

NOȚIUNI DE FIZICA ATOMICĂ

1. INTRODUCERE. BAZELE EXPERIMENTALE ALE FIZICII ATOMICE

Conceptul de atom apare pentru prima dată în anul 450 î.d.Ch., când Leucip elaborează o teorie conform căreia materia nu este infinit divizibilă și introduce noțiunea de atom. **Atomos** (**ἄτομος**) în limba greacă însemnând indivizibil. Democrit, un discipol al lui Leucip, dezvoltă această teorie și concluzionează că materia este alcătuită din niște particule invizibile, indivizibile și eterne numite atomi. Aici trebuie să remarcăm că această teorie se bazează pe considerente pur filozofice și nu pe fapte experimentale. De asemenea trebuie remarcat faptul că această teorie a marcat atât evoluția filozofiei materialiste despre lume și viață, cât și dezvoltarea și evoluția științelor naturii.

Concepția modernă de atom și moleculă a fost creată de chimie și ulterior preluată de fizică. Implementarea teoriei atomiste în fizică s-a produs în trei etape.

A. Prima etapă în evoluția teoriei atomiste despre atom s-a produs în anul 1808, când chimistul englez **John Dalton** a făcut următoarele observații:

- Elementele chimice sunt realizate din particule extrem de mici, numite atomi.
- Atomii unui element chimic sunt identici ca dimensiune, masă, și alte proprietăți.
- Atomii nu pot fi divizați, creați, sau distruși.
- Atomii diferitelor elemente se combină într-un raport simplu pentru a forma compuși chimici, care exprimă legea proporțiilor definite, așa cum este cunoscută în chimie.
- În reacții chimice, atomii se combină, se separă, sau se reordonează.

B. Etapa a doua a avut loc în anul 1811, când chimistul italian **Amedeo Avogadro** a enunțat legea care-i poartă numele: Volume egale ale gazelor, la aceeași temperatură și presiune, conțin același număr de particule (sau molecule), N_A , cunoscut sub numele de numărul lui Avogadro.

C. Etapa a treia și ultima s-a produs în anul 1866, când **J.C. Maxwell** și **L. Boltzman**, independent unul de altul au pus bazele teoriei cinetico-moleculare a gazelor, teorie verificată experimental de A. Einstein în anul 1905, explicând mișcarea Browniană. **Trebuie să remarcăm că Teoria cinetico-moleculară a gazelor este prima formă a teoriei fizice despre atom și că în tot acest timp nu s-a cunoscut nimic despre structura atomului**

2. SPECTRE ATOMICE

Sursa de lumină este un corp care datorită unor fenomene fizico-chimice, care se produc în interiorul ei, poate să emită lumină. Cel mai simplu mod de a produce lumină este să aducem corpul într-o stare înaltă de încălzire, numită stare de incandescență, dar sunt și alte metode, de ex. utilizarea unui câmp electric, sau **bioluminescența**.

Lumina, așa cum am văzut deja, este un amestec radiații electromagnetice, un **pachet de unde**.

Dar sursele de lumină emit în același timp și radiații electromagnetice invizibile cu ochiul liber precum radiațiile infraroșii IR, radiațiile ultraviolet UV, sau radiațiile X.

Trecând prin anumite medii, numite dispersive, lumina se separă în culorile componente. Acest fapt se vede atunci când se formează curcubeul, lumina trece prin picăturile de apă din atmosferă, sau dacă utilizăm o prismă optică.

Studiind diferite surse de lumină, oameni de știință au observat că lumina produsă de acestea este specifică fiecărei surse.

Combinăția de unde electromagnetice emisă de o anumită sursă se numește SPECTRU.

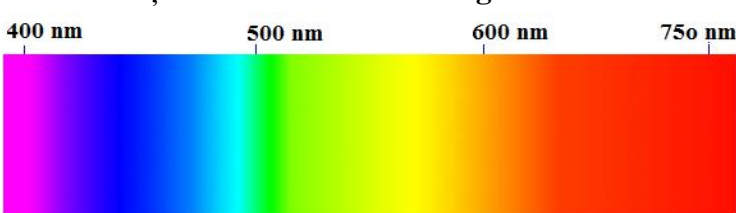


Fig. 1.

Cuvântul vine din limba latină **spectrum = imagine**. Spectrul este deci imaginea, amprenta luminii.

În Fig. 1 este prezentat spectrul de emisie al Soarelui. Acest spectru se mai numește și spectru continuu. Soarele este singura sursă de lumină care emite toate radiațiile

electromagnetice, de aceea spectrul său se

numește spectru continuu. Toate celelalte surse emit doar anumite combinații de culori, adică au

spectre discontinue, sau discrete. Aparatul folosit pentru descompunerea luminii în culorile componente este numit spectrograf.

În Fig. 2 sunt prezentate schematic părțile componente ale unui spectrograf, precum și spectrul de emisie al hidrogenului. Se observă că acest spectru conține doar 4 linii, de fapt 4 culori. Acest tip de spectru se numește **spectru de linii**. Alte substanțe aduse la incandescență vor emite alte linii spectrale. De ex. dacă presărați puțină sare de bucătărie în flacăra aragazului veți observa ca flacăra se colorează galben. Acest lucru se datorează sodiului, din compoziția chimică a sării de bucătărie. Dacă turnați spirt, de exemplu medicinal, pe o bucată de vată și îi dați foc o să observați că flacăra are culoare albastruie, de asemenea observați culoarea flăcării aragazului și așa mai departe.

Acest fenomen este folosit încă din antichitate, în diferite ocazii, pentru obținerea flăcărilor de diferite culori, sau la fabricarea artificiiilor.

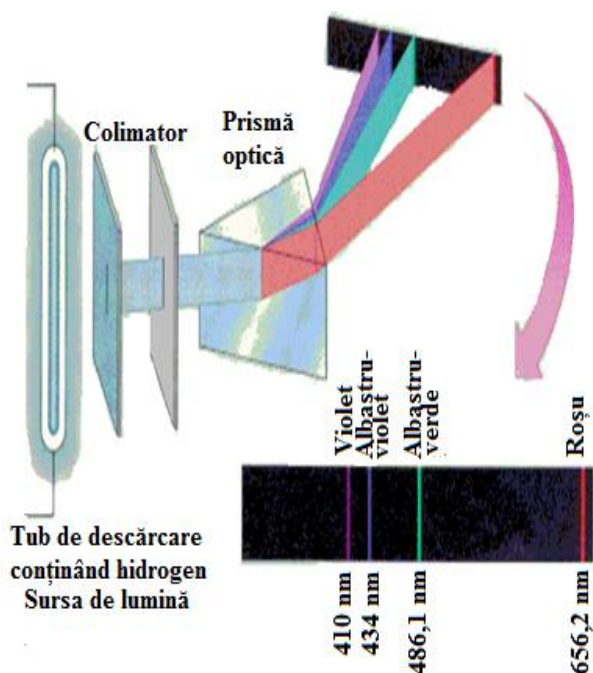


Fig. 2.

Clasificarea spectrelor

a) Dacă substanța emițătoare de lumină este în stare atomică, ex. hidrogenul, sodiul, mercurul, etc. atunci spectrul este un spectru de linii, Fig. 3a).

b) Dacă substanța care emite lumina este în stare moleculară, ex. petrolul, metanul, alcoolul, etc. atunci spectrul caracteristic va fi alcătuit dintr-o succesiune de linii mai late, numite benzi spectrale, iar spectrul respectiv se va numi spectru de bandă, Fig. 3b).

c) Dacă lumina care provine de la o anumită sursă, înainte de a trece prin spectrograf trece printr-un mediu oarecare, ea va suferi un proces de absorbție. În acest caz spectrul va fi un spectru de absorbție, Fig. 3c). **ATENȚIE!** Într-un spectru de absorbție liniile spectrale care lipsesc (liniile negre) sunt specifice mediului absorbant, mediul prin care trece lumina. De exemplu, dacă într-un spectru al luminii care a străbătut un anumit mediu lipsesc liniile cu lungimile de undă 410nm, 434nm, 486,1nm, 656,2nm atunci mediul absorbant conține și hidrogen.

Aceste observații au condus oamenii de știință la ideea că studierea spectrelor poate fi utilă în analiza fizico-chimică a diferitelor materiale. Așa a luat naștere analiza spectrală, care poate fi:

- analiza spectrală calitativă:** în funcție de compoziția spectrului se pot face aprecieri în ce privește compoziția chimică a unui compus;
- analiza spectrală cantitativă:** în funcție de intensitatea luminoasă a liniei spectrale se pot face aprecieri în ce privește concentrația unei substanțe dintr-un compus.

3. SERII SPECTRALE

Încă de la începutul studierii spectrelor oamenii de știință au fost de acord că liniile spectrale dintr-un spectru nu sunt dispuse la întâmplare, ci respectă o anumită lege. Care este această lege o să vedem puțin mai târziu. Multe substanțe emit spectre sărace în linii, în domeniul vizibil. Acest fapt face ca analiza spectrală să fie dificilă. În această situație, oamenii de știință au înregistrat spectrele diferitelor substanțe în domeniile radiațiilor invizibile: IR, UV sau X. În aceste domenii spectrele s-au dovedit

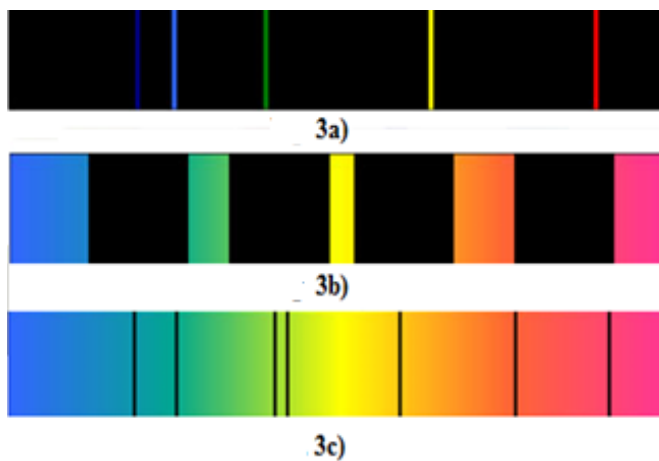


Fig. 3.

generoase în linii și deci, s-au putut obține mai multe informații despre substanța respectivă. Un exemplu în acest caz este spectrul fierului, care are puține linii în domeniul vizibil, dar este generos în domeniul UV.

Pentru a sistematiza observațiile referitoare la diferitele spectre, aceste au fost grupate corespunzător domeniilor de radiație și astfel au fost definite seriile spectrale.

Spectrele obținute în domeniul radiației vizibile au fost grupate și formează seria spectrală [Balmer](#).

Spectrele obținute în domeniul radiației UV au fost grupate și formează seria spectrală [Lyman](#).

Și așa mai departe, în domeniul IR apropiat seria spectrală se numește [Paschen](#), în domeniul IR mediu seria [Brackett](#), sau IR îndepărtat seriile [Pfund](#) și [Humphrey](#).

Pentru a concluziona cele remarcate mai sus, Balmer și ulterior [J. Rydberg](#) au dat o formulă empirică cu ajutorul căreia se putea calcula lungimea de undă a unei anumite linii spectrale:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (1)$$

Unde $\tilde{\nu}$ se numește număr de undă, iar $R = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ este constanta lui Rydberg, (calculată empiric).

- A. Dacă $n_1=1$, iar $n_2=2, 3, 4, \dots$ seria spectrală se numește Lyman.
- B. Dacă $n_1=2$, iar $n_2=3, 4, 5, \dots$ seria spectrală se numește Balmer.
- C. Dacă $n_1=3$, iar $n_2=4, 5, 6, \dots$ seria spectrală se numește Paschen.
- D. Dacă $n_1=4$, iar $n_2=5, 6, 7, \dots$ seria spectrală se numește Brackett.
- E. Dacă $n_1=5$, iar $n_2=6, 7, 8, \dots$ seria spectrală se numește Pfund.
- F. Dacă $n_1=6$, iar $n_2=7, 8, 9, \dots$ seria spectrală se numește Humphrey.

4. STRUCTURA ATOMULUI

4.1 FENOMENE CARE AU CONDUS LA DESCOPERIREA ELECTRONULUI

Conceptul atomic al substanței a pătruns în teoria electricității independent de teoria gazelor, dar cam în aceeași perioadă.

În anul 1834 M. Faraday a descoperit legea echivalentelor electrolitice, care spune că o moleculă-gram de ioni monovalenți, indiferent de natura lor, poartă o anumită sarcină electrică. Dacă ionii sunt bivalenți sarcina electrică este dublă, și așa mai departe. Pornind de la această observație, fizicienii au ajuns la concluzia că fiecărui ion i se poate atribui un anumit număr de sarcini elementare. Este de remarcat faptul că pornind de la legile electrolizei s-a putut stabili, în mod indirect, valoarea sarcinii electrice elementare: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Considerarea electronului drept particulă elementară purtătoare de sarcină electrică negativă a fost susținută către fizicianul irlandez [George Johnstone Stoney](#) în 1874, care a și *inventat* termenul de [electron](#), în anul 1894. Etimologic vorbind, termenul de electron provine din limba greacă **ήλεκτρον** (**electron**) = [chihlimbar](#) și se datorează faptului că primele observații ale fenomenului de electrizare au avut ca obiect de studiu un „bețișor” de chihlimbar.

Tot în această perioadă s-a declanșat și bătălia pentru „deconspirarea” atomului!

În anul 1876 [E. Goldstein](#), studiind trecerea curentului electric prin gazele rarefiate, în așa numitele tuburi [Crookes](#), a observat o radiație care pleacă de pe suprafața catodului, pe care a numit-o rază, sau [radiație catodică](#). Inițial natura acestei radiații a fost vehement contestată, totuși proprietățile ei erau evidente:

- a) Provoacă fluorescența unor substanțe;
- b) Se propagă în linie dreaptă;
- c) Sunt emise după o direcție perpendiculară pe suprafața catodului;
- d) Au energie cinetică;
- e) Impresionează placa fotografică;
- f) Generează raze X;
- g) Sunt deviate în câmpuri electrice și magnetice.

În anul 1897, [J.J. Thomson](#) studiind razele descoperite de Goldstein a stabilit că acestea sunt alcătuite din fluxuri de particule universale, independente de natura gazului, sau de materialul din care este confecționat catodul, cu sarcină electrică negativă, pe care le-a identificat ca fiind chiar **electronii**.

4.2 MODELE DE ATOM

A. MODELUL THOMSON. Problema indivizibilității atomului, ca particulă constituantă a substanței, rămâne valabilă doar în chimie, în cazul reacțiilor chimice, sau în teoria cinetico-moleculară a gazelor, în cazul proceselor de ciocnire dintre atomi.

În fizică, problema indivizibilității atomului a fost desființată abia acum, în urma observațiilor lui Thomson!

Ca urmare a acestor observații, ideea care se desprinde în mod logic este că atomul este alcătuit dintr-un amestec de sarcini electrice pozitive și negative, în cantități egale.

Neutralitatea atomului din punct de vedere electric rămâne incontestabilă!

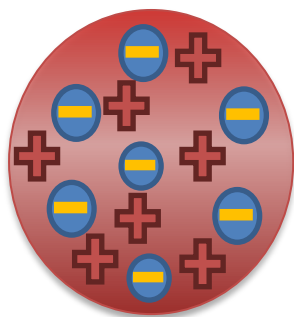


Fig. 4.

Pornind de la aceste observații J.J. Thomson, în anul 1904, afirmă că atomul este o sferă de sarcină electrică pozitivă, în care există niște mici sfere încărcate cu sarcină electrică negativă, electronii, Fig. 4.

Pentru a-și primi acreditarea, acest model trebuia să fie verificat experimental. Ca o observație amuzantă, chiar de la început, modelul a fost privit cu suspiciune și numit, în glumă, „modelul budincă cu stafide” !

EXPERIMENTUL RUTHERFORD.

În 1909 [Ernest Rutherford](#) a imaginat un experiment, în acest sens, folosind o sursă de particule alfa și o foiță foarte subțire de aur, Fig. 5. Teoretic, conform modelului atomic elaborat de Thomson, particulele α trebuiau să fie deviate cu câteva grade la trecerea prin foița de aur, din cauza forțelor electrostatice. Experimental, s-a constatat, însă, că unele dintre ele erau deviate cu unghiuri mai mari decât

90° sau chiar cu 180° . Acest fapt a fost explicat prin existența unei neuniformități a distribuției de sarcină electrică în interiorul atomului. Pe baza observațiilor efectuate, Rutherford a propus un nou model, conform căruia atomul este o sferă de rază aprox. $r = 10^{-10}$ m, în care sarcina pozitivă era concentrată într-o zonă restrânsă, în centrul atomului, numită nucleu, de rază aprox. $r = 10^{-15}$ m.

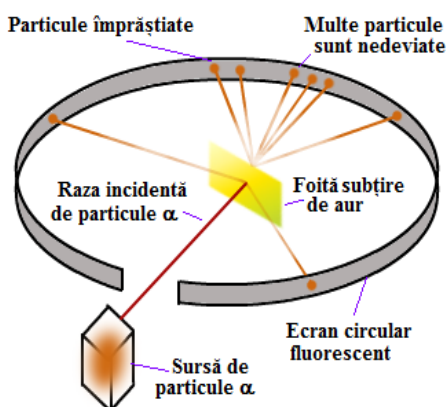


Fig. 5

Rutherford al atomului a primit denumirea de modelul planetar al atomului, Fig. 6.

Electronii se rotesc pe traiectorii circulare, în jurul nucleului, precum planetele în jurul Soarelui. Din acest motiv, modelul

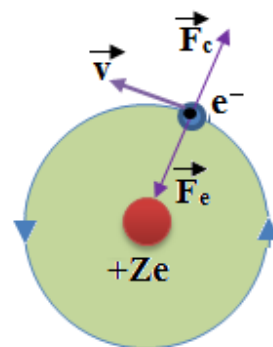


Fig. 6

B. MODELUL RUTHERFORD AL ATOMULUI, SAU MODELUL PLANETAR AL ATOMULUI. În cadrul modelului planetar, cel mai simplu atom este atomul de hidrogen, format dintr-un nucleu de sarcină $+e$ ($Z=1$), și un electron de sarcină $-e$, Fig. 6.

În conformitate cu legile de conservare, energia totală a unui sistem este o sumă dintre E_p și E_c :

În conformitate cu legile de conservare, energia totală a unui sistem este o sumă dintre E_p și E_c :

$$E_{\text{tot}} = E_p + E_c = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

După cum se poate observa, E_p este totdeauna negativă, în timp ce E_c este totdeauna pozitivă.

Astfel, conform modelului planetar, traiectoria electronului în jurul nucleului, în funcție de energia totală a sistemului nucleu-electron, poate fi deschisă, dacă $E_c > E_p$ și deci $E_{\text{tot}} > 0$, Fig. 7a), sau închisă, dacă $E_c < E_p$, adică $E_{\text{tot}} < 0$, Fig. 6 și 7b).

De asemenea, starea atomului în care electronul este constrâns să orbiteze în jurul nucleului se numește *stare legată*.

Într-o stare legată, traiectoria electronului este stabilă dacă F_c și F_e , sunt egale în modul și opuse ca semn, Fig. 6, ceea ce înseamnă:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3)$$

Dacă rescriem rel. (2) ținând cont de rel.(3) rezultă formula energiei totale a unui atom legat, atunci energia totală este dată de relația:

$$E_{\text{tot}} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (4)$$

DEFICIENȚELE MODELULUI PLANETAR.

Modelul planetar nu poate explica:

1. Marea stabilitate a atomilor. Relația (3) nu este suficientă pentru a explica acest fapt. Mișcarea electronului pe traiectorie închisă în jurul nucleului este o mișcare accelerată. Pe de altă parte, o particulă încărcată cu sarcină electrică emite energie sub formă de radiație electromagnetică, dacă mișcarea ei este accelerată. Emițând energie, energia cinetică a electronului scade. Acest fapt are drept consecință scăderea razei orbitei, până când electronul ar sfârși prin a „cădea” în nucleu, iar atomul s-ar distruge – **fapt ne observat experimental!**

2. De ce atomul nu poate emite energie, sub formă de radiație electromagnetică, atunci când se află în starea fundamentală, starea de minimă energie.

3. De ce atomul poate emite energie doar când se află în stare excitată. De asemenea, în acest caz, frecvența radiației electromagnetice emise ar trebui să ia orice valoare (valori continue), fapt infirmat de experimentele în domeniul spectroscopiei și de existența seriilor spectrale.

D. MODELUL BOHR AL ATOMULUI, SAU MODELUL CUANTIFICAT AL ATOMULUI.

Este primul și cel mai simplu model cuantic al atomului și a fost introdus în anul 1913 de [N. Bohr](#).

Bohr preia modelul lui Rutherford, modelul planetar clasic, căruia îi aplică [teoria cuantelor](#).

Pentru a corecta deficiențele modelului planetar, Bohr a introdus ca postulate concluziile rezultate din datele experimentale!

Postulatul nr. 1. Stările legate ale atomului sunt stări în care atomul nu primește și nu cedează energie. Aceste stări se numesc stări staționare și în această stare atomul poate sta un timp oricât de lung, dacă nu este perturbat de interacțiuni exterioare.

- Valorile energiilor stărilor staționare formează un șir discret de valori: $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$.

Postulatul nr. 2. Atomul absoarbe sau emite energie, sub formă de radiație electromagnetică, doar atunci când trece dintr-o stare staționară în altă stare staționară.

- Trecerea unui atom dintr-o stare staționară în altă stare staționară se numește tranziție cuantică.
- Există o stare cuantică a atomului în care energia lui este minimă. Această stare se numește stare fundamentală.
- Energia radiației absorbită sau emisă într-o tranziție cuantică este egală cu diferența de energie dintre cele două stări cuantice:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n \quad (5)$$

OBSERVAȚIE: Deși postulatele introduse de Bohr sunt de natură cuantică, calculele efective ale mărimilor specifice atomului sunt pur clasice, modelul fiind, de fapt, semi-cuantic, sau super-clasic. Modelul Bohr al atomului este aplicabil doar atomului de hidrogen și atomilor hidrogenoizi ($\text{He}^+, \text{Li}^{+2}, \text{Be}^{+3}$, etc., adică ioni care au un singur electron în câmpul de sarcină efectivă a nucleului).

▪ CUANTIFICAREA ATOMULUI.

Din acest moment, Bohr, nu mai avea nici o regulă după care să se conducă. În acest caz, el a recurs la o ipoteză îndrăzneată: **deoarece energia unei stări staționare a atomului depinde exclusiv de orbită, rel. (4), atunci cuantificarea energiei ar presupune, mai întâi, cuantificarea orbitei.**

Mărimea fizică ce caracterizează mișcarea electronului pe orbită este **momentul cinetic**.

Deci cuantificarea orbitei se face indirect, cuantificând momentul cinetic!

În continuare, Bohr recalculeze raza orbitei și energia totală a electronilor în stările legate ale atomului, pornind de la afirmațiile pe care tocmai le-a făcut. În acest sens el are în vedere și următoarele fapte:

1. Electronul, ca microparticulă, se comportă ca o entitate [undă-corpusul](#).
2. În stare liberă, electronul poate avea orice valoare pentru energia cinetică și deci și pentru lungimea de undă atașată.
3. În stare legată, unda atașată electronului trebuie să fie staționară, adică, lungimea traiectoriei trebuie să fie un multiplu întreg de lungimi de undă, λ :

$$l = 2\pi r = n\lambda, \quad (6)$$

unde n este un număr întreg, iar r este raza orbitei.

Într-o primă aproximație, vom considera cuantificarea modului momentului cinetic:

$$|\vec{L}| = (r \cdot p) = n \cdot \frac{h}{2\pi} = n \cdot \hbar \quad (7)$$

Din rel.(3) rezultă:

$$(r \cdot p)^2 = r \frac{m_0 e^2}{4\pi\epsilon_0} \quad (8)$$

Ținând cont de rel.(7) și (8) rezultă **relația de cuantificare orbitei**

$$r_n = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m_0 e^2} \quad (9)$$

Rel.(9) ne arată că, în modelul cuantificat, electronii nu se pot mișca pe orice orbită în jurul nucleului, ci numai pe acele orbite care îndeplinesc această condiție!

OBSERVAȚIE: pentru $n=1$ rel.(9) se scrie:

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_0 e^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} m \quad (9')$$

și care reprezintă prima orbită a electronului în atomul de hidrogen, sau prima orbită Bohr.

Tot din relația (9') se observă că $r_2=4 \cdot r_1$, $r_3=9 \cdot r_1$ și așa mai departe...

Din acest moment **cuantificarea energiei totale în stările legate ale atomului** devine o formalitate!

Înlocuind rel.(9) în rel.(4) obținem relația de calcul a energiei totale a electronului într-o stare legată, sau **relația de cuantificare a energiei:**

$$E_n = -\frac{m_0 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 n^2} \quad (10)$$

OBSERVAȚIE: pentru $n=1$ rel.(11) devine:

$$E_1 = -\frac{m_0 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} = -13,6 eV \quad (10')$$

și care nu este altceva decât energia de ionizare, adică energia necesară unui electron pentru a părăsi atomul!

De asemenea, observăm că $E_2 = \frac{E_1}{4}$, $E_3 = \frac{E_1}{9}$, și așa mai departe....

Verificarea modelului Bohr cu ajutorul datelor experimentale:

Conform celui de-al doilea postulat al lui Bohr:

$$\epsilon_{mn} = h\nu_{mn} = E_m - E_n = \frac{m_0 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 n^2} - \frac{m_0 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 m^2} = \frac{m_0 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (11)$$

sau:

$$\frac{1}{\lambda} = \tilde{\nu} = \frac{m_0 e^4}{8ch^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (11')$$

unde putem observa că, dacă facem calculele, utilizând valorile constantelor fizice respective, obținem:

$$R = \frac{m_0 e^4}{8ch^3 \epsilon_0^2} = 1,097373 \cdot 10^7 m^{-1} \quad (11'')$$

este chiar constanta lui Rydberg. Interesant este faptul că Rydberg a obținut, pe cale empirică, pentru constanta care-i poartă numele o valoare foarte apropiată de valoarea calculată teoretic!

➤ FENOMENE DE EXCITARE ȘI IONIZARE

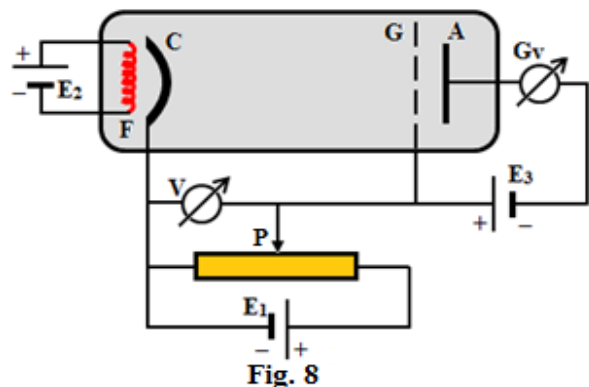
Ciocnirea dintre un electron și un atom poate produce următoarele efecte:

1. $e^- + A = e^- + A$ – **ciocnire perfect elastică**, cele două particule nu își modifică energia. Acest lucru arată că nu toate ciocnirile sunt „eficace”, pentru a produce excitare sau ionizare.
2. $e^- + A = e^- + A^*$ – **excitare**, în urma ciocnirii, în anumite condiții, electronul cedează o parte din energia lui atomului, care va trece pe un nivel energetic superior, iar el va trece pe nivelul fundamental (nivelul de minimă energie).
3. $e^- + A = 2e^- + A^+$ – **ionizare**, în urma ciocnirii electronul, care are o energie foarte mare, expulzează un electron din atom, dar rămâne și el liber.

Dacă electronul are o energie mult mai mare decât energia minimă de excitare sau ionizare, el va fi capabil să excite și să ionizeze o serie de particule aflate pe traiectoria sa, lăsând o „urmă” de atomi excitați și ionizați, până când își va pierde toată energia, trecând pe nivelul fundamental. În acest mod în niște instalații speciale, numite detectoare de particule, se poate identifica traiectoria particulelor ionizate, ex. [camera cu bule](#), sau [camera cu ceață](#). **Acesta este cazul radiațiilor emise de substanțele radioactive, care au proprietatea de a ioniza mediul prin care trec.**

➤ [Experiența Frank și Hertz](#)

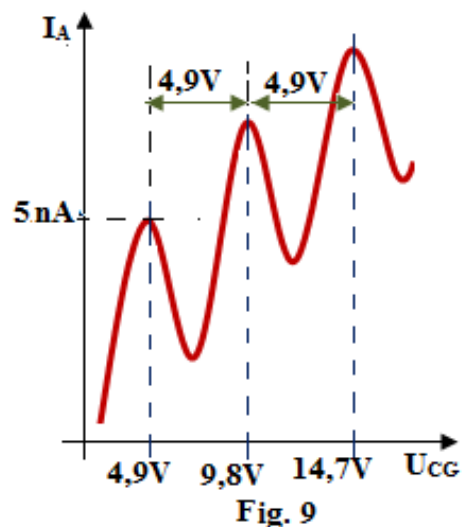
Pornind de la aceste idei J. Frank și G. Hertz, în 1914 au imaginat un experiment fundamental pentru verificarea modelului Bohr.



Dispozitivul experimental constă dintr-o **triodă**, în care grila este plasată foarte aproape de anod. În triodă, după ce s-a făcut vid, au fost introduși vaporii unei substanțe, în cazul experimentului inițial – vaporii de mercur, Fig. 8.

Între catod și grilă se aplică o tensiune pozitivă, de accelerare, iar între grilă și anod se aplică o tensiune de frânare foarte mică (sub 1V). **Metoda folosită în realizarea acestui experiment se numește metoda câmpului contrar.**

Electronii emiși de catod sunt accelerați în spațiul catod-grilă, unde vor suferii ciocnirii cu atomii de mercur. Spațiul grilă-anod este foarte îngust, pentru a nu permite ciocniri suplimentare între electroni și atomii de mercur. Astfel electronii vor ajunge direct la anod și vor da naștere unui curent anodic, I_A , măsurat de galvanometru, G_V , a cărui valoare crește o dată cu creșterea tensiunii de accelerare, U_{CG} , Fig. 9. Caracteristica curent-tensiune este asemănătoare caracteristicii unei diode cu vid, curentul anodic tinzând către o valoare de saturație, corespunzătoare colectării tuturor electronilor emiși de filament. În momentul în care tensiunea de accelerare $U_{CG} = 4,9V$ curentul anodic I_A scade brusc. Acest lucru se datorează faptului că atunci când electronii emiși de catod capătă energia $\varepsilon = 4,9 eV$, aceștia nu mai suferă ciocniri elastice cu atomii de mercur, ci vor suferii ciocniri neelastice, transferând atomilor de mercur o parte din energia lor. Devenind prea lenți, electronii nu mai pot traversa câmpul contrar dintre grilă și anod și se vor neutraliza la grilă, iar curentul anodic va scădea brusc. Și așa mai departe, continuând să creștem tensiunea de accelerare U_{CG} , fenomenul se va repeta pentru valori ale U_{CG} multiplu întreg 4,9V, respectiv pentru energii ale electronilor $\varepsilon = 9,8eV$, $\varepsilon = 14,7eV$, etc.



Experiența Frank și Hertz demonstrează că nivelele energetice ale atomului, în cazul nostru atomul de mercur, sunt cuantificate, și că energia de excitare a atomului de mercur este $\varepsilon = 4,9eV$. Repetând experiența, dar înlocuind vaporii de mercur cu vaporii de potasiu energia de excitare a acestuia s-a găsit $\varepsilon = 1,63eV$. Pentru sodiu s-a găsit $\varepsilon = 2,12eV$, pentru heliu $\varepsilon = 21eV$ și așa mai departe.

OBSERVAȚIE: Acestea sunt primele nivele de excitație, nivelele cele mai joase, numite și nivele de rezonanță. Perfecționând această metodă, *metoda câmpului contrar*, s-au putut obține și alte nivele discrete de excitație, superioare nivelurilor de rezonanță.

Este, de asemenea, de remarcat faptul că primele rezultate ale acestui experiment au fost publicate înainte ca N. Bohr să fi formulat teoria sa referitoare la cuantificarea atomului. Din acest motiv *experiența Frank și Hertz este considerată una dintre experiențele fundamentale ale fizicii atomice.*

▪ **NUMERE CUANTICE.**

1. Număr cuantic principal. Modelul Bohr poate explica spectrele diferiților atomi, într-o primă aproximație, dacă în rel.(10) se consideră că **n** poate lua doar valori întregi și pozitive: **n = 1, 2, 3, ...** și va fi numit, în continuare **număr cuantic principal**. Ca pături electronice, valorile lui **n** se numesc, respectiv, K, L, M, N, O, P, Q.

2. Număr cuantic orbital (azimutal). Toate afirmațiile și considerațiile pe care le-am făcut până acum sunt valabile, într-o primă aproximație, așa cum am mai afirmat deja, doar pentru atomul de hidrogen, sau atomii hidrogenoizi. A. Sommerfeld introduce o extindere a modelului Bohr, pentru atomii cu mai mulți electroni. Acest model a fost numit modelul **Bohr-Sommerfeld**.

Apariția spectrografelor de mare rezoluție a făcut posibil ca în locul unei linii spectrale, în spectrul unei anumite substanțe, să se observe două sau mai multe linii foarte apropiate. Acest fenomen a fost numit **despicare spectrală**. Despicarea liniilor spectrale se observa în aceleași condiții ca și până acum, doar performanța aparatelor era superioară! Explicația fenomenului rezidă în faptul că, în cazul atomilor cu mai mulți electroni, aceștia se regroupează, în fiecare pătură energetică în una sau mai multe subpături energetice, după un număr cuantic auxiliar, numit **număr cuantic orbital, l**.

În cazul atomului cu mai mulți electroni aproximația dată de rel.(7) nu mai este satisfăcătoare. După o serie de raționamente cuantice și calcule matematice, Sommerfeld stabilește relația de cuantificare a modulului momentului cinetic orbital:

$$|\vec{L}| = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar \tag{12}$$

Unde **l** este numărul cuantic orbital. Conform teoriei lui Sommerfeld, valorile numărului cuantic orbital sunt limitate de valorile numărului cuantic principal, și anume:

- 1) Pentru fiecare valoare a lui **n**, **l** ia **n** valori.
- 2) Valoarea maximă a lui **l** este **(n-1)**.

OBSERVAȚIE. Din cele spuse până acum se pot trage următoarele afirmații:

a. În pătura K(n=1) există o singură subpătură cuantică posibilă: l=0, a cărei orbită este un cerc, în centrul căruia se află nucleul.

b. În pătura L(n=2) există două subpături cuantice posibile: l=0 a cărei orbită este un cerc și l=1 a cărei orbită este o elipsă, într-unul din focarele căreia se află nucleul. Și așa mai departe pentru celelalte nivel M, N, O, P și Q.

c. Stările cuantice l=0, 1, 2, 3...sunt cunoscute în chimie ca stările s, p, d, f.

3. Număr cuantic magnetic.

O situație aparte apare atunci când atomul se află într-un câmp magnetic exterior. În acest caz se observă că stările electronice explicate până acum se despică în alte stări.

Practic, apar linii spectrale noi. Această nouă despicare se datorează faptului că stările electronice caracterizate de numerele cuantice principal și azimutal nu conțin nici o informație despre orientarea orbitelor circulare, respectiv eliptice în spațiu. Pentru a explica această despicare spectrală suplimentară trebuie să revedem următoarele fapte:

1. Traiectoria electronului în jurul nucleului este circulară, sau eliptică.
2. Conservarea momentului cinetic \vec{L} impune ca traiectoria să fie plană.

Cum planul traieectoriei poate lua diverse orientări în spațiu și vectorul \vec{L} , care este perpendicular pe planul traieectoriei, poate lua și el diverse orientări, sau altfel spus este cuantificată. Relația de cuantificare este:

$$L_z = m \cdot \hbar \tag{13}$$

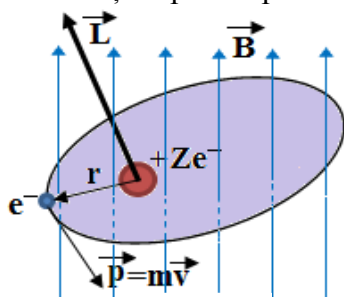


Fig. 10

unde L_z este proiecția momentului cinetic pe axa Oz, iar m se numește **număr cuantic magnetic**, deoarece descrie comportarea atomului în câmp magnetic.

În ce privește valorile lui m , acesta poate lua valori întregi, între $-l$ și $+l$. Această restricție impune ca m să ia $(2l+1)$ valori sau, altfel spus, L_z poate avea $(2l+1)$ orientări posibile.

Momentul magnetic orbital, $\vec{\mu}$.

În mișcarea sa pe orbită, electronul se comportă ca un curent circular. Acest curent dă naștere unui câmp magnetic, care la rândul său va genera un moment magnetic $\vec{\mu}$, a cărui mărime este dată de relația:

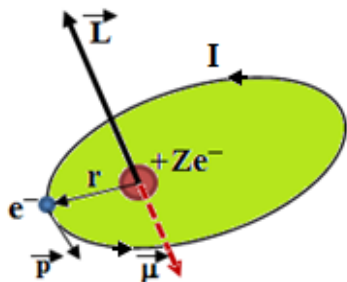


Fig. 11

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_0}\vec{L} \quad (14)$$

Ținând cont de relațiile de cuantificare ale lui \vec{L} :

$$|\vec{\mu}| = -\frac{e}{2m_0}\sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (15)$$

și:

$$\mu_z = -\frac{e}{2m_0}m\hbar \quad (16)$$

sau

$$\mu_z = -m\mu_B \quad (16')$$

unde am notat

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_0} = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (16'')$$

magnetonul Bohr-[Procopiu](#).

4. Număr cuantic de spin.

Studii spectroscopice mai precise ale atomilor aflați în câmp magnetic au arătat că cele trei numere cuantice nu descriu în totalitate mișcarea pe orbită a unui electron în jurul nucleului. Astfel, spectroscopicele de mare rezoluție au pus în evidență linii spectrale noi. Acest lucru se datorează faptului că electronul are, pe lângă mișcarea de rotație în jurul nucleului, (mișcarea de revoluție) și o mișcare de rotație proprie, în jurul propriei axe, (ca și Pământul!). Această mișcare a electronului a fost numită mișcare de spin, sau spin și este descrisă de o mărime vectorială, numită **moment cinetic propriu**, sau **moment cinetic de spin**. (În limba engleză to spine = a se roti, a se învârti.)

În acest caz putem vorbi de un **moment cinetic total** \vec{J} :

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (17)$$

unde \vec{S} este **momentul cinetic de spin**. Ca și \vec{L} , \vec{S} se cuantifică ca modul:

$$|\vec{S}| = \sqrt{s(s+1)}\hbar \quad (18)$$

unde s se numește **număr cuantic de spin**. Experiențele arată că vectorul impuls al acestei rotații proprii poate ocupa într-un câmp magnetic numai două direcții bine determinate. Pentru electron, acest număr, are valoarea: $s = \frac{1}{2}$.

Observație. Ca particulă elementară, electronul face parte din categoria așa numitelor **particule cu spin semiîntreg!**

De asemenea \vec{S} se cuantifică și ca direcție și sens, sau ca proiecție pe o axă, axa Oz, de exemplu.

$$S_z = m_s \cdot \hbar \quad (19)$$

unde m_s se numește **număr cuantic magnetic de spin** și poate lua valori cuprinse între $-s$ și $+s$, iar numărul total de valori ale lui m_s este $(2s+1) = 2$ valori: $m_s = \pm \frac{1}{2}$, conform celor două sensuri posibile de rotație ale electronului în jurul axei sale. Sesizați analogia cu numărul cuantic orbital l .

➤ [RADIATIA X](#)

A fost descoperită în anul 1895 de fizicianul german [W. C. Röntgen](#) în timp ce studia fenomene de descărcare în gaze rarefiate. Pentru descoperirea făcută Röntgen primește premiul Nobel pentru fizică în anul 1901. W. C. Röntgen este primul laureat al premiului Nobel pentru fizică!

Radiația X este o radiație electromagnetică cu o frecvență mult mai mare decât a radiației vizibile.

Lungimea de undă corespunzătoare este cuprinsă între 0,1 Å și 500Å.

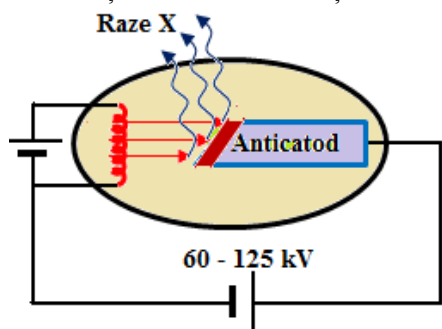


Fig. 12

Radiația X se obține în tuburi vidate, tuburi [Coolidge](#), Fig. 12, prin bombardarea unei ținte, cu electroni rapizi. Ținta este depusă sub forma unei pastile solide pe anticatom. Electronii emiși de filament sunt accelerați la o tensiune de 60 – 125kV.

În acest caz energia cinetică a electronilor are valoarea:

$$E_{cin.} = eU \quad (20)$$

Radiația X emisă de anticatom este rezultatul interacțiunii dintre electronii rapizi și substanța anticatomului.

A. Radiația X de frânare. Se obține ca urmare a devierii și frânării electronilor rapizi în câmpul electric al nucleului, Fig. 13. Pierderea de energie a electronului se face sub formă de radiație X. Evident că cu cât electronul va trece mai aproape de nucleu, câmpul electric de frânare va fi mai mare și deci, energia fotonului X va fi mai mare. Spectrul radiației X de frânare este un spectru continuu, din această cauză radiația X de frânare se mai numește și **radiație X albă**. Există și electroni care sunt frânați până la oprire. În acest caz, energia fotonului X este maximă și este egală cu energia cinetică a electronului incident, adică:

$$h\nu_{max.} = \frac{hc}{\lambda_{min.}} = eU \quad (21)$$

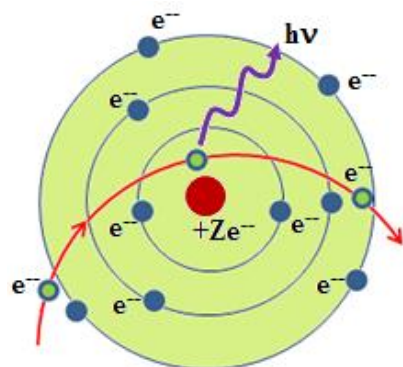


Fig. 13

Din rel. (21) se observă că lungimea de undă a fotonului X este cu atât mai mică cu cât tensiunea de accelerare este mare.

Observăm, de asemenea, că energia radiației X de frânare nu depinde de natura substanței din care este confecționată ținta, ci doar de valoarea tensiunii de accelerare.

Deoarece radiația X de frânare are energie mică se mai numește și **radiație X moale**.

B. Radiația X caracteristică. Un electron liber cu energie foarte mare ciocnește un electron legat, aflat pe o pătură interioară, de pe nivelul $n=1$, pătura K, sau $n=2$, pătura L, a atomului, pe care îl expulzează, îl rupe din legătură. Având energie foarte mare, electronului „proiectil” îi rămâne suficientă energie să părăsească atomul, împreună cu electronul „țintă”. Deoarece în atom s-a creat un loc „gol”, un alt electron aflat pe o pătură exterioară va tinde să ocupe acest gol. În procesul de rearanjare atomul emite energie sub formă de radiație X, Fig. 14. După cum ați sesizat, atomul țintă a suferit, în acest caz, un proces de ionizare.

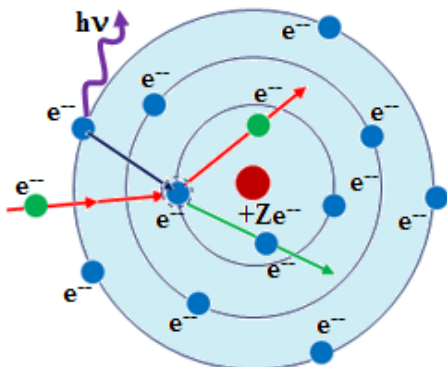


Fig. 14

Acest tip de radiație X se numește **caracteristică** deoarece este specifică materialului din care este confecționată ținta!

Spectrul radiației X caracteristice este un spectru discret, spectru de linii, conform rel. (22), dar care conține puține linii, a căror frecvență variază monoton cu Z. Datorită acestui fapt, radiația X caracteristică a fost utilizată pentru identificarea elementelor chimice transurane (Z>92), în concentrație foarte mică.

Spectrele caracteristice pot fi aranjate în serii spectrale ca și spectrele optice.

Deosebirea constă în faptul că studiul spectrelor caracteristice permite explorarea nivelelor electronice profunde ale atomului, în timp ce spectrele optice permit explorarea nivelelor exterioare ale atomului.

Frecvența radiației X caracteristice se calculează din legea lui [H. Moseley](#):

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu_{kn}}{c} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (22)$$

unde R este constanta lui Rydberg, Z este numărul atomic al materialului emițător, n și k sunt numerele cuantice principale ale nivelelor între care are loc tranziția cuantică, iar σ este o constantă de ecran, determinată experimental.

Semnificația lui σ rezidă în faptul că păturile interioare ale atomului ecranează nucleul de păturile exterioare.

Energia radiației X caracteristice este foarte mare, deoarece emisia de radiație are loc ca urmare a dezexcitării pe nivelele interioare. Din această cauză radiația X caracteristică se mai numește și **radiație X dură**.

Proprietățile radiației X

- În vid ele se propagă cu viteza luminii.
- Impresionează plăcile fotografice.
- Nu sunt deviate de câmpuri electrice și magnetice, deci nu este încărcate cu sarcină electrică.
- Produc fluorescența unor substanțe (emisie de lumină); Exemple de substanțe fluorescente: silicat de zinc, sulfură de cadmiu, sulfură de zinc, care emit lumina galben-verzuie.
- Sunt invizibile, adică spre deosebire de lumină, nu impresionează ochiul omului;
- Pătrund cu ușurință prin unele substanțe opace pentru lumină, de exemplu prin corpul omenesc, lamele metalice cu densitate mică, hârtie, lemn, sticlă ș.a., dar sunt absorbite de metale cu densitatea mare (de exemplu: plumb). Puterea lor de pătrundere depinde de masa atomică și grosimea substanței prin care trec.
- Ionizează gazele prin care trec. Numărul de ioni produși indică intensitatea radiațiilor. Pe această proprietate se bazează funcționarea detectoarelor de radiații.
- Au acțiune fiziologică, distrugând celulele organice, fiind, în general, nocive pentru om. Pe această proprietate se bazează folosirea lor în tratamentul tumorilor canceroase, pentru distrugerea țesuturilor bolnave.

➤ **RADIATIA LASER**

Pentru a înțelege ce este și cum funcționează un LASER este necesar să facem o scurtă recapitulare a unor noțiuni pe care le-am învățat.

După cum am văzut, atomii pot absorbi și emite radiație electromagnetică. În mod normal, atomul se află într-o stare în care energia sa este minimă. Această stare se numește **stare fundamentală**.

Atunci când atomul, printr-o modalitate oarecare, absoarbe energie, trece într-o stare energetică superioară, numită **stare excitată**. Energie absorbită poate fi sub diferite forme, cel mai adesea sub formă de energie a câmpului electromagnetic.

Așa cum am văzut deja, atomul nu poate primi, sau ceda decât cantități de energie bine determinate. Vezi exp. Frank și Hertz!

Să presupunem că, printr-o metodă oarecare, un atom a primit o anumită „porție” de energie.

Să reamintim că aceste „porții” de energie se numesc cuante de energie și că sunt specifice, ca valoare, fiecărui tip de atom.

Primind cuanta de energie, atomul suferă o tranziție cuantică și trece într-o stare excitată.

În starea excitată atomul nu poate rămâne decât un timp finit, după care va reveni în starea fundamentală, bineînțeles, după ce va elibera surplusul de energie, de obicei sub forma unui foton, a cărui energie trebuie să fie egală cu diferența de energie dintre nivelele energetice între care a avut loc tranziția cuantică. Timpul scurs din momentul în care atomul a trecut în starea excitată, până când revine în starea fundamentală se numește **timp mediu de viață**, τ și are o valoare de $\approx 10^{-8}$ s.

Dacă tranziția cuantică spre starea fundamentală are loc într-un timp $t < \tau$, tranziția cuantică se numește **tranziție spontană**. Atomii suferă acest tip de tranziții fără intervenția vreunui factor exterior.

Nivelele energetice care pot rămâne excitate un timp $t > \tau$ se numesc **nivele metastabile**. Atomul excitat pe o stare metastabilă va reveni în stare fundamentală, dar după un timp $t > \tau$, $\approx 10^{-3}$ s.

Dacă un atom aflat pe un nivel metastabil este stimulat de un factor exterior, de exemplu o radiație electromagnetică, el se poate dezexcita înainte de expirarea timpului de viață, $t < \tau$. În acest caz, tranziția cuantică se numește **tranziție stimulată, (sau indusă)**. Această observație este foarte importantă și stă la baza producerii fenomenului LASER.

De fapt cuvântul LASER este un acronim și provine de la definiția fenomenului: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation.

Fenomenul a fost prezis de către A. Einstein încă din 1916, ca urmare a evaluării consecințelor legii radiației emise de M. Planck. Tot Einstein a introdus și conceptele de tranziții spontane și tranziții induse.

Observațiile teoretice ale lui A. Einstein au fost, însă, uitate până în 1953 când fizicianul american [Charles Townes](#) și, independent, [Nikolai Basov](#) și [Aleksandr Prohorov](#) din Uniunea Sovietică au reușit să producă primul maser, un dispozitiv asemănător cu laserul, dar care emite microunde în loc de radiație laser, rezultat pentru care cei trei au fost răsplățiți cu Premiul Nobel pentru Fizică în 1964.

Primul laser funcțional a fost construit de [Theodore Maiman](#) în 1960 și avea ca mediu activ un cristal sintetic de [rubin](#) pompat cu pulsuri de [flash](#).

Principiul de funcționare al laserului este exemplificat în Fig. 15.

În mod normal, nivelul energetic fundamental este cel mai populat; pe acest nivel se află cel mai mare număr de atomi.

Pe nivelul excitat se află un număr mic de atomi, care au tendința de a se dezexcita spontan. Dacă printr-o metodă oarecare reușim să suprapopulăm nivelul

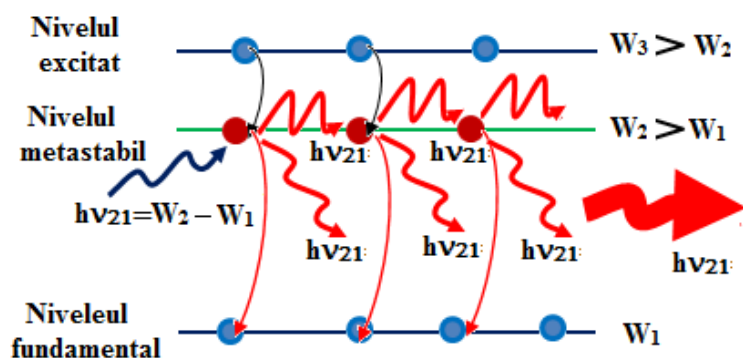


Fig. 15

excitat, lucru nefiresc, în mod natural, creăm posibilitatea de a amplifica lumina. Fenomenul de suprapopulare a nivelului superior energetic cu stări atomice se numește [inversie de populație](#). Procedeu tehnologic de realizare a acestui fenomen se numește **pompaj**, care poate fi optic sau electric. Maiman, de exemplu, a folosit pompajul optic pentru a produce radiația laser.

Pe nivelul excitat, atomii vor sta un timp limitat, după care se vor dezexcita spontan, o parte pe nivelul fundamental, iar o altă parte pe un nivel intermediar, așa numitul nivel metastabil. Atomii stimulați pe nivelul metastabil se vor dezexcita la rezonanță și vor da naștere unui fascicul de lumină foarte intens, coerent și perfect monocromatic, Fig. 15!

Remarcați că energia fotonului incident este strict egală cu energia fotonilor emiși!

Acesta este fenomenul laser!



Și acum o observație foarte importantă:

Fenomenul laser este singurul fenomen care nu se produce de la sine în natură! Acest fenomen este produs exclusiv de om.

România a fost a patra țară din lume în care s-au realizat laseri, în urma unor cercetări întreprinse de un colectiv condus de prof. [Ion I. Agârbiceanu](#) (fiul scriitorului [Ion Agârbiceanu](#)), în cadrul Institutului de Fizică Atomică din București. Rezultatul lor a fost raportat în 1961.

PROPRIETĂȚILE RADIAȚIEI LASER

- monocromaticitatea (tranziția este stimulată între două nivele înguste bine determinate, Fig. 15);
- coerență (radiația emisă este în fază);
- direcționalitate (este emisă sub forma unui fascicul paralel și foarte îngust);
- intensitatea, posibilitate mare de focalizare; se produc regiuni cu energie luminoasă extrem de mare.

APLICAȚII ALE LASERULUI

Laserele sunt folosite în multe dispozitive tehnologice moderne incluzând scanere pentru citirea codurilor de bare, unități de citire a compact disc-urilor (CD-uri) și a imprimantelor cu laser.

De asemenea laserul este utilizat în medicină, industrie, telecomunicații.

Laserul poate să genereze lumină invizibilă ochiului uman, de la raze infraroșii până în domeniul razelor X.

ACTIVITĂȚI DE FIXARE A CUNOȘTINTELOR ȘI DE EVALUARE

Răspundeți la următoarele întrebări:

1. Cine a elaborat prima teorie atomistă a materiei și care a fost, cu aproximație, perioada istorică?
2. Prezentați, pe scurt, etapele istorice în care a fost implementată teoria atomistă modernă, în fizică.
3. Ce este o sursă de lumină?
4. Ce este un spectru de lumină?
5. Ce este un spectrograf și care sunt părțile lui componente?
6. Ce este un spectru de emisie?
7. Ce este un spectru de absorbție?
8. Ce este o serie spectrală?
9. Care este concluzia experienței lui Rutherford?
10. Ce este o stare legată a atomului?
11. Ce este un atom hidrogenoid?
12. Care sunt deficiențele modelului planetar?
13. Enumerați postulatele lui Bohr.
14. Care este concluzia experienței Frank și Hertz?
15. Ce reprezintă numerele cuantice? Dați exemple.
16. Ce este radiația X?
17. Care sunt tipurile de radiație X?
18. Care sunt proprietățile radiației X?
19. Ce este radiația laser?
20. Care sunt proprietățile radiației laser?

BIBLIOGRAFIE:

1. Mantea C., Garabet M – Fizica F_1+F_2 , manual pentru clasa a 12-a, Editura ALL Educational, 2007
2. Ciubotaru D., ș.a. – FIZICA, Manual pentru clasa a XII-a, Editura Didactică și Pedagogică, București – 1994.
3. Vlăducă Gh., ș.a. – PROBLEME DE FIZICĂ PENTRU CLASELE XI-XII, Editura Didactică și Pedagogică, București – 1983.
4. Cone G., Stanciu Gh. - PROBLEME DE FIZICĂ PENTRU LICEU, vol. II, Editura Academiei, 1988
5. von Laue M, - Istoria fizicii, pag. 135-151, EDITURA ȘTIINȚIFICĂ, București, 1965
6. <http://inforisx.incerc2004.ro/sursa.htm>
7. <http://ro.wikipedia.org/>
8. <http://www.walter-fendt.de/ph14ro/>
9. <http://ael.ctcnvk.ro/econtent-fizica/>