

O zavádění konceptu fotonu

Jiří Králík, kralikj@physics.ujep.cz

1. 12. 2018

Celých padesát let soustředěného přemítání mě nepřivedlo k odpovědi na otázku, co je to světelné kvantum. Dnes si samozřejmě každý chytrák myslí, že zná odpověď, jenže to klame sám sebe.

Albert Einstein, 1951 (citováno v [25], str. 5)

Hlavními cíli tohoto příspěvku je stručné seznámení čtenáře se třemi myšlenkami:

- Cesta ke správnému chápání pojmu foton je o dost klikatější, než se uvádí ve standardních SŠ i VŠ učebnicích, a to jak historicky, tak významově.
- Představa fotonu jako klasicky či jen mírně neklasicky se chovající kuličky je nejen nepřesná, ale i silně zavádějící.
- Na slovo „důkaz“ je třeba si (nejen) ve fyzice dávat dobrý pozor.

1 Učebnicový obraz fotonu

V běžných středoškolských učebnicích probíhá zavedení konceptu fotonu po lince:

**Objevení vztahu $E = hf$ Planckem (sdělení) →
Einsteinova teorie fotoelektrického jevu (potvrzení).**

Tato linka je standardně lemována celou řadou nevhodných či dokonce přímo chybných vyjádření. Například ve „Fyzice pro střední školy II“ [[17] od str. 173] se píše:

Podle představ kvantové optiky má světlo vlastnosti částic, z nichž každá má zcela určitou energii. Tuto, ve své době velmi neobvyklou myšlenku vyslovil v roce 1900 Max Planck. Důkazem správnosti Planckových představ o světle je fotoelektrický jev. ... Fotoelektrický jev však není možné vysvětlit na základě vlnových vlastností světla. Teorie fotoelektrického jevu vychází z předpokladu, že světlo je tvořeno částicemi, které se pohybují rychlostí světla, a každá nese určité **kvantum energie**.

Každá z výše uvedených vět, které lze v obdobných formulacích nalézt v drtivé většině dalších textů o základech kvantové optiky, je zavádějící či přímo nesprávná. Tak například Planck ve svém vysvětlování spektra černého tělesa vůbec o „světelných částicích“ neuvažoval. Fotoelektrický jev není *důkazem* částicové struktury elektromagnetického záření a dokonce tento jev lze vysvětlit s pomocí vlnových vlastností světla přesněji. V neposlední lze vybudit světelné záření (stavy elektromagnetického pole), jehož energie je neurčitá, tj. nelze ji vyjádřit přirozeným násobkem nějaké základní hodnoty ve stejném smyslu jako je veškerý elektrický náboj vyjádřitelný celým násobkem elementárního náboje.¹

2 Max Planck a akt zoufalství

Cesta, kterou Planck dospěl ke svému slavnému popisu spektra vyzařování černého tělesa, je z historického hlediska velmi poučná, ale pro úvodní výklad kvantových představ v podstatě nepoužitelná, dokonce i pro vysokoškolské kurzy. V česky psané literatuře ji lze ve stručnosti nalézt např. v [10].² Důvod nevhodnosti leží už v náročnosti samotného výkladu vyzařování černého tělesa. Ovšem nejen to – způsob původního Planckova odvození je nejen poměrně fyzikálně komplikovaný, ale také je nekonzistentní (např. nesprávné použití Boltzmannovy formule pro entropii, nebo odvození počtu módů stojatého vlnění na jednotku frekvence, resp. vlnovou délku – viz [9]).

Předpoklad platnosti $E = hf$, ke kterému byl proti jeho vůli experimenty doslova dotlačen, se týkal výměny energie mezi elektromagnetickým zářením v dutině simulující černé těleso a oscilátory, kterými vnitřní stěny tohoto tělesa modeloval. Pokud tedy v Planckově práci lze mluvit o kvantování energie nějakého objektu, jde spíše o kvantování energie (atomárních) harmonických oscilátorů, nikoli o kvantování samotného elektromagnetického záření.

¹Ano, vím o kvarcích, ale nechtejte mě prosím za slovíčka – jde o princip. :-)

²Nebo ještě podrobněji ve slovněštině v [24].

3 Einsteinův heuristický pohled

Na rozdíl od Planckova vyzařovacího zákona je výklad fotoelektrického jevu o mnoho jednodušší, třebaže historie jeho objevování, jak je téměř samozřejmé, je také o dost spleťtější, než se běžně uvádí (a v učebnicích fyziky de facto *může* uvádět). Pro kvalitní historické i didaktické rozpracování tohoto tématu viz [13].

Každá teorie fotoelektrického jevu musí umět vysvětlit zejména tyto vlastnosti (viz [8] str. 26, sledujte obr. 1):

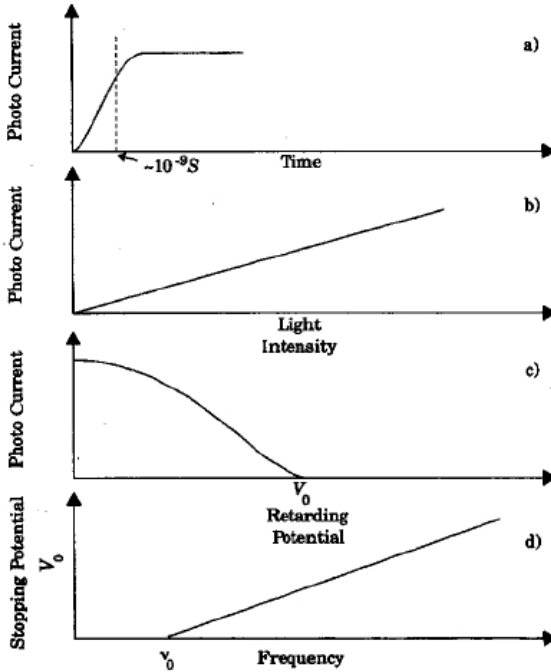
1. První elektrony jsou emitovány velmi záhy (v řádu nanosekund) po ozáření kovu.
2. Proud elektronů se vzrůstající intenzitou dopadajícího elektromagnetického záření roste lineárně.
3. Proud klesá s narůstajícím brzdícím napětím a stává se nulovým při určité hodnotě brzdného napětí U_0 .
4. Prahová hodnota brzdného napětí U_0 je přímo úměrná frekvenci dopadajícího záření a pro daný kov vykazuje konkrétní mezní hodnotu – f_0 .

Tato experimentální fakta je obtížné, ne-li nemožné, vysvětlit pouze s pomocí klasického přístupu – chápeme-li totiž elektrony jako (newtonovské) kuličky, které jsou vázány v objemu kovu a světlo a příbuzná záření jako vlnění elektromagnetického (maxwellovského) pole, docházíme k rozporům s experimenty. Viz např. [1] nebo opět [13].

Obecně se má za to, že východisko z problémů našel ve svém „zázračném roce“ (1905) Albert Einstein, když v článku [3] ukázal, že při chápání světla jako proudu malých částic s energií úměrnou jeho frekvenci ($E = hf$), mají výsledky experimentálního zkoumání fotoelektrického jevu snadné vysvětlení. Toto vysvětlení je standardně uváděno jako *důkaz* částicového charakteru elektromagnetického záření. Einstein byl zřejmě prvním vědcem, který po „definitivním vítězství“ vlnové teorie světla v polovině 19. století navrhl brát vážně částicovou povahu světla. Přesto jeho slavný článek (který tvoří těžiště jeho Nobelovy ceny za rok 1921) je nazvaný „O heuristickém úhlu pohledu na vznik a přeměnu světla“ a netvrdí v něm, že „světlo se *musí* skládat z částic“, ale že je to pouze *heuristický úhel pohledu* na světlo, nikoli logicky zavazující závěr.

Einstein v něm doslova zavádí *hypotézu světelných kvant* takto:

Monochromatické záření nízké hustoty [v oblasti platnosti Wienovy vyzařovací formule] se chová v termodynamickém ohledu



Obrázek 1: Základní vlastnosti fotoelektrického jevu (převzato z [8], str. 25).

jako by sestávalo ze vzájemně nezávislých kvant energie o velikosti $R\beta\nu/N$.

Při dnešním značení je $\beta = h/k_B$, kde h je Planckova konstanta a k_B je Boltzmannova konstanta a $R/N = k_B$, kde R je molární plynová konstanta a N je Avogadrova konstanta, takže $R\beta\nu/N = h\nu$, či označíme-li frekvenci f , jak je ve středoškolských učebnicích zvykem, pak $R\beta\nu/N = hf$. Oním odvážným „nobelovským krokem“ pak byl jeho následující *heuristický princip*:

Jestliže, s ohledem na objemovou závislost entropie, se monochromatické záření dostatečně nízké hustoty, chová jako diskrétní prostředí sestávající z kvant energie o velikosti $R\beta\nu/N$, pak je svůdné se ptát, zdali rovněž zákony vzniku a přeměny světla nejsou tvořeny jako by světlo bylo složeno z kvant energie tohoto druhu.

Jinými slovy, hypotéza světelných kvant je tvrzení o kvantové vlastnosti vol-

ného elektromagnetického záření, heuristický princip je předběžné rozšíření těchto vlastností světla na veškerou interakci mezi světem a látkou.[20]

Je důležité zdůraznit, že světelná kvanta byla zpočátku míněna pouze ve smyslu kvantování (tj. kouskování či zdiskrétnění energie). Koncept fotonu jako částice s určitou energií a *hybností* vyvstával pouze postupně. Einstein sám nediskutoval o hybnosti fotonu až do roku 1917. Relativistické vztahy pro zachování energiohybnosti („čtyřvektor“) zahrnující fotony nebyly publikovány až do roku 1923.[20]

4 Odpor proti Einsteinovi

Einsteinův heuristický přístup vzbudil ve vědeckých kruzích převážně silný odpor. Například sám Robert A. Millikan, který s vysokou přesností experimentálně potvrdil Einsteinovu předpověď, že maximální energie elektronů se musí s frekvencí dopadajícího záření měnit lineárně, později vzpomíná ([19]):

Strávil jsem deset let svého života testováním Einsteinovy rovnice [pro fotoelektrický jev] z roku 1905 a, navzdory mým očekáváním, jsem byl nucený v roce 1915 potvrdit její jednoznačné experimentální ověření. A to navzdory její pošetilosti, protože se zdála narušovat vše, co jsme věděli o interferenci světla.

Millikan v tomto ohledu nebyl zdaleka jediný. Za všechny uvádím ještě citace dvou osobností, od kterých se to běžně neočekává. Niels Bohr ještě v roce 1921 napsal (citováno v [2]):

... Na druhou stranu záření musí být popsáno klasickou elektromagnetickou teorií.

A dokonce i Planck (společně s W. H. Nernstem, H. Rubensem a E. G. Warburgem), když Einsteina v roce 1913 navrhoval na člena Pruské Akademie, zakončil své výrazně pozitivní dobrozdání slovy (citováno v [20]):

Celkem lze říci, že mezi velkými problémy, na které je moderní fyzika tak bohatá, stěží existuje nějaký, ke kterému by Einstein nepřidal svůj pozoruhodný příspěvek. Skutečnost, že možná někdy ve svých spekulacích přestřelil, jako například ve své hypotéze světelných kvant, by mu neměla být příliš vyčítána, protože bez občasného riskování není možné přijít se skutečně novými myšlenkami, dokonce ani v nejexaktnějších vědách.

S tím, jak obecná myšlenka kvantování fyzikálních veličin postupně ukazovala svou užitečnost, odpor proti Einsteinově představě pomalu začínal slábnout a Einstein nakonec získal svou Nobelovu cenu za „jeho služby teoretické fyzice a speciálně za jeho objev zákona fotoelektrického jevu“.³ Po Comptonových experimentech a jejich analýze z počátku 20. let 20. století vzdor vědecké veřejnosti proti fotonům⁴ téměř, ale ne zcela (viz např. Bohrův boj v [2]), vyhasl. Pro bližší seznámení s Comptonovým jevem viz např. prezentace A. Laciny na adrese <http://www.physics.muni.cz/~lacina/fotoefekt.ppt>.

5 Návrat spojitého

Nicméně, po příchodu kvantové teorie se ukázalo, že k vysvětlení všech výše jmenovaných vlastností fotoelektrického jevu postačí i klasická teorie elektromagnetického pole. Například Willis Lamb a Marlan Scully ve svém článku [16] vyšli ze „semiklasické teorie“, ve které popisují atomy kvantově s pomocí Schrödingerovy rovnice, ale světlo je chápáno čistě klasicky (maxwellovsky), bez částicových vlastností. Hladiny energie (jednoho) elektronu v atomu byly v článku zjednodušeny na základní stav a řadu (kvazi)spojitých stavů volného elektronu – viz obr. 2. Elektromagnetické záření bylo popsáno jednoduchou harmonickou závislostí elektrické intenzity na čas: $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$. Pro analýzu interakce záření a atomů pak lze užít standardní časově závislou poruchovou metodu, v níž vystupuje interakční energie (běžně zvaná jako „interakční potenciál“) v tzv. dipólové aproximaci $E_{\text{int}}(t) = -e\mathcal{E}(t)x(t)$. Lamb a Scully nakonec získali pro pravděpodobnost, že pole způsobí přechod atomového elektronu ze základního stavu $|g\rangle$ do excitovaného stavu $|k\rangle$, tj. že

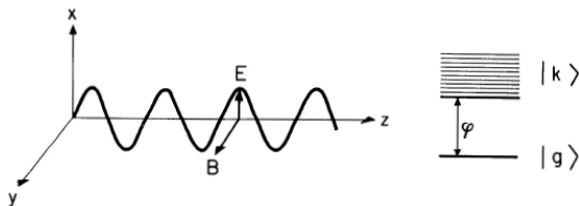
³Citace je ze stránky <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>, kde se navíc píše, že Einstein získal svou cenu sice za rok 1921, ale až v roce 1922, protože během výběrového procesu v roce 1921 se nobelovský výbor rozhodl, že nikdo v daném roce nesplnil kritéria zanechaná v závěti Alfreda Nobela. V takovém případě ale pravidla Nobelovské nadace umožňují, aby cena byla udělena následující rok zpětně. Patrně v té době největší žijící fyzik od Newtona tak získal nejvyšší vědecké ocenění až po sedmnácti letech od svého „zázračného roku“, navíc zejména za práci, která zdaleka nebyla jednoznačným potvrzením částicové struktury elektromagnetického záření (více o tom viz následující oddíl).

⁴Název *foton* se rozšířil až po roce 1926 díky jeho zavedení významným fyzikálním chemikem G. N. Lewisem a zejména jeho používání Arthurem Comptonem. Paradoxem je, že Lewis název foton užil k popisu velmi odlišného konceptu než bylo Einsteinovo světelné kvantum. Oproti tvrzení mnoha učebnic Lewis nebyl první, kdo použil pojmu *foton*. Tento výraz byl zaveden nezávisle v minimálně třech odlišných významech už během deseti let před Lewisem.

dopadající elektromagnetické záření ionizuje atom, výraz:

$$\wp_k(t) \approx \frac{4 |X_{kg} \frac{eE_0}{2\hbar}|^2 \sin^2 \left[\left(\frac{E_k}{\hbar} - \omega \right) \frac{t}{2} \right]}{\left(\frac{E_k}{\hbar} - \omega \right)^2}.$$

Přitom X_{kg} je maticový element x mezi oběma stavy a E_k je energie k -tého stavu měřená vzhledem k základnímu stavu.



Obrázek 2: Zjednodušené hladiny energie atomu a klasická elektromagnetická vlna (převzato z [16]).

Tento výsledek reprezentuje podmínku rezonance pro excitaci elektronu. Elektron se tak z atomu uvolní s větší pravděpodobností pouze tehdy, když je frekvence dopadajícího záření blízká frekvenci $\omega_k = E_k/\hbar$ dané rozdílem hladin energie. Jak je patrné z výše uvedeného vyjádření pravděpodobnosti excitace, jmenovatel se pro tuto hodnotu stává nulový a dokud frekvence světla nedosáhne ω_k , žádný elektron z atomu nevyskočí, zatímco nad touto frekvencí se elektrony začínou objevovat. Tímto způsobem můžeme vysvětlit mezní frekvenci, která odpovídá tzv. výstupní práci kovu užitá v Einsteinově rovnici pro fotoelektrický jev:

$$hf = W_v + E_{\text{kin}}.$$

Tato rovnice tak může být chápána jako přirozený důsledek rezonanční podmínky pro excitaci elektronů elektromagnetickou vlnou spíše než jako odraz mikroskopického zachování energie pro světlo, jak navrhl Einstein. Obdobně lze vysvětlit i další aspekty fotoelektrického jevu. A nejen to, s pomocí semiklasických teorií lze dokonce vysvětlit i další podrobnosti fotoelektrického jevu, které v Einsteinově rovnici zahrnuté nejsou – například úhlové rozdělení vyletujících elektronů.

Obdobně se to má s Comptonovým jevem. Vysvětlení Comptonových experimentálních výsledků studia rozptylu rentgenového záření na téměř volných elektronech je v pojmech srážky dvou kuliček (elektronu a fotonu) velmi

názorné a přímočaré.⁵ Nicméně i zde platí, že popisujeme-li látku (atomy) kvantovou teorií a elektromagnetické záření klasickou Maxwellovou teorií, získáme v detailech přesnější výsledky, než s pomocí jednoduché „kulečnickové“ představy. O historickém vývoji semiklasických přístupů k výkladu fotoelektrického a Comptonova jevu viz [11] a literatura tam citovaná.

6 Názorné „důkazy“ existence fotonů

Na základě vlnové představy o elektromagnetickém záření by se dalo očekávat, že budeme-li pořizovat fotografii za stále nižšího a nižšího osvětlení, budeme získávat stále slabší a slabší celkový obraz celé situace. Místo toho se ale stane něco jiného – fotografie se rozpadne na shluky oddělených zrn. Již v padesátých letech 20. století byly pořízeny snímky jako na obr. 3, které jsou asi nejsuggestivnější podporou názoru, že se světlo „skládá z částic“. Je ale třeba si i zde uvědomit, že takové obrázky nejsou *jednoznačným důkazem* částicové stránky světelných dějů. Podobně jako padání jednotlivých listů ze stromů není jednoznačným důkazem částicové povahy vzduchu, který ve formě větru listy shazuje. Proces tvorby fotografií je totiž velmi blízký fotoelektrickému jevu a i on lze vysvětlit pouze na základě vlnových představ o světle (a kvantových představ o látce). Podobně se to má i se známými „lapači fotonů“ – s fotonásobiči.

7 Konečně částicovost jak má být

Proč tedy vůbec věříme na fotony? Jak bychom měli uspořádat experiment, aby přesvědčivě ukazoval částicovou povahu světla? V samotném pojmu částice je implicitně zahrnuto, že existuje v nějaké (omezené) části prostoru. Nachází se na jednom nebo na druhém místě.⁶ Naproti tomu vlnění vzniklé na jednom místě se spojitě rozšiřuje do stále větších a větších oblastí prostoru a i když je energie vyzářená zdrojem velmi malá, měli bychom být schopni zaregistrovat elektromagnetické kmitání i na mnoha vzdálených místech najednou. Experiment zkoumající částicovou povahu světla by tedy měl především testovat to, zdali se dostatečně „zředitelné“ světlo může v jeden okamžik nacházet na dvou odlišných místech. Jestliže elektromagnetické záření má opravdu částicové vlastnosti, pak pošleme-li paprsek s velmi nízkou intenzitou na dělič

⁵Návrh, jak konkrétně lze na střední škole postupovat ve výkladu kvantových vlastností elektromagnetického záření viz [18].

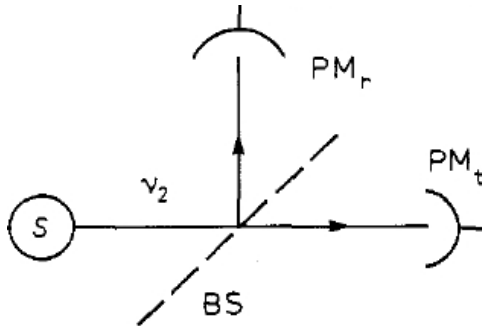
⁶Poznámka pro matematiky: spojka „nebo“ je zde užitá v běžném slova smyslu, tj. je vylučovací.-)



Obrázek 3: Albert Rose ve své knize [21] u obrázků a - f uvádí, že užil světelný skener a že byl dokonce schopný vypočítat, kolik fotonů tvoří jednotlivá stádia tvorby konečného obrazu: a) $3 \cdot 10^3$, b) $1,2 \cdot 10^4$, c) $9,3 \cdot 10^4$, d) $7,6 \cdot 10^5$, e) $3,6 \cdot 10^6$, f) $2,8 \cdot 10^7$.

svazku (například na polopropustné zrcátko), měl by pokaždé zareagovat jen jeden z detektorů umístěných v dostatečné vzdálenosti od sebe (viz uspořádání na obr. 4). Takovéto experimenty byly provedeny (jeden z nejznámějších viz [7]) a ukázalo se, že vzniká-li elektromagnetické záření speciálním způsobem (například při vyzařování vhodně připravených atomů), bude na příchod energie reagovat vždy jen jeden z detektorů, které jsou na opačných stranách děliče svazků. Právě tyto prostorově oddělené „balíčky elektromagnetické energie“ lze považovat za, v jistém smyslu, částice světla – fotony.

Na druhou stranu se rovněž ukázalo, že tepelné zdroje světla (jako například plamínek vycházející z kahanu) nebo lasery, ve skutečnosti nejsou dobrými zdroji jednotlivých fotonů. Například tepelné zdroje mají tendenci produk-



Obrázek 4: Ze zdroje S dopadá na dělič svazků BS elektromagnetické záření, které se může buď odrazit do detektoru PM_r , nebo může projít do detektoru PM_t (převzato z [7]).

vat fotony po dvou. Pokud světlo z takových zdrojů zredukujeme natolik, že by se podle energiových úvah mělo mezi zdrojem a detektorem v každém okamžiku nacházet nanejvýš jedno kvantum energie, většinu času se v aparatuře nebude nacházet žádný foton, ale pokud ano, s vysokou pravděpodobností to bude fotonový pár a my při uspořádání 4 zaznamenejme současné zareagování obou detektorů.⁷ Samotné úvahy o energii světla tedy nejsou dostatečné, abychom si mohli být jistí, že se mezi zdrojem a stínítkem nenachází více fotonů najednou.⁸

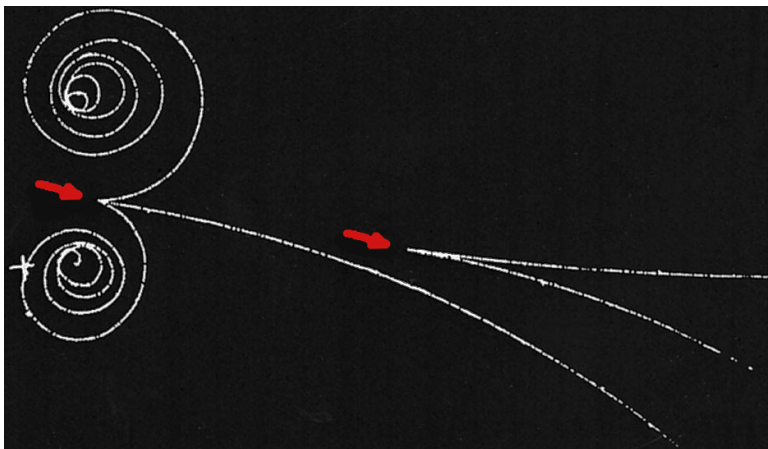
8 Kvantová teorie elektromagnetického pole

Do několika let po vzniku kvantové teorie částic v roce 1925 lidé začali aplikovat stejné principy i na fyzikální pole – vznikla tak kvantová teorie polí, která do dnešních dnů velmi přesně popisuje veškeré experimentální zkušenosti nabrahané lidstvem i v těch nejnáročnějších laboratořích (např. CERN). Snímky jako na obr. 5, zdá se, jasně ukazují, že se náš dosud nejhluběji poznávaný mikrosvět skládá z částic, tj. z prostorově oddělených „kousků hmoty“ (ne

⁷Jde o známé kouzlo statistiky – pokud v daném okamžiku uděláme průměr příjmů na hlavu v chudinské čtvrti, kterou zrovna projíždí jeden miliardář, v průměru mají všichni slušný příjem. :-)

⁸V této oblasti se uplatňuje tzv. Hanbury Brownův-Twissův jev. Podrobnější informace o tomto jevu lze nalézt například na https://en.wikipedia.org/wiki/Hanbury_Brown_and_Twiss_effect.

nepodobných kulečnickovým koulím).



Obrázek 5: Svazek gama paprsků s vysokou energií dopadá zleva ve směru červené šipky na bublinkovou komoru. Rozptýluje se na elektronu v obalu atomu (a elektron se s vysokou energií odrazí), ztratí část své energie a dává vzniknout elektron-pozitronovému páru. Trajektorie elektronu a pozitronu jsou zakřivené díky přítomnosti silného magnetického pole v komoře. Uprostřed obrázku jsou zachyceny trajektorie druhého elektron-pozitronového páru vzniklého dopadem stejného svazku. Z o mnoho menšího zakřivení trajektorií je patrné, že tento pár má mnohem větší hybnost než předchozí (snímek pochází z Lawrence Berkeley National Laboratory).

Přes tento částicový charakter našich vizuálních dojmů, které sledováním podobných obrázků automaticky získáváme, k vysvětlení veškerých pozorovaných jevů musíme(?asi?) předpokládat, že všechny tyto „částice“ jsou jen balíčky (kvanty) energie a hybnosti určitých druhů polí. Tak například fotony jsou kvanty elektromagnetického pole, elektrony a pozitrony jako kvanty elektronového, resp elektron-pozitronového pole, Higgsův boson je kvantum tzv. Higgsova pole a obdobně máme i různá kvarková, gluonová a neutrinová pole. Aplikací kvantových principů pouze na částice (= nularozměrné objekty), nejsme schopni všechny informace (různé statistiky rozpadů, korelace apod.) skryté v obrázcích typu 5 vysvětlit.

Teorie kvantových polí popisuje fotony jako excitace elektromagnetického (= fotonového) pole rozprostírajícího se po celém vesmíru. Tak například vy-

světluje fakt, že všechny fotony mají stejné základní charakteristiky – hmotnost, spin a elektrický náboj. Zatímco jejich energie a hybnosti mohou být různé, fotony vždy mají nulovou hmotnost ($m = 0$), jejich spin je vždy jedna ($s = 1$, resp. velikost jejich spinu je $\hbar\sqrt{s(s+1)} = \hbar\sqrt{2}$) a jejich náboj je za všech okolností přesně nula ($q = 0$). Pro obraz fotonů jako kuliček je důležité to, že teorie kvantových polí fotonům obecně nepřirazuje žádné souřadnice – energie jednotlivých fotonů (pokud lze vůbec jednotlivé fotony v daném problému uvažovat) je v této teorii obvykle rozložena v makroskopických objemech.

Takzvaný vlnově-částicový dualismus, který tak mátl první průzkumníky mikrosvěta a dodnes mate mnoho učitelů a jejich studentů, nikdy netvořil základ ucelené kvantové teorie.⁹ Stejně tak fakt, že některé fyzikální veličiny nabývají za určitých okolností diskrétních hodnot. Obojí jsou pouze vnější projevy hlubších kvantových principů, o kterých zase až jindy. :-) Na tomto místě pouze podotýkám, že i když existence fotonů byla ve výše uvedeném smyslu dokázána, je na hony vzdálená „kuličkové představě“. Fotony se totiž mohou nacházet v superpozici různých klasických stavů, mohou interferovat „samy se sebou“, existují stavy s neceločíselným počtem fotonů, vykazují „nelokální“ korelace a mají mnoho dalších, velmi neklasických (nenewtonovských) vlastností. Vlastnosti, které je nutné fotonům přiřadit, abychom byli schopni vysvětlit výsledky všech experimentů, vedly dokonce nositele Nobelovy ceny Willise Lamba k prohlášení (viz [15]):

Z titulu tohoto článku [nazvaného Anti-photon] by mělo být zřejmé, že jeho autor nemá rád užívání slova „foton“. K jeho popularitě mezi fyziky a vědci zabývajícími se optikou vedla pouze komedie chyb a historických náhod.¹⁰

Lambův názor na používání slova *foton* mezi vědci rozhodně není převládající, i když není ojedinělý. Například Richard Feynman ve své originální [4] používá zcela protichůdná vyjádření (str. 26)

Chtě bych zdůraznit, že světlo má *částicovou* povahu. Je velmi

⁹Jednotlivým fotonům dokonce ani obecně nelze přiřadit vlnové funkce, které tak dobře popisují například elektrony v atomech.[22]

¹⁰Lamb v článku [15] dále například uvádí, že máme-li jeden jediný mód záření [elektromagnetického] pole, v jistém smyslu o fotonech mluvit lze, ale jakmile budeme mít superpozici módů s různými energiemi, přestože ještě můžeme mluvit o pravděpodobnostech nalezení určitého počtu fotonů, tyto fotony nelze lokalizovat žádným rozumným způsobem a „nechovají se vůbec jako částice“. Pokud máme více módů (například při spontánním přechodu excitovaného atomu do základního stavu jich máme nekonečný počet) je problém ještě komplikovanější. Doslova: „With more complicated states it is terribly difficult to talk meaningfully about „photons“ at all.“

důležité vědět, že se světlo chová jako proud částic; zvláště pro ty z vás, kteří si ze školy možná pamatují, jak vás učili, že se světlo chová jako vlnění. Já vám teď říkám, jak se chová *doopravdy* – jako částice.

Takové výrazy, dle mého názoru ne právě vhodně pronesené k laickému publiku, Feynman nakonec precizuje tím, jak je nutné ony „částice světla“ chápat – zcela neklasicky. V žádném případě jako dětské kuličky. Ve své knize [5]¹¹ Feynman používá didakticky daleko zdařilejší formulace (str. 135):

Začneme s historií světla. Nejprve se předpokládalo, že se světlo chová jako sprška částic, jako déšť, jako střely. Další výzkum ukázal, že tato představa není správná a že se světlo chová jako vlny podobně jako ty na vodě. Na začátku dvacátého století další objevy odhalily, že v mnoha ohledech se světlo skutečně chová jako částice. Tyto částice můžeme při fotoelektrickém jevu *doopravdy* počítat jednu po druhé a dnes je nazýváme fotony. Když byly objeveny elektrony, chovaly se přesně jako částice, tak jednoduše jako střely. Následující pokusy s elektronovou difrakcí ukázaly, že se někdy také chovají jako vlny. S novými pokusy vzrůstal zmatek. Jak se *doopravdy* chovají, jsou to vlny, nebo částice? Zdálo se, že obojí.

Tento narůstající zmatek byl ukončen roku 1925 nebo 1926 nalezením správných rovnic kvantové mechaniky. Od té doby je známo, jak se elektrony a světlo chovají. Jak to ale nazvat? Řeknu-li, že se chovají jako částice, získáte špatnou představu, stejně jako když řeknu, že se chovají jako vlny. Chovají se svým nenapodobitelným způsobem. ... Nechovají se jako nic z toho, co jsme dosud viděli. Naše předchozí zkušenost byla neúplná. Děje v mikrosvětě jsou prostě odlišné. Atom se nechová jako kývající se závaží. Správná není ani představa miniaturní napodobeniny sluneční soustavy s malými planetami. Také nevypadá jako oblak nebo mlha obklopující jádro.

Je nutno podotknout, že ačkoli je Feynmanův výklad opiky z hlediska kvantové elektrodynamiky v [4] založen na částicových základech, lze ve skutečnosti některé Feynmanem „shůry dané“ vztahy přirozeně *odvodit* v rámci kvantové teorie *polí*, tj. nikoli částic. Více viz např. [12] kap. 5.

¹¹Kterou doporučuji každému fyzikáři přečíst celou. ;-)

9 Silná vyjádření ve výuce fyziky aneb pozor na slovo „důkaz“

To, že nějaký jev umíme popsat jedním způsobem neznamená, že tento jev *dokazuje* správnost tohoto popisu.¹² Tak například se často tvrdí, že lom světla nemá v pojmech částic vysvětlení. To ale obecně není pravda – Snellův zákon lomu s pomocí představy o částicích odvodil už Newton. K odvození ale potřeboval předpokládat, že rychlost pohybu světelných částic je v opticky hustším prostředí vyšší než v opticky řidším prostředí. To se ale měřením (konaným o mnoho let později) nepotvrdilo. Jenže pokud bychom světelné částice chápali kvantově, Newtonovou „chybou“ byla záměna fázové a grupové rychlosti.

Ve fyzice by se tedy nemělo používat příliš silných vyjádření typu „Věda dokázala ...“ (myšleno nevyvratitelně) nebo „Tato úvaha vede k naprosto samozřejmému závěru ...“ a podobně. Stejně jako každý fyzik, měl by si i každý učitel fyziky plně uvědomovat omezenou platnost našeho poznání a našich modelů „reality“. Daleko více využívat frází typu „Důkazy, jak se zdá, nasvědčují tomu, že ...“ nebo „Dosavadní vývoj fyziky svědčí ve prospěch představy ...“ atd. Na toto konto Richard Feynman ve své knize [6] na straně 35 napsal:

... to, co nazýváme dnešním vědeckým poznáním, je suma tvrzení, kterou známe s větší či menší jistotou. Některá z tvrzení jsou velice nejistá. Některá jsou skoro určitě správná. Ale žádná z nich nejsou naprosto jistá. Vědci jsou na to zvyklí. Víme, že život jde ruku v ruce s nevědomostí.

10 Zkouška postřehu

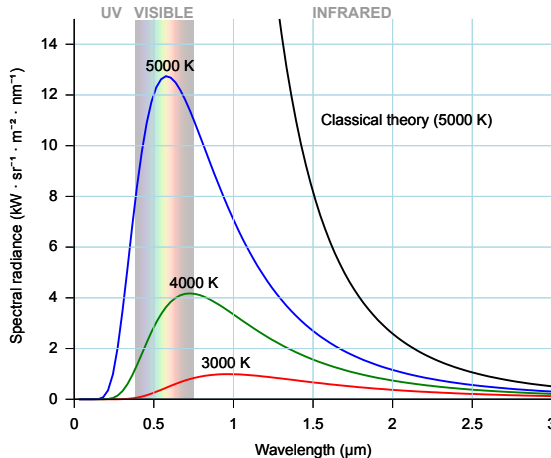
V tomto oddílu je uvedeno několik citací z *Přehledu středoškolské fyziky* [23] – pokuste se nyní, po pečlivém přečtení předchozích částí tohoto článku, najít formulace, které jsou nepřesné či zavádějící a zformulujte si také proč (a v případě pochybností mi napište :-)).

V oddílu *Elektromagnetické záření látek* začínajícím na str. 396 autoři [23] nejprve mluví o tzv. „teplém záření“¹³, zavádějí koncept černého tělesa a

¹²A samozřejmě i naopak: Myslet si, že nedostatek důkazů pro některou myšlenku je důkazem pro nějakou konkurenční myšlenku, je prostě klam.

¹³Pozor, tento pojem se vztahuje nikoli na záření samotné, ale na způsob jeho vzniku. Dle mého to není příliš vhodný terminus technicus proto, že teplým zářením může být vlastně jakékoli elektromagnetické záření z celého širého elektromagnetického spektra – od

diskutují spektrální hustotu intenzity vyzařování $H_\lambda = f(\lambda, T)$, která určuje, jaká část celkové energie vyzařené zdrojem za 1 s přísluší záření o vlnové délce λ při teplotě zdroje záření T .¹⁴ Dále se uvádí:



Obrázek 6: Obrázek z Wikipedie by Darth Kule – Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10555337>.

Fyzikové se také pokusili nalézt vztah pro funkci $H_\lambda(\lambda, T)$, která určuje tvar křivky na obr. graf 6. Na základě představ klasické fyziky však vycházelo, že by se podíl energie připadající na kratší vlnové délky měl stále zvětšovat. To je ovšem v rozporu s experimentálním zjištěním, že při $\lambda \ll \lambda_{\max}$ černé těleso prakticky nevyzařuje. K tomuto závěru dospěli angličtí fyzikové lord Rayleigh a J. H. Jeans a rozpor se skutečným průběhem funkce H_λ se označuje jako „ultrafialová katastrofa“.

Vlastnosti záření černého tělesa se podařilo objasnit na začátku 20. století německému fyzikovi M. Planckovi. Musel však zavést předpoklad, který byl z hlediska klasické fyziky nepochopitelný. Podle Planckovy teorie vyslovené v roce 1900 nevyzařuje černé těleso svoji energii spojitě, ale po určitých **kvantech energie** E .

radiového záření až po záření gama. Jeví se mi tedy jako naprosto nadbytečný.

¹⁴Přesněji nejde o záření s určitou jednou vlnovou délkou, ale s vlnovými délkami spadajícími do rozmezí od λ po $\lambda + d\lambda$.

Velikost těchto kvant závisí na frekvenci f záření

$$E = hf .$$

Tak dospěl vývoj fyziky k poznatku, který má obecnou platnost a je základní ideou **kvantové fyziky**:

**Energie elektromagnetického záření je
vyzařována nebo pohlcována jen po celistvých
kvantech energie E .**

Na výše uvedenou část se opět navazuje na str. 411 „Přehledu“ takto:

Objev M. Plancka, že zářící těleso vyzařuje energii nespojitě a vyzářená energie je celistvým násobkem kvanta energie $E = hf$, podstatným způsobem ovlivnil další vývoj fyziky. Bylo třeba opustit představu klasické fyziky, podle níž všechny fyzikální děje probíhají spojitě. Na příkladu vyzařování a pohlcování kvant záření se poprvé ukázalo, že energie těles se může měnit jen po určitých diskrétních hodnotách.

Zobecněná představa o nespojitě, kvantové povaze elektromagnetického záření je základním poznatkem kvantové optiky. ... K nejdůležitějším jevům kvantové optiky patří fotoelektrický jev, který je důkazem kvantové povahy elektromagnetického záření.

Zákony fotoelektrického jevu vyložil v roce 1905 na základě Planckovy kvantové teorie záření A. Einstein. ...

Na straně 415 je přímo oddíl nazvaný **Foton**. Z něj opět cituji:

Výklad teorie fotoelektrického jevu přivedl A. Einsteina k závěru, že kvantová povaha elektromagnetického záření se neprojeví jen při vyzařování a pohlcování záření, ale i při jeho šíření prostorem. Podle této představy se např. světlo šíří v podobě jednotlivých kvant elektromagnetického pole, pro která byl později zaveden název fotony.

Na rozdíl od vlnové optiky, která považuje světlo za elektromagnetické vlnění spojitě vyplňující prostor, je v kvantové optice světlo i jiné druhy elektromagnetického záření chápáno jako proud fotonů.

Fotony jsou zvláštní druh částic, které mají nulovou klidovou hmotnost a pohybují se rychlostí c .

O problematice středoškolského výkladu kvantových vlastností elektromagnetického záření z poněkud jiného úhlu pohledu se lze dočíst i v článku [14]. O mém návrhu na způsob výkladu optiky na střední škole zase někdy Letní škole. :-)

Reference

- [1] BEISER, A. *Úvod do moderní fyziky*. Praha : Academia, 1975.
- [2] BOYA, L. J. Rejection of the Light Quantum: The Dark Side of Niels Bohr. Dostupné na <https://arxiv.org/pdf/physics/0212090.pdf>.
- [3] EINSTEIN, A. Über einen die Eregung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*. 1905, roč. 17, č. 6, s. 132-148. (Článek lze nalézt i s anglickým překladem např. na https://en.wikipedia.org/wiki/Annus_Mirabilis_papers#cite_note-einsta-9.)
- [4] FEYNMAN, R. P. *Neobyčejná teorie světla a látky. Kvantová elektrodynamika*. Praha : Aurora, 2001.
- [5] FEYNMAN, R. P. *O povaze fyzikálních zákonů*. Praha : Aurora, 1998.
- [6] FEYNMAN, R. P. *O smyslu bytí*. Praha : Aurora, 2000.
- [7] GRANGIER, P., ROGER, G., ASPECT, A. Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. *Europhysics Letters*. 1986, roč. 1, č. 4, 173-179.
- [8] GREENSTEIN, G., ZAJONC, A. G. *The Quantum Challenge*. 2. vyd, London : Jones and Bartlett Publishers, 2006.
- [9] CHENG, T. *Einstein's Physics. Atoms, Quanta, and Relativity Derived, Explained, and Appraised*. Oxford : Oxford University Press, 2013.
- [10] JEX, I. *Max Planck. Hledač absolutna*. Praha : Prometheus, 2000.
- [11] KIDD, R., ARDINI, J., ANATOL, A. Evolution of the modern photon. *American Journal of Physics*. 1989, roč. 57, č. 1, 27-35.
- [12] KRÁLÍK, J. *Nové přístupy k výuce základů kvantové fyziky*. (disertační práce, ved. prof. Lubomír Skála) Praha : MFF UK, 2009.

- [13] LACINA, A., MARTINÁSKOVÁ, H. Fotoelektrický jev. *Školská fyzika*. 2005, 3, 15-27. Dostupné na <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/fotoefekt.pdf>.
- [14] LACINA, A., MARTINÁSKOVÁ, H. *Kvantové vlastnosti elektromagnetického záření v gymnaziálním kurzu fyziky*. Dostupné na <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/kvantovevlastnosti.pdf>.
- [15] LAMB, W. E. Anti-photon. *Applied Physics B*. 1995, roč. 60, 77-84.
- [16] LAMB, W. E., SCULLY, M. O. The photoelectric effect without photons. In *Polarisation, Matiere et Rayonnement*. Presses University de France, 1969.
- [17] LEPIL, O., BEDNAŘÍK, M., HÝBLOVÁ, R.: *Fyzika pro střední školy II*. 4. vyd., Praha : Prometheus, 2012.
- [18] MARTINÁSKOVÁ, H., LACINA, A. Comptonův jev jako základní téma úvodního výkladu kvantových vlastností elektromagnetického záření. Dostupné na <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/comptonuvjev.pdf>.
- [19] MILLIKAN, R. A. Albert Einstein on his seventieth birthday. *Review of Modern Physics*. 1949, roč. 21, 343-345.
- [20] PAIS, A. Einstein and the quantum theory. *Reviews of Modern Physics*. 1979, roč. 51, č. 4, 863-914.
- [21] ROSE, A. *Vision: human and Electronic*. New York : Plenum Press, 1973.
- [22] STRNAD, J. Photons in introductory quantum physics. *American Journal of Physics*. 1986, roč. 54, 650-652.
- [23] SVOBODA, E. a kol. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. vyd, Praha : Prometheus, 1996.
- [24] ZAJAC, R., PIŠŮT, J., ŠEBESTA, J. *Historické pramene současnej fyziky 2*. Bratislava : Univerzita Komenského, 1997.
- [25] ZAJONC, A. *Uchopit světlo*. Praha : Malvern, 2015.