

2. ELEMENTE DE FIZICĂ CUANTICĂ

2.1. Efectul fotoelectric extern.

Prin **efect fotoelectric extern** se înțelege emisia de electroni de către corpuri sub acțiunea radiațiilor electromagnetice.

Există și **efect fotoelectric intern**, care constă în generarea unor noi purtători de sarcină liberi în interiorul unui semiconductor sub acțiunea radiațiilor electromagnetice.

Efectul fotoelectric a fost descoperit de H. Hertz în 1890, dar a fost explicat abia în 1904 de către A. Einstein pe baza teoriei corpusculare a luminii, *conform căreia lumina este emisă, se propagă și este absorbită în mod discontinuu sub formă de fotoni.*

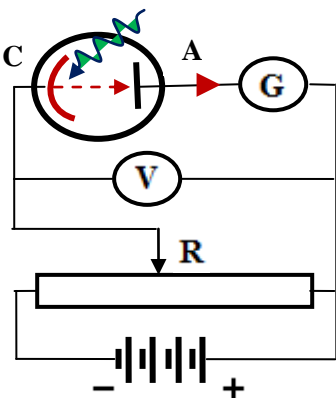


Fig. 1

Pentru studiul efectului fotoelectric extern Einstein a folosit dispozitivul experimental din Fig.1.

- Catodul este confecționat dintr-un material cu proprietăți **fototelectronoemissive** (*emite foarte ușor electroni sub influența luminii, Cesiul – de ex.*).
- Cu ajutorul cursorului reostatului R se poate modifica tensiunea de polarizare a celulei fotoelectrice, măsurată cu voltmetrul V.
- Curentul din circuitul anodic va fi indicat de galvanometrul G.
- Inițial circuitul este polarizat direct (+ la anod și –la catod).

Din datele experimentale s-au observat următoarele:

1. Dacă se iluminează catodul cu lumină de **frecvență constantă** (aceeași culoare) și pentru o anumită valoare a fluxului luminos intensitatea curentului fotoelectric (curentul anodic) variază proporțional cu tensiunea de polarizare.

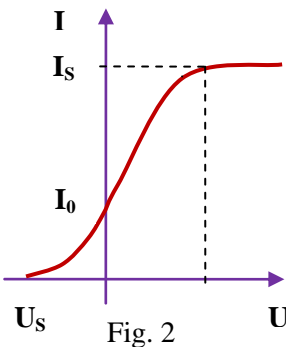


Fig. 2

2. Intensitatea curentului crește până la un moment dat, după care rămâne constantă, chiar pentru tensiuni de polarizare mari. Acest curent se numește *curent de saturație I_s*. Se constată, de asemenea, că în circuitul anodic există un curent *I₀*, chiar în absența polarizării, Fig. 2. Fig. 2 se mai numește *caracteristica curent tensiune a efectului fotoelectric extern*.

3. În cazul polarizării inverse, curentul anodic variază invers proporțional cu valoarea tensiunii, devenind zero pentru o valoare a tensiunii inverse de polarizare *U_s*, numită *tensiune de stopare*.

4. Dacă modificăm fluxul luminos de un anumit număr de ori se va obține o *familie de caracteristici* asemănătoare, dar cu valori ale lui *I_s* și *I₀* proporționale, Fig. 3.

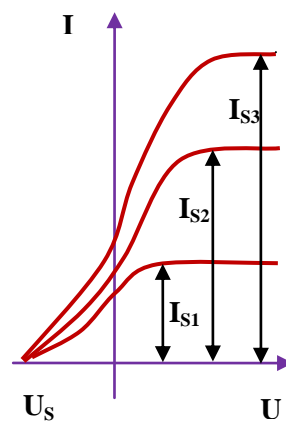


Fig. 3

5. Dacă micșorăm frecvența radiației luminoase foarte mult, constatăm că pentru există o frecvență minimă pentru care efectul nu se mai produce.

2.1.1. Legile efectului fotoelectric extern

Din datele observate experimental A. Einstein a enunțat cele patru legi ale efectului fotoelectric extern:

1. *Intensitatea curentului fotoelectric de saturație este direct proporțional cu fluxul radiațiilor electromagnetice incidente, când frecvența este constantă.*
2. *Energia cinetică a fotoelectronilor emiși este direct proporțională cu frecvența radiațiilor electromagnetice și nu depinde de fluxul acestora.*
3. *Există o frecvență minimă, specifică fiecărei substanțe, numită frecvență de prag, sau prag roșu, pentru care efectul nu se mai produce.*
4. *Efectul fotoelectric extern se produce practic instantaneu.*

2.1.2. Cuante de energie. Fotoni.

În 1900 [M. Planck](#), pornind de la o intuiție a lansat o ipoteză care spunea: Ce-ar fi dacă, la fel ca materia, și energia ar fi constituită din particule, pachete de energie, sau **cuante de energie**, cum le-a denumit el – de la adjectivul interogativ latin *quanta, quantum* care înseamnă *cât, câte*.

Mergând pe această ipoteză Planck a descoperit ca mărimea acestor cuante este direct proporțională cu frecvența:

$$\varepsilon = h\nu \quad (1)$$

unde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ este **constanta lui Planck**.

Pentru această ipoteză Max Planck a primit premiul Nobel pentru fizică în 1918.

Așa după cum observăm, cuanta de energie nu poate lua orice valori – valori continue, ci numai anumite valori – valori discrete.

Pornind de la această ipoteză, A. Einstein, în 1905, reia o ipoteza mai veche în legătură cu lumina, conform căreia radiația luminoasă este alcătuită din niște particule (corpusculi) numite ulterior **fotoni**.

Denumirea **foton** a fost dată în 1926 de fizicianul american [Gilbert N. Lewis](#), pornind de la cuvântul grecesc φως, phos, care înseamnă *lumină*.

Fotonul are viteză. Viteza fotonului este viteza luminii: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Fotonul are masă, dar numai de mișcare, conform teoriei relativității restrânse masa de repaus a fotonului este $m_0 = 0$.

Fotonul are energie, conform rel. (1).

Fotonul are impuls:
$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

Din cele prezentate mai sus rezultă în mod evident că fotonul este o particulă reală.

2.1.3. Explicația legilor efectului fotoelectric extern.

În anul 1905, pornind de la concepția corpusculară (fotonică) în legătură cu natura luminii, A. Einstein a explicat efectul fotoelectric extern ca un proces de ciocnire plastică între un electron legat și un foton. Un foton cu energia $h\nu$ lovește un **electron legat**, căruia îi cedează întreaga energie,

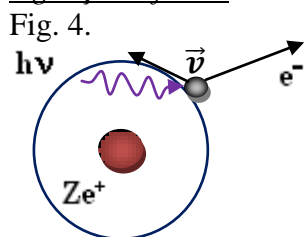


Fig. 4

Electronul folosește această energie pentru a se rupe din legătură – efectuează un lucru mecanic de extracție L și pentru a se deplasa în continuare cu o anumită viteză, adică va căpăta și energie cinetică E_c .

Legea conservării energiei, în acest caz se va scrie:

$$h\nu = L + E_c \quad (3)$$

În continuare vom explica fiecare lege a efectului fotoelectric extern.

Legea I. Flux luminos mare înseamnă număr mare de fotoni. Numărul mare de fotoni va genera un număr mare de electroni, care vor genera, la rândul lor un curent anodic mare.

Legea a-II-a. Din relația (3) se vede că E_c este proporțională cu frecvența. **Lucrul mecanic de extracție este o constantă de material.**

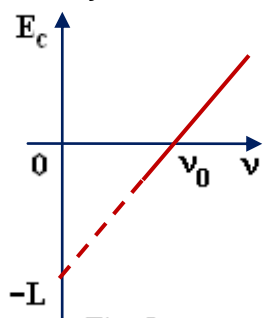


Fig. 5

Reprezentarea grafică a rel. (3) este redată în Fig. 5. Se observă dependența liniară $E_c = E_c(\nu)$, pentru un anumit catod.

Legea a-III-a. Din Fig. 5 se observă că pentru $\nu = \nu_0$ energia cinetică este zero. ν_0 se numește **frecvența de prag** sau **pragul roșu**.

Prin extrapolare se poate obține și lucrul mecanic de extracție, care, din punct de vedere matematic, nu reprezintă altceva decât ordonata la origine.

Legea a-IV-a. De fapt efectul fotoelectric nu este instantaneu, dar având în vedere viteza foarte mare de propagare a luminii, putem considera că **efectul fotoelectric extern se produce practic instantaneu!**

2.1.4. Aplicații ale efectului fotoelectric extern. Dispozitive optoelectronice.

1. **1. Celula fotoelectrică**, Fig. 6 este alcătuită dintr-un tub de sticlă, vidat sau conținând un gaz inert la

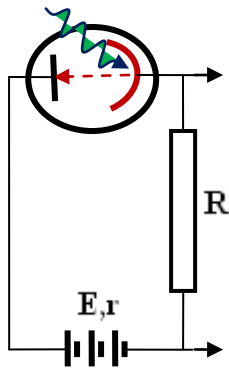


Fig. 6

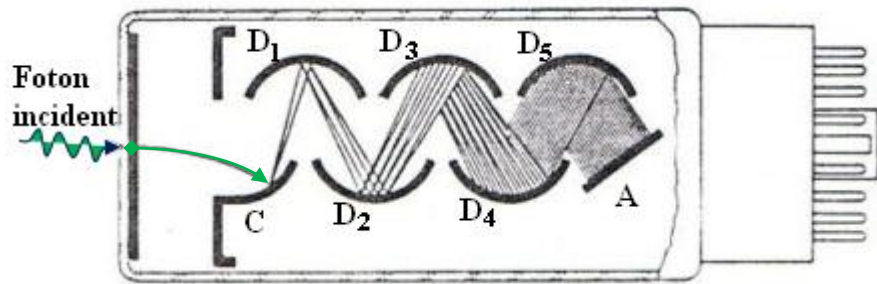


Fig. 7

presiune scăzută, care are în interior doi electrozi: catodul și anodul. Când celula este iluminată ea generează un curent prin circuitul anodic, care se va aplica unui circuit cu o anumită funcție, de ex. de comandă a unui dispozitiv.

2. **Fotomultiplicatorul**, Fig. 7 este alcătuit dintr-un tub de sticlă vidat în care se află un catod C, un anod A și un număr oarecare de electrozi auxiliari numiți dinode **D₁-D₅**. Dinoda este un electrod care, bombardat cu un electron, emite un număr mai mare de electroni secundari. În acest fel un flux luminos incident scăzut poate genera un curent anodic mare (multiplicat). Acest dispozitiv este practic un amplificator de lumină. Este folosit în construcția camerelor de luat vederi.

2.2 Efectul Compton

În 1923, fizicianul american [Arthur Holly Compton](#), oferă dovezi suplimentare potrivit cărora radiația electromagnetică are și o structură corpusculară, iar **cuantelor - particulele constituente - li se pot asocia proprietăți precum energia și impulsul.**

Mai mult, la interacțiunea cu materia a acestor corpusculi se respectă și legile de conservare a energiei și impulsului.

Observațiile lui Compton au reprezentat la vremea respectivă o **confirmare strălucită a concepției corpusculare a luminii**, introdusă de Einstein în 1905.

Studiind împrăștierea razelor X pe un bloc de grafit sub diferite unghiuri θ , Fig. 8, A. H. Compton a observat că pe lângă radiațiile cu lungimea de undă egală cu a radiațiilor incidente mai apare o radiație cu lungimea de undă mult mai mare decât a radiației incidente. **Fenomenul de apariție a unei radiații cu lungimea de undă mai mare decât a radiației incidente, ca urmare a împrăștierei radiației pe un material, se numește efect Compton.**

Ca și efectul fotoelectric extern, efectul Compton este explicat ca un proces de interacțiune dintre un foton și un electron. Fig. 9. Legea conservării energiei se va scrie:

Ca și efectul fotoelectric extern, efectul Compton este explicat ca un proces de interacțiune dintre un foton și un electron. Fig. 9. Legea conservării energiei se va scrie:

$$h\nu_0 = h\nu + L + E_c \quad (4)$$

Ținând cont că energia fotonului incident $h\nu_0$ este mult mai mare decât lucrul mecanic de extracție L , acesta poate fi neglijat în raport cu celelalte

forme de energie, adică putem considera $L \cong 0$.

În acest caz, procesul Compton, poate fi explicat ca un proces de ciocnire elastică între un foton și un electron liber și deci, ecuația (4) devine:

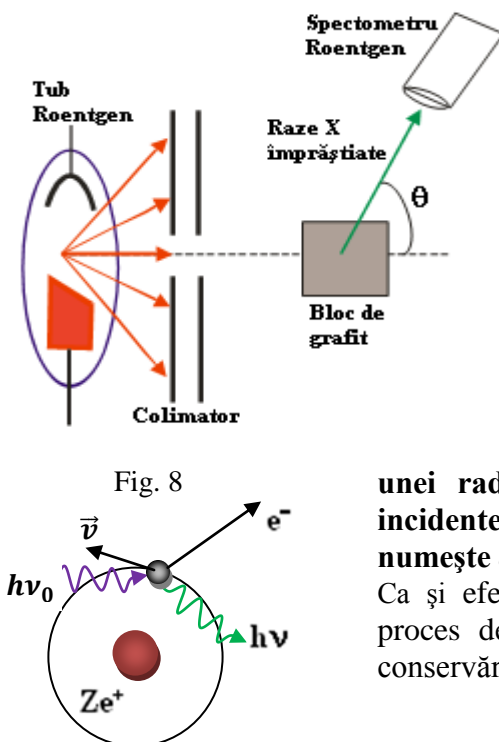


Fig. 8

Fig. 9

$$h\nu_0 = h\nu + E_c \quad (4')$$

sau, ținând cont de relația relativistă dintre masă și energie:

$$h\nu_0 = h\nu + (m - m_0)c^2 \quad (4'')$$

Fiind vorba de o ciocnire elastică, se impune și respectarea legii conservării impulsului (Fig.10):

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e \quad (5)$$

sau:

$$\frac{h}{\lambda_0} = \frac{h}{\lambda} + m \cdot v \quad (5')$$

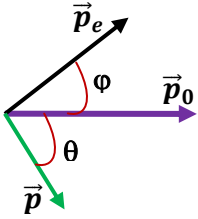


Fig. 10

Așa cum am spus, când am definit efectul Compton, există o variație a lungimii de undă a unei împrăștiate, față de unda incidentă, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, numită *deplasare Compton*. Considerând relațiile (4'') și (5') putem calcula această deplasare:

$$\Delta\lambda = 2\Lambda \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (6)$$

Unde am făcut notația:

$$\Lambda = \frac{h}{m_0 c} \quad (7)$$

care se numește lungimea de undă Compton. Așa cum se vede în Fig. 8 și 10, θ este unghiul de împrăștiere al radiației, iar ϕ unghiul sub care este deviat *electronul de recul*.

Faptele experimentale legate de efectele fotoelectric și Compton au contribuit la fundamentarea teoriei corpusculare (fotonice) a luminii. Deși aceasta teorie complementară a cunoscut succese spectaculoase în explicarea acestor fenomene, nu s-a renunțat la teoria ondulatorie prin care se pot interpreta corect interferența, difracția și polarizarea luminii. A apărut, în mod evident, întrebarea: **ce este lumina, undă sau corpuscul?** Răspunsul la aceasta întrebare se găsește în următoarea afirmație a lui A. Einstein: "este mult mai probabil să spunem că lumina are atât caracter ondulatoriu cât și corpuscular". Astăzi acest răspuns este depășit. Din punct de vedere microscopic lumina și, în general, radiația electromagnetică este o undă. Microscopic, lumina este un ansamblu de particule cuantice, care nu sunt nici unde, nici corpusculi, ci obiecte radical diferite de cele clasice.

2.3 Ipoteza de Broglie. Aplicații.

În anul 1924, [Louis de Broglie](#) a făcut *ipoteza* că, *așa cum radiația are proprietăți corpusculare, și particulele materiale au proprietăți ondulatorii și a presupus că oricărei particule libere, de impuls \vec{p} , i se poate atașa o lungime de undă, numită lungime de undă atașată sau lungime de undă de Broglie.*

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (8)$$

Relația (8) este cunoscută sub numele de ecuația lui de Broglie.

Sau, cunoscând energia particulelor $E = \frac{p^2}{2m}$ (nerelativistă) lungimea de undă de Broglie este dată

de relația

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (9)$$

2.3.1 Difrakția electronilor. (Experimentul Devison și Germer).

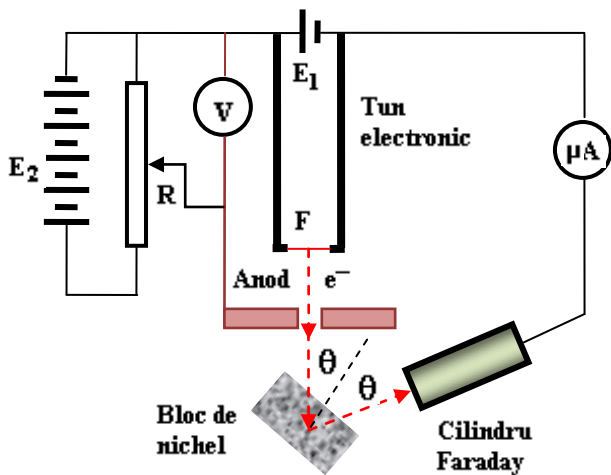


Fig. 11

Ipoteza lui Luis de Broglie a fost confirmată experimental de [C.J. Davisson](#) și [L.H. Germer](#) în 1927. Ei au efectuat un experiment de difracție a unui fascicul de electroni pe un cristal de nichel.

Caracterul ondulatoriu al razelor X a fost pus în evidență de [Max von Laue](#) în 1912, studiind difracția razelor X în cristale, lucrare pentru care a primit [premiul Nobel pentru fizică](#) în 1914..

În 1926 [Walter M. Elasser](#) a arătat că natura ondulatorie a particulelor materiale (de ex. electroni) s-ar putea pune în evidență la fel ca în cazul razelor X, și anume trimițând un fascicul de electroni pe un solid cristalin (de ex. un cristal de Ni). În acest caz atomii dispuși în plane reticulare joacă rolul unei rețele de difracție tridimensională.

Trebuie să remarcăm în acest caz faptul că se respectă condiția ca fenomenul de difracție să se producă, și anume că *lungimea de undă atașată electronilor accelerați este comparabilă ca ordin de mărime cu distanța dintre atomii cristalului – constanta rețelei, n.*

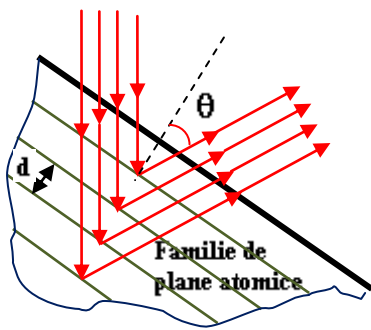


Fig. 12

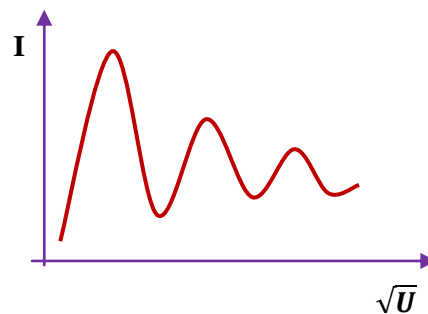


Fig. 13

În Fig. 11 este reprezentat schematic experimentul Devison și Germer. Un fascicul de electroni, emiși de un tun electronic și accelerați la tensiunea U sunt reflectați prin difracție de blocul de nichel sub unghiul θ către cilindrul Faraday, care va înregistra un curent I . Reprezentând grafic $I = I(\sqrt{U})$ se obține caracteristica din Fig. 13. S-a constatat experimental, că pentru diferite unghiuri θ , Fig. 13, se obțin maxime și minime de curent. Din punct de vedere ondulatoriu, existența maximelor de curent după anumite direcții se explică prin aceea că aceste direcții corespund unei intensități mai mari a undei asociate electronilor difracți.

Din teoria difracției se știe că intensitatea maximă a undelor rezultate după interferență se obține dacă diferența de drum δ este un multiplu întreg de lungimi de undă λ :

$$\delta = 2d \sin \theta = n\lambda, \text{ unde } n=1,2,3,\dots \quad (10)$$

Viteza de accelerare a electronilor se obține din legea conservării energii $E_c = eU$, de unde:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (11)$$

pe care dacă o înlocuim în rel. (8) obținem:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} \quad (12).$$

Se observă că valoarea lungimii de undă se poate modifica, modificând valoarea tensiunii de accelerare U .

De exemplu: pentru $\theta = 65^\circ$, $d = 0,9 \text{ \AA}$ și $n = 1$, din rel. (10) se obține $\lambda_{\text{exp.}} = 0,164 \text{ nm}$.

Pe de altă parte, din rel. (12), pentru $U = 54 \text{ V}$, se obține $\lambda_{\text{teor.}} = 0,164 \text{ nm}$, ceea ce reprezintă o excelentă concordanță între datele teoretice și cele experimentale.

2.3.1.a APLICAȚII. MICROSCOPUL ELECTRONIC.

Comportarea ondulatorie a particulelor, deci și a electronilor, este exploatată într-un domeniu nou al fizicii: **optica electronică**.

Principala concretizare a acestui domeniu științific este [microscopul electronic](#).

Din punct de vedere constructiv, microscopul electronic are o structură mai complexă, dar principalele lui părți componente îndeplinesc aceleași funcții ca și la microscopul optic. Evident, în acest caz rolul lentilelor optice este preluat de așa numitele lentile magnetice.



Fig. 14



Fig. 15

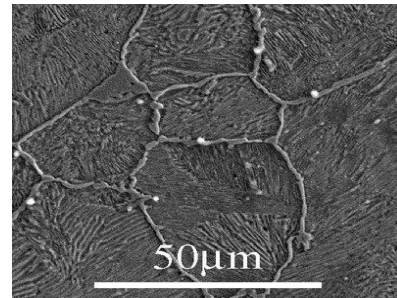


Fig.16

Deoarece puterea separatoare este invers proporțională cu lungimea de undă, microscopul optic nu pot da imagini clare ale unor obiecte mai mici de $0,15 \mu\text{m}$, adică pot realiza o mărire de maxim 2.000 de ori. Deoarece electronii au o lungime de undă atașată mult mai mică decât lungimea de undă a radiației vizibile și rezoluția acestor aparate este considerabil mai mare decât a microscopelor optice, ele putând realiza o mărire de până la 1.000.000 de ori. Vă prezint, în continuare câteva imagini spectaculoase, obținute cu microscopul electronic. În fig. 14 puteți vedea imaginea mărită a unui grăunte de sare și a unui bob de piper, fotografie realizată de David McCarthy, în Fig. 15 este musca de casă, Musca Domestica, iar în Fig. 16 oțelul hipereutectoid (microscop electronic - Perlita lamelară și Cementita II de culoare deschisă).

Oamenii de știință folosesc microscopul electronic în diferite domenii de cercetare incluzând medicina, biologia, chimia, metalurgia, entomologia (studiul insectelor) și FIZICĂ.

Pentru mai multe imagini, vizitați și site-ul: <http://www.google.ro/images?q=microscopul+electronic>

2.4 DUALISMUL UNDĂ CORPUSCUL

Am văzut că pentru a explica efectul fotoelectric extern, A. Einstein reconsideră caracterul corpuscular al luminii. Această teorie nu era nouă. I. Newton considera la vremea sa că lumina are caracter corpuscular și explica în felul acesta fenomenele de reflexie și refracție a luminii. Fenomenele de interferență și difracție nu pot fi explicate decât admitând caracterul ondulatoriu al luminii, caracter enunțat de [Cr. Huygens](#) în 1680. Ca o paranteză vă pot spune că între Newton și Huygens a existat, la vremea respectivă, o polemică aprinsă referitoare la adevărata natură a luminii...

De fapt, se acceptă azi că fenomenele de interferență și difracție sunt fenomene tipic ondulatorii, iar fenomenul fotoelectric extern și fenomenul Compton sunt fenomene tipic corpusculare.

În acest caz, pe bună dreptate, oamenii de știință și-au pus întrebarea: *Care este adevărata natură a luminii?*

Pentru a rezolva această dilemă, A. Einstein face afirmația că lumina are caracter **dual**. Acest lucru rezultă evident din rel. (1), și este confirmat de rel. (8), relații în care intervin atât mărimi corpusculare ϵ și p , cât și mărimi ondulatorii λ și ν . Astfel putem concluziona că *substanța se comportă în anumite situații ca particulă, iar în alte situații ca undă*.

2.5 PRINCIPIUL DE INCERTITUDINE

În fizică, una din problemele fundamentale este de a determina (cu precizie) poziția și coordonata unui corp pe traiectoria sa. Pentru a face aceste determinări este necesar să facem observații optice, fapt care presupune, uneori, anumite constrângeri. De exemplu, Luna care se mișcă în jurul Pământului este observată deoarece ea reflectă lumina care vine de la Soare. Dar așa cum am văzut deja, lumina este alcătuită din fotoni, care interacționând cu Luna îi cedează atât impuls cât și energie. Deoarece Luna are o masă și o energie foarte mare, efectul perturbator al acestei interacțiuni este neglijabil. Adică razele Soarelui nu vor modifica traiectoria Lunii, sau viteza acesteia pe traiectorie în jurul Pământului.

În cazul electronului, de exemplu, datorită dimensiunilor lui foarte mici, efectul perturbator al interacțiunii acestuia cu lumina (fotonul) are ca efect modificarea stării acestuia de mișcare.

Dificultatea de a descrie mișcarea electronului, cu ajutorul fizicii clasice, este magistral exprimată de principiul de incertitudine (sau de nedeterminare), enunțat de [W. Heisenberg](#) în 1927.

Pentru formularea acestui principiu, să considerăm un fascicul de electroni monoenergetici, care se mișcă cu viteza v_0 , ca în Fig. 17.

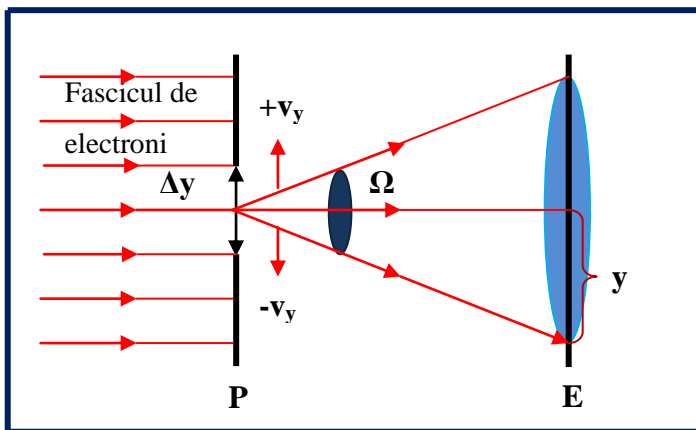


Fig. 17

Ne propunem să măsurăm cu o precizie oricât de mare coordonata y și viteza v_y a unui electron.

Pentru a determina coordonata y , cu o precizie cât mai mare, este necesar să așezăm în fața fasciculului paravanul **P**, prevăzut cu o fantă de lărgime Δy . **Precizia** cu care măsurăm coordonata y a electronului va fi cu atât mai mare cu cât lărgimea Δy va fi mai mică. Dar mișcarea electronului este caracterizată de o undă (de Broglie), care va interacționa cu fanta.

Din studiul fenomenului de difracție știm că atunci când dimensiunea paravanului devine comparabilă, ca ordin de mărime, cu lungimea de undă a radiației incidente, se produce fenomenul de difracție, fapt evidențiat de faptul că pe ecranul **E** va apărea o figură de difracție. Acest lucru evidențiază faptul că **imprecizia** cu care se poate măsura viteza electronului, respectiv impulsul, a crescut corespunzător, sau altfel spus viteza electronului poate avea orice valoare cuprinsă în conul de unghi solid Ω .

Dacă notăm cu Δy imprecizia cu care este măsurată coordonata electronului pe direcția y , iar cu Δp_y imprecizia cu care este măsurat impulsul electronului de aceeași direcție atunci:

$$\Delta p_y \cdot \Delta y \geq \hbar \quad (13)$$

Cunoscută și ca **relația de incertitudine**, sau **relația lui Heisenberg** și care exprimă matematic principiul de incertitudine:

Nu se poate măsura, în același timp, cu aceeași precizie, viteza și coordonata unei microparticule.

2.6 ACTIVITĂȚI DE FIXARE A CUNOȘTINȚELOR ȘI DE EVALUARE

Răspundeți la următoarele întrebări:

1. Definiți *efectul fotoelectric extern*.
2. Ce este *efectul fotoelectric intern*?
3. Cine a descoperit *efectul fotoelectric extern* și când?
4. Cine a explicat *efectul fotoelectric extern*, în ce an și în baza cărei teorii referitoare la lumină?
5. Ce înțelegeți prin caracterul corpuscular al luminii?
6. Ce înțelegeți prin sintagma: „proprietăți fotoelectronoemise” ale unui material?
7. Ce este o caracteristică?
8. Ce este tensiunea de stopare, U_s ?
9. Ce este curentul de saturație, I_s ?
10. Enunțați legile efectului fotoelectric extern.
11. Ce este fotonul și care sunt proprietățile lui fizice?

12. Ce este lucrul mecanic de extracție?
13. Ce este 1eV și ce mărime fizică măsoară?
14. Ce este frecvența de prag?
15. Scrieți legea de conservare a energiei în cazul efectului fotoelectric extern.
16. Scrieți legea de conservare a energiei în cazul efectului Compton.
17. Care este deosebirea dintre *efectul fotoelectric extern* și *efectul Compton*?
18. În ce constă ipoteza lui de Broglie?
19. Enunțați ipoteza dualismului *undă corpuscul*.
20. Enunțați *principiul de incertitudine*.

Rezolvați următoarele probleme:

Tabelul I

constanta lui Planck	$h=6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s
masa de repaus a electronului	$m_0=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
masa protonului	$m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$ kg
sarcina electronului	$e=1,6 \cdot 10^{-19}$ C
viteza luminii	$c=3 \cdot 10^8$ m/s

*)Pentru rezolvarea problemelor de mai jos utilizați datele din tabelul I.

1. Câți fotoni a căror a căror lungime de undă în vid este $\lambda_0=520$ nm au energia totală 10^{-3} J?
R: $N=26 \cdot 10^{14}$ fotoni
2. Cu ce viteză trebuie să se miște un electron pentru ca energia lui cinetică să fie egală cu energia unui foton cu $\lambda=5,2 \cdot 10^{-7}$ m.
R: $v = 9,2 \cdot 10^5$ m/s
3. Pragul fotoelectric pentru bariu este $\lambda_0=5,5 \cdot 10^{-7}$ m. cu ce viteză maximă ies electronii, dacă lungimea de undă a radiației incidente este $\lambda=4,4 \cdot 10^{-7}$ m?
R: $v = 4,45 \cdot 10^5$ m/s.
4. Pe o suprafață de aluminiu ($L=1,2$ eV) cade un fascicul de lumină cu lungimea de undă $\lambda=200$ nm. Să se calculeze: a) energia cinetică a celui mai rapid electron; b) tensiunea de stopare; c) lungimea de undă de prag pentru aluminiu.
R: a) $E_c=3,2$ J; b) $U_s=2$ V; c) $\lambda_0=300$ nm.
5. Un foton de raze X cu energia 50 keV suferă o ciocnire directă cu un electron liber aflat în repaus și este împrăștiat sub un unghi de 180° . Să se calculeze: a) variația lungimii de undă Compton; b) variația relativă a lungimii de undă Compton; c) care este pierderea de energie a fotonului?
R: a) $\Delta\lambda=4,852$ pm; b) $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,2, \text{ sau } 20\%$; c) $E_c \cong 8$ keV
6. Să se calculeze lungimea de undă de Broglie a unui proton știind că energia lui cinetică este egală cu energia de repaus a electronului.
R: $\lambda=40$ fm
7. O particulă încărcată cu sarcină electrică pozitivă, accelerată de o tensiune $U=100$ V, are o lungime de undă de Broglie $\lambda=2,87$ pm și sarcina electrică egală cu sarcina electronului. Calculați masa particulei. Precizați natura particulei.
R: $m=1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Vezi Tabelul I.
8. Să se stabilească expresia lungimii de undă a unei asociate unei particule, cu masa de repaus m_0 , care se mișcă cu viteze relativiste.
R: $\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$
9. Să se stabilească expresia lungimii de undă a unei asociate unei particule în funcție de factorul relativist $\gamma = \frac{m}{m_0}$.
R: $\lambda = \frac{h}{m_0 c \sqrt{\gamma^2 - 1}}$
10. Un microscop care folosește fotoni este folosit pentru a localiza un electron dintr-un atom cu o imprecizie $\Delta x=10$ nm. Care este imprecizia în determinarea impulsului electronului localizat?
R: $\Delta p=1,05 \cdot 10^{-26}$ kg·m/s

BIBLIOGRAFIE:

1. D. Ciubotaru, T. Angelescu, I. Munteanu, M. Melnic, M. Gall – FIZICA – Manual pentru clasa a XII-a, Editura Didactică și Pedagogică – București – 1992.
2. Gh. Vlăducă, N. Gherbanovschi, M. Melnic, D. Ciubotaru, I. Munteanu, A. Rusu, I. Viță – PROBLEME DE FIZICĂ pentru clasele XI – XII, Editura Didactică și Pedagogică – București – 1983.
3. <http://en.wikipedia.org/wiki>
4. http://dev.physicslab.org/Document.aspx?doctype=3&filename=AtomicNuclear_DavissonGermer.xml
5. <http://pentru-curiosi.blogspot.ro/2010/04/imagini-la-microscopul-electronic.html>

OBSERVAȚIE: *Cuvintele de culoare albastră și subliniate sunt hiperlincuri. De asemenea, dacă puneți promterul pe anumite imagini vi se va deschide un link.*