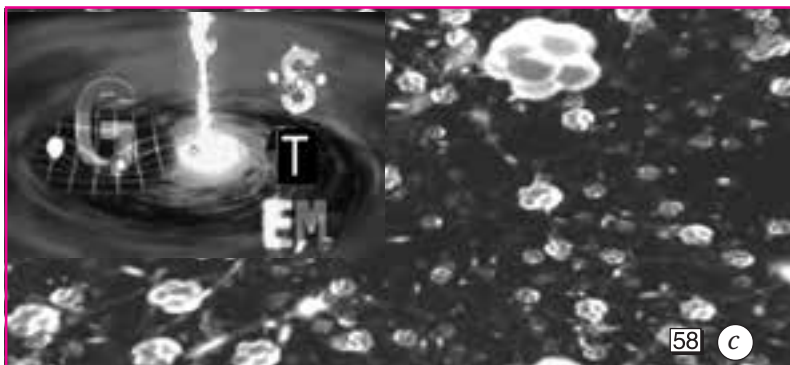
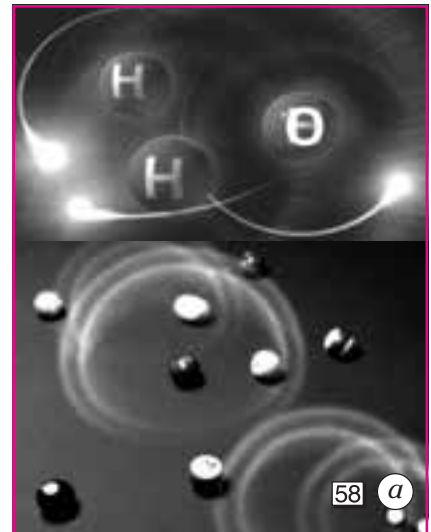
Cei care au considerat că există mai multe dimensiuni ale spațiului, au fost considerați trăsniți sau nebuni. Dacă stringurile vor fi confirmate (fig. 58c), atunci vom admite că există mai multe dimensiuni ale spațiului.

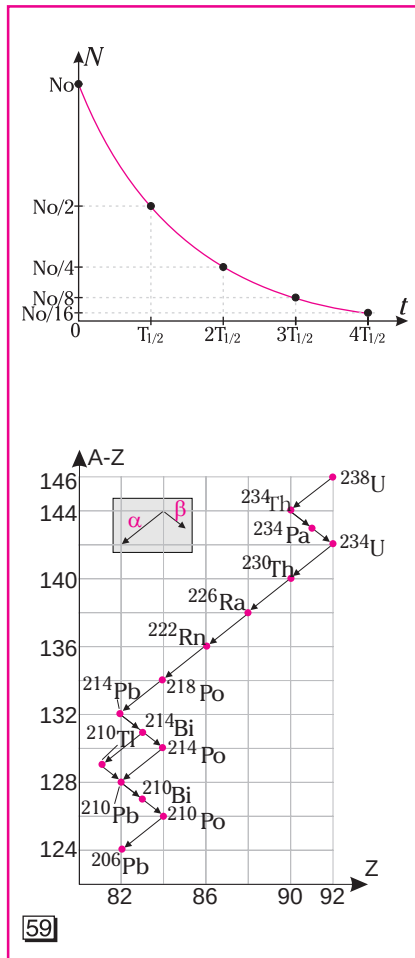
Teoria stringurilor așteaptă confirmarea experimentală.

Forța	Raza de acțiune	Particula de schimb	Intensitatea relativă
gravitațională	∞	graviton	1
electromagnetică	∞	foton	10^{37}
nucleară slabă	$< 10^{-18}\text{m}$	$W^{+/-}; Z^0$	10^{33}
nucleară tare	$< 10^{-15}\text{m}$	gluon	10^{40}



Martinus Veltman și Gerardus't Hooft au primit premiul Nobel (1999) pentru lucrările teoretice în direcția unificării tuturor forțelor fizicii.





Legile deplasării

✓ Dacă un nucleu ${}^A_Z X$ emite radiație ${}^4_2\alpha$, se obține un specimen nuclear cu numărul de masă mai mic cu patru unități și cu numărul atomic mai mic cu două unități (${}^A_Z X \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{A-4}_{Z-2} Y$).

✓ Dacă un nucleu ${}^A_Z X$ emite radiație ${}^0_{-1}\beta$, se obține un specimen nuclear cu numărul de masă nemodificat (deoarece nu este expulzat un nucleon), dar cu sarcina pozitivă mai mare cu o unitate (${}^A_Z X \rightarrow {}^0_{-1}\beta + {}^{A}_{Z+1} Y$).



Rezumat
Schemă
de sinteză

✓ Numărul de masă al nucleului A sau numărul total de nucleoni din nucleu: $A = Z + N$, unde Z – numărul atomic al elementului egal cu numărul de protoni și N – numărul de neutroni;

✓ Raza nucleului: $R = R_0 A^{1/3}$, unde $R_0 \approx 1,45 \cdot 10^{-15} \text{ m}$;

✓ Energia de legătură a nucleului de masă M_N :
$$W_{\text{leg}} = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - M_N c^2 = c^2 \Delta m;$$

✓ Echivalentul energetic al unității atomice de masă:
$$u \cdot c^2 \approx 931,5 \text{ MeV};$$

✓ Legea dezintegrării radioactive: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, unde λ – constanta radioactivă; legile deplasării sunt utile în explicarea dezintegrărilor radioactive (fig. 59); Activitatea unei substanțe radioactive: $\Lambda = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$;

✓ Timpul de înjumătățire: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$;

✓ Legi de conservare în interacțiunile nucleare: conservarea sarcinii electrice, conservarea numărului de nucleoni, conservarea impulsului;

✓ Legea de atenuare a intensității radiației γ :
$$I(x) = I_0 e^{-kx},$$
 unde k – coeficientul de atenuare liniară a intensității inițiale I_0 printr-un strat cu grosimea x .

✓ Deoarece nucleul nu conține electroni, în dezintegrarea ${}^0_{-1}\beta$ trebuie să acceptăm ipoteza că un neutron se transformă într-un proton, care rămâne în nucleu, în electronul care este expulzat din nucleu cu diferite energii și într-o particulă expulzată $\bar{\nu}$, cu masa de repaus nulă și fără sarcină electrică, numită antineutrino: ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1}\beta + \bar{\nu}$. Prin dezintegrarea ${}^0_{-1}\beta$ se obține un nuclid cu masa și energia mai mică decât a nuclidului inițial.

✓ **Fisiunea nucleară stimulată** este reacția nucleară în care un nucleu cu masă mare este ciocnit de un neutron și se divide în două nuclee mai ușoare, cu energie de legătură pe nucleon mai mare, și doi sau trei neutroni.



Atitudinea ta față de calitatea învățării contează

Atitudinea ta față de calitatea învățării contează pentru compararea evaluării juste, pe baza unor criterii cunoscute, cu autoevaluarea obiectivă la examenele următoare?

În Legea nr. 87/2006 privind asigurarea calității educației, atitudinea elevului față de educația furnizată de școală este considerată pozitivă dacă participă activ la lecții, valorifică pozitiv cunoștințele în procesul de învățare și întocmire de portofoliu individual, se autoevaluează obiectiv, are capacitate de a converti cunoștințele teoretice în competențe și abilități.

Analizează ciclul asigurării calității învățării și cercetării în Europa (fig. 60). Redactează un eseu cu acest titlu.

Obiectivele trebuie să fie: suficiente; măsurabile; realiste.

Evaluarea trebuie să fie: validă; documentată; fidelă; consecventă; autentică; măsurabilă.

Procesul planului de feedback și îmbunătățire este prezentat în figura 61.



60

Chestionar pentru portofoliul individual

1. Care este raportul între învățarea sistematică la fizică și dezvoltarea personală?

2. Care este rolul capacității de autoevaluare obiectivă la examenele următoare?

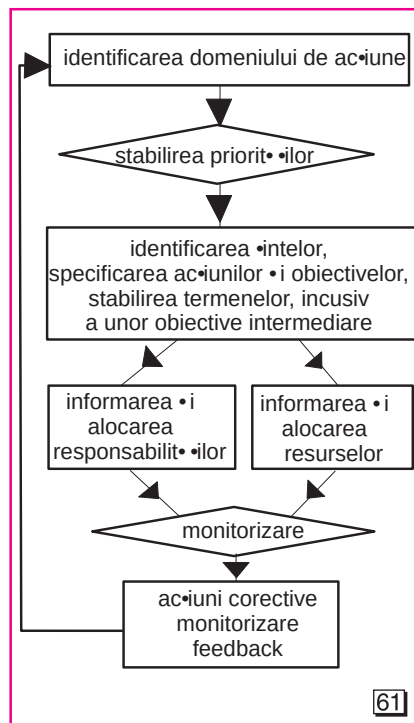
3. Parteneriatul cu profesorul de fizică sau cu altcineva asigură calitatea pregătirii tale pentru integrarea în societate?

4. Beneficiile calității învățării la fizică, menționate mai jos, sunt adevărate sau false pentru tine, ca elev?

- standarde înalte ale învățării individuale;
- creșterea capacității de ocupare a unui loc de muncă;
- egalitatea șanselor;
- informare validă în ceea ce privește oportunitățile de învățare și rutele de progres;
- implicare activă în propriul proces de învățare și îmbunătățirea continuă a acestuia;
- comentariile și opiniile elevilor sunt apreciate și respectate;
- sentimentul de proprietate asupra învățării;
- o mai bună apreciere a programelor de învățare.

5. Beneficiile calității învățării la fizică, menționate mai jos, sunt adevărate sau false pentru tine, ca partener social ?

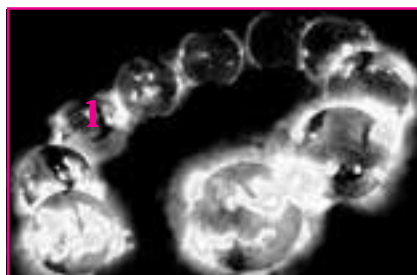
- abilități îmbunătățite de ocupare a unui loc de muncă;
- standarde mai înalte ale ofertei educaționale;
- competențe de bază mai bune;
- un nivel mai înalt al competențelor pentru atragerea investițiilor interne;
- încredere în calitatea procesului de învățare și în rezultatele acestuia.



61

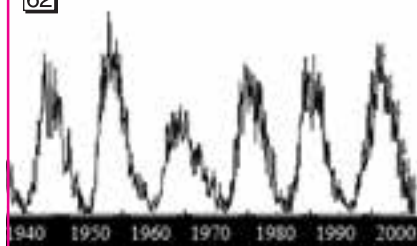


5.9. PROBLEME ȘI TESTE PROPUSE



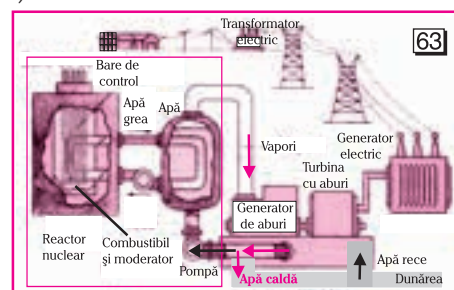
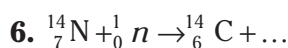
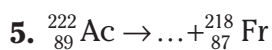
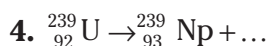
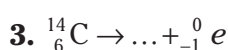
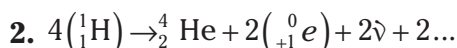
[62]

Ciclul solar



5.9.1. Probleme cu grad scăzut de dificultate

Completează spațiile libere din reacțiile nucleare, scrise simbolic, folosind legile de conservare cunoscute:



Care dintre reacțiile de mai sus sunt legate de activitatea solară și, respectiv, de reactorul nuclear (fig. [62] și [63])?

Completează spațiile libere cu termenii potriviți în itemii 7-17:

7. După ce apa a fost încălzită în reactorul nuclear, ea este pompată într-un schimbător de căldură cu serpentine, unde se generează ... care se utilizează pentru punerea în mișcare a paletelor turbinei.

8. Combustibilul fisionabil este protejat de o ... din aluminiu sau oțel inoxidabil.

9. Rolul tecilor este reținerea produșilor de fisiune, care sunt

10. Apa grea din reactor este agent termic care folosește la ... reactorului.

11. Barele de control conțin bor sau cadmiu care ... neutroni. Ele au rolul de a regla numărul de neutroni din reactor, deci și puterea acestuia (fig. [64]).

12. Barele de control mențin reactorul în stare staționară atunci când numărul de neutroni rămâne practic constant în timp. Ele pot să oprească funcționarea reactorului dacă ... zona activă a reactorului.

13. Reactorul nuclear este un sistem în care se autoîntreține o reacție de fisiune nucleară în lanț, iar energia eliberată prin fisiunea nucleelor poate fi folosită



14. Cea mai mare parte a energiei de fisiune este transportată de produsele de fisiune (nuclee și neutroni rezultați) sub formă de energie cinetică, se transferă sub formă de căldură în tecile cu combustibil fisionabil, prin frânarea produșilor de fisiune. Dacă această căldură nu ar fi preluată de agentul de răcire, acestea s-ar ... într-un interval mic de timp.

15. Pentru protejarea mediului înconjurător în cazuri de avarie, reactorul este amplasat într-o ... construită din beton armat cu oțel (fig. [65]).

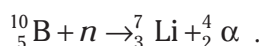
16. Sistemul de control și reglaj al reactorului trebuie să poată ... în caz de avarie (creșterea nivelului de radiații sau supraîncălzirea reactorului), înainte de a scăpa de sub control.

17. În realizarea protecției populației față de poluarea radioactivă se acordă atenție: protecției directe a oamenilor față de ... emise de reactor și față de izotopii radioactivi ce se formează în el.

18. Prin ce transformări energetice succesive se obține energie electrică din energia nucleară într-o centrală electro-nucleară?

19. Care este rolul serpentinelor prin care circulă apa grea în schimbătorul de căldură? De ce nu se utilizează pentru alimentarea turbinei chiar vaporii proveniți din apa care s-a încălzit în reactorul nuclear?

20. Neutronii interacționează cu nucleele de bor (aflat în detectoare sub formă de BF_3) în reacții de tipul:



Particulele α produse ionizează mediul traversat (fig. [66])?

5.9.2. Probleme cu grad mediu de dificultate

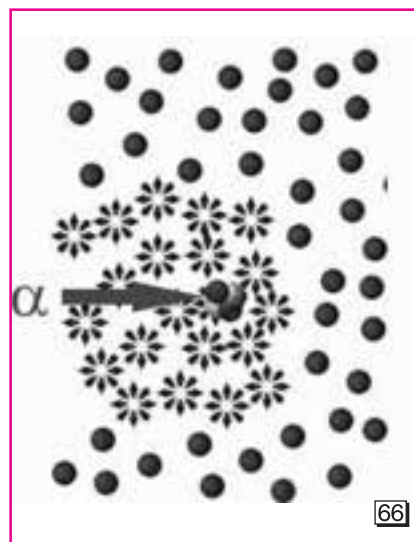
1. Raza nucleului de uraniu ${}^{238}_{92}\text{U}$ calculată cu relația $R = R_0 \sqrt[3]{A}$ este aproximativ egală cu:

- a) $9 \cdot 10^{-15} \text{ m}$; b) $8 \cdot 10^{-14} \text{ m}$;
c) $8,9 \cdot 10^{-13} \text{ m}$; d) 10^{-12} m .

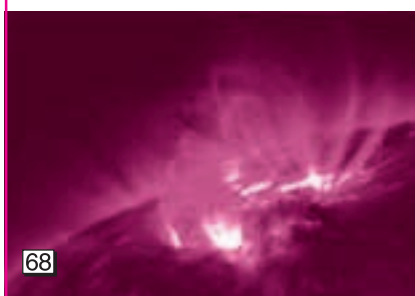
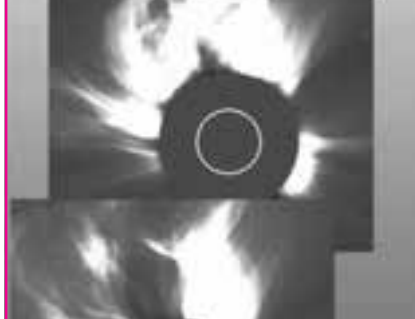
2. Densitatea medie a nucleelor are același ordin de mărime pentru toate nucleele:

- a) $10^{15} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; b) $10^{16} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
c) $10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; d) $10^{20} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Caracterizează modelul picăturii de lichid (fig. [67]).



Documentează-te și caracterizează exploziile solare reprezentate mai jos.



3. Calculează energia de legătură a nucleului de bor $^{10}_5\text{B}$, dacă masa atomică este $M_A = 10,012939 \text{ u}$, $m_H = 1,007825 \text{ u}$, $m_n = 1,008665 \text{ u}$ și vei obține o valoare apropiată de una din valorile:

- a) 87 MeV; b) 76 MeV; c) 65 MeV; d) 54 MeV.

4. Calculează energia necesară pentru desfacerea nucleului de oxigen $^{16}_8\text{O}$ în patru particule $^4_2\alpha$, dacă se consideră $M_{\text{oxigen}}c^2 = 14899,3 \text{ MeV}$ și $M_\alpha c^2 = 3728,4 \text{ MeV}$ și vei obține una din valorile:

- a) $E_{\text{leg}} \approx 14,3 \text{ MeV}$; b) $E_{\text{leg}} \approx 1,43 \text{ MeV}$;
c) $E_{\text{leg}} \approx 7,6 \text{ MeV}$; d) $E_{\text{leg}} \approx 76 \text{ MeV}$.

5. Calculează energia de legătură pe nucleon a nucleului de uraniu $^{239}_{92}\text{U}$ cu masa atomică $M_A = 239,054 \text{ u}$ și vei găsi una din valorile:

- a) 8,9 MeV; b) 8,3 MeV; c) 7,6 MeV; d) 6,7 MeV.

6. Defectul de masă la fuziunea a patru nuclee de hidrogen într-un nucleu de heliu este $\Delta m_1 = u(4 \cdot 1,007276 - 4,002604)$. Energia totală eliberată la formarea masei $m = 1 \text{ g}$ nuclee de heliu

$$E_{\text{tot}} = \frac{m}{\mu} N_A (\Delta m_1) u c^2 = \frac{1}{4,002604} 6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,0254 \cdot 931,5 \text{ (MeV)}$$

are valoarea, obținută prin calcul:

- a) $E_{\text{tot}} \approx 3,6 \cdot 10^{24} \text{ MeV}$; b) $E_{\text{tot}} \approx 3,6 \cdot 10^{23} \text{ MeV}$;
c) $E_{\text{tot}} \approx 2,36 \text{ MeV}$; d) $E_{\text{tot}} \approx 2,36 \cdot 10^3 \text{ MeV}$.

7. Energia de legătură pe nucleon în nucleul de plumb $^{208}_{82}\text{Pb}$ cu masa atomică $M_A = 207,976650 \text{ u}$ se calculează cu

relația cunoscută $B = \frac{E_{\text{leg}}}{A}$, unde $E_{\text{leg}} = c^2 \Delta m$; $u c^2 = 931,5 \text{ MeV}$

și $\Delta m = Z m_{\text{electron}} + Z m_{\text{proton}} + (A - Z) m_n - M_A = 1,92079 \cdot u$. Valoarea aproximativă este:

- a) $B = 8,9 \text{ MeV}$; b) $B = 8,6 \text{ MeV}$;
c) $B = 7,9 \text{ MeV}$; d) $B = 6,9 \text{ MeV}$.

8. Radiația γ cu energia $E = 0,5 \text{ MeV}$ are valoarea frecvenței ν egală cu:

- a) $1,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$; b) $1,2 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$;
c) $1,2 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$; d) $1,2 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$.

9. Particulele α care ies dintr-un ciclotron aflat într-un câmp magnetic cu inducția magnetică $B = 1,7 \text{ T}$ au raza maximă a traiectoriei $R = 0,5 \text{ m}$ și viteza:

- a) $2 \cdot 10^4 \text{ m/s}$; b) $3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$; c) $4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$; d) $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

10. Stratul de apă care reduce la jumătate intensitatea I_0 a radiațiilor γ are coeficientul de atenuare $k = 0,047 \text{ cm}^{-1}$ în expresia $I(x) = I_0 e^{-kx}$, iar grosimea x are valoarea aproximativă:

- a) 1,47 cm; b) 14,7 cm; c) 147 cm; d) 14,4 m.

11. Structura protono-neutronică a nucleelor explică dezintegrarea ${}^0_{-1}\beta$, cu toate că nucleele nu au în componență asemenea particule, deoarece:

- a) neutronul din nucleu se dezintegrează în: proton, electron și antineutrino;
b) radiațiile β au un spectru discret de energii;
c) protonii din nucleu se pot dezintegra în: neutron, pozitron sau antineutrino.

12. Ca urmare a emisiilor de radiație γ , nucleul rezultat are:

- a) același Z și același A cu nucleul inițial;
b) numărul de neutroni modificat cu 1;
c) numărul Z mai mare cu 2;
d) starea energetică nemodificată.

13. În modelul nucleului în straturi, nucleonii sunt grupați pe nivele succesive de energii diferite, la fel ca electronii în atom (fig. 69). Pe un nivel energetic nu pot sta decât cel mult:

- a) 2 nucleoni identici; b) 3 nucleoni;
c) 4 nucleoni; d) 8 nucleoni identici.

14. Într-un spectrometru de masă sunt selectați ionii de bor, simplu ionizați și accelerați sub o tensiune U_a (fig. 70). Razele de curbură, produse de un câmp magnetic transversal de inducție B , observate într-o cameră cu ceață sunt R_1 și R_2 . Raportul maselor izotopilor de bor (neglijând masele electronilor) este:

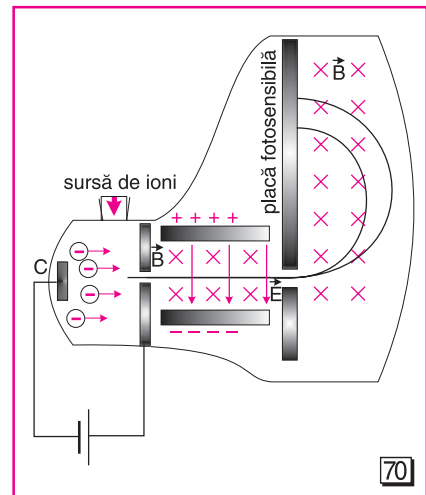
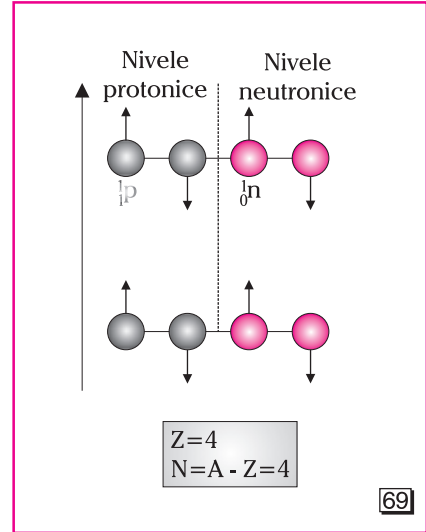
- a) $\frac{m_1}{m_2} \approx \frac{R_1^2}{R_2^2}$; b) $\frac{m_1}{m_2} \approx \frac{R_1 B}{2 R_2 U}$;
c) $\frac{m_1}{m_2} \approx \frac{R_2 B}{R_1 U}$; d) $\frac{m_1}{m_2} \approx \frac{R_2 B}{R_1 e U}$.

15. Dacă doza biologică $H_1 = 10 \mu\text{Sv}$ este primită de pilotul de cursă lungă la un zbor (fig. 71), atunci într-un an poate efectua, fără să depășească doza biologică anuală permisă $H_{\text{max}} = 1 \text{ mSv}$, numărul maxim de curse:

- a) 10; b) 100; c) 500; d) 1000.

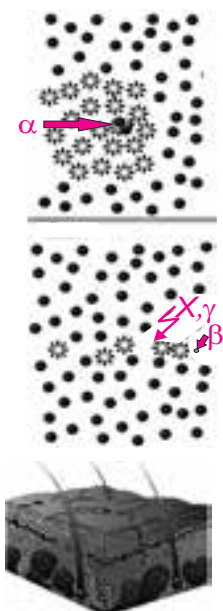
16. Energia degajată la fisiunea unui nucleu ${}^{235}_{92}\text{U}$ are valoarea $E_1 = 200 \text{ MeV}$. Energia degajată prin fisiunea completă a unei mase $m = 1 \text{ kg}$ de uraniu este:

- a) $8,1 \cdot 10^{10} \text{ J}$; b) $8,1 \cdot 10^{11} \text{ J}$; c) $8,2 \cdot 10^{13} \text{ J}$; d) $8,2 \cdot 10^{15} \text{ J}$.

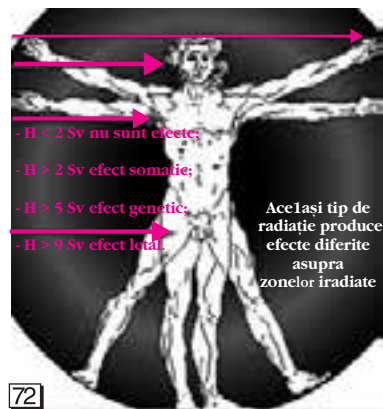


Documentează-te și scrie eseu „Efectele radiațiilor”. În obiectiv ai iradierile:

- naturale;
- medicale (radiografii, terapii, investigații);
- profesionale;
- accidentale.



Țesuturi/organe	Ponderea dozei
Plămâni	0,12
Sâni	0,15
Testicule/ovare	0,25
Măduvă osoasă	0,23
Oase	0,03
Ficatul	0,06
Tiroida	0,03
Toate celelalte	0,25



17. Activitatea $\Lambda = \lambda N$ a unui gram de ^{226}Ra , care emite radiații α , având perioada de înjumătățire $T_{1/2} = 1590$ ani și $\lambda = 1,38 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$, este:

- a) $\Lambda = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$; b) $\Lambda = 3,7 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$;
c) $\Lambda = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; d) $\Lambda = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

18. Activitatea Λ a unei mase m de substanță radioactivă cu constanta radioactivă λ și cu numărul de masă A se exprimă prin relația:

- a) $\Lambda = \lambda \frac{m N_{\text{Avogadro}}}{A}$; b) $\Lambda = \lambda \frac{A N_{\text{Avogadro}}}{m}$;
c) $\Lambda = \lambda \frac{A}{m N_{\text{Avogadro}}}$; d) $\Lambda = \lambda \frac{m}{A N_{\text{Avogadro}}}$.

19. Perioada de înjumătățire a izotopului $^{14}_6\text{C}^*$ este 5700 ani. Activitatea nucleară este 1 Ci pentru masa:

- a) $m = 1 \text{ kg}$; b) $m = 1 \text{ g}$; c) $m = 2 \text{ mg}$; d) $m = 0,2 \text{ mg}$.

20. Densitatea constantă $\rho \approx 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a materiei nucleare implică incompresibilitatea acesteia, iar caracterul de saturație al forțelor nucleare este răspunzător pentru forma sferică a nucleului. Aceste argumente sugerează modelarea nucleului cu:

- a) o bilă rigidă; b) o bilă elastică;
c) o picătură de lichid; d) păturile atomilor.

21. Nucleele cu numerele magice 2, 8, 20, 28 pentru protoni sau neutroni sunt: ^4_2He , $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$, $^{48}_{20}\text{Ca}$, $^{58}_{28}\text{Ni}$, $^{208}_{82}\text{Pb}$. Abundența izotopică indică:

- a) instabilitatea nucleelor; b) stabilitatea nucleelor;
c) dezintegrarea α ; d) dezintegrarea β .

22. O particulă $^4_2\alpha$ pătrunde într-o cameră cu ceață (Wilson), perpendicular pe câmpul magnetic de inducție B . Cunoscând raza R a traiectoriei circulare, parcursul d al particulei și energia W_1 necesară formării unei perechi de ioni, numărul de perechi de ioni N care se formează pe unitatea de lungime l este exprimat prin relația:

- a) $\frac{N}{l} = \frac{q^2 B^2 R^2}{m d W_1}$; b) $\frac{N}{l} = \frac{d W_1}{q^2 B^2 R^2}$;
c) $\frac{N}{l} = \frac{q B R W_1}{d}$; d) $\frac{N}{l} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2 m d W_1}$.

23. În procesele de fisiune și de fuziune, interacția este de tipul:

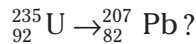
a) nucleară tare; b) nucleară slabă; c) electromagnetică.

24. Seria (familia) radioactivă a uraniului cuprinde nuclizii radioactivi instabili care se formează succesiv, în urma dezintegrărilor alfa sau beta, începând cu izotopul $^{238}_{92}\text{U}$, cap de serie, până la izotopul stabil de plumb $^{206}_{82}\text{Pb}$ (fig. 73).

Izotopul $^{238}_{92}\text{U}$ există în Pământ de la formarea lui, deoarece are perioada de înjumătățire foarte mare ($T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ ani). Deoarece numerele de masă ale nuclizilor diferă printr-un multiplu de patru, înseamnă că numărul de dezintegrări α este

$$N_{\alpha} = \frac{238 - 206}{4} = 8. \text{ Prin opt dezintegrări alfa s-ar ajunge la}$$

numărul de ordine $Z = 92 - (8 \cdot 2) = 76$. Prin fiecare dezintegrare beta crește cu o unitate numărul de ordine, deci numărul dezintegrărilor β este $N_{\beta} = 82 - 76 = 6$. Prin câte dezintegrări se realizează seria thoriului $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$ și seria actiniului



- a) 6α ; 4β și 7α ; 4β ; b) 6α ; 3β și 7α ; 3β ;
c) 6α ; 2β și 6α ; 4β ; d) 8α ; 6β și 6α ; 4β .

25. În păturile superioare se generează constant izotopul radioactiv $^{14}_6\text{C}^*$, cu perioada de înjumătățire $T_{1/2} = 5700$ ani, prin bombardarea azotului $^{14}_7\text{N}$ cu neutronii din radiația cosmică ($^{14}_7\text{N} + {}^1_0n \rightarrow ^{14}_6\text{C}^* + {}^1_1p$). Din bioxidul de carbon

plantele rețin în structura lor $^{14}_6\text{C}^*$ și $^{12}_6\text{C}$. Plantele moarte care intră în compoziția obiectelor arheologice permit determinarea vârstei lor prin măsurarea activității specifice a radionuclidului de carbon conținut de obiectul arheologic.

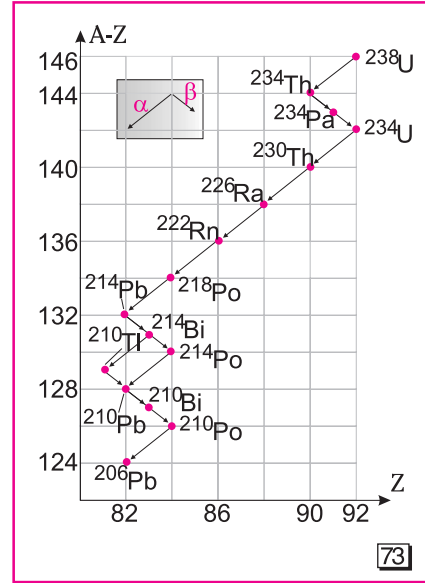
Ce vârstă are un obiect arheologic carbonizat dacă $\Lambda = 7,5$ dezintegrări/g · minut, unde $\Lambda = \Lambda_0 e^{-\lambda t}$, iar la o substanță vie $\Lambda_0 = 15$ dezintegrări/g · minut?

- a) $t \approx 1000$ ani; b) $t \approx 1600$ ani; c) $t = 2600$ ani; d) $t = 5700$ ani.



26. Completează spațiile libere din tabelul de mai jos:

Interacțiuni prin	Particule de schimb	Domeniu de acțiune
forțe ...	gluoni	nucleu, nucleoni
forțe ...	fotoni	atom, radiație
forțe ...	bozoni Z, W, W^+ W^-	radioactivitate β
forțe ...	gravitoni	sisteme planetare



P

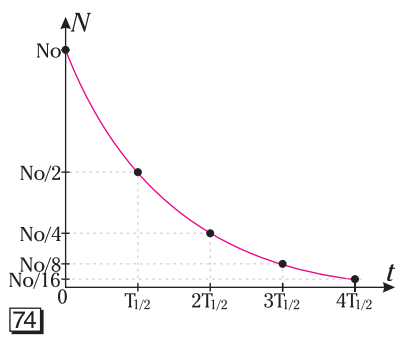
Redactează eseul „Viața fizicienilor poate fi un model de urmat”, folosind următorul plan de idei:

- a) au ajuns la glorie științifică prin propria lor muncă;
- b) au fost pasionați de cunoaștere;
- c) nu au urmărit interese personale și recompense materiale;
- d) în final au obținut și recompense materiale.



1a; 2c; 3c; 4a; 5c; 6a; 7b; 8d; 9c; 10b;
11a; 12a; 13a; 14a; 15b; 16c; 17a; 18a;
19d; 20c; 21b; 22d; 23a; 24a; 25d.

5.9.3. Test pentru autoevaluare cu grad scăzut de dificultate



1. Determină de câte ori scade numărul nucleelor radioactive dintr-o probă după un interval de timp de 2 ori mai mare decât timpul de înjumătățire (fig. 74).

2. Considerăm un nucleu de beriliu ${}^8_4\text{Be}$. Calculează în MeV, energia de legătură a nucleului de ${}^8_4\text{Be}$, cunoscând $m_n = 1,008665u$; $m_H = 1,007825u$; $m_{\text{Be}} = 8,00538u$ și $uc^2 = 931,5 \text{ MeV}$.

3. Considerăm un nucleu de aluminiu ${}^{27}_{13}\text{Al}$. Calculează în MeV, energia de legătură a nucleului de ${}^{27}_{13}\text{Al}$, cunoscând $m_n = 1,008665u$; $m_H = 1,007825u$; $m_{\text{Al}} = 26,981535u$ și $uc^2 = 931,5 \text{ MeV}$.

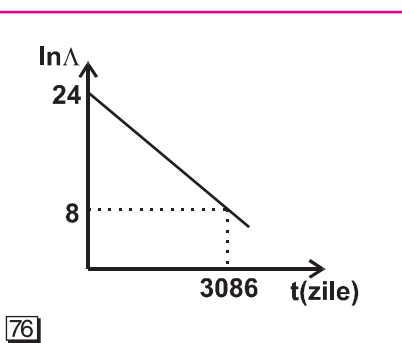
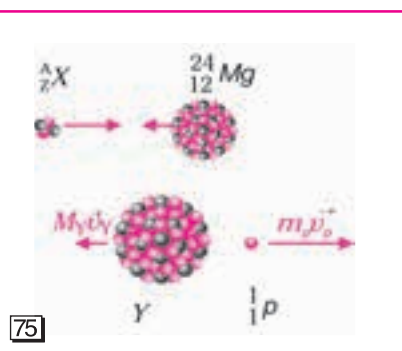
4. Prin bombardarea nucleului de ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ cu nuclee X, (fig. 75) are loc reacția nucleară ${}^{24}_{12}\text{Mg} + X \rightarrow {}^1_1p + {}^{27}_{13}\text{Al}$. Se consideră $m_{\text{Mg}} = 23,985044u$; $m_X = 4,002604u$; $m_p = 1,007825u$; $m_{\text{Al}} = 26,981535u$; $1uc^2 = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ J}$. Calculează energia de reacție.

5. Graficul alăturat a fost obținut prin măsurarea activității Λ a unei surse radioactive într-un interval de timp. Determină, cu ajutorul graficului (fig. 76), constanta de dezintegrare a sursei.

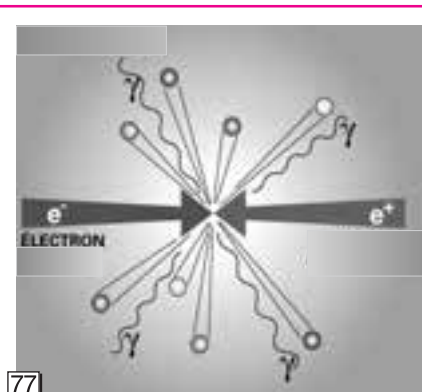
6. Calculează, cu ajutorul graficului de la problema 5, activitatea inițială a sursei. ($e^{12} = 1,6 \cdot 10^5$).

7. Se consideră reacția nucleară ${}^{23}_{11}\text{Na}(p, X){}^{20}_{10}\text{Ne}$. Calculează numărul de neutroni din nucleul X.

8. Comentează reacția de anihilare din figura 77.



- de 4 ori; 2. $W_{\text{leg}} = 56,43 \text{ MeV}$;
- $W_{\text{leg}} = 224,96 \text{ MeV}$;
- $Q = -2,568 \cdot 10^{-13} \text{ J}$; reacția este endoenergetică; 5. $\lambda = 6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ (determinare cu panta drepte);
- $\Lambda_0 = 2,56 \cdot 10^{10} \text{ dez/s}$ (valorile de pe grafic se înlocuiesc în expresia legii dezintegrării);
- $N = A - Z$; $N = 2$.



5.9.4. *Test recapitulativ cu grad mediu de dificultate

1. O particulă X cu energia cinetică E_c ciocnește frontal un nucleu de litiu aflat în repaus (fig. 78). Ecuația procesului este: $X + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2\alpha$.

a) Identifică particula X din reacție.

b) Exprimă energia rezultată din reacție, presupunând că ambele particule emise au aceeași viteză. Se cunosc: masele m_X , m_{Li} , m_α și viteza luminii în vid.

2. Un nucleu ${}^{12}_5\text{B}^*$ emite spontan un electron, e^- și o particulă antineutrino, $\bar{\nu}$, transformându-se într-un nucleu Y, (fig. 79).

Prin transformarea unui neutron într-un proton (${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0\beta + \bar{\nu}$), după ce sunt expulzați din nucleu un electron și particula $\bar{\nu}$, numită antineutrino, se ajunge în starea cu 6 protoni și 6 neutroni, cuplați câte doi, pe nivelele energetice cele mai mici. Se eliberează energia $\Delta E = c^2(m_B - m_C)$.

Scrie simbolic relația care descrie acest proces.

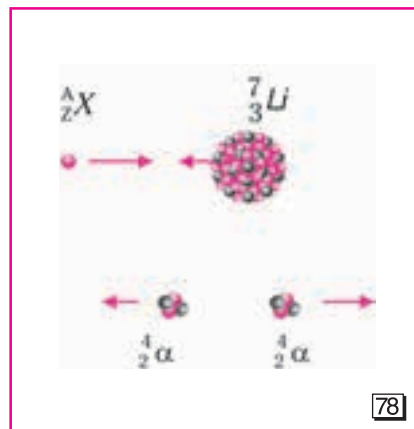
3. Se cunosc: $R_0 = 1,45 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ și $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Determină:

a) numărul de neutroni ai nucleului de ${}^{27}_{12}\text{Mg}$ și raza acestuia;

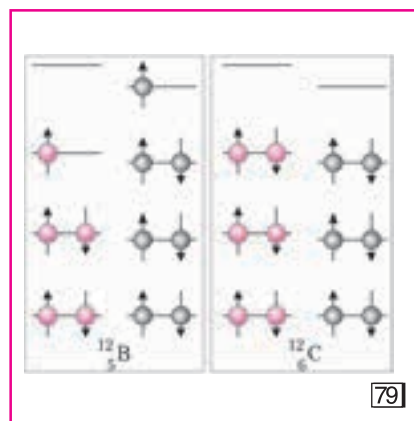
b) densitatea materiei nucleare aproximând masa nucleului, exprimată în unități atomice de masă, cu numărul de masă.

4. Dacă scrii o expresie a energiei de reacție în cazul reacției nucleare $X(a,b)Y$, precizează condiția ca această reacție să fie exoenergetică.

5. Constanta de dezintegrare λ_A a unei surse radioactive A este de două ori mai mare decât constanta de dezintegrare λ_B a unei surse B. Sursa A are la un moment dat activitatea de patru ori mai mare decât a sursei B. Exprimă timpii de înjumătățire ai surselor A și B, în funcție de λ_B .



78



79



1. a) $X = {}^1_1p$;

b) $Q = (m_H + m_{\text{Li}} - 2m_\alpha) c^2$;

2. Nuclidul ${}^{12}_5\text{B}^*$ obținut artificial este

instabil: ${}^{12}_5\text{B}^* \rightarrow {}^0_{-1}\beta + {}^{12}_6\text{C} + \bar{\nu}$;

3. a) $N=15$; $R = 4,35 \cdot 10^{-15} \text{ m}$;

b) $\rho_{\text{nucleu}} = \frac{3u}{4\pi R_0^3}$;

$\rho_{\text{nucleu}} = 1,3 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;

4. $Q > 0$; 5. $T_A = \frac{\ln 2}{2\lambda_B}$; $T_B = \frac{\ln 2}{\lambda_B}$.



Armele nucleare de fisiune. Efectele utilizării armamentului nuclear și accidentelor nucleare
Fragmente din „Istoria bombei atomice” de Castellani Gigante (lectură)



Irène Joliot-Curie și Frédéric Joliot
 (1935 – premiul Nobel la chimie) pentru descoperirea radioactivității artificiale.



James Chadwick – premiul Nobel
 (1935) pentru descoperirea neutronului.

În ianuarie 1934, fizicianul francez Frédéric Joliot și soția sa Irène Curie anunță descoperirea radioactivității artificiale, bombardând cu particule alfa atomii de aluminiu, bor, fosfor. Prin bombardarea cu particule alfa, un atom stabil poate fi transformat într-unul instabil, devenind radioactiv, deoarece se modifică structura și stările energetice ale atomilor obișnuți. Primind Premiul Nobel împreună cu soția lui, Frédéric Joliot a spus: „se poate considera că oamenii de știință care pot crea și distruge elemente după bunul lor plac vor reuși să realizeze formațiuni nucleare, cu caracter exploziv, care pot elibera o cantitate enormă de energie utilizabilă.”

Cu trei ani înainte, englezul Chadwick descoperise existența neutronului, particula care, neavând nici o sarcină electrică, nu era respinsă de nucleu și avea o putere de penetrație cam de 10.000 de ori mai mare decât cea a unei particule alfa. Neutronii nu sunt emiși spontan de substanțele radioactive, ci prin bombardarea anumitor elemente cu particule alfa. Se obține un neutron la fiecare 100.000 de particule alfa folosite.

Fermi se hotărăște să repete experiența soților Curie folosind particule alfa pentru a obține o sursă de neutroni cu care să bombardeze atomii și să provoace, în felul acesta, radioactivitate și fisiune nucleară.

„În 1939, vestea descoperirii fisiunii nucleare – povestește Alexander Sachs – a pus pe gânduri o serie de oameni de știință, ca și pe cei preocupați de implicațiile acestei descoperiri în arta războiului.” Apare posibilitatea de a provoca și menține o reacție în lanț – fenomen prevăzut teoretic de Fermi, Szilard și de Joliot – prin bombardarea nucleelor atomilor de uraniu cu neutroni încetiniți. Soții Joliot-Curie hotărâseră să folosească deuteriu sau apă grea pentru încetinirea neutronilor. În toamna anului 1940, uzinele producătoare de apă grea de la Rjukan (Norvegia) au fost rechiziționate de Wehrmacht pentru construirea unei bombe atomice. Marea familie a fizicienilor încetase să mai existe în 1940, deoarece oamenii de știință militau în tabere opuse...

La 11 octombrie 1939, Alexander Sachs i-a înmănat președintelui Roosevelt scrisoarea lui Einstein, însoțită de o introducere redactată de el, în care arăta temerile și bănuielile fizicienilor aflați în America în legătură cu progresele germanilor în domeniul atomic, subliniind că era absolut necesar să se întreprindă „ceva”.

La sfârșitul acelei întrevederi, președintele l-a chemat de urgență pe secretarul care se ocupa de problemele strict secrete, generalul Watson, spunându-i că „trebuie să acționăm de urgență”.

La 19 octombrie, Einstein a primit răspunsul președintelui: „Este de datoria noastră să construim acea armă cât mai repede, pentru a scurta la maximum războiul și a-i da toate întrebunțările adecvate în timp de pace”. Această hotărâre îi lega de acum înainte de guvernul american pe fizicienii emigrați din Europa. Era primul act din proiectul Manhattan, Los Alamos.

În dimineața zilei de 7 decembrie 1941, o numeroasă escadrilă de avioane japoneze își face apariția deasupra bazei navale americane de la Pearl Harbor (insulele Hawaii). Cel de-al doilea război mondial începea și pentru America.

La 6 decembrie, cu o zi înainte de acest atac, fizicianul Vannevar Bush comunicase colegilor săi hotărârea președintelui Roosevelt de a se da o dezvoltare maximă cercetărilor nucleare.

În 1942, Roosevelt și Churchill hotărăsc transferarea în Statele Unite a tuturor fizicienilor atomiști disponibili. La 17 iunie 1942, Bush îi prezintă lui Roosevelt un raport detaliat în care arată că este posibilă fabricarea cu ajutorul energiei nucleare a unei arme hotărâtoare pentru ducerea războiului prin transformarea programului de cercetare științifică într-unul de construire a unei arme, de a pune întregul proiect nuclear sub controlul unui departament al armatei condus de colonelul James Marshall.

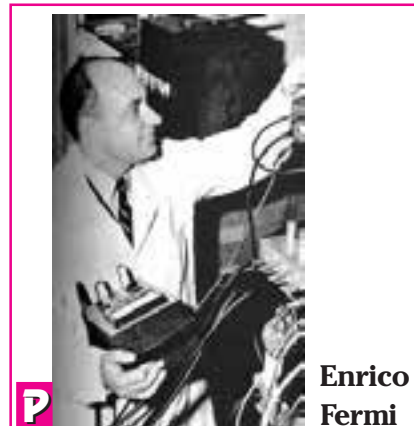
Proiectul Manhattan a fost condus de generalul Groves și fizicienii Oppenheimer, Bush, Fermi și Wigner.

Cercetările lui Fermi aveau să se concretizeze în multe luni de muncă asiduă în sala de sub stadionul din Chicago. Reactorul lui a fost realizat din plăci de grafit extrem de pur, între care fuseseră dispuși, la intervale regulate, o serie de cilindri de uraniu. Trecând prin grafit, neutronii își încetineau acțiunea, putând, în felul acesta, să scindeze nucleele atomilor de uraniu și să producă reacții în lanț. Grafitul era numit „moderator” și îndeplinea aceeași funcție pe care o avea apa grea în reactoarele proiectate de Joliot-Curie și Heisenberg.

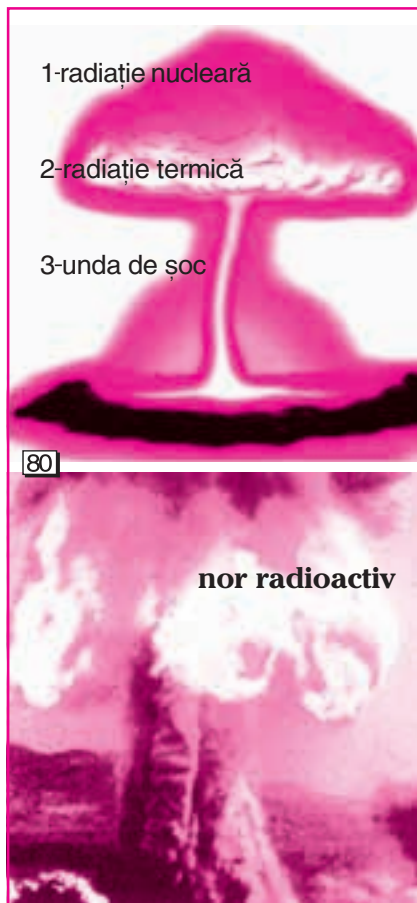
Pentru controlarea sau întreruperea reacției s-a recurs la niște bare de cadmiu, care puteau să absoarbă neutronii eliberați. Era suficient să se scoată aceste bare pentru a declanșa reacția și să fie introduse din nou pentru a o întrerupe.

Experiența a servit pentru a demonstra tuturor că reacția în lanț era posibilă.

Fermi și colaboratorii săi erau preocupați de consecințele practice ale reacției în lanț, așa că toți au sărbătorit evenimentul „cu inima grea”.



Eugene Paul Wigner – premiul Nobel (1963) pentru „contribuțiile lui la teoria nucleului atomic și a particulelor elementare”



La 23 iulie 1945 se dă ordinul de lansare a bombelor asupra Japoniei:

„Grupul mixt 509 din cadrul Armatei a XX-a aeriene va lansa, după data de 3 august 1945, prima bombă specială, imediat ce starea timpului va permite bombardamentul în condiții de vizibilitate, asupra unuia dintre următoarele obiective: Hiroshima, Kokura, Niigata și Nagasaki. Aeronava care va duce bomba va fi însoțită de încă un aparat care va transporta personalul științific, militar și civil din cadrul Departamentului de Război, cu scopul de a constata și a înregistra efectele exploziei bombei. Avioanele de observație se vor afla la multe mii de kilometri de punctul de lansare a bombei.” De la momentul exploziei trecuseră doar câteva minute. La unsprezece mii de kilometri de punctul lansării, două unde de șoc au lovit una după alta avionul „Enola Gay”, zguduindu-l puternic. Căpitanul Robert A. Lewis a întors capul ca să vadă ce se întâmplă. „Dumnezeule, ce am făcut...!”, a spus el.

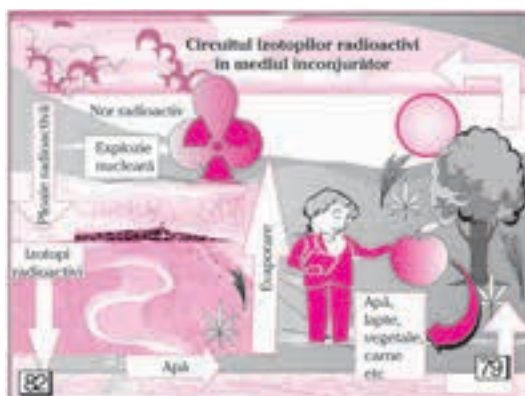
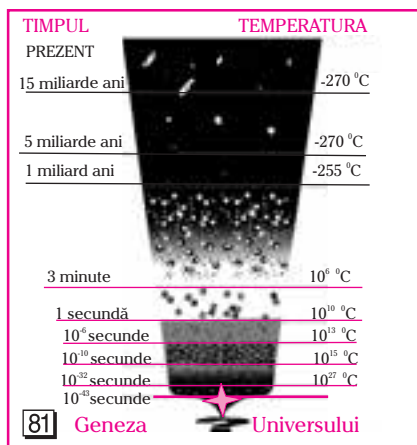
Efectele somatice constatate: depresii hematopoietice, sterilitate, tulburarea vederii, căderea părului, scurtarea vieții și apariția cancerului epitelial și pulmonar.

Până în anul 1963, marile puteri au efectuat sute de teste nucleare în atmosferă și ulterior subterane. Energia eliberată în testele efectuate a fost de câteva ori mai mare decât a tuturor explozivilor folosiți în al doilea război mondial. Cele mai puternice bombe testate au fost de mii de ori mai puternice decât cele din 1945. În anul 1963, radionuclizii proveniți de la testele cu arme nucleare în emisfera nordică au produs o iradiere suplimentară anuală de 430 mSv pe individ. După acest an, valoarea iradierii suplimentare a scăzut substanțial, până la explozia centralei de la Cernobâl.



1. Scrie un eseu structurat pe ideile sugerate de fotografiile alăturate.

2. Redactează un referat în care să prezinți utilizarea radiațiilor emise de izotopi (radioterapia, radiografia, iradierea alimentelor).



CONSTANTE IMPORTANTE

Numele mărimii	Simbolul	Valoarea
Viteza luminii în vid	c	$2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Sarcina electronului	$-e$	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masa de repaus a electronului	m_e	$9,10 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$
Constanta lui Planck	h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constanta lui Boltzmann	k	$1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Numărul lui Avogadro	N_A	$6023 \cdot 10^{23} \text{ molecule} \cdot \text{mol}^{-1}$
Constanta universală a gazelor	R	$8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Presiunea atmosferică normală	$p_0 = 1 \text{ atm}$	$1,013 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
Volumul molar la $t_0 = 0^\circ\text{C}$ și $p_0 = 1 \text{ atm}$	V_{0m}	$22,415 \text{ litri} \cdot \text{mol}^{-1}$
Constanta universală a gravitației	K	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
Masa atomului de hidrogen neutru	m_{H}	$1,007825 \text{ u}$
Masa protonului	m_p	$1,007277 \text{ u}$
Masa neutronului	m_n	$1,008665 \text{ u}$
Constanta lui Rydberg	R	$1,097373 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$
Unitatea atomică de masă (u.a.m.)	u	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
$c^2 \cdot 1 \text{ u.a.m.}$	$c^2 \cdot u$	$931,5 \text{ MeV}$



MĂRIMI FIZICE FUNDAMENTALE ȘI DERIVATE

Mărimea	Simbolul	Unitatea S.I	Denumirea
lungimea,distanța	L, d	m	metru
masa	m	kg	kilogram
timp	t	s	secunda
temperatura termodinamică	T	K	kelvin
intensitatea curentului electric	I	A	amper
cantitatea de substanță	$\tilde{\nu}$	mol	mol
intensitatea luminoasă	I	cd	candela
viteza	v	m/s	
acclerația	a	m/s ²	
forța	F	kg m/s ²	N-newton
lucrul mecanic	L	N m = m ² kg s ⁻²	J-joule
energia	W, E	N m	J-joule
puterea	P	J/s = m ² kg s ⁻³	W-watt
lungimea de undă	λ	m	
frecvența	$\tilde{\nu}, f$	s ⁻¹	Hz-hertz
impulsul	p	kg m/s	

... Completează tabelul cu toate celelalte mărimi fizice derivate ...

Bibliografie

- Ardley, N., Bates, J., Hemsley, W., Lafferty, P., Parker, S., Twist, C., *Enciclopedia Științelor*, Editura Teora, 1998
- Bărbulescu, N., *Introducere în teoria relativității*, Editura Știința pentru toți, 1980
- Bunget, I. și colectiv, *Compendiu de fizică*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988
- Burcin, A., Lascu, G., *Teste de fizică, Bacalaureat 2002*, Editura Humanitas Educațional, 2002
- Chiorcea, N., *Fizicienii laureați ai premiului Nobel*, Editura Teora, 1998
- Chirleşan, G., Rusu, O., *Ghid de evaluare la fizică*, Serviciul Național de evaluare și examinare M.E.N., Trithemius Media, București, 1999
- Crețu, T., *Fizică*, Editura Tehnică, București, 1993
- Cursul de fizică Berkeley*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
- Dima, I. și colectiv, *Dicționar de fizică*, Editura Enciclopedică Română, București, 1972
- Durnadeau, J. - P., Bramand, P., Caillet, D., Comte, M. - J., Faye, P., Themassier, G., Eby, D., *Physical science*, Macmillan Publishing Company New York, Collier Macmillan Publisher, London, 1987
- Dumielles, J.-Ch., Mercier, B., *Physique*, 2^e, Editions Belin, Paris, 1987
- ELWE – Echipamente didactice – TEILKATALOG 2-11 Germany – reprezentanța în România - fax 01-3229346; elwerom@fx.ro
- Epstein, L. C., *Gândiți fizica!*, ALL Educațional, București, 1995
- Feynman, R. P., *Fizica modernă*, Editura Tehnică, București, 1970
- Hallyday, D., Resnick, R., *Fizică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975
- Iordache, D., Pop, R., *Culegere de probleme de fizică*, Editura Radical, Craiova, 1997
- Jones, E., Childers, R., *Physics*, McGraw – Hill Higher Education, Boston, 2000
- Negrescu, H., *De la relativitatea clasică la teoria relativității*, Editura Albatros, 1988
- Ohanian, H.C., *Physics*, W-W-Norton & Company, New York-London, Copyright 1985
- Popescu, A. și colectiv, *Probleme de fizică pentru clasele IX-XII*, Editura Petron, București, 2000
- Rusu, O., Galbură, A., Georgescu, C., *Fizică (Fizică moleculară, atomică și nucleară. Electricitate și optică) pentru liceu, bacalaureat și concursuri de admitere, sistem grilă*, Editura Niculescu, București, 1997
- Rusu, O. și colectiv, *FIZICA-Manual pentru clasa a X-a*, Editura Teora Educational, București, 2000
- Rusu, O. și colectiv, *FIZICA-Manual pentru clasa a XII-a*, Editura Teora Educational, București, 2002
- Truția, C., Rusu, O., *Fizică (Electricitate, Optică, Termodinamică) – teste pentru admitere în învățământul superior*, Editura universitară „Carol Davila”, București, 2000
- Sandu, M., *Temă și probleme pentru cercurile de fizică*, Editura Hyperion, București, 1993
- Sears, F.W., Zemansky, M.W., Young, H.D., Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
- Snow, T. P., Shull, J. M., *Physics*, University of Colorado at Boulder, West Publishing Company, St. Paul, New York, San Francisco, Los Angeles, Copyright 1986 by West Publishing Company
- Thomas L. Floyd, *Dispozitive electronice*, Editura Teora, 2003
- XXX, *Colecția revistei de fizică Evrika*, 1996-2002
- Film-The Elegant Universe-Strings theory, Brian Greene, Website NOVA, <http://www.pbs.org/wgbh/nova/einstein>
- <http://webphysics.davidson.edu/Applets/minkowski4/default.html>, Minkowski Physlet, Lorentz transformation
- Lecții interactive de fizică Intuitext - Softwin și AEL - Siveco

**Octavian Rusu
Livia Dinică**

**Constantin Trăistaru
Marius Nistor**

Fizică

F1+F2

Manual pentru clasa a XII-a



F1 – Filiera teoretică, profil real, specializările matematică-informatică și științe ale naturii; filiera vocațională, profil militar, specializarea matematică-informatică.

F2 – Filiera tehnologică, pentru calificările profesionale cu 1-2 ore pe săptămână.

Se aplică și la clasa a XIII-a — ciclul superior al liceului, filiera tehnologică, ruta progresivă de calificare profesională.

CORINT
EDUCAȚIONAL

ISBN: 978-973-135-091-2

