

## Dualna narava svetlobe in delcev

### Fotoni

Vidimo, da se lahko svetloba enkrat obnaša kot valovanje ter drugič kot curek delcev. Ta trditev ni pravilna, svetloba je v resnici oboje. Kaj opazimo, pa je odvisno od eksperimenta. Če delamo interferenčne poskuse ali uklon svetlobo vidimo kot valovanje, če pa želimo opisati fotoefekt, Comptonovo sipanje, sevanje črnega telesa, moramo svetlobo obravnavati kot curek delcev, fotonov. Fotoni so v fiziki osnovni delci, energijski kvantni kvantiziranega elektromagnetnega polja. Foton je najmanjša količina energije, ki jo elektromagnetno valovanje lahko odda ali sprejme. Elektromagnetno valovanje ne more izmenjavati energije z okolico zvezno temveč diskretno. Fotoni na različnem delu elektromagnetnega spektra nastanejo na različne načine. Lahko nastanejo s sevanjem elektronov, ko ti prehajajo med različnimi energijskimi stanji kot tudi pri prehodu med notranjimi stanji jeder, anihilaciji delcev in antidelcev, pri rotacijskih in vibracijskih prehodih molekul ter pri kakršnemkoli spreminjanju elektromagnetnega polja. Fotoni se razlikujejo od mnogih drugih osnovnih delcev, v tem da je njihova mirovna masa enaka nič. Zato se v vakuumu gibljejo s svetlobno hitrostjo  $c$ , ki je po definiciji enaka  $299.792.458 \text{ m/s}$ , oziroma približno  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Energija fotona je odvisna od frekvence valovanja oziroma valovne dolžine

$$W_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Ker se fotoni gibljejo, imajo tudi gibalno količino. Njihovo gibanje lahko opišemo z relativističnimi enačbami. Energijo in gibalno količino delca povezuje naslednja enačba

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4.$$

Foton nima mirovne mase, tako da zanj velja

$$W_f = p_f c.$$

Za gibalno količino dobimo

$$p_f = \frac{h}{\lambda}.$$

Foton nima naboja ter imam spin enak 1. Spada med bozone. Nekatere lastnosti fotona lahko preverimo z eksperimentom. Svetloba se v električnem polju ne uklanja, kar pomeni, da nima naboja. Kako potrdimo spin, si bomo ogledali pri pravilih za prehode med kvantnimi stanji atoma. Gibalno količino lahko prav tako eksperimentalno določimo. Najlažje je določimo tako, da z vzporednim curkom enobarvne svetlobe posvetimo v pravokotni smeri na ravno oviro s površino, ki ima odbojnost  $\alpha$ . Če ima svetloba za valovno dolžino  $\lambda$  energijski tok enak  $P$ , potem lahko določimo kolikšen je številski tok fotonov na časovno enoto kot

$$\frac{N_f}{t} = \frac{P}{h\nu} = \frac{jS}{h\nu'}$$

kjer je  $j$  gostota svetlobnega toka in  $S$  presek curka. Foton, ki pride do površine se z verjetnostjo  $a$  odbije, gibalna količina pa se spremeni kot

$$\Delta p_f = \frac{h}{\lambda}(1 + a),$$

V času  $t$  trči na površino  $N_f$  fotonov, zaradi tega površina občuti sunek sile enak

$$Ft = N_f \frac{h}{\lambda}(1 + a).$$

Tlak, ki ga povzroča curek pa je enak

$$P = \frac{F}{S} = \frac{N_f}{t} \frac{h}{S\lambda}(1 + a) = \frac{jS}{hvS\lambda} \frac{h}{S\lambda}(1 + a) = \frac{j}{c}(1 + a)$$

To so potrdili z merjenji in ugotovili, da se eksperimentalni podatki ujemajo s teoretičnimi v okviru eksperimentalne napake.

### Valovna narava delcev

Leta 1923 je fizik Louis de Broglie pri svojem doktoratu predpostavil, da se vsi delci obnašajo podobno kot fotoni. Rekel je, da če ima lahko svetloba dualno naravo in se enkrat obnaša kot valovanje in drugič kot curek delcev, potem se tudi delci kot elektroni lahko obnašajo kot valovanje pod pravimi pogoji ter da imajo valovno naravo z valovno dolžino enako

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

kjer je  $h$  Planckova konstanta in  $p$  gibalna količina delca. Valovni vektor pa je enak

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

S tem je dualno naravo predpostavil za vse delce, kot so elektroni, protoni, nevtroni itd. Kot za svetlobo je predpostavil, da se tudi vsi delci lahko obnašajo kot deli ali kot valovanje istočasno. De Broglie je povezal valovno in delčno naravo snovi z zvezo med maso in hitrostjo na strani delčne narave ter valovno dolžino na strani valovne narave. Če obravnavamo klasično gibanje in gibalno količino zapišemo kot produkt mase in hitrosti dobimo, da je valovna dolžina obratno sorazmerna z maso

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Vidmo, da imajo težja telesa manjšo valovno dolžino, če se vsa gibljejo z isto hitrostjo. Valovno dolžino si lahko predstavljamo tudi kot dolžina v prostoru, pri kateri najdemo delec v določenem trenutku oziroma natančnost položaja. Rečemo lahko tudi, ko se valovna dolžina manjša, delčna narava prevlada nad valovno. De Broglie je svojo trditev utemeljiv z dejstvom, da naj bi bila narava simetrična in naj bi podobni zakoni veljali za vse delce. Če dobro analiziramo mehaniko in geometrijsko optiko, vidimo podobnost med njima. Leta 1927 sta Davisson in Garmer kot prvič jasno potrdila de Brogliejevo

predpostavko in pokazala, da se elektroni resnično obnašajo kot valovanje. Kasneje so naredili interferenčne poskuse tudi s protoni, nevtroni ter atomi in molekulami.

Vidimo, da se tudi delci lahko enkrat obnašajo kot valovanje drugič kot curek delcev. Tudi za delce rečemo, da imajo dualno naravo, kaj opazimo pa je odvisno od načina opazovanja. Nogometna žoga ima dualno naravo z valovno dolžino tako majhno, da lahko njeno valovno naravo pozabimo in jo obravnavamo samo kot delec, ki ga opišemo s klasično mehaniko. Na splošno je valovna naravo pomembna, ko imamo pri eksperimentu opravka z dimenzijami, ki so primerljive z valovno dolžino (pri sipanju na kristalu mora biti valovna dolžina elektronov primerljiva z razmakom med ravninami v kristalu). V atomu je valovna dolžina elektrona primerljiva dimenziji atoma, zato je valovna narava elektrona pomembna pri razlagi strukture atoma.

### Heisebergov princip nedoločenosti

V klasični mehaniki lahko vedno natančno poznamo poljubne fizikalne količine istočasno, na primer položaj in hitrost delcev, to pa žal ni več možno za delce, ki so majhni (atomi, molekule, elektroni, protoni, nevtroni, itd). Princip nedoločenosti, ki ga je postavil nemški fizik Werner Heisenberg leta 1927, je posledica dualne narave snovi. Princip nedoločenosti pravi, da obstaja končna natančnost za položaj in gibalno količino, čas in energijo, ko opisujemo majhne delce. Par dveh fizikalnih količin lahko istočasno poznamo za natančnostjo reda  $\hbar$ . Veljajo zveze

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{1}{2} \hbar$$

Princip nedoločenosti nam postavi mejo klasične fizike. Od te meje naprej moramo upoštevati dualno naravo snovi. Dve posledici principa nedoločenosti sta, da v atomskem jedru ne moremo imeti elektronov, da je jedrska sila močnejša od elektromagnetne. Nedoločenost, ki smo jo napisali za koordinato  $x$ , velja tudi za preostali dve koordinati

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{1}{2} \hbar$$