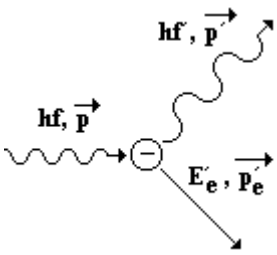
Popis experimentu a jeho důsledky

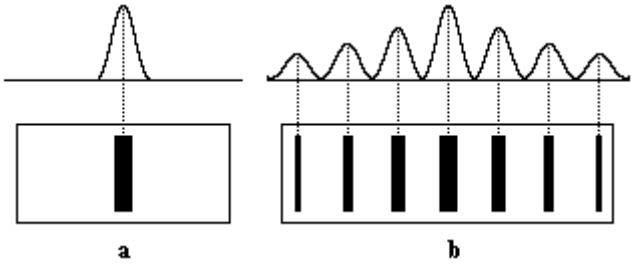
Albert Einstein začal považovat jako první kvanta elektromagnetického záření za skutečné částice. Přímý a přesvědčivý důkaz této částicové povahy fotonů (kvant elektromagnetického záření) podal až v roce 1922 americký fyzik Arthur Holly Compton (1892 - 1962, Nobelova cena v roce 1927), který experimentoval s tvrdým rentgenovým zářením o vlnové délce 0,07 nm, jehož kvanta mají vysokou energii: $E = hf = 17{,}8\ \mathrm{keV}$. Rovnoběžný svazek tohoto záření nechal dopadat na uhlíkovou destičku a měřil frekvenci záření rozptýleného pod různými úhly. Kvanta záření se přitom chovala jako malé pružné kuličky, které se srážely s elektrony v uhlíkové destičce. Protože energie kvant elektromagnetického záření vysoko převyšovala vazebnou energii elektronů v uhlíku, bylo možné považovat elektrony za volné nehybné částice (viz obr. 14).

Jinými slovy ve výpočtu není nutné brát v úvahu vazebnou energii elektronu, kterou je nutné překonat. Její hodnota je totiž řádově mnohem menší než je energie použitého elektromagnetického záření.

Analogie pro snadnější pochopení: Mějme rybářský vlasec, který má nosnost jeden kilogram. Tento vlasec přivažme za nárazník automobilu a druhý jeho konec do skobičky ve zdi tak, že vlasec je mezi autem a zdí velmi volný. Když se auto začne rozjíždět, řidič v autě nezaznamená přetržení vlasce - síla (resp. práce) nutná na jeho přetržení je výrazně menší, než je síla (práce) vyvinutá motorem auta. (Kdybychom připevnili mezi auto a zeď silný řetěz, řidič si napnutí řetězu při rozjíždění automobilu jistě všimne ...)



Obr. 14



Obr. 15

Při pružných srážkách musí být splněny zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti. Frekvence záření rozptýleného pod určitým úhlem pak splňuje rovnici: $hf = hf' + E'_e$, kde f je frekvence záření původního svazku, f' frekvence záření rozptýleného a E'_e kinetická energie elektronu po srážce (viz obr. 14). Podle této rovnice je tedy $f' < f$ a $\lambda' > \lambda$. Tento rozptyl záření na volných elektronech byl nazván **Comptonův jev**.

Na světlo a ostatní druhy elektromagnetického záření lze tedy pohlížet jako na proud částic - proud fotonů. Jedná se o nový druh částic s nulovou klidovou hmotností, které v sobě spojují chování vln i částic, neustále se pohybují rychlostí světla a jejich energie je dána vztahem $E = hf$ a hybnost vztahem $p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

S fotony se člověk setkával již odpradávna, neboť vnímal světlo. Fyzikálně se je podařilo objevit až ve 20. století. Jejich objev souvisí s historií výzkumu podstaty světla. Od 17. do 19. století byly vypracovány dvě teorie vysvětlující vlastnosti světla:

1. Newtonova (korpuskulární) teorie - chápe světlo jako proud částic
2. Huygensova (vlnová) teorie - světlo chápe jako vlnění světového éteru

Některé jevy (odraz, lom) bylo možné vysvětlit z hlediska obou teorií. Z hlediska Newtonovy

teorie se jednalo o částice, které se prostě při dopadu na rozhranní dvou prostředí odráží nebo jím procházejí (jsou natolik malé, že projdou). Analogicky bylo možné pomocí Newtonovy teorie vysvětlit disperzi světla: bílé světlo je složeno z částic („kuliček“) různých druhů (barev), které vnímáme spolu dohromady jako barvu bílou. Při disperzi se pak částice jednotlivých barev od sebe oddělí proto, že mají nepatrně jiné vlastnosti (např. hmotnost).

V 19. století však došlo k zásadnímu zvratu a byla všeobecně přijata teorie vlnová. Young a Fresnel prováděli pokusy s difrakcí světla (ohybem světla). Ohyb nastává na malých překážkách či otvorech (srovnatelných s vlnovou délkou světla), na hraně, vlasu, tenkém drátku, jedné či více štěrbinách, na mřížce. Ve všech těchto případech procházející světelné vlny vzájemně interferují, v některých směrech se vzájemně zesilují, v jiných se zase zeslabují a vytvářejí tak na stínítku charakteristický ohybový obrazec (viz obr. 15b). Tyto experimenty není možné vysvětlit z hlediska korpuskulární teorie - ta dává výsledný obrazec s maximální intenzitou přímo naproti otvoru (viz obr. 15a) bez typického opakování světlých a tmavých míst (resp. barevného spektra).

J. C. Maxwell později dokázal, že světelné vlnění není vlněním éteru, jak se do té doby soudilo, ale že se jedná o zvláštní případ vlnění elektromagnetického. Na základě toho vypracoval celou teorii elektromagnetického pole, která velice dobře souhlasila s již zjištěnými (a ověřenými) fakty a zákony (Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákny, …). Zároveň umožnila rozvoj poznatků „novým“ směrem.

Na druhé straně Planckova kvantová hypotéza vysvětlující spektrum rovnovážného záření, Einsteinova teorie fotoefektu a Comptonův jev nás přesvědčují o tom, že světlo má částicový (korpuskulární) charakter. Tím ale vzniká rozpor neřešitelný v rámci klasické makroskopické fyziky: Je-li světlo proud částic (fotonů), jak je možné vysvětlit jeho difrakci na dvou štěrbinách? Částice přece může projít jen jednou štěrbinou a přítomnost druhé štěrbiny nemůže mít na průběh experimentu žádný vliv. A přesto, jestliže zakryjeme jednu štěrbinu, difrakční obrazec se změní.

Bylo by možné si představit, že vlnění nastává, pohybuje-li se současně velké množství fotonů, podobně jako vznikají vlny v plynech nebo kapalinách. Proto byly prováděny pokusy s velmi slabým zářením a dlouhými expozičními dobami, kdy do difrakčního systému vstupoval jeden foton po druhém. Každý takový foton vyvolal samozřejmě zčernání jen jednoho bodu fotografické desky v místě, kam náhodně dopadl. Po delší době však zčernalé body začaly opět vytvářet difrakční obrazec jako v případě vlny dopadající současně na obě štěrbiny. Na některá místa fotografické desky dopadlo fotonů méně, na některé více a pravděpodobnost dopadu se řídila přesně chováním vlny při difrakci na dvou štěrbinách.

Proto je nutné připustit, že foton se chová jako částice a zároveň jako vlna. Interferenčními metodami je možné měřit jeho frekvenci a vlnovou délku, pozorujeme-li jeho ohyb na překážkách a štěrbinách. Popisujeme tedy chování fotonu jako vlnu. Na druhé straně při fotoefektu a Comptonově jevu se chová foton jako částice - sráží se s elektrony a předává jim část své energie analogicky jako jedna kulečníková koule předává energii jiné kouli při vzájemné srážce. Při dopadu na fotografickou desku vyvolá každý foton zčernání v určitém místě jako důsledek chemické reakce. Chová se tedy jako částice.

Uvedený rozpor se nazývá **korpuskulárně vlnový dualismus** (**částicově vlnový dualismus**). Mnoho fyziků již vedlo spory o tom, jak si představit částici, která se chová jako vlna, a vlnu, která se chová jako částice. Je to ale nesprávně položená otázka. Z naší běžné makroskopické zkušenosti jsme zvyklí buď na pohyb částic, těles (letící kulka, jedoucí automobil, pohybující se planeta, …) a nebo na pohyb vlny (zvukové vlnění, vlna na vodní hladině, …). Částice má v klasické fyzice v každém okamžiku určitou polohu na své trajektorii a určitou rychlost, kterou se pohybuje, vlna má zase vlnovou délku a frekvenci a zasahuje současně do celého prostoru.

Foton je objekt mikrosvěta a pohybuje se prostě jinak, než jak jsme zvyklí si představovat. Není možné prostě určit jeho trajektorii a stanovit místo jeho dopadu např. na fotografické desce. Je možné stanovit pouze **pravděpodobnost**, s níž dopadne do daného místa. Podle druhu

experimentu, který s fotonem provádíme, může foton projevit buď svou částicovou nebo vlnovou povahu, i když se samozřejmě jedná o tentýž objekt.

Při experimentování s elektromagnetickým zářením různých vlnových délek lze zjistit tento poznatek:

SE ZKRACOVÁNÍM VLNOVÉ DÉLKY SE PROJEVUJÍ ČÁSTICOVÉ VLASTNOSTI FOTONU VÝRAZNĚJI.

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.