

# Dualismul undă-corpusul. Ipoteza de Broglie

## Cuprins

1	Dualismul undă-corpusul	1
2	Ipoteza de Broglie. Difrakția electronilor. Aplicații	2

## 1 Dualismul undă-corpusul

Fenomenele de interferență, difracție, și polarizare evidențiază proprietățile ondulatorii ale luminii, pe când efectul fotoelectric și efectul Compton evidențiază proprietățile corpusculare. Prin urmare, se constată caracterul dual, ondulatoriu, și corpuscular al undelor electromagnetice.

Efectul fotoelectric și efectul Compton au fost explicate considerând că radiația electromagnetică este un flux de particule, numite fotoni, ce interacționează cu substanța.

Mărimile ce caracterizează un foton sunt:

- sarcina electrică  $q = 0$
- masa de repaus  $m_0 = 0$
- energia  $E = h\nu$
- masa de mișcare  $m = \frac{h\nu}{c^2}$
- impulsul  $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

Constanta lui Planck,  $h$ , reprezintă veriga de legătură dintre aspectul ondulatoriu și cel corpuscular. Poate fi exprimată prin produsul a două mărimi, una ce caracterizează unda (frecvența  $\nu$ , perioada  $T = \frac{1}{\nu}$ , lungimea de undă  $\lambda$ ) și una caracteristică particulei (energia  $E$ , impulsul  $p$ ).

$$h = ET = p\lambda$$

În cazul radiațiilor X și  $\gamma$  predomină caracterul corpuscular, energia și impulsul fiind mari, iar perioada și lungimea de undă mici. În cazul undelor radio predomină caracterul ondulatoriu, energia și impulsul fiind mici, iar perioada și lungimea de undă mari.

În sistemele macroscopice, constanta lui Planck poate fi considerată nulă.

## 2 Ipoteza de Broglie. Difrakția electronilor. Aplicații

Analog cu dualismul undă-corpusul în cazul undelor electromagnetice, Louis de Broglie asociază oricărei microparticule în mișcare cu energia  $E$  și impulsul  $p$  o undă caracterizată prin frecvența  $\nu$  și lungimea de undă  $\lambda$ , cu relațiile dintre mărimi

$$E = h\nu \quad \left\{ \begin{array}{l} \nu \\ E \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda \\ p \end{array} \right\} \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

De Broglie a presupus că lungimea de undă a undelor asociate microparticulelor trebuie să fie dată tot de relația  $\lambda = \frac{h}{p}$ , unde  $p$  este impulsul microparticulei.

Ipoteza de Broglie afirmă că oricărei microparticule care posedă un impuls  $p$  i se poate asocia în mod formal o undă cu lungimea de undă  $\lambda_B = \frac{h}{p}$ , numită lungime de undă de Broglie.

Undelor electromagnetice le sunt asociați fotonii, care nu au masă de repaus. Analog, undele de Broglie sunt asociate particulelor cu masă de repaus: electroni, protoni, neutroni, particule  $\alpha$ , molecule de hidrogen. În concluzie, radiația electromagnetică are proprietăți ondulatorii și corpusculare, asemenea radiației corpusculare.

### Experimentul Davisson-Germer

Fizicienii Davisson și Germer au confirmat experimental ipoteza de Broglie, demonstrând că electronii în mișcare prezintă proprietăți ondulatorii, prin generarea fenomenelor de difracție însoțite de interferență.

Filamentul  $F$ , alimentat de sursa  $E_1$ , emite electroni care sunt accelerați într-un tun electronic, alimentat de sursa  $E_2$ . Tensiunea de accelerare  $U$  este controlată de reostatul  $R$  și măsurată cu voltmetrul  $V$ .

Fasciculul monoenergetic de electroni, numit *monocromatic*, care iese din tunul electronic, are energia:

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU \quad (1)$$

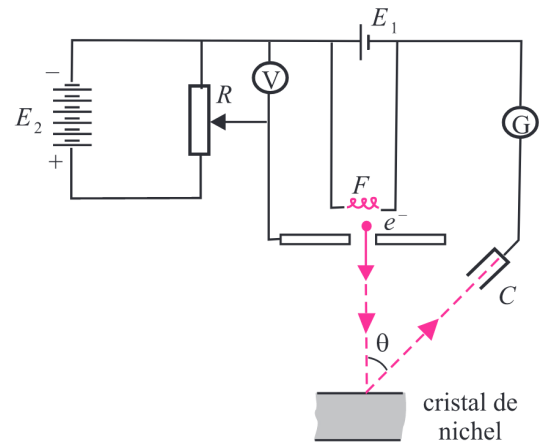
Fasciculul cade pe un monocristal de nichel, iar fasciculul difractat este captat de un cilindru Faraday  $C$  colector. Curentul de electroni este măsurat de galvanometrul  $G$ .

Se observă că intensitatea fasciculului de electroni difracți prezintă maxime și minime în funcție de  $U$  și unghiul de incidență  $\theta$ .

Din relația (1) rezultă  $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$ .

În cazul nerelativist avem impulsul  $p = m_e v = \sqrt{2em_e U}$ , iar lungimea de undă de Broglie asociată este:

$$\lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}} = \frac{h}{\sqrt{2em_e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{12,23 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{U}}$$



**Fig. 1:** Schema experimentului

Pentru un potențial de accelerare  $V = 54$  V, lungimea de undă este de același ordin de mărime cu lungimea de undă a radiației X:

$$\lambda_B = \frac{12,23 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{54}} = 1,664 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad (2)$$

Fenomenele de difracție pot fi observate când unda interacționează cu o „rețea de difracție” a cărei constantă de rețea are dimensiunile comparabile cu lungimea de undă ( $10^{-10}$  m).

Atomii monocristalului sunt așezați ordonat, distanța dintre doi atomi vecini fiind de ordinul  $10^{-10}$  m. Această aranjare regulată în nodurile rețelei cristaline conferă proprietățile unei rețele de difracție tridimensionale.

În urma studierii difracției razelor X pe monocristale, Bragg a stabilit că intensitatea fasciculului difractat trece prin valori maxime în cazul:

$$2d \sin \theta = k\lambda, k \in \mathbb{N}^* \quad (3)$$

unde:

- $\theta$  este unghiul format de planul reticular cu direcția fasciculului incident, respectiv cel difractat.
- $d$  este constanta rețelei, adică distanța dintre două plane reticulare.
- $\lambda$  este lungimea de undă a radiației.
- $2d \sin \theta$  este diferența de drum dintre razele difractate de două plane reticulare vecine.

În cazul în care particulele suferă o difracție, se aplică relația (3). Pentru  $d = 0,91 \cdot 10^{-10}$  m,  $k = 1$ ,  $U = 54$  V, tensiune la care se obține primul maxim pentru  $\theta = 65^\circ$ , se obține:

$$\lambda_B = 2d \sin \theta = 2 \cdot 0,91 \cdot 10^{-10} \cdot 0,906 = 1,65 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad (4)$$

Valorile obținute în relațiile (2) și (4) se află în concordanță, confirmând că electronii în mișcare au proprietăți ondulatorii.

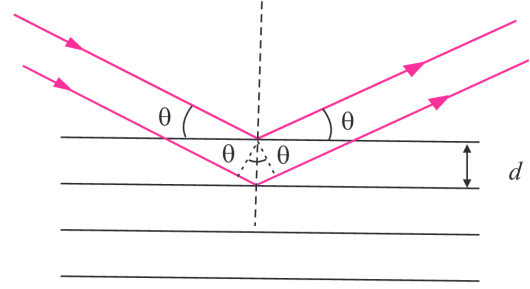
Lungimea de undă de Broglie este invers proporțională cu masa particulelor cărora le este asociată.

Microparticulele, numite *particule cuantice*, sunt radical diferite de particulele clasice, supunându-se unor legi specifice. Nu sunt nici particule, nici unde în sens clasic, comportamentul lor reflectând dualismul corpuscul-undă.

Deși unda de Broglie asociată microparticulelor nu este o undă în sensul clasic al cuvântului, este folosită această noțiune.

La nivel microscopic, un corpuscul nu poate avea proprietăți ondulatorii, iar unda nu poate fi concepută ca un flux de particule discrete. Particulele cuantice aparțin însă nivelului cuantic, fiind radical diferite de unde și corpusculi. De exemplu, ele nu au traiectorii.

Asupra sistemelor cuantice putem face doar afirmații statistice.



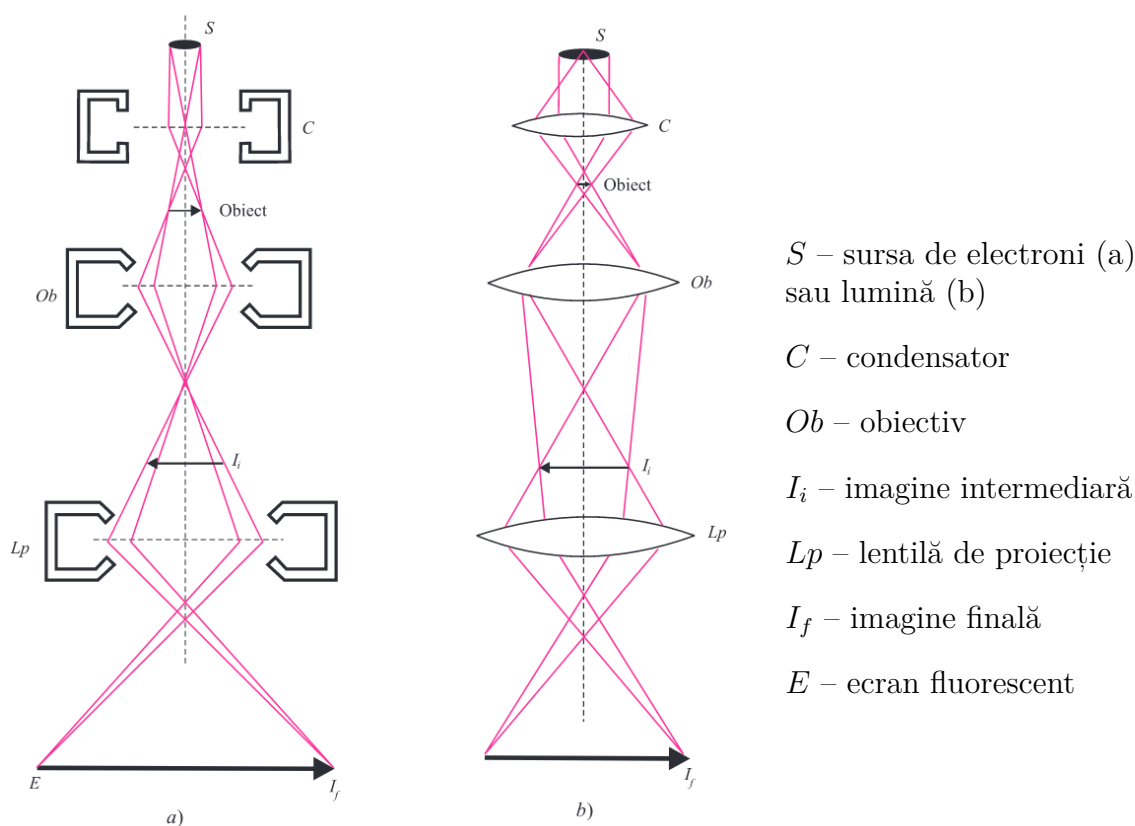
**Fig. 2:** Difracția razelor X pe un monocristal

## Microscopul electronic

Microscopul electronic este o aplicație a ipotezei lui de Broglie. Un fascicul de electroni cade pe un preparat și îl traversează, variațiile de grosime ale preparatului devenind variații de intensitate a fasciculului. Utilizând câmpuri electrice sau magnetice, traiectoriile electronilor sunt asemănătoare traiectoriilor razelor de lumină dintr-un microscop optic.

În cazul microscopului optic, pentru a distinge două puncte, distanța dintre ele trebuie să fie mai mare decât lungimea de undă a luminii folosite, adică mai mare decât zecimi de microni (puterea de separare).

În locul lentilelor optice se găsesc bobinele parcurse de curent electric (*lentile magnetice*) sau electrozii încărcăți electric – *lentile electrice* – ce pot focaliza și defocaliza un fascicul de electroni.



**Fig. 3:** Schema microscopului electronic și a microscopului optic

Datorită lungimii de undă mult mai mici a undelor asociate electronilor, puterea de separare a microscopului electronic este mult mai mare decât a microscopului optic. Transformarea imaginii în una luminoasă se realizează cu ajutorul unui ecran fluorescent.

Probele examinate trebuie să fie sub formă de pelicule foarte subțiri, din cauza puterii de pătrundere mici a electronilor.

Au fost construite și microscopie protonice și ionice, care pot mări de 10-15 ori mai mult decât un microscop electronic.

## Bibliografie

- Manualul de fizică pentru clasa a XII-a, F1  
Cleopatra Gherbanovski, Nicolae Gherbanovski  
Editura NICULESCU ABC  
2016