

Kvantové vlastnosti elektromagnetického záření v gymnaziálním kurzu fyziky

Aleš Lacina, Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Hana Martinásková, Gymnázium Brno - Řečkovice

Jednou z nejvýznamnějších idejí, které přinesla tzv. moderní fyzika vzešlá z krize, do níž se dostal zavedený – a do té doby nanejvýš úspěšný – způsob fyzikálního myšlení na přelomu devatenáctého a dvacátého století, je představa o kvantovém charakteru interakce světla (elektromagnetického záření) s látkou. Tuto skutečnost reflektuje i Rámcový vzdělávací program pro gymnaziální vzdělávání [1, 2], když ve *vzdělávacím [pod]oboru Fyzika mikrosvěta* mezi nemnoha očekávanými výstupy také uvádí:

„žák využívá poznatky o kvantování energie záření ... pro řešení fyzikálních problémů“.

V navazující položce *Učivo* pak vymezuje „závazný věcný obsah učení, jehož prostřednictvím žák dosáhne“ [těchto] „závazných a ověřitelných výsledků“ body „Einsteinův zákon vnějšího fotoelektrického jevu, foton;“ [1], resp. „foton a jeho energie; korpuskulárně vlnová povaha záření“ [2]. Vyjádříme-li totéž poněkud prostším jazykem, můžeme konstatovat, že Rámcový vzdělávací program ve své tištěné pilotní verzi [1] zavazuje všechna česká gymnázia k tomu, aby prostřednictvím Einsteinova výkladu fotoelektrického jevu zavedla pojem foton – či za pomoci pojmu foton dospěla k Einsteinovu zákonu fotoelektrického jevu (?) – a dovedla tak svoje frekventanty k uživatelské *znalosti* kvantování energie (elektromagnetického) záření. Jeho novější – zatím poslední a v době odeslání tohoto článku redakci ještě neschválená – pracovní verze [2] jim pak ukládá dosažení téhož *očekávaného výstupu* blíže nespecifikovanou cestou.

Autoři tohoto příspěvku by rádi věřili, že slovní spojení „*využívá poznatky*“ zde není míněno jako pouhé

přiložení hotové operační šablony světlo \equiv soubor kvant,

ale označuje určitý intelektuální výkon založený na dostatečně hlubokém

porozumění nutnosti změny paradigmatu vlnění \rightarrow kvanta,

pro něž je charakteristická přiměřená

schopnost formulovat odpovídající fyzikální argumentaci.

Je-li tomu skutečně tak, potom má zmiňovaný *očekávaný výstup* zdravé, sympatické ambice a směřuje výše než dosavadní způsob gymnaziální prezentace [3–6] této problematiky. Za přezkoumání ovšem stojí, zda vůbec, v jaké míře a jakým způsobem lze na gymnaziální úrovni tohoto vysokého cíle dosáhnout.

1. Fyzikálně-historické souvislosti

První – zpočátku ovšem nerozpoznané – signály svědčící o kvantovém charakteru interakce mezi elektromagnetickým zářením a látkou se objevily v posledních desetiletích devatenáctého století. Tedy – na první pohled možná poněkud paradoxně – prakticky již v téže době, kdy byla teprve experimentálně prokázána existence Maxwellem předpovězených elektromagnetických vln a zároveň odhalena elektromagnetická podstata světelného vlnění [7]. Právě tento pokrok totiž umožnil podrobněji a důsledněji teoreticky popsat vlastnosti a chování elektromagnetického záření, což záhy přivedlo nejprve k **poznání omezené platnosti vlnové koncepce** a následně pak k **postupnému vytváření představy kvantové**.

Zatímco šíření elektromagnetického záření popisoval vlnový obraz zcela uspokojivě, při popisu jeho emise a absorpce už tak úspěšný nebyl. Současně – avšak nezávisle – probíhající experimentální výzkum vlastností rovnovážného tepelného záření (1860 \rightarrow) [7–9] a fotoelektrického jevu (1887 \rightarrow) [8–10] totiž postupně přinášel výsledky, které se rozcházely se závěry vlnového výkladu těchto jevů. A i když takový nesoulad vedl samozřejmě také k vyšším požadavkům na kvalitu experimentování, další vývoj ukázal, že klíčovým problémem bylo nalezení nových logicky nerozporných teoretických postupů, které by umožnily reprodukovat (a rovněž pochopit) nečekaná, avšak čím dál spolehlivější, experimentální zjištění.

Kvanta energie $\varepsilon = hf$ (Max Planck 1900)

[NC 1918]

Prvního úspěchu na této dlouhé a strastiplné cestě dosáhl na sklonku roku 1900 Max Planck, jemuž se – po mnoha marných pokusech jeho předchůdců – podařilo na základě statistické analýzy termodynamické rovnováhy mezi tepelným zářením uzavřeným v dutině a stěnami této dutiny odvodit rozdělení celkové energie mezi jednotlivé frekvence (spektrální složky). Poněvadž je tato *spektrální hustota energie* – při rovnováze mezi oběma podsystemy – stejná jak ve stěnách dutiny, tak v záření, které dutinu vyplňuje, mohl se Planck v konečné fázi svých úvah omezit na jednodušší z nich – stěny dutiny, které modeloval souborem navzájem neinteragujících harmonických oscilátorů. Jeho postup – opírající se o tehdy relativně novou (1877) Boltzmannovu pravděpodobnostní interpretaci entropie – je však realizovatelný, řečeno matematickým jazykem, když a jen když tyto oscilátory mají nespojité energiové spektrum. Tak byl Planck, podle vlastních slov, v podstatě „přinucen“ formulovat (z fyzikálního hlediska neslýchaný) předpoklad, později nazvaný *kvantová hypotéza*, že energie harmonického oscilátoru nemůže být jakákoli, ale může být rovna jen celistvému násobku jistých – stejných – elementárních porcí (energiových kvant) ε . Na základě něj pak naznačeným postupem dospěl k obecnému výrazu pro (rovnovážnou) spektrální hustotu energie uvažovaného souboru oscilátorů (resp. spektrální hustotu energie záření v dutině)

$$\rho(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \cdot \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1}$$

(f je frekvence, T termodynamická teplota, c rychlost světla, k zatím neurčená konstanta),

jež se dnes běžně označuje jako *Planckův vyzařovací zákon*. Tato základní charakteristika rovnovážného tepelného záření nejen umožňuje snadno vyvodit všechny dříve zjištěné dílčí vlastnosti tohoto důležitého fyzikálního systému, ale může být i konfrontována s výsledky přímých měření $\rho(f, T)$ [8, 9]. Na základě těchto srovnání Planck nejprve zjistil, že energie ε kvanta je úměrná frekvenci f oscilátoru ve stěně (resp. vlny v dutině) $\varepsilon \sim f$ a detailním numerickým nafitováním svých závěrů na experimentální data pak stanovil i číselné hodnoty jak konstanty h této úměrnosti

$$\varepsilon = hf,$$

nazvané později jeho jménem, tak konstanty k , jež byla posléze nazvána konstantou Boltzmannovou.

Ve fyzikálně-historické literatuře (např. [7, 11]) se často zdůrazňuje, a celou řadou Planckových vlastních výroků dokládá, že kvantová hypotéza byla sice předpokladem nutným, avšak neslučitelným s jeho fyzikálním cítěním, a že Planck byl tedy v podstatě „revolucionářem proti své vůli“, který svou ideu kvant dlouho považoval jen za „matematický trik“, jemuž nepřikládal žádný hlubší fyzikální význam a z nějž odmítal vyvozovat jakékoli fyzikální důsledky [12].

Souhrnně lze říci, že výsledky Planckových – velmi netriviálních – úvah a výpočtů se shodovaly se všemi experimentálně zjištěnými vlastnostmi rovnovážného tepelného záření, avšak fyzikální podstata jeho postupu byla tehdy – i jemu samému – nejasná. A až další vývoj nezvratně ukázal, že *kvantová hypotéza* není jen matematickým artefaktem, ale převratným fyzikálním předpokladem, k němuž neexistuje žádná „fyzikálně přijatelnější“ alternativa.

Světelná kvanta $\varepsilon = hf$ (Albert Einstein 1905)

[NC 1921]

Kvanta energie zavedl Planck při popisu chování harmonických oscilátorů tvořících stěny dutiny naplněné zářením a nikoli samotného záření. Pokud by však energie těchto oscilátorů byla skutečně kvantována, musela by být stejně kvantována i energie jimi emitovaná/absorbovaná do/z dutiny, což by znamenalo, že: *výměna energie mezi rovnovážným tepelným zářením a stěnami dutiny* (elektromagnetickým zářením a látkou) *se realizuje po kvantech o velikosti $\varepsilon = hf$* . V takovém případě by ovšem nebylo vyloučeno, že se toto kvantování projeví i u samotného záření.

A právě s tímto názorem přichází v roce 1905 Albert Einstein v jedné ze svých nejslavnějších prací *O jednom heuristickém aspektu týkajícím se vzniku a přeměny světla* [13] zabývající se několika – navzájem značně odlišnými – jevy, při jejichž popisu neuspěla klasická (= vlnová) teorie světla. V úvodu tohoto článku sice připouští, že „[tato] teorie ... popisuje čistě optické jevy natolik dobře, že [při jejich výkladu] nebude pravděpodobně nikdy nahrazena žádnou jinou“, současně však upozorňuje na to, že „optická pozorování

vypovídají pouze o časových středních hodnotách [veličin]“. Lze tedy, podle něj, očekávat, že „navzdory jejímu úplnému souhlasu s experimentem v případě difrakce, odrazu, lomu, disperze, atd., ... může vést k rozporu se zkušeností, bude-li aplikována na jevy emise a transformace světla [v nichž je třeba uvažovat o okamžitých hodnotách veličin]“, tj. na popis interakce světla (elektromagnetického záření) s látkou. Po té se Einstein obrací k problému rovnovážného tepelného záření. A poněvadž jej neuspokojuje jistá nesymetrie předchozích Planckových úvah – na stěny dutiny se v nich pohlíží jako na soubor částic (oscilátorů), jejichž energie je navíc kvantována, zatímco záření v dutině, které je jimi emitováno a absorbováno, se považuje za spojitě – formuluje bezprecedentní ideu: *energie je nejen emitována a absorbována stěnami dutiny po kvantech, ale ve formě těchto kvant v dutině i existuje*. Na základě tohoto předpokladu, že na rovnovážné tepelné záření (elektromagnetické pole) lze pohlížet jako na soubor lokalizovaných objektů – *světelných kvant* – majících energii $\varepsilon = hf$ a pohybujících se rychlostí světla, pak odvozuje alternativním způsobem Planckův vyzařovací zákon.

Užitečnost této kacířské myšlenky pak Einstein ještě demonstroval ve zbytku zmíněného sdělení na fyzikálním objasnění několika do té doby nevysvětlených jevů. Nejznámějším z nich je fotoelektrický jev. Emise elektronů z ozařovaného vodivého vzorku, jež je jeho podstatou, je zde nově interpretována jako důsledek absorpce jednotlivých světelných kvant jednotlivými elektrony a matematicky popsána jednoduchou energií bilancí

$$E_k = hf - W_V,$$

kde E_k je energie uvolněného elektronu a W_V výstupní práce,

nyní běžně nazývanou *Einsteinův zákon (vnějšího) fotoelektrického jevu*.

(Přestože k přijetí tohoto výkladu – a zpočátku ještě velmi rezervovanému – došlo až po následném pečlivém a zdoluhavém (1906–1916) Millikanově experimentálním ověření tohoto vztahu [10], jeho pozdější popularita způsobila, že se dnes ve prospěch světelných kvant nejčastěji argumentuje právě fotoelektrickým jevem a na celý článek [13] se dokonce mnohdy – ne zrovna nejvýstižněji – odkazuje jako na „Einsteinovu práci o fotoelektrickém jevu“.)

Fotony $\varepsilon = hf$, $\vec{p} = \left(\frac{hf}{c}\right)$ (Arthur Compton 1923) [NC 1927]

Krajně nezvyklá představa nespojitě struktury elektromagnetického záření vzbudila značný – převážně ovšem negativní – ohlas Einsteinových současníků, kteří sice uznávali její dílčí úspěchy, většinou ji však považovali jen za ryze účelový „heuristický trik“, neslučitelný s existencí interferenčních jevů. Sám Einstein si byl tohoto problému samozřejmě také vědom, nepovažoval jej však za nepřekonatelný [8, 11]. K problému emise a absorpce elektromagnetického záření se pak vrátil ještě v letech 1916–1917, kdy při jejich detailnějším teoretickém rozboru navrhl připsat světelnému kvantu kromě energie ε také hybnost \vec{p} o velikosti $p = \varepsilon / c$ a směru shodném se směrem šíření záření.

Pevný empirický základ kvantově-korpuskulární koncepci světla poskytla vyčerpávající experimentální a teoretická analýza změny frekvence f , resp. vlnové délky λ , rentgenového záření při jeho rozptylu na vzorcích obsahujících slabě vázané elektrony, kterou provedl v letech 1920–1922 Arthur Compton. Tento – z vlnového hlediska nevysvětlitelný – jev, vzápětí nazvaný jeho jménem, Compton vyložil jako důsledek interakcí jednotlivých světelných kvant dopadajícího záření s jednotlivými elektrony ozařovaného vzorku. Dokonalou shodu teoreticky vypočtených a naměřených hodnot změny vlnové délky $\Delta\lambda$, k níž dospěl velmi jednoduše a přesvědčivě použitím zákonů zachování energie a hybnosti pro tyto elementární srážky, pak sám komentuje slovy: „*Tento pozoruhodný souhlas mezi našimi vzorci a experimenty neponechává téměř žádný prostor pro pochybnost o tom, že rozptyl rentgenových paprsků je kvantovým jevem. ... Předložená teorie se opírá o předpoklad, že každý elektron rozptyluje jedno kvantum. Je v ní obsažena hypotéza, že kvanta záření přicházejí z určitých směrů a do určitých směrů jsou rozptylována. Experimentální potvrzení této teorie pak ukazuje velmi přesvědčivě, že kvantum záření nese jak určitou energii, tak určitou hybnost*“ [14]. Následně provedenými doplňkovými experimenty (1923 Wilson, Bothe, Geiger; 1925 Compton, Simon) byly záhy dokonce přímo potvrzeny i dílčí detaily této představy (individuální charakter interakcí; splnění zákonů

zachování v nich) [15]. V roce 1926 pak Gilbert Lewis navrhl pro toto kvantum záření – mající energii $\varepsilon = hf$

a hybnost $\vec{p} = \left(\frac{hf}{c} \right)$ – dnes užívaný název *foton*.

Stojí za zmínku, že Comptonův rozbor v sobě skrývá jistý paradox. Na dopadající i rozptýlené záření se v něm pohlíží jako na vlnění: obě jsou totiž charakterizována svými vlnovými délkami λ , resp. λ' měřeními pomocí krystalového spektrometru, jenž funguje na principu interference – tedy jevu považovaného za typicky vlnový. Změnu vlnové délky způsobenou rozptylem ($\lambda \rightarrow \lambda'$) přitom však lze vyložit pouze na základě představy o fotonech, připomínajících svým chováním částice. Compton na tuto nekonzistentnost sám upozorňuje: „*Způsob, jímž [zde] dochází k interferenci ... není dosud jasný ... v každém případě je však problém rozptylu natolik těsně svázán s problémy odrazu a interference, že jeho vyšetření velmi pravděpodobně vrhne určité světlo i na obtížnou otázku vzájemné souvislosti mezi interferencí a kvantovou teorií.*“ V bezprostředně následujících letech se pak začal prosazovat názor, že elektromagnetické záření není ani vlněním (tak jak je chápala dřívější fyzika), ani souborem běžných částic, ale vykazuje jak vlastnosti vlnové, tak vlastnosti korpuskulární, který se pak postupně vyvinul až k dnešní koncepci kvantově-elektrodynamické [16, 17].

2. Kvantové vlastnosti záření jako téma školské fyziky

Vytvoření pojmu foton patří nejen mezi nejdůležitější, ale také nejzajímavější a nejpůsobivější příběhy novodobé fyziky. Objev žádné z nových mikročástic – dříve ani potom – nezpůsobil zřejmě větší rozruch a delší zmatení. Hlavní příčinou tohoto vzrušení a nejistoty přitom snad nebyl ani tak sám objev nových jevů, jako to, že se už známé skutečnosti začaly jevit v nové podobě a souvislostech: Elektromagnetické záření – všeobecně považované za dobře pochopené (běžné) vlny – za jistých okolností svým chováním připomínalo spíše soubor částic. Již tento první projev vlnově-částicového dualismu rozvrátil klasickou fyziku až po základy.

Poctivé pedagogické zpracování takové problematiky v celé její šíři je ovšem mimořádně obtížné. A to tím spíše, že předpověď fotonu nebyla spojena pouze s jednotlivým jevem či teoretickým článkem, ale že představa o něm byla budována jen velmi postupně. Nadto je zřejmé, že chronologická prezentace rozhodujících fyzikálních událostí

rovnovážné tepelné záření → fotoelektrický jev → Comptonův jev

nastíněná v předchozím bodě, není pro úvodní úroveň vhodná. Z trojice těchto témat je totiž nejkomplikovanější právě to první.

I pouhé pasivní sledování teoretického výkladu vlastností tepelného záření, který se opírá o ad hoc vyslovenou kvantovou hypotézu, vyžaduje značnou fyzikální i matematickou erudici. Cesta od tohoto výchozího mikroskopického předpokladu (kvantování energie elementárních harmonických oscilátorů tvořících stěny dutiny) k závěrečnému výsledku (rozdělení energie záření mezi jednotlivé frekvence) a jeho důsledkům [8, 18] je totiž dlouhá, náročná a pro nespécialistu poměrně nepřehledná. Pro středoškolačka je pak zcela neschůdná.

Fotoelektrický jev je jak po stránce fyzikální, tak z hlediska pedagogického podstatně jednodušší než emise a absorpce záření zahřátými tělesy. A jeho základní popis, doplněný informacemi o relevantních technických aplikacích, se stal standardní součástí středoškolského učiva fyziky prakticky od doby, kdy do něj byly zařazeny tzv. moderní partie [19]. Většina pozdějších učebnicových výkladů však bohužel prezentuje toto inspirativní téma velmi nezáživným způsobem.

Značnými nedostatky zpravidla trpí již expozice problému. Z řady působivých – a v další diskusi využitelných – rozporů mezi některými experimentálně zjištěnými vlastnostmi tohoto jevu a teoretickými očekávanými klasické fyziky se totiž obvykle zmiňují jen některé, při čemž ani ty nebývají dostatečně (mnohdy ovšem vůbec) vysvětleny či aspoň komentovány. (Učebnice [6] například uvádí výslovně jen jeden: „*Na základě představ klasické fyziky by se zdálo,¹ že čím větší bude intenzita dopadajícího záření ..., tím snadněji se budou elektrony z kovu uvolňovat a tím větší bude jejich energie. Experimenty ... však ukázaly, že tomu tak není, že přitom nezáleží na intenzitě záření, ale na jeho frekvenci.*“). Není pochyb o tom, že podstatně hodnotnější – a pro studenty po všech stránkách přínosnější – by bylo pečlivé provedení příslušné fyzikální

¹ Podtrženo autory tohoto sdělení.

analýzy, na základě níž by byly zmiňované neshody odhaleny. Dobře vedení gymnazisté by se mohli (a měli!) tohoto intelektuálního výkonu sami aktivně účastnit a dospět tak k vlastnímu přesvědčení o nepoužitelnosti vlnové koncepce v dané situaci. (Zanedbatelný přitom jistě není ani motivační aspekt takového postupu.)

Druhý krok výkladu vydávaný za „objasnění“ fotoelektrického jevu pak bývá zpravidla redukován na pouhé oznámení, že „... zákonitosti fotoefektu vysvětlil Albert Einstein ... [který] využil Planckovy kvantové hypotézy a vyšel z představy, že elektromagnetická vlna ... se chová jako soubor částic...“ [6] a sestavení Einsteinova zákona fotoelektrického jevu, z něhož jsou pak následně vyvozeny (některé) jeho experimentálně zjištěné vlastnosti. Takový postulativní způsob prezentace kvantové představy o záření ovšem postrádá to věcně nejpodstatnější a pedagogicky nejhodnotnější: sled fyzikálních úvah, který k ní vede.²

S fotoelektrickým jevem – jako s jedním z mála závazných témat *Fyziky mikrosvěta* – počítala i pilotní verze reformované české gymnaziální fyziky [1]. A přestože málo konkrétní vyjádření koncepce fyzikální tematiky na jedné straně, spolu s jen telegrafickým výčtem fyzikálního učiva na straně druhé v [1], značně ztěžuje formulování jednoznačných závěrů, „krátké spojení“ „Einsteinův zákon vnějšího fotoelektrického jevu, foton“ naznačuje tradiční uchopení této problematiky. Citelné omezení celkové (povinné) časové dotace fyziky dokumentem [1, 2] přitom navíc budí obavu, že by se pojetí celého tématu *kvantové vlastnosti záření* mohlo stát ještě schematictější a povrchnější než tomu bylo doposud.

Zcela obecné vymezení relevantního učiva – „foton a jeho energie; korpuskulárně vlnová povaha záření“ – v poslední pracovní verzi RVP [2], působí sice až alibistickým dojmem, současně ovšem otevírá i prostor pro individuální posouzení této důležité problematiky a pro vlastní výběr způsobu jejího výkladu. Jako velmi vhodná možnost se zde nabízí Comptonův jev, který je natolik přesvědčivým projevem kvantového charakteru interakce mezi elektromagnetickým zářením a látkou, že byl záhy po svém objevu a vysvětlení uznán za průkazné svědectví o reálné existenci fotonů. Jeho obvyklé zařazení v učebnicových výkladech kvantových vlastností záření bohužel neodpovídá ani jeho fyzikálnímu významu, ani jeho pedagogické hodnotě. Pokud je v nich totiž vůbec zmíněn, je zpravidla uveden jen velmi stručně – jako doplňkový příklad ilustrující (a snad i dodatečně podepírající) nezvyklé ideje použité v předcházející prezentaci tradičně preferovaného fotoelektrického jevu. Jeho případný výklad se tedy – v drtivé většině učebnicových textů, které jej obsahují – od samého počátku opírá o vpodstatě postulovanou kvantovou koncepci interakce elektromagnetického záření s látkou [20].

3. Alternativy úvodního výkladu kvantových vlastností elektromagnetického záření

Mezi nejvyšší cíle jakéhokoli školního vyučování patří zprostředkovat jeho frekventantům poznání toho nejpodstatnějšího a ideově nejcennějšího z příslušné vzdělávací oblasti. Jeho dosažení je – nezávisle na podobě a množství školských reforem – trvalou výzvou zodpovědným učitelům na školách všech stupňů, kteří ve své činnosti usilují jak o rozšíření věcných znalostí svých svěřenců, tak o celkový rozvoj jejich intelektuálních schopností i obecně lidských vlastností [21]. Tento základní imperativ každého systematického vzdělávání nutí k opakovanému přemýšlení nad výběrem konkrétních témat – k rozmyšlení jejich vnitřních i vnějších souvislostí a návazností, ke zvažování nejen jejich fyzikální, ale i metodologické a pedagogické hodnoty a ovšem také k promýšlení přiměřeného způsobu jejich prezentace.

Předložit příběh rovnovážného tepelného záření na středoškolské úrovni intelektuálně poctivě a smysluplně nelze. A případný lehce nahozený výklad je tak nejen prakticky bezcenný, ale může být dokonce kontraproduktivní. Je-li totiž zařazen jako jediné, nebo i – jak je v učebnicích obvyklé – jako první dílčí, téma celku *kvantové vlastnosti elektromagnetického záření*, pak není ničím jiným než velmi problematickou snahou servírovat adeptům vzdělanosti informace, na jejichž pochopení jejich fyzikální, matematické, ale ani mentální schopnosti nestačí.

Podstatně vhodnějším východiskem, tradičním těžištěm a často také jediným tématem úvodních výkladů kvantové představy o záření je fotoelektrický jev. Při obvyklém – a v případě kurzů pro začátečníky i dobře ospravedlnitelném – mlčky činěném zjednodušení [22] lze pomocí něj jednak přesvědčivě vysvětlit (nejen oznámit!) neslučitelnost vlnové představy o elektromagnetickém záření s jeho některými experimentálně zjištěnými vlastnostmi, jednak – dalším rozvinutím téže argumentace – postupně vybudovat (nejen předložit!) kvantový obraz absorpce tohoto záření elektrony uvolňovanými z ozařovaného vzorku. Standardní způsob jeho

² Připomeňme znovu skutečný průběh událostí nastíněný již v bodě 1: Einstein sice kvantový charakter absorpce při popisu fotoelektrického jevu skutečně přímo předpokládal. Bylo to však až po té, co jej vyslovil a komentoval při své – na začátečnické úrovni ovšem nereprodukovatelné – statistické analýze vlastností rovnovážného tepelného záření.

učebnicového zpracování stručně komentovaný v předcházejícím bodu však těchto možností ani zdaleka nevyužívá, když jak selhání klasických představ, tak existenci fotonů, oznamuje bez zdůvodnění jako hotová fakta. Alternativní přístup, který těmito nedostatky netrpí a tlumočí tak studentům lépe fyzikální podstatu celého příběhu, formulovali autoři tohoto sdělení dostatečně podrobně na jiném místě [10, 23, 24].

Nanejvýš vhodným tématem pro úvodní seznámení s kvantovými vlastnostmi elektromagnetického záření je – díky své vysoké, v učebnicích však zcela pomíjené, fyzikální a pedagogické hodnotě – Comptonův jev. Již jeho základní analýzu lze totiž uspořádat jako přímočarý, přehledný, celistvý fyzikální příběh, umožňující nejen velmi jednoduše demonstrovat nepoužitelnost vlnové koncepce, ale také snadno a hlavně nezávisle – tj. bez odvolání na dříve či jindy vyslovené předpoklady – vytvořit jeho adekvátní kvantový popis. Promyšlenou prezentací Comptonových experimentálních výsledků a navazujících teoretických úvah tak lze dospět k pojmu světelného kvanta – fotonu podstatně přesvědčivěji než v obou výše zmiňovaných případech. Podrobně je tento postup rozveden a okomentován v [25].

Literatura a poznámky:

- [1] *Rámcový vzdělávací program pro gymnaziální vzdělávání, pilotní verze.* Výzkumný ústav pedagogický v Praze, Praha 2004.
- [2] *Rámcový vzdělávací program pro gymnaziální vzdělávání, poslední pracovní (neschválená) verze.* Výzkumný ústav pedagogický v Praze, Praha (červen) 2007.
http://www.vuppraha.cz/soubory/RVPG_2007_06.pdf.
- [3] Rudolf V., Fuka J., Hlavička A.: *Fyzika pro jedenáctý postupný ročník.* SPN, Praha 1957.
- [4] Fuka J. a kol.: *Fyzika pro III. ročník střední všeobecně vzdělávací školy.* SPN, Praha 1965.
- [5] Pišút J. a kol.: *Fyzika pro IV. ročník gymnázií.* SPN, Praha 1987.
- [6] Štoll I.: *Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvěta.* Prometheus, Praha 1993, 2002.
- [7] Zajac R., Šebesta J.: *Historické pramene současnej fyziky 1.* Alfa, Bratislava 1990.
- [8] Zajac R., Pišút J., Šebesta J.: *Historické pramene súčasnej fyziky 2.* Univerzita Komenského, Bratislava 1997.
- [9] Trigg G. L.: *Crucial Experiments in Modern Physics.* Van Nostrand Reinhold Company, New York 1971. (Ruský překlad: *Rešajuščije eksperimenty v sovremennoj fizike.* Mir, Moskva 1974.)
- [10] Lacina A., Martinásková H.: *Fotoelektrický jev.* Školská fyzika **VIII**, č. 3 (2005) 15.
<http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/fotoefekt.pdf>.
- [11] Jammer M.: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics.* McGraw-Hill Book Company, New York 1967. (Ruský překlad: *Evoljucija ponjatij kvantovoj mechaniki.* Nauka, Moskva 1985.)
- [12] Kragh H.: *Max Planck: the reluctant revolutionary.* Physics World, December 2000.
<http://physicsweb.org/articles/world/13/12/8/1>.
- [13] Einstein A.: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.* Annalen der Physik **17** (1905) 132.
Podstatně dostupnější než německý originál jsou jeho komentované anglické překlady, např. American Journal of Physics **33** (1965) 367 nebo Boorse H. A., Motz L. (Eds.): *The World of the Atom, vol. I.* Basic Books, Inc., Publisher, New York 1966, příp. Stachel J. (Ed.): *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics.* Princeton University Press 1998.
- [14] Compton A. H.: *A Quantum Theory of Scattering of X-rays by Light Elements.* Physical Review **22** (1923) 483.
- [15] Hajko V. a kol.: *Fyzika v experimentoch.* Veda, Bratislava 1988.

- [16] Feynman R.: *QED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton University Press, Princeton 1985. (Český překlad: *Neobyčejná teorie světla a látky. Kvantová elektrodynamika*. Aurora, Praha 2001.)
- [17] Strnad J.: *Photons in Introductory Quantum Physics*. American Journal of Physics **54** (1986) 650.
- [18] Zajac R.: *Storočnica Planckovej konštanty*. Školská fyzika **VI**, č. 3 (2000) 3.
- [19] Bělař A. a kol.: *Fyzika pro čtvrtou třídu gymnasií*. Státní nakladatelství učebnic, Praha 1951.
- [20] Lacina A.: *Moderní trendy v českém fyzikálním vzdělávání*. Školská fyzika **VIII**, č. 3 (2005) 83. (Pod názvem *Aktuální problémy českého fyzikálního vzdělávání*: Čs. čas. fyz. **54**, č. 2 (2004) 92. <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/aktprobl.pdf>.)
- [21] Martinásková H.: *Vývoj představ o světle a možnosti jeho využití v gymnaziálním kurzu fyziky*. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta MU, Brno 2007.
- [22] Leadstone S.: *The Photoelectric Effect – a Suitable Case for Surgery?* In: Roche J. (Ed.): *Physicists Look Back*. IOP Publishing, Bristol, 1990.
- [23] *Fotoelektrický jev – prezentace*. <http://www.physics.muni.cz/~lacina/fotoefekt.ppt>.
- [24] Martinásková H.: *Fotoelektrický jev*. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta MU, Brno 2005. <http://www.kof.zcu.cz/st/dp/martinaskova.shtml>
- [25] Martinásková H., Lacina A.: *Comptonův jev jako základní téma úvodního výkladu kvantových vlastností elektromagnetického záření*. Matematika, fyzika, informatika **17**, č. 8 (2007/2008) 486.