

# Енергия и импулс на фотона. Корпускулярно-вълнови свойства на микрочастиците. Вълни на дьо Бройл. Експериментално потвърждение

## Енергия и импулс на фотона

От разгледаните дотук явления, свързани със светлината и изобщо с електромагнитните вълни (интерференция, дифракция, поляризация, топлинно излъчване, фотоефект), става ясно, че в определени случаи електромагнитните вълни (в частност светлината) се проявяват като вълни, а в други – като поток от частици (кванти). Според съвременната квантова теория за светлината тези две диаметрално противоположни гледни точки могат да се обединят, като на съответните вълнови характеристики (напр. честота и дължина на вълната) се съпоставят корпускулярни (енергия, импулс). Всеки фотон може да се характеризира с енергия и импулс, определени от следните формули:

$$(1) E_{\gamma} = hf = \frac{h\omega}{2\pi} = \hbar\omega; \quad p_{\gamma} = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{\hbar k}{2\pi} = \hbar k,$$

където  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  е т.нар. рационализирана константа на Планк, а  $\omega$  и  $k$  – съответно кръговата честота и вълновото число на електромагнитната вълна. Така енергията и интензитетът на електромагнитната вълна са пропорционални на броя на фотоните ( $E = nE_{\gamma}$ ), което беше същественото в квантовата хипотеза на Планк за топлинното излъчване и квантовото обяснение на законите на фотоефекта от Айнщайн. Електромагнитната вълна също така притежава импулс, пропорционален на вълновото ѝ число, който е насочен по посока на разпространението ѝ, следователно светлината трябва да упражнява и налягане – факт, който е установен експериментално в началото на 20 век от руския физик Лебедев.

По този начин, чрез зависимостите (1), окончателно се утвърждава квантовата хипотеза за характера на светлината и изобщо на електромагнитното лъчение – т. нар. корпускулярно-вълнов дуализъм. В определени случаи то може да проявява корпускулярен характер (топлинно излъчване, фотоефект и др.) и да се представи като поток от фотони, а в други – да проявява вълновите си свойства (интерференция, дифракция, поляризация и др.). Колкото е по-голяма честотата на лъчението (по-малка дължина на вълната), толкова по-ясно са изразени корпускулярните му свойства и обратно – при малка честота (голяма дължина на вълната) на преден план излизат вълновите му свойства.

## Корпускулярно-вълнови свойства на микрочастиците. Вълни на дьо Бройл

През 1923 г. френският учен Луи дьо Бройл, изхождайки от получените връзки (1) между корпускулярните и вълновите характеристики на светлината, изказал хипотезата, че те са двупосочни – както на електромагнитната вълна с дължина на вълната  $\lambda$  можем да съпоставим импулс  $p$ , така на всяка микрочастица с импулс  $p$  можем, чрез същата зависимост (1), да съпоставим дължина на вълната  $\lambda$ :

$$(2) \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

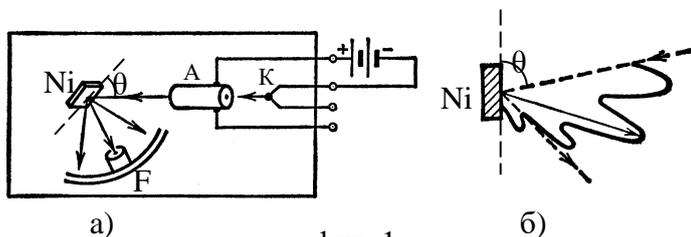
където  $h$  е константата на Планк, а  $m$  и  $v$  са съответно масата и скоростта на частицата. По този начин на всяка движеща се частица съпоставяме вълна, чиято дължина на вълната се определя от (2) и се нарича дължина на вълната на дьо Бройл. Дефиниционната формула (2) представлява едно от основните съотношения в квантовата механика.

Вълните на дьо Бройл нямат аналог в класическата физика. Те не са нито еластични, нито електромагнитни и не се излъчват от даден източник. Природата им е специфична и по-скоро могат да се разглеждат като вълни, присъщи на веществото (материята).

Хипотезата на дьо Бройл утвърждава универсалния характер на корпускулярно-вълновия дуализъм. Ние вече не можем да говорим за вълни или за частици, а за обекти, които в даден момент проявяват корпускулярни свойства, а в друг – вълнови. Ако следваме логиката за проявата на корпускулярните и вълнови свойства, развита по-горе за светлината, би трябвало да очакваме, че вълновите свойства ще се проявяват при движение на частици с малка маса (микрочастици), които се движат със сравнително малка скорост (такива частици ще имат голяма дължина на вълната (2)). По-късно хипотезата била потвърдена експериментално от редица опити, чрез които се откриват дифракционни явления при взаимодействие на снопове бавни микрочастици (електрони, неутрони, атоми, молекули) с веществото. Същественото при проявата на корпускулярните и вълнови свойства, както на светлината, така и на частиците е, че те не се проявяват едновременно – в даден момент от време се проявяват или корпускулярните или вълновите свойства на обекта.

## Експериментално потвърждение на вълните на дьо Бройл

Първото експериментално потвърждение на вълните на дьо Бройл е осъществено от американските физици К. Дейвисън и Л. Джърмър през 1927 г. Изучавайки разсейването на електрони от никелов монокристал, те наблюдават ясно изразена дифракционна картина. Схемата на техния опит е показана на фиг. 1а. От нагорещен катод **К** се отделят електрони, които преминават през малък отвор на анода **А** и попадат върху никеловия кристал. Електроните притежават определена скорост, зависеща от приложеното ускоряващо напрежение  $U$  във веригата на анода и катода ( $v = \sqrt{(2eU)/m}$ , работата на



фиг. 1

електричните сили  $eU$  се превръща в кинетична енергия на електроните  $mv^2/2$ ). При попадане под определен ъгъл върху образеца електроните се отразяват от него и се улавят от фарадеев цилиндър **Ф**, свързан с галванометър. Подвижният цилиндър позволява да се регистрират електроните, отразени от никела в различни направления. При определен

ъгъл на падане  $\theta$  от повърхността на кристала се отразяват електрони под различни ъгли. При това в едни направления се регистрират максимален брой отразени електрони, а в други – минимален брой. На фиг. 1б е показана кривата на разпределение на отразените електрони в различни направления при зададен ъгъл  $\theta$  на падащия сноп. Получената картина е идентична на тази, наблюдавана при отражение на рентгенови лъчи от кристална решетка, т.е. снопът електрони наистина се държи като вълна. Дейвисън и Джърмър определили и дължината на вълната, съответстваща на разсеяните електрони, която потвърдила справедливостта на формулата на дьо Бройл (2):

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{(2eU)/m}} = \frac{h}{\sqrt{2eUm}},$$

където  $m$  и  $e$  са масата и зарядът на електроните, а  $U$  – приложеното ускоряващо напрежение между анода и катода.

По-късно било установено, че не само електроните, но и други микрочастици, като протони, неутрони, атоми и даже молекули, притежават вълнови свойства. При отражение на снопове от тези частици от повърхността на различни кристали било наблюдавано явлението дифракция.