

46. FOTON

Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz

Úvod	1	Teplné záření, tepelná emise, sálání	9
Odhad pravděpodobné trasy fotonu	1	Bilance dopadajícího elektromagnetického záření	12
O interferenci fotonu	2	Tabulky	14
Štěrbínový experiment	3	1184 Konstanty z oboru elektromagnetického záření	14
Kapitola o rychlosti světla a relativitě	4	Odkazy	14
Neurčitost	6	Přílohy	(3 strany)
Energie a hybnost fotonu	7		
Světlo jako elektromagnetické záření	7		
Optické vlastnosti elektromagnetického záření	9		

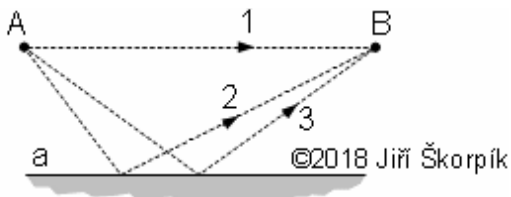
Úvod

Fotony jsou částice, které přenáší energii. Nejbližší je lidským smyslem proud fotonů ve formě světelného paprsků. V tomto případě vznikají fotony ve zdroji světla (Slunce, plamen apod), ale existují i jiné zdroje. Například i rádiové, televizní i Wi-fi signály nejsou ničím jiným než proudem fotonů.

U fotonu se velmi výrazně projevují kvantové vlastnosti částic tj pohyb z místa vyzáření do místa dopadu má nejbližší k představě skoku, kdy nelze stanovit trasu skoku ale pouze pravděpodobnost dopadu do určitého místa. V místě dopadu foton zanikne předáním své energie a hybnosti částici, která ho pohltí.

Odhad pravděpodobné trasy fotonu

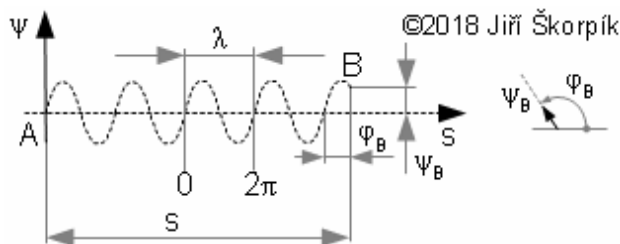
Jestliže bychom znali okamžitý **pohybový stav** fotonu (jeho polohu a další parametry souvisejícím z jeho pohybem), pak by bylo možné stanovit pravděpodobnost jeho následujícího výskytu pro určité vzdálenější místo. K tomu musíme znát všechny možné trasy, po kterých se do onoho vyšetřovaného místa může dostat, a pro jednotlivé trasy znát i tzv. **amplitudy pravděpodobnosti**, které se sečtou, a tím dají výslednou pravděpodobnost, že foton do vyšetřovaného místa dorazí:



1.1180 Možné trasy fotonu.

Foton o známém pohybovém stavu se z místa **A** do místa **B** může dostat několika možnými trasami. Těchto tras je obrovské množství, ale pro názornost jsou zde pouze tři. **1** přímá trasa; **2** trasa s odrazem s různými úhly dopadu a odrazu; **3** trasa s odrazem se stejným úhlem dopadu a odrazu.

Amplituda pravděpodobnosti se po trase periodicky mění jako funkce sinus, ale současně se jedná o vektor přičemž směr amplitudy pravděpodobnosti je dán jejím úhlem, který se také periodicky opakuje v rámci vlnové délky a může mít tedy unikátní hodnotu θ až $2\pi^{(1)}$, respektive 0° až 360° (jedná se o sinusový vektor popsany v kapitole 42. Funkce sinus jako vektor aneb další perlička z kvantové mechaniky). Výsledná amplituda pravděpodobnosti závisí na délce možné trasy fotonu, respektive na tom, kolikrát se průběh amplitudy pravděpodobnosti zopakuje:



2.1181 Amplituda pravděpodobnosti možné trasy.

ψ [-] amplituda pravděpodobnosti (ψ_B amplituda pravděpodobnosti pro bod **B**); λ [m] vlnová délka amplitudy pravděpodobnosti fotonu (dále jen fotonu); s [m] vzdálenost vyšetřovaného bodu **B** od počátku.

⁽¹⁾Poznámka

Proč rozdělení vlnové délky na stupnici $0 - 2\pi$, a ne třeba na $1-12$? Jak píšou v kapitole 42. Stupně nebo radiány? s radiánovou stupnicí se lépe počítá.

Absolutní pravděpodobnost dopadu fotonu do vyšetřovaného bodu je druhá mocnina výsledné amplitudy pravděpodobnosti $|\psi^2|$. Pokud bychom vyšetřovaný bod B posunuly do jednoho z uzlů průběhu této amplitudy, pak by foton v tomto bodě nebyl zachycen – foton si "vybere" pro dopad místo poblíž s vyšší pravděpodobností dopadu. Existují-li dvě nebo více tras, po kterých se foton může dostat do bodu B , musí se nejprve sečíst (vektorově) amplitudy pravděpodobnosti pro jednotlivé trasy, tak lze dostat výslednou amplitudu pravděpodobnosti. Sčítání amplitud pravděpodobnosti pro jednotlivé trasy se nazývá **interference fotonu**

Samozřejmě, že nikdy nebudeme znát bod vzniku fotonu a tak nelze spočítat přesně amplitudu pravděpodobnosti pro konkrétní případy, ale jednotlivé případy lze mezi sebou porovnávat (který je pravděpodobnější), a s pomocí této teorie zdůvodnit veškeré jevy v optice [17] (v uvedené literatuře jsou příklad na odraz, soustředění fotonů pomocí čočky a jiné). Na druhou stranu, při řešení proudu velkého množství fotonů lze vycházet ze zákonů optiky [6, s. 177], které vychází z experimentů.

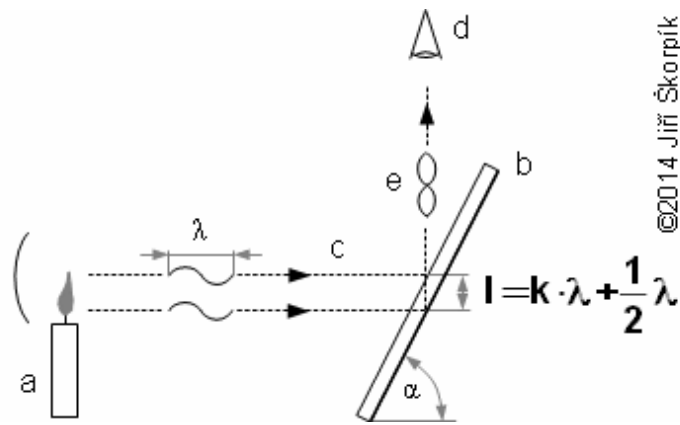
Určete výslednou amplitudu pravděpodobnosti, že foton dorazí z bodu A do bodu B , jestliže víte, že má pouze dvě možnosti.

Úloha 1.1179

Interpretaci výchylky ψ jako amplitudu pravděpodobnosti předložil **Max Born** (1882-1970). To jakým způsobem určit pravděpodobnou dráhu fotonu, jestliže známe jeho vlnovou délku a polohu zdroje popsal americký fyzik **Richard Feynman** (1918-1988) [17, s. 34] (pravděpodobnost je ve skutečnosti vektor). Takový způsob sčítání pravděpodobnosti, ale znamená, že foton nějak dopředu "ví" jaké jsou možnosti cest, nebo všemi cestami prochází současně. Možná, že to souvisí s tím, že fotonu neplyne čas, jak ukazuje teorie relativity. Než zde ale začnu popisovat relativitu vrátím se k důsledkům interference:

O interferenci fotonu

Důsledky interference světla vnímáme kolem sebe neustále, ale poprvé se o jeho zkoumání pokusil až anglický fyzik **Isaac Newton** (1643-1727), který při optických experimentech s monochromatickým světlem (jednobarevné, fotony mají stejnou vlnovou délku) zjistil, že při správném odrazu několika paprsků od skleněné destičky vzniknou tmavé a světlé proužky⁽²⁾. Toto chování světla si nedovedl vysvětlit, protože zastával hypotézu, že světlo je tvořeno proudem korpuskulí [9], [10, s. 89]. Tento jev se podařilo vysvětlit až Nizozemci **Christiaan Huygensovi** (1629-1695), který navrhl, že kdyby se světelný paprsek choval jako vlna, efekt proužků by vzniknout mohl. Sčítáním amplitud [2, s. 173] dvou stejných vln totiž, při vhodné fázovém posunu (o polovinu vlnové délky), se mohou oba paprsky "vyrušit" či při jiném posunu vznikne paprsek jiný [6, s. 68-71]. Později tuto teorii doplnil francouzský fyzik **Augustin-Jean Fresnel** (1788-1827), na základě dalších optických pokusů, že světlo se chová jako příčné vlnění [10, s. 130]. Ve skutečnosti se ale jedná o součet amplitud pravděpodobnosti, pro dvě trasy fotonu (foton odražený na povrchu destičky a foton odražený na druhé straně destičky):



©2014 Jiří Škorpík

3.1008 *Interference světla při odrazu od skleněné destičky.*

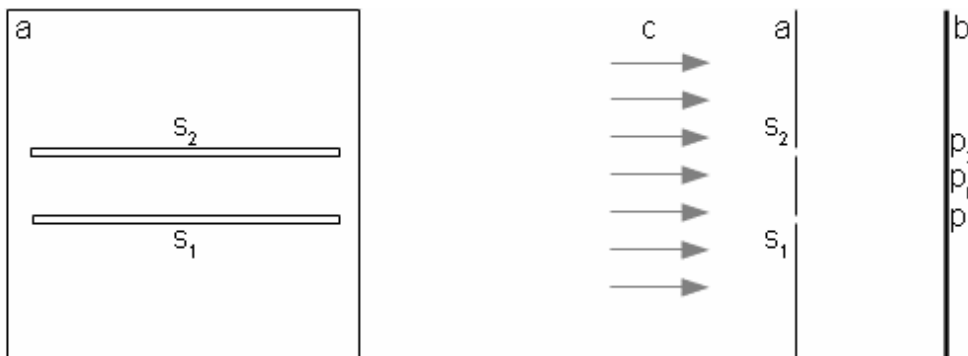
l [m] vzdálenost mezi přední a zadní odrazovou plochou; k [-] celé číslo; α [°] sklon skleněné destičky od hlavního směru světelných paprsků. **a** zdroj monochromatického světla (např. kuchyňská sůl hoří jasně žlutým plamenem); **b** tenká skleněná destička; **c** paralelní světelné paprsky, které se odrazí od přední nebo zadní strany skleněné destičky; **d** oko pozorovatele; **e** smíchání odražených paprsků od přední a zadní stěny. Při určitém náklonu destičky o úhel α je délka trasy odražených paprsků od zadní stěny přesně o polovinu vlnové délky jiná, než paprsku odraženého od přední stěny. Toto posunutí způsobí, že amplituda pravděpodobnosti pro tuto kombinaci tras je nulová (či velmi blízká nule).

⁽²⁾*Poznámka*

Lze stejný pokus zopakovat i před zrcadlem, ale pouze v místnosti s monochromatickým světlem. Přítomnost světla jiné barvy s rozdílnými vlnovými délkami proužky nevytvoří (občas lze pouze na zrcadle rozlišit proužky, ve kterém chybí jedna barva – podobně vznikají proužky na mýdlových bublinách nebo olejovém filmu).

Štěrbínový experiment

Tentokrát se experimentální zařízení skládá z tenké destičky (nepropuští fotony) se dvěma horizontálními štěrbinami. Za touto destičkou je citlivá deska, která v místě dopadu fotonu zanechává černou skvrnu:



©2018 Jiří Škorpík

4.1154 *Experiment s interferencí fotonu.*

a deska se dvěma horizontálními štěrbinami s_1 , s_2 ; **b** světlo citlivá deska, která v místě dopadu fotonu ztmavne; **c** směr přichozích fotonů; p_0 oblast ve stínu destičky mezi štěrbinami s_1 , s_2 ; p_1 místo přímo naproti štěrbině s_1 ; p_2 místo přímo naproti štěrbině s_2 . Popis experimentu následuje.

Při postupném ostřelování destičky a fotony lze celkem oprávněně očekávat, že na fotocitlivé desce b se vytvoří postupně dva tmavé pruhy v místech p_1, p_2 . Naproti tomu oblasti p_0 zůstane téměř čistá, bez zásahu. Jenže lze nalézt takovou vzdálenost desky b od desky a , při které budou fotony dopadat téměř jen na úroveň bodu p_0 . Jestliže ale desku b začneme přibližovat k desce a , tak se opět objeví dopady fotonů na úrovních p_1, p_2 a na úrovni bodu p_0 nic. To není ale vše. Součet fotonů, které dopadly na úroveň p_1, p_2 je mnohem menší, než to co dopadlo v předchozí případ na úroveň bodu p_0 (předpokládáme, že počet vystřelených fotonů směrem ke štěrbinám byl stejný při obou experimentech). Tento experiment dokazuje, že výsledná poloha dopadu závisí na všech možnostech, které foton má. Foton se při určité vzdálenosti štěrbin choval jako by prošel najednou oběma štěrbinami a interferoval sám se sebou, respektive realizoval všechny stejně možné pohybové stavy. Kdežto, když byla deska b příliš blízko štěrbinám už neměly možnost pro jeden bod více cest, a proud fotonů štěrbinami se výrazně zmenšil. Popis experimentu a jeho interpretaci naleznete třeba v [17, s. 82].

Kapitola o rychlosti světla a relativitě

Počátečním systematickým krokem k objevování vlastností světla pravděpodobně bylo první změření rychlosti světla Dánem **Ole Rømer** (1644-1710) v roce 1676 pomocí měření zpoždění stínů na povrch Jupitera vrhané jeho měsíci [6, s. 75]. Rømerovi se podařilo, vzhledem k přesnosti tehdejší měřicí techniky, změřit rychlost světla jen řádově, a to na hodnotu $2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž přesná rychlost světla ve vakuu (v prázdném prostoru) na 9 míst je $299\,792\,459 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a označuje se obvykle písmenem c . Zajímavé je, že vzhledem k velmi vysoké rychlosti světla dlouho trvalo, než lidé myšlenku konečné rychlosti světla vůbec přijali, protože vliv konečné rychlosti světla našimi smysly není postřehnutelná. Ale ještě větší překvapení týkající se rychlosti světla mělo teprve přijít, a to s experimentem, který dokázal, že rychlost světla je stejná ve všech vztažných soustavách tj. ať se pozorovatel pohybuje seberyhleji, vždy bude na něj dopadat světlo stejnou rychlostí a stejnou rychlostí se bude z této soustavy světlo šířit. Tak byla objevena relativita.

Relativita byla objevena náhodou při pokusu dokázat existenci tzv éteru. Podle dobové hypotézy měl éter vyplňovat celý známý prostor, měl být dostatečně řídký aby neovlivňoval pohyb hmoty a hmotou i procházel, ale tuhý aby přenášel světlo o velmi malé vlnové délce. Existence éteru by totiž vysvětlovala vlnové vlastnosti světla.

V éteru by se mělo světlo šířit podobným způsobem jako zvuk ve vzduchu, a tedy i rychlost světla v éteru by měla být konstantní všemi směry od zdroje. Například Země se otáčí kolem své osy, takže světlo ze zdroje umístěné na jejím povrchu by dorazilo k pozorovateli na západní straně od zdroje dříve, i když by oba byli od zdroje stejně daleko a stáli na stejné zeměpisné šířce. Navíc by oba naměřili jinou vlnovou délku světla. Tj. jedná se o ekvivalent Dopplerova jevu v akustice [2, s. 216]. Na to jak ověřit tuto hypotézu přišel Američan **Albert A. Michelson** (1852-1931), který společně s dalším americkým fyzikem **Edwardem W. Morleym** (1838-1923) provedli experiment, který ale naopak vedl k pochybnostem o existenci éteru. Experiment spočíval v měření rozdílu doby, kterou urazí na stejné dráze světelný paprsek ve směru sever-jih a východ-západ.



5.1009 Michelson-Morleyův experiment, kterým chtěli dokázat existenci éteru.

uprostřed kopie experimentálního přístroje vystavená v Postupimi [7]. S sever; J jih; Z západ; V východ; a zdroj světla, b tenká skleněná destička; c zrcátko; d zrcátko; e stínítko; s_1 světelný paprsek ze zdroje; s_2 interferenční světelný paprsek vzniklý složením dvou paprsků vzniklých rozložením paprsku s_1 a nasměrovaných do ramene stroje |BC| a |BD|; u [m·s⁻¹] obvodová rychlost otáčení Země na zeměpisné šířce prováděného experimentu; $\tau_{|BC|}$ [s] očekávaná doba, za kterou světelný paprsek urazí vzdálenost |BC| nejprve ve směru sever jih, a potom ve směru východ západ, tedy ve směru obvodové rychlosti Země. Ve směru východ-západ by tato doba měla být delší. Protože měření tak malých časových rozdílů bylo mimo technické možnosti tehdejší doby využili experimentátoři interferenci světelných paprsků tj. světelný paprsek z jednoho zdroje rozdělili – jeden směřoval na sever a zpět druhý na západ a zpět. Po setkání by měly vytvořit interferenci, a protože očekávali různé doby návratu, tak by se zpět složilo světlo rozdílných interferenčních proužků, respektive vlnových délek. To se však nestalo a obě varianty experimentu vykazovaly stejné tvary interferenčních proužků. Odvození rovnic pro Michelson-Morleyho experiment je uvedeno v Příloze 1009.

Michelson-Morley experiment lze vysvětlit tak, že Země se vůči éteru nepohybuje respektive, že éter je v klidu vůči všem předmětům ať jsou v pohybu nebo v klidu, protože interferenční proužky na experimentálním zařízení by se měnily i během dne tak, jak se mění rychlost Země vůči Slunci. Další vysvětlení nabízela hypotéza nizozemského fyzika **Hendrika A. Lorentze** (1853-1928), ve které předpokládal, že pohyb má vliv na rozměry tělesa, respektive prostoru. Kompletní teoretické vysvětlení Michelson-Morley experimentu vznikalo dalších 18 let a vyvrcholilo **Speciální teorií relativity** [2, s. 189], kterou postupně, včetně Lorentze, formulovali francouzský matematik **Henri Poincaré** (1854-1912), německý matematik **Hermann Minkowski** (1864-1909) a především německý fyzik **Albert Einstein** (1879-1955). Později na jejím základě Einstein formuloval **Obecnou teorii relativity**, která zahrnuje i vliv gravitace na dilataci času a prostoru. Tyto teorie objasňují jevy, které vznikají při vysokých rychlostech a pobytu v gravitačních polích a v praxi jsou důležité při popisu vlastností rychle se pohybujících částic.

Podle speciální teorie relativity je rychlost světla stejná ve všech vztažných soustavách tj. ať se pozorovatel pohybuje seberychněji vždy bude na něj dopadat světlo stejnou rychlostí a stejnou rychlostí se bude z této soustavy světlo šířit. Znamená to, že se délkové rozměry ve směru pohybu takového tělesa prodlužují a plynutí času zkracuje, a u těles pohybujících se rychlosti světla by došlo k zastavení plynutí času. Současně se mění hmotnost těles bez ohledu na to, jakou mají hmotnost v klidu viz kapitola 47. Hmotnost a relativita. Dokonce tato teorie předpovídala, že při rychlostech světla by hmotnost mohly mít i částice, které nemají klidovou hmotnost. Tyto úvahy, že světelná vlna by mohla přeci jen mít vlastnosti částic jako hmotnost a hybnost potvrdily experimenty vedoucí k formulaci kvantové teorie fotonu uvedené výše.

Neurčitost

To, že jsme schopni stanovit pouze pravděpodobnou polohu fotonu a dalších velmi malých částic se nazývá neurčitost, což znamená, že nejsme vlastně schopni určit polohu pohybujících se těles absolutně přesně. Takto jednoduše se smířil s neurčitostí a matematicky ji popsal německý teoretický fyzik **Werner Heisenberg** (1901-1976). Nemožnost určit absolutně přesně polohu v daném čase se nazývá Heisenbergův princip neurčitosti. Neurčitost neplyne pouze z lidské neschopnosti měřit něco dokonale přesně, ale přímo z přírody. Podobně jako člověku se budou jevit dvě blízké tečky z určité vzdálenosti jen jako jedna rozmazaná, tak ani v přírodě neexistuje absolutní rozlišení. Což se projevuje zejména u částic menších než atom. Víme, že hmotu jde dělit na stále menší a menší částice, ale je třeba si uvědomit, že takovým částicím nelze přiřadit nějakou přesnou polohu, protože jsou v pohybu. Patrné je to zejména u elektronů. Takovým částicím lze přiřadit jen nějakou pravděpodobnou polohu uvnitř nějaké oblasti na základě experimentů. K výpočtu pravděpodobnosti pohybového stavu jakékoliv částice lze také použít vlnovou funkci amplitudy pravděpodobnosti, protože výsledky experimentů se nejlépe shodují právě s takovou funkcí. Tyto vlny pravděpodobnosti se nazývají de Broglieho vlny podle francouzského fyzika **Louis de Broglie** (1892-1987), který tuto vlnovou teorii pravděpodobné polohy poprvé aplikoval i na hmotné částice.

Klíčem k pochopení podstaty fotonu je jeho vznik. Fotony jsou vyzářovány (emitovány) částicemi při snížení jejich energetického obsahu právě o energii fotonu. Toto vyzáření se děje také skokově, kdy částice svou energii a polohu změni opět neurčitě [6, s. 158]. Tento proces si v podstatě můžeme představit jak chceme.

Jak foton "ví", jaké jsou možnosti má, nejsme schopni říci, možná za to mohou tzv. **virtuální částice**. Foton urazí vzdálenost své vlnové délky rychlostí světla, ale díky neurčitosti by v rámci jedné vlny mohl tuto rychlost překonat a podle teorie relativity částice pohybující se rychlostí větší než rychlost světla putuje v čase zpět. Takto by foton mohl virtuálně realizovat všechny možné trasy. Je to podobné jako bychom chtěli postavit dům jen pomocí jedné cihly, kterou bychom neustále posílali v čase zpět. Takový dům bychom postavit nemohli, ale mohli bychom například využít informace o tom jak cihlu správně umístit, prostým zkoušením a vracením se v čase. Virtuální částice byly například potvrzeny u elektronů [19, s. 68]. Virtuální fotony samozřejmě na začátku ani na konci experimentu nezachytíme.

Zajímavým důsledkem neurčitosti polohy fotonu je, že je možné ho snadněji zachytit. Bez rozptylu jejího polohy by ho prakticky nebylo možné zachytit a vše by se pro něj stalo průhledným. Hmota by vyzařovala energii ve formě fotonů, ale zpět by ji zachytila velmi málo.

Energie a hybnost fotonu

Vlnovou délku fotonu lze určit z jeho energie. Německý fyzik **Max Planck** (1858-1947), aby určil energii fotonu výpočtem, vyslovil hypotézu, že energie fotonu je lineární závislostí jeho vlnové délky λ , přičemž se směrnici přímky h přímky dnes nazýváme **Planckovou konstantou**. energii fotonu nazýváme jako **kvantum energie** [6, s. 149]:

$$E = h \cdot f; \quad h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}; \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

6.740 Energie kvanta.

E [J] energie kvanta (fotonu) – přepočítává se na praktičtější jednotku elektronvolt [eV] používané při vyhodnocování energie; h [J·s] Planckova konstanta (tzv elementární účinkové kvantum energie, což je energie fotonu o vlnové délce stejné jako vzdálenost, kterou foton urazí za 1 s); f [s⁻¹] frekvence fotonu; c [m·s⁻¹] rychlost světla ve vakuu.

Tuto hypotézu potvrdil experiment amerického fyzika **Arthura H. Comptona** (1892-1962) z roku 1923. Compton svými pokusy dokázal, že foton při odrazech od pevných částic část své energie předá, a tím zvýší svou vlnovou délku. Tento efekt platí i naopak. Mimo jiné zjistil, že při srážce fotonu s částicí, při kterém dojde k předání energie se foton od původního směru odklaní, takže tím dokázal, že foton má i hybnost. Rovnici pro hybnost fotonu lze odvodit z rovnice mechaniky rychle se pohybujících těles [6, s. 135]:

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

7.1010 Hybnost fotonu.

p [N·s] hybnost fotonu.

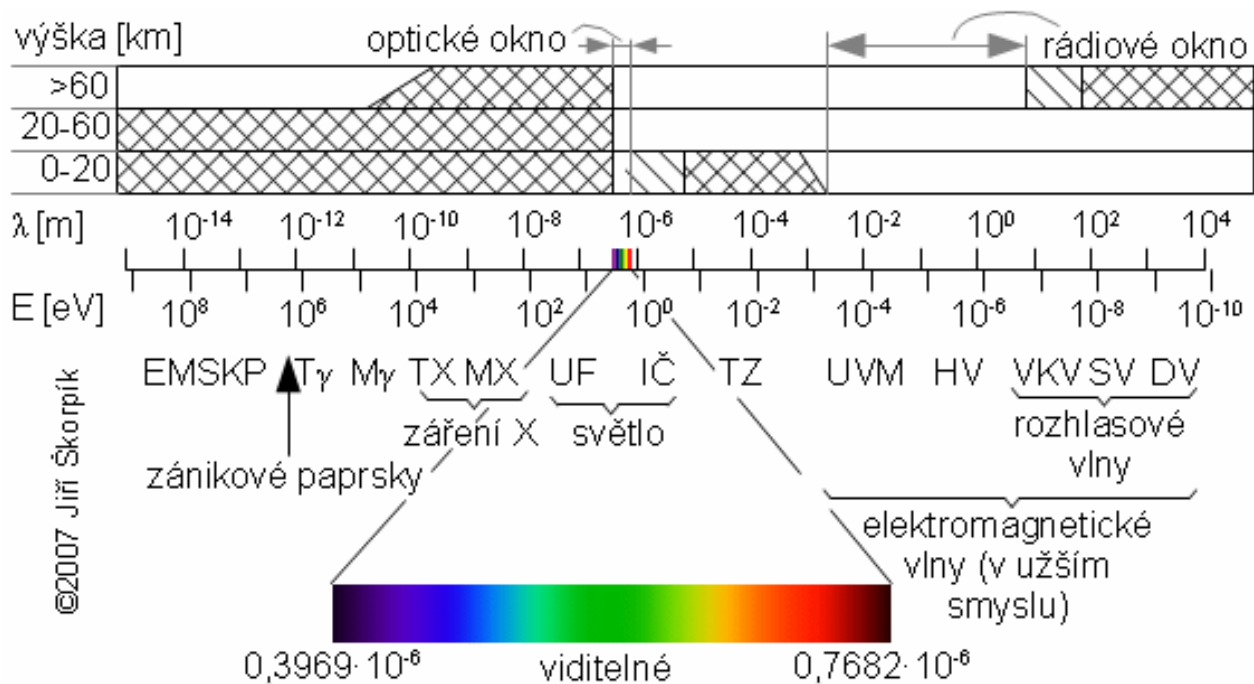
Hybnost fotonu, respektive schopnost předávat energie změnou hybnosti se považuje za důkaz částicové povahy fotonu.

Světlo jako elektromagnetické záření

Comptonovy experimenty byly prováděny s fotony mnohem vyšších energií, než jsou energie fotonů, které je naše oko schopno vnímat jako světlo. Lidské oko je schopno vidět pouze fotony o určité energii, respektive vlnových délkách. Jiné vlnové délky lidské oko není schopno zpracovat. Slunce nevyzařuje pouze fotony viditelných vlnových délek, akorát je jich mnohem méně. Dalšími zdroji fotonů může být například fosforescence, fluorescence, chemická luminiscence, štěpení jader atomů, anihilace částic atd. V době Planckova objevu se už dokonce vědělo, že i elektromagnetické záření je proudem fotonů.

Elektromagnetické záření vzniká například při dynamickém pohybu elektricky nabitě částice (při zpomalení), nebo když se nabitá částice pohybuje v potenciálním elektrickém poli. Existenci elektromagnetického záření teoreticky předpověděl a matematicky popsal skotský matematik a fyzik **James Maxwell** (1831-1879) v roce 1872. Maxwellova práce znamenala, že energii by bylo možno přenášet na dálku. Právě tímto způsobem existenci elektromagnetického záření dokázal německý fyzik **Heinrich R. Hertz** (1857-1894) v roce 1887, který sestrojil první jednoduchý vysílač i přijímač elektromagnetického záření a tak jeho existenci dokázal. Herz dále s elektromagnetickým zářením experimentoval a zjistil, že má stejné optické vlastnosti jako světelné (viditelné) záření tj. lom a odraz i rychlost. Ale nejen to, Maxwell a další významní vědci té doby se domnívali, že mnoho záření do té doby objevených (tepelné, infračervené, ultra fialové..) je zároveň i elektromagnetickým, lišící se od sebe vlnovou délkou [10, s. 171], [9]. Také v rovnicích pro elektromagnetické záření se vyskytovala velmi často i rychlost světla. Bylo-li by světlo elektromagnetickým zářením, znamenalo by to, že pro vodiče by světlo bylo neprůchozí, což se také výzkumem potvrdilo a energie fotonu ovlivňuje energii elektronů ve vodiči.

Vlnová délka elektromagnetického záření určuje jeho chování při průchodu různým prostředím a jeho vliv na toto prostředí. Např. záření v rozsahu vlnových délek $0,3969 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ až $0,7682 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ nazýváme viditelné a člověk ho vnímá jako **světlo**. Člověk je schopen vnímat ještě záření větších vlnových délek jako teplo. Naopak menší vlnové délky mohou být pro lidské zdraví škodlivé, protože už dosahují takových energií, že se z nich stává ionizační záření:



8.249 Rozdělení známého elektromagnetického záření do spektrálních oborů a prostupnost jednotlivých vlnových délek vrstvami atmosféry Země.

DV dlouhé vlny; SV střední vlny; VKV krátké a velmi krátké vlny; HV Hertzovy vlny; UVM ultrakrátké vlny mikrovlny; TZ tepelné záření (sálaní); IČ infračervené záření (1800); UF ultrafialové záření – UV záření (1801); MX měkké paprsky X (rentgenové-1895); TX tvrdé paprsky X; $M\gamma$ měkké záření γ (gamma); $T\gamma$ tvrdé záření γ ; EMSKP elektromagnetická složka kosmických paprsků (ultragama). Šrafováním je vyznačena propustnost zemské atmosféry v různých výškách nad povrchem. Zdroje dat [1, s. 727], [2, s. 168]. Vyšší vlnové délky byly objeveny až ve 20. století. Stupnice vlnových délek a energií jsou logaritmické.

Optické vlastnosti elektromagnetického záření

Základní zákony optiky, jako je odraz a lom světelných paprsků, zde probírat nebudu. Velmi významný je pro měření vlastností částic optický jev zvaný **disperze** [1]. Disperzí svazků fotonů se zabývá obor spektroskopie. Disperze je uspořádaný rozptyl (rozklad) svazků fotonů podle jejich vlnových délek, takže po dopadu takto rozložených paprsků lze přesně sledovat zastoupení jednotlivých vlnových délek ve svazku (vytvoří se tzv. čárové spektrum záření). Tímto způsobem lze zaznamenat změny vlnových délek po průchodu nějakou zkoumanou látkou apod. [6, s. 165].

Tepelné záření, tepelná emise, sálání

Většina látek emitují elektromagnetické záření o vlnové délce odpovídající jejich teplotě [8], [13], [1, s. 834] (elektromagnetické záření způsobené teplotou látky například nevyzařují plyny nebo plazma, ale mohou ho vyzařovat z jiných důvodů například pokud jsou v excitovaném stavu po chemické reakci apod). Zdrojem tohoto záření je dynamický (tepelný) pohyb nabitých částic tělesa, proto název tepelné záření či sálání. Tento tepelný pohyb se zářením snižuje (těleso chladne) pokud nepřijímá z okolí sálání nebo jinou energii, která by těleso opět zahřívala. Těleso, které nesálá by mělo teplotu absolutní nuly⁽³⁾ [4, s. 6], [10, s. 154]. Dokonce i černé díry sálají.

⁽³⁾Absolutní nula

Při chladnutí ustává tepelný pohyb částic v tělese až při jisté teplotě úplně zastaví. Tato teplota se nazývá teplota absolutní nuly $-273,15\text{ °C}$ [14, s. 161] a nezávisí na složení tělesa. Současně se jedná o nejnižší možnou teplotu.

Pevné látky emitují elektromagnetické záření svým povrchem, tekutiny celým svým objemem. To samé platí s pohlcováním elektromagnetického záření tzv. absorpce.

V technické praxi se s problematikou sálání setkáváme při přenosu tepla například únik tepla z tepelných akumulátorů, kotlů, potrubí s horkým médiem a nebo naopak ohřev akumulátorů chladu teplem z okolí a pod. Mimo sdílení tepla sáláním existují ještě dva mechanismy sdílení tepla, a to sdílení tepla vedením a konvekcí [3]. Sálavý výkon tj. množství vyzařovaného tepla do okolí lze spočítat podle vzorce:

$$\dot{Q}_\tau = \int_S \mathbf{e}_\tau \cdot d\mathbf{S}$$

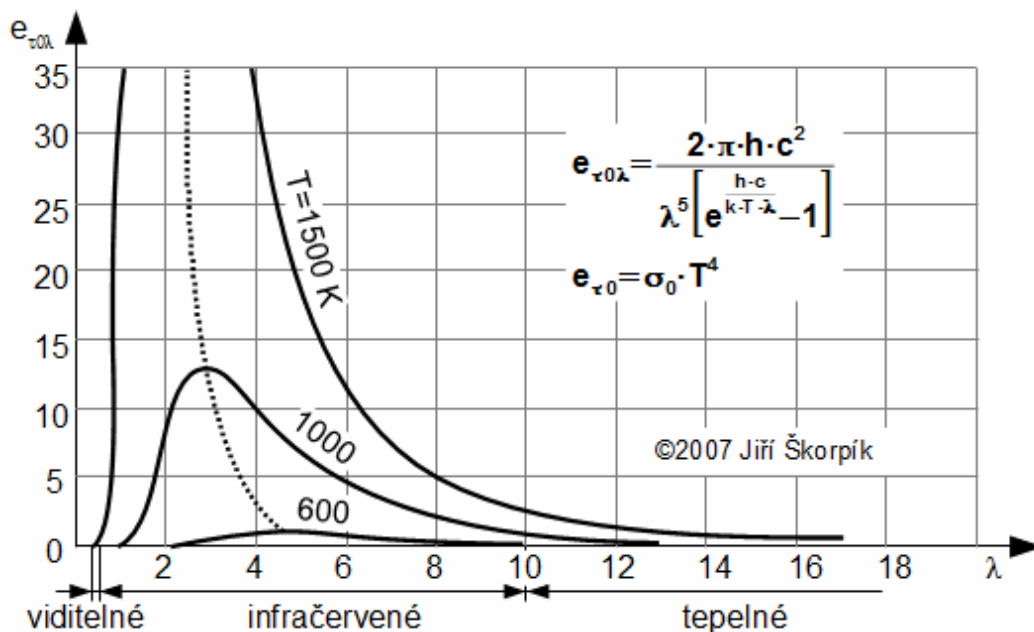
9.743 Tepelný výkon záření vyzařovaný z povrchu tělesa.

\dot{Q}_τ [W] tepelný výkon tepelného záření (tepelný tok z tělesa ve formě elektromagnetického záření); \mathbf{e}_τ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] **intenzita vyzařování** z povrchu tělesa v důsledku tepelného pohybu částic (tepelný výkon vztážený na jednotku plochy, těleso může mít na povrchu proměnnou intenzitou podle toho, jak se teplota jeho povrchu mění se souřadnicí); S [m^2] povrch tělesa.

Přímý výpočet intenzity vyzařování reálných těles je prakticky nemožný, protože záleží na mnoha faktorech a především na rozložení vlnových délek, protože těleso o konkrétní teplotě nevyzařuje ze svého povrchu všechny fotony o stejné energii, respektive vlnové délce, ale celková energie je v ideálním případě rozložena mezi fotony různých vlnových délek, i když určitý rozsah vlnových délek převažuje. Proto se při výpočtu vychází z podobnosti reálného tělesa s černým tělesem⁽⁴⁾. U černého tělesa totiž lze vypočítat, na základě kvantové teorie vyzařování, intenzitu vyzařování pro jednotlivé vlnové délky přesně. Kvantová teorie vyzařování dokonale vysvětluje spektrum záření černého tělesa, na rozdíl od předpokladu, že částice mohou vyzařovat spojité spektrum vln o jakékoliv energii [6, s. 150]. Rovnici pro výpočet intenzity elektromagnetického záření černého tělesa připadající na fotony o jednotlivých vlnových délkách odvodil Planck [1, s. 842], a proto se ji také říká **Planckův vyzařovací zákon**.

⁽⁴⁾Černé těleso nebo černý zářič

Je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření dopadající na jeho povrch a současně dosahuje maximální možné intenzity vyzařování ze svého povrchu, které způsobuje teplo v tělese tj. vyzařování nezávisí na jeho složení a spektru dopadajícího záření [14, s. 161].



10.250 Planckův vyzařovací zákon a celková intenzita vyzařování černého tělesa.

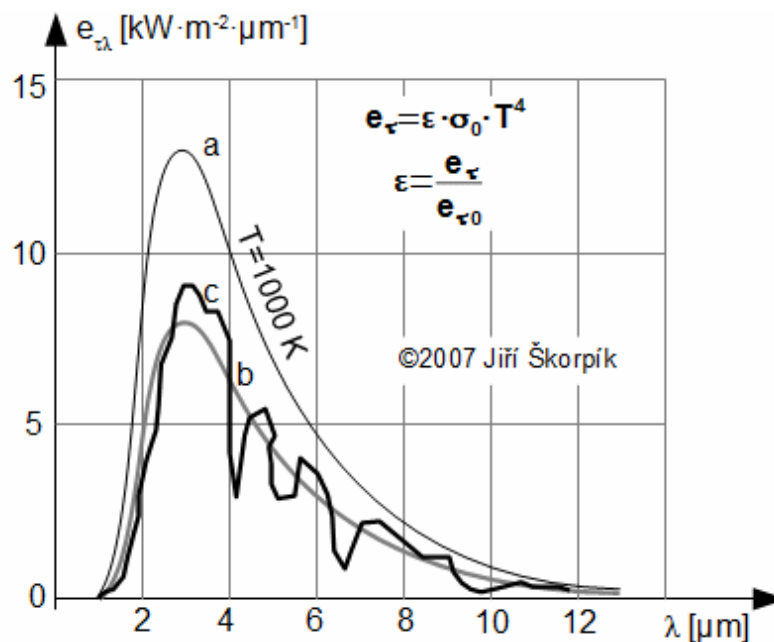
$e_{\tau 0 \lambda}$ [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$] intenzita elektromagnetického záření černého tělesa (proto index **0**) připadající na fotony o vlnové délce λ [μm] (tomuto rozložení se také říká monochromatická zářivost); $e_{\tau 0}$ [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$] intenzita záření černého tělesa; σ_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] konstanta sálání černého tělesa (**Stefan–Boltzmannova konstanta**); T [K] absolutní teplota povrchu tělesa. Intenzita vyzařování černého tělesa $e_{\tau 0}$ je integrací rovnice $e_{\tau 0 \lambda}$. Jedná se o součet energií vyzařovaných tělesem na všech vlnových délkách. Výsledný vztah je nazýván **Stefan–Boltzmannův zákon**. Odvození Planckova vyzařovacího zákona je uvedeno například v [1, s. 842], Stefan–Boltzmannova zákona v [8, s. 40].

Černé těleso o teplotě povrchu 600 K vyzařuje velmi malý poměr fotonů s vlnovou délkou menší $2\ \mu\text{m}$, a zároveň většina vyzařených fotonů bude mít vlnovou délku cca $5\ \mu\text{m}$, což není ještě ve viditelném rozmezí. Při 700 K je většina vyzařované energie menší vlnové délky a v tmavé místnosti by povrch tělesa měl již tmavou červeň. Při teplotě 2000 K už povrch velmi jasně září a při 6000 K se objevuje maximum vyzařované energie tělesa uprostřed oblasti viditelného světla [3, s. 119], jedná se i o teplotu povrchu Slunce.

Černá tělesa se v přírodě nevyskytují, nejvíce se jim asi blíží Slunce, respektive hvězdy. Černé díry nejsou rozhodně dokonalým zářičem. Reálná tělesa jsou horším zářičem než černá a nemají tak spjité rozložení zářivosti jako černá tělesa ale víme, že jejich intenzita vyzařování při stejné teplotě je menší. Intenzitu vyzařování reálného tělesa není jednoduché exaktně určit, proto se reálná tělesa nahrazují šedými tělesy⁽⁵⁾ o stejné teplotě povrchu.

⁽⁵⁾Šedé těleso

Šedé těleso má menší intenzitu vyzařování než černé těleso při stejné teplotě povrchu, přičemž poměr intenzity vyzařování šedého tělesa ku intenzitě vyzařování černého tělesa se nazývá **poměrná zářivost** nebo také emisivita. Poměr intenzity vyzařování šedého tělesa ku intenzitě vyzařování černého tělesa připadající na konkrétní vlnovou délku je také rovna poměrné zářivosti:



11.741 Rozložení zářivosti reálného tělesa do konkrétních vlnových délek a jeho nahrazení šedým tělesem.

a rozložení zářivosti černého tělesa jehož teplota povrchu je 1000 K ; **b** příklad rozložení zářivosti reálného tělesa o teplotě 1000 K ; **c** rozložení zářivosti šedého tělesa při stejné teplotě o poměrné zářivosti $\epsilon=0,6$. ϵ [-] poměrná zářivost.

Rovnici Stefan–Boltzmannova zákona lze tedy aplikovat na černé a šedé zářiče. S dostatečnou přesností také pro pevná reálná tělesa s výjimkou některých kovů, u nichž je vyzařovaná energie vyšší než odpovídá čtvrté mocnině teploty povrchu a při technických výpočtech se vychází z experimentálně naměřených dat [8, s. 89]. Tyto odchylky od teorie jsou tím větší, čím více se blíží frekvence tepelného záření frekvenci srážek volných elektronů v krystalické mřížce. Jsou-li však částice v energeticky nerovnovázném stavu s teplotou tělesa může těleso, v určitých částech spektra, vyzařovat mnohokrát větší energii (například díky předchozí chemické reakci uvnitř těles) než odpovídá záření černého tělesa při stejné teplotě (záření světlušky, elektrická luminiscence plynů, rádiové vysílače a pod...).

Podrobnosti o vyzařování kapalin a plynů jsou uvedeny v [8].

Bilance dopadajícího elektromagnetického záření

Na tělesa zároveň dopadá elektromagnetické záření o různých vlnových délkách od okolních těles o celkové intenzitě záření $e_{\tau 2}$, část nebo všechna energie takového záření je buď tělesem pohlcena $e_{\tau 2A}$, odražena $e_{\tau 2R}$ a nebo tělesem prostoupí $e_{\tau 2D}$. Při výpočtu se plně uplatňují teorie optických jevů např. zákon odrazu, viditelnosti (jedno těleso může ozařovat druhé jen na straně k ní převrácené) atd.

$$e_{\tau 2} = e_{\tau 2A} + e_{\tau 2R} + e_{\tau 2D}; \quad 1 = \frac{e_{\tau 2A}}{e_{\tau 2}} + \frac{e_{\tau 2R}}{e_{\tau 2}} + \frac{e_{\tau 2D}}{e_{\tau 2}} = a + r + d$$

12.739 *Bilance dopadajícího elektromagnetického záření na těleso.*

$e_{\tau 2}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] celková intenzita dopadajícího elektromagnetického záření na povrch tělesa; $e_{\tau 2A}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] část $e_{\tau 2}$, která je tělesem pohlcena (absorpce)⁽⁶⁾; $e_{\tau 2R}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] část $e_{\tau 2}$, která je povrchem tělesa odražena (odrazivost); $e_{\tau 2D}$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] část $e_{\tau 2}$, která tělesem prostoupí (průteplivost); **a** [-] **součinitel relativní absorpce** (poměrná tepelná pohltivost povrchu tělesa); **r** [-] **poměrná tepelná odrazivost**; **d** [-] **poměrná průteplivost**.

⁽⁶⁾ *Absorpce tepelného záření*

Pokud je pohlcené záření přeměněno na vnitřní tepelnou energii tělesa (zvýší se teplota tělesa), pak hovoříme o tzv. tepelné absorpci.

Černé těleso pohlcuje veškerý dopadající výkon v podobě elektromagnetického záření ($a=1$, $r=0$, $d=0$). Těleso, které veškerý dopadající výkon v podobě elektromagnetického záření ze svého povrchu odráží ($a=0$, $r=1$, $d=0$) se nazývá **bílé těleso**. Těleso přes které veškerý dopadající výkon v podobě elektromagnetického záření prochází ($a=0$, $r=0$, $d=1$) se nazývá dokonale průteplivé těleso či **diatermní**.

Uvedená tělesa se v běžném prostředí nevyskytují a většinou se jedná o tělesa s kombinovanými vlastnostmi tj. část záření odráží, část pohltí a část tělesem prostoupí. Tuhá tělesa a kapaliny jsou prakticky neprůteplivé. Jsou však tělesa, která jsou neprůteplivá jen pro některé délky vln (např. okenní sklo propouští jen paprsky světelné, ale téměř nepropouští paprsky ultrafialové a tepelné). Záleží i na kvalitě a barvě povrchu tělesa. Bílý povrch dobře odráží elektromagnetické záření viditelné (sluneční), ale elektromagnetické záření mimo viditelné spektrum už pohlcuje stejně dobře jako tmavý povrch.

Pro pohltivost a odrazivost má větší význam stav povrchu než barva. Nezávisle na barvě je odrazivost hladkých a leštěných povrchů mnohonásobně větší (alobal). Naproti tomu drsná černá barva (nejčastěji naftové saze) pohlcují 90 až 96 % dopadající zářivé energie. U plynů záleží většinou na velikosti molekul. Pro vlnovou délku elektromagnetických vln, které vyzařují tělesa běžných teplot je vzduch například průteplivý, ale obsahuje-li vodní páru nebo CO₂ je jen částečně průteplivý, což má vliv na množství zachycené energie v atmosféře při skleníkovém efektu.

Šedá těleso odráží stejný díl elektromagnetického záření bez ohledu na jejich vlnovou délku. Poměrná pohltivost šedého tělesa je menší jak jedna ($a < 1$). Odtud lze odvodit Kirchhoffův zákon⁽⁷⁾.

⁽⁷⁾*Kirchhoffův zákon*

Bude-li těleso (černé nebo šedé) přijímat elektromagnetické záření pouze od okolních těles (které budou černé nebo šedé), bude jeho absorpce rovna poměrné zářivosti ($a = \varepsilon$). Odvození např. [3, s. 117]. Například je-li těleso obklopeno pouze dalšími tělesy (černými nebo šedými), bude teplota jejich povrchu v ustáleném stavu stejná jako povrchu vyšetřovaného tělesa.

Jaká by byla teplota povrchu desky s vlastnostmi černého tělesa ve stejné vzdálenosti od Slunce jako je střední vzdálenost Země od Slunce? Považujte odvrácenou stranu desky od Slunce za dokonale tepelně izolovanou.

Úloha 2.1105

Dále se definuje **barevné těleso**, které odráží jen elektromagnetické záření o určitých vlnových délkách odpovídajících jeho barvě. Například zelené těleso odráží pouze elektromagnetické záření s vlnovou délkou odpovídající zelené barvě viz *Obrázek 8*.

Součet vyzařené energie a odražené energie tělesa se nazývá **efektivní sálavost tělesa**.