

# 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

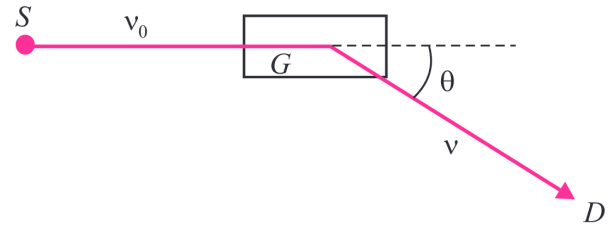
Analog cu dualismul undă-corpusul în cazul undelor electromagnetice, Louis de Broglie asociază oricărei microparticule în mișcare cu energia  $E$  și impulsul  $p$  o undă caracterizată prin frecvența  $\nu$  și lungimea de undă  $\lambda$ , cu relațiile dintre mărimi

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

Atunci când un fascicul de raze X, provenit de la o sursă  $S$ , trece printr-un bloc de grafit  $G$ , radiațiile incidente sunt împrăștiate în toate direcțiile.

Pentru diferite unghiuri de împrăștiere  $\theta$ , detectorul  $D$  înregistrează, pe lângă radiația incidentă cu lungimea de undă  $\lambda_0$ , și o altă radiație cu lungimea de undă  $\lambda > \lambda_0$ .

Din punct de vedere macroscopic, lumina, și în general radiația electromagnetică, este o undă. Din punct de vedere microscopic, lumina este un ansamblu de particule cuantice.



**Fig. 1:** Experimentul Compton, reprezentat schematic

Fenomenul, observabil pentru lungimi de undă mici, ca în cazul razelor X și  $\gamma$ , deci pentru frecvențe mari ( $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ), a fost explicat de către Compton pe baza naturii corpusculare a undelor electromagnetice, adică prin existența fotonilor.

*Efectul Compton este fenomenul de împrăștiere elastică a fotonilor pe electronii liberi, în urma căreia, pe lângă radiația incidentă, apare și o radiație cu lungimea de undă mai mare (frecvența mai mică).*

În cazul în care atomii substanței pe care se produce împrăștierea sunt ușori, ca în cazul atomilor de siliciu, bor sau bariu, atunci energia de legătură a electronilor de valență este mult mai mică decât energia fotonului incident  $h\nu_0$ , iar electronul poate fi considerat practic liber.

Indiferent de natura substanței pe care se produce împrăștierea, diferența  $\lambda - \lambda_0$  este direct proporțională cu  $\theta$ , relația dintre ele fiind:

$$\lambda - \lambda_0 = a(1 - \cos \theta)$$

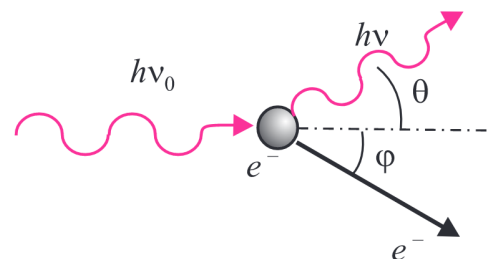
unde  $a = 2,423 \cdot 10^{-3}$  nm.

Dacă electronul substanței împrăștiătoare se afla în repaus înainte de interacțiunea cu fotonul (fig. 9), legea conservării energiei este:

$$h\nu_0 = h\nu + E_c + L$$

unde  $h\nu_0$  și  $h\nu$  sunt energiile fotonilor cu lungimea de undă  $\lambda$ , respectiv  $\lambda_0$ ,  $E_c$  este energia cinetică a electronului de recul, iar  $L$  este lucrul mecanic de ieșire a electronului din atomul substanței.

Electronul fiind liber, putem neglija  $L$ .



**Fig. 2:** Fotonul împrăștiat și electronul de recul în efectul Compton

Această interacțiune dintre foton și electronul liber poate fi tratată ca o ciocnire elastică, aplicându-se legile conservării energiei și impulsului.

Având o masă foarte mică, electronul atinge viteze mari. Prin urmare, legile conservării energiei și impulsului se scriu relativist:

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2 \quad (1)$$

$$\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e$$

Proiectând relația a doua pe  $Ox$  și  $Oy$ , și știind că  $p_0 = \frac{h\nu_0}{c}$ ,  $p = \frac{h\nu}{c}$ ,  $p_e = mv$ , obținem:

$$\begin{aligned} \text{pe } Ox: \quad p_0 &= p \cos \theta + p_e \cos \alpha & \Leftrightarrow & \quad \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu}{c} \cos \theta + mv \cos \alpha \\ \text{pe } Oy: \quad 0 &= p \sin \theta - p_e \sin \alpha & \Leftrightarrow & \quad 0 = \frac{h\nu}{c} \sin \theta - mv \sin \alpha \end{aligned}$$

Rezultă că:

$$mv \cos \alpha = \frac{h\nu_0}{c} - \frac{h\nu}{c} \cos \theta \quad \quad mv \sin \alpha = \frac{h\nu}{c} \sin \theta$$

Ridicăm la pătrat și adunăm, obținând:

$$m^2v^2c^2 = h^2(\nu_0^2 + \nu^2 - 2\nu_0\nu \cos \theta) \quad (2)$$

Scriem relația (1) sub forma  $mc^2 = h(\nu_0 - \nu) + m_0c^2$  și o ridicăm la pătrat:

$$\begin{aligned} m^2c^4 &= [h(\nu_0 - \nu) + m_0c^2]^2 \\ &= h^2(\nu_0^2 - 2\nu_0\nu + \nu^2) + 2m_0c^2h(\nu_0 - \nu) + m_0^2c^4 \end{aligned}$$

Din această relație scădem (2), și rezultă:

$$m^4c^4 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = -2\nu_0\nu h^2(1 - \cos \theta) + m_0^2c^4 + 2m_0c^2h(\nu_0 - \nu) \quad (3)$$

Cum  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , relația (3) devine:

$$\begin{aligned} \nu_0\nu h(1 - \cos \theta) &= m_0c^2(\nu_0 - \nu) \\ 1 - \cos \theta &= \frac{m_0c^2}{h} \left(\frac{1}{\nu} - \frac{1}{\nu_0}\right) = \frac{m_0c}{h}(\lambda - \lambda_0) \end{aligned}$$

Rezultă:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \theta)$$

Mărimea  $\Lambda = \frac{h}{m_0c}$  este lungimea de undă Compton, și are valoarea  $\Lambda = 2,427$  pm atunci când particula cu care interacționează fotonul este un electron cu masa  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J · s, și  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

În concluzie, diferența lungimilor de undă a celor două radiații este:

$$\Delta\lambda = \Lambda(1 - \cos \theta) = 2\Lambda \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

În cazul particulelor ce au masa mai mare decât masa electronului,  $\Lambda$  ia valori foarte mici, de regulă neglijabile față de lungimea de undă a radiației incidente.

## Bibliografie

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