

Optika ó úvod: sv tlo a jeho vlastnosti

Nauka o sv tle je velmi d ležitý fyzikální obor - ve fyzikálních teoriích i v technických aplikacích.

Sv tlo (šviditelné sv tloõ) je oblast vlnových délek 380 ó 780 nm elektromagnetického vln ní, vnímaná lidským zrakem

Historické poznámky:

Základní poznatky o sv tle jsou velmi staré - v dob vzniku **fyziky jako v dy** (ve 2. pol. 17. století) již bylo známo:

- ší í se p ímo a e, tj. podél p ímek ší í . **sv telné paprsky**
- sv telné paprsky se navzájem neovliv ují
- jejich ú inký se s ítají (p í dopadu na jedno místo)
- p í dopadu paprsku na rozhraní dvou prost edí nastává sou asn jeho odraz a lom

Dopátrat se podstaty sv tla na základ t chto znalostí bylo ov-em obtílné, v této dob vznikly dva názory:

- **korpuskulární teorie** (sv tlo jsou hmotné ástice, r zné velikosti - barvy)

Newton, 1704 í í . šOptikaõ

- **vlnová teorie** (sv tlo je vln ní)

Huygens, 1690 í .. šTraité de la lumiereõ

Newtonova autorita, vznikla pod dojmem úsp ch jeho mechaniky, a také fle Huygensova teorie nebyla tak detailn zpracován, zp sobily **v-eobecné p íjetí korpuskulární teorie** sv tla.

(Pojem vln ní se v-ak udržel a rozvinul pro popis mechanického vln ní hmotného prost edí.)

Na po átku 19. století se objevily nové jevy (**ohyb sv tla, interference, polarizace**), které jsou typické pouze pro vln ní (mechanické) ó vlnová teorie sv tla ořívá (Fresnel, p í né vln ní).

V analogii s mechanickým vln ním se uvařovalo, v jakém prost edí sv telné vln ní probíhá ší í byl zaveden pojem **ether** ó (zatím) neznámá nehmotná látka s mechanickými vlastnostmi.

Nauka o elekt in a magnetismu byla dovr-ena r. 1864 tzv. **Maxwellovými rovnicemi**:

$$\boxed{\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}$$

Z t chto rovnic byla p edpov zena mořnost existence dosud neznámých d j v elektromagnetickém poli, které by m ly charakter vln ní ó tzv. elektromagnetické vln ní:

Pro homogenní izotropní nevodivé prost edí (dielektrikum) bez proud a volných náboj bylo totiř mořno velmi jednodu-e z Maxwellových rovnic odvodit vztahy:

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \Delta \vec{B} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Práv existence těchto rovnic byla matematickým základem teorie elektromagnetického vlnění, nebo byly (formálně) shodné s tzv. **vlnovou rovnicí** mechanického vlnění:

$$\Delta \vec{u} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$

Porovnáním koeficientů pravých stran byl získán výraz pro rychlost předpokládaného elektromagnetického vlnění:

$$\frac{1}{c^2} = \varepsilon \cdot \mu, \text{ tedy:}$$

$$c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon \cdot \mu}}$$

fázová rychlost elektromagnetického vlnění

Jestliže do tohoto vztahu dosadíme parametry nejjednoduššího prostředí – vakua

$$\varepsilon_0 \cong 8,854188 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

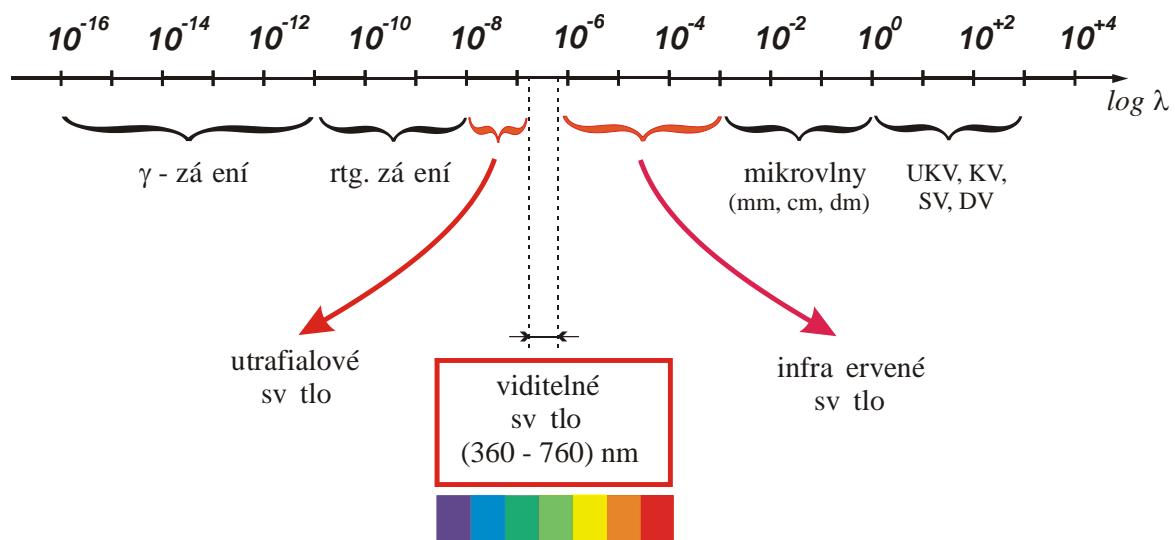
dostaneme:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 2,998 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$$

což se již tenkrát dosti přesně shodovalo se změřenou rychlostí světla ve vakuu (viz Foucault 1850)

íáí...to bylo podnětem ke znovu vzniku **elektromagnetické teorie světla**

Tato teorie se skvěle potvrdila a dnes víme, že nejen světlo je elektromagnetické vlnění, o čemž se setkáváme s tímto druhem vlnění o různých vlnových délkách - od 10^{-16} m do prakticky nekonečna:



Světlo je tedy elektromagnetické vlnění, které charakterizuje relativně úzký interval vlnových délek, stanovený pro průměrné lidské oko intervalem (380 až 780) nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$)

Používá se také pojem **optické záření** :

Interval 10 nm až 1 mm ($= 1000\text{ nm}$) je ..optické záření, světlo v širším smyslu .., UV a VIS - IR
 Interval 10 nm až 380 nm je .. ultrafialové záření (světlo) je .. UV (UV A-320 nm, UV B-280, UV C-pod 280)
 Interval 380 nm až 780 nm je .. viditelné záření (světlo) je .. VIS
 Interval 780 nm až 1 mm je .. infra červené záření (světlo) je .. IR (IR A-1400 nm, IR B-2500, IR C-nad 2500)

Historie fyzikálních objevů ovšem nekončila o na přelomu 19. a 20. století se objevily jevy (záření zahájených těles, fotoelektrický a Comptonův jev), které se vlnovou teorií nedaly vysvětlit, naopak byl nutný návrat k představám částic:

1900 od Plancka je ..elmg. vlnění se vyzařuje (vzniká) po energetických kvantech

1905 od Einsteina je ..elmg. vlnění se také prostorem **pohybují po kvantech**,

kteřé mají vlastnosti jako malé hmotné částice - **fotony**

Vzniká tak syntéza vlnové a částicové představy elektromagnetického vlnění, která také byla experimentálně potvrzena je tzv. **korpuskulárně vlnový dualismus**

Na druhé straně - tyto duální vlastnosti byly potvrzeny i u malých stavebních částic hmoty (například jev difrakce elektronů na krystalu) a v současné moderní (kvantové) fyzice jsou považovány za vlastnost všech tzv. mikro částic.

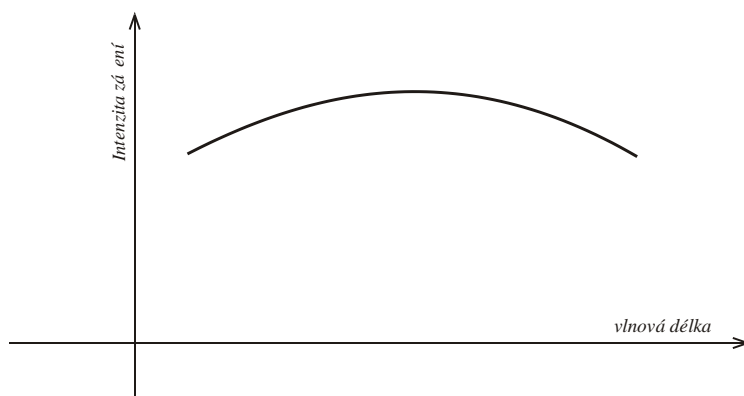
Kromě speciálních zdrojů (lasery, ..) vyzařují světlo každá zahájená látka - pevná, kapalná i plynná.

Jejich záření je charakterizováno známým zastoupením vlnových délek je tzv. **světelným spektrem**.

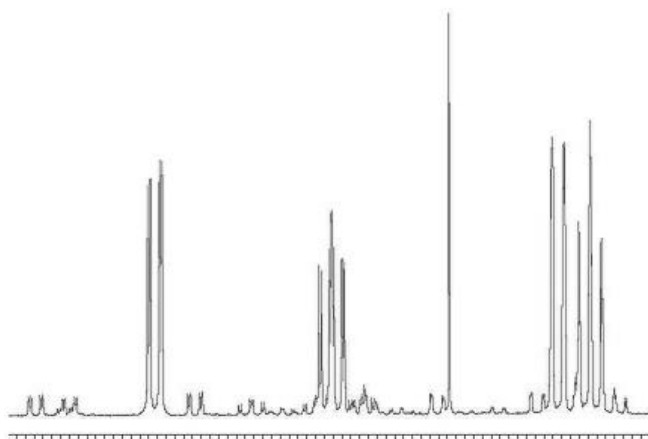
Změříme ho optickým **spektrometrem**, který pomocí disperzního prvku (hranol, mřížka) rozloží světlo na jednotlivé vlnové délky (viz další kapitola).

Existují **dva typické druhy** spekter:

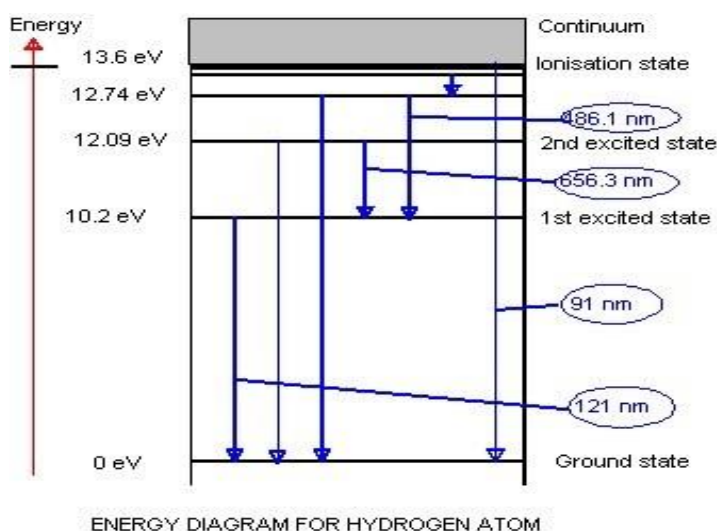
a) **spojité spektrum** je typické pro zahájená tělesa (Slunce)



b) **arové spektrum** í í vyza ují látky v plynném stavu (plazma)



Vlnové délky spektrálních ar (i jejich uskupení ó pás , v tví) jsou **charakteristické** pro konkrétní atom (molekulu, iont), nebo vznikají p echody mezi jeho energetickými hladinami (viz obr. nífle pro vodíkový atom) í í . Lze je proto využít pro **identifikaci** látek i pro ur ení jejich **koncentrace** (je úm rná intenzit spektrálních ar).



I ve spojitém slune ním spektru existují spektrální áry í .. jsou to štmavéõ absorp ní áry (sv tlo chybí) í í ..tzv. **Fraunhoferovy áry** (ozna ují se písmeny A, B, C, í) í ..používají se v praktické optice, nap íklad:

ára C í í .. = 656,3 nm í í . ára H vodíku

ára D í í .. = 589,3 nm í í . ára Na - dublet

ára e í í ... = 546,1 nm í í . ára Hg

ára F í í ... = 486,1 nm í í . ára H vodíku

Měření rychlosti světla

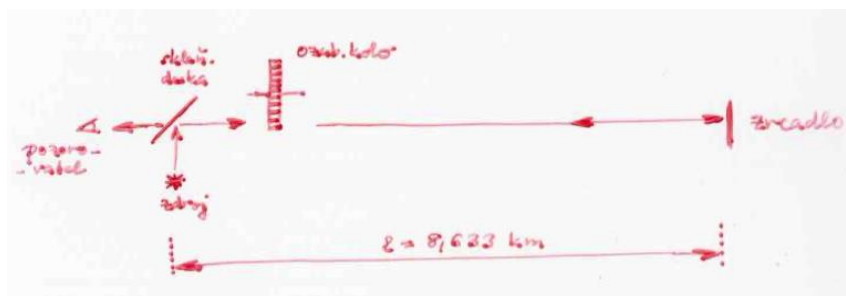
Jiří Newton předpokládal ve své Optice, že rychlost světla je konečná.

První pokusy o její stanovení (Galileo, 1607, lucerny na dvou kopcích) naznačovaly, že je obrovská. Vymyká se běžnému měření rychlostí v mechanice z dráhy a času. Vzdálenosti by musely být velmi dlouhé - astronomické - proto také první použitelné hodnoty získali hvězdně:

1675 Olaf Römer z pozorování rozdílné doby mezi zákryty Jupiterových měsíců (220 tis. km/s)

1728 James Bradley z pozorování aberace hvězd (301 tis. km/s)

Až 1849 Armand Fizeau provedl první měření na Zemi, pomocí rotujícího ozubeného kola (315 tis. km/s)



1850 Jean Foucault z obdobného měření s využitím rotujícího zrcátka ($298\,000 \pm 500$ km/s)

Nejpřesnější měření prováděl **Albert Michelson** pomocí zdokonalené Foucaultovy metody, s využitím interferometru v letech 1879 až 1911,

získal hodnotu $c = 299\,796 \pm 4$ km/s

Ve druhé polovině 20. století bylo dosaženo značného pokroku při zvyšování přesnosti měření rychlosti světla, nejprve s využitím dutinových rezonátorů, později technikami laserové interference:

1972 K.M.Evenson et.al., National Bureau of Standards (NBS), Boulder, Colorado ($299\,792\,456,2 \pm 1,1$ m/s)

1975 15. CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures)

doporučila definovat rychlost světla jako explicitní, absolutní přesnou konstantu:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

1983 17. CGPM z využití přesné rychlosti světla pro novou definici metru

1 metr je roven délce dráhy, kterou urazí světlo ve vakuu za časový interval 1/299 792 458 sekundy.

Pozn.: Mezi 1960 a 1983 byl metr definován jako délka rovnající se 1 650 763,73 násobku vlnové délky záření odpovídající přechodu mezi stavy $2p_{10}$ a $5d_5$ atomu Krypton 86

Dodatek 1

Tepelné záření těles (po ústí cestě ke kvantové teorii)

Vyzařování elektromagnetické energie zahřátým pevným tělesem - byl to zdánlivě velmi jednoduchý jev, ale stal se z něj neřešitelný problém klasické fyziky ve 2. polovině 19. století a byl prvním impulsem ke vzniku kvantové fyziky:

Jeho studium komplikoval ten fakt, že sice těleso **zahřáté** dodávanou tepelnou energií **emituje** ze svého povrchu elektromagnetické záření (vlnění), ale jeho povrch také soustavně **odrážá** (a absorbuje) záření, které na něj dopadá z jiných těles v okolí.

Můžeme přitom zřejmě definovat **koeficient absorpce** a **odrazivosti** povrchu tělesa:

$$A = \frac{\text{absorbovaná energie}}{\text{dopadlá energie}} \quad R = \frac{\text{odražená energie}}{\text{dopadlá energie}} \quad \Rightarrow \quad A + R = 1$$

Pro přesné změření **vlastního emitovaného záření** je proto potřebné, aby energie z okolí **odražená** povrchem tělesa byla co **nejmenší**, a soustavně, aby energie absorbovaná z okolí byla co nejvyšší - ideálně tedy:

$$\boxed{R \rightarrow 0} \quad \text{nebo-li také:} \quad \boxed{A \rightarrow 1}$$

To je charakteristika ideálního **absolutně černého tělesa**, které absorbuje veškeré záření, které na něj zvenku dopadá.

Jde samozřejmě o teoretický pojem, ale **experimentální realizace** takového tělesa je relativně dosti jednoduchá a ve formě **dutinového zářiče**:

- tvoří ho dutina v pevném tělese, jejíž vnitřní stěny mají co nejvyšší koeficient absorpce (například grafit),
- s velmi malým otvorem, kterým záření vystupuje ven.

Teoreticky je absolutně černé těleso jednoduchým kosinovým zářičem - jeho zářivost splňuje Lambertův zákon (viz kapitola Radiometrie a fotometrie).

Pro stanovení **veškeré elektromagnetické energie**, kterou emituje jeho povrch do prostoru se vhodně vyulívá veličina: **intenzita vyzařování** H_e (W/m²), definovaná jako zářivý tok do celého poloprostoru (2π) z jednotky povrchu zdroje

Na základě termodynamických úvah (dutina v termodynamickém obsaženého záření je v termodynamické rovnováze se stěnami a lze je tedy popsat jedinou teplotou) odvodil německý fyzik Gustav Robert Kirchhoff tvrzení, že **intenzita vyzařování** zahřátého tělesa musí **záviset** na **absolutní teplotě** a na **koeficientu absorpce**:

$$\boxed{\frac{H_e}{A} = f(T)} \quad \text{Kirchhoffův zákon (1859)}$$

Z toho vyplývá, že záření absolutně černého tělesa ($A=1$) je tedy pouze **funkcí teploty**:

$$\boxed{H_e = f(T)}$$

Odvození této závislosti se s použitím klasické termodynamiky podařilo až před koncem století:

$$H_e = \sigma \cdot T^4$$

Stefanův Boltzmannův zákon (1879)

Její průběh byl také spolehlivě experimentálně potvrzen. Dále bylo zjištěno, že elektromagnetické vlnění emitované zahřátým tělesem obsahuje všechny možné vlnové délky (frekvence) od nuly až do nekonečna (*spojité spektrum*). Pro jeho popis se používá následující **spektrální veličina**:

Označíme jako dH_ν tu **část intenzity vyzařování**, která obsahuje elektromagnetické vlnění s frekvencemi v intervalu $(\nu, \nu + d\nu)$ (tj. při dané, prakticky stejné frekvenci) a pak definujeme:

$$H_\nu = \frac{dH_\nu}{d\nu}$$

spektrální hustota intenzity vyzařování

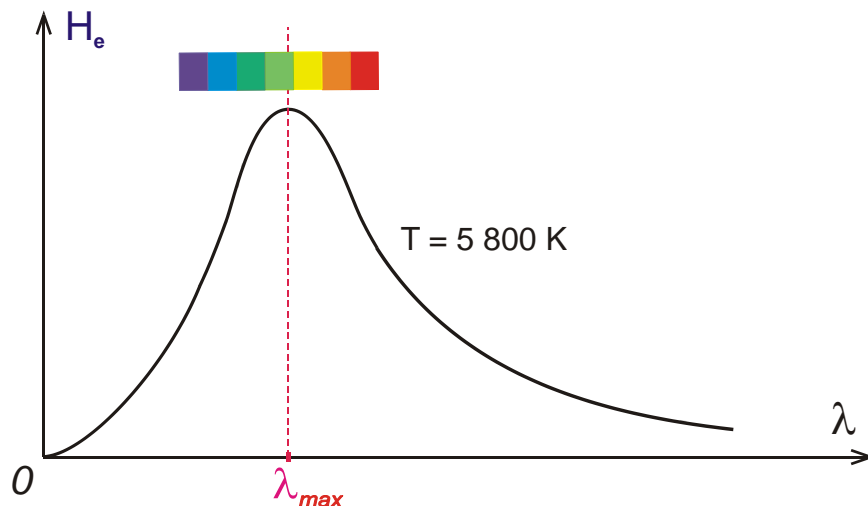
Je to intenzita vyzařování plošného zdroje, která obsahuje elektromagnetické vlnění s frekvencemi v jednotkovém intervalu frekvencí (při dané frekvenci)

Analogicky je možné definovat spektrální hustotu intenzity vyzařování pomocí intervalu vlnových délek:

$$H_\lambda = \frac{dH_\lambda}{d\lambda}$$

Je to intenzita vyzařování plošného zdroje, která obsahuje elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami v jednotkovém intervalu vlnových délek (při dané vlnové délce)

Spektrální hustota energie elektromagnetického vlnění, emitovaného zahřátým absolutně černým tělesem, byla také velmi přesně změřena:



Pro polohu maxima platí:

$$\lambda_{max} \cdot T = konst.$$

Wienův posuvový zákon

Na obrázku je průběh funkce pro teplotu 5800 K - přibližně teplota povrchu Slunce, kdy maximum připadá na vlnovou délku asi 550 nm (modrozelená) a na níž je lidské oko také maximálně citlivé.

Teoretické odvození této závislosti se v-ak afl do konce 19. století nezda ilo !

Bylo pouze nalezeno áste né e-ení pro nízké frekvence (Rayleigh a Jeans, ultrafialová katastrofa) a pro vysoké frekvence (Wien,).

Afl roku 1900 dosp l n mecký fyzik Max Karl Ernst Ludwig Planck ke správnému vztahu - nejprve pouze **matematickou extrapolaci** obou vý-e uvedených závislostí pro nízké a vysoké frekvence:

$$H_{e\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

Planck v zákon

$$H_{e\nu} = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Teprve v pr b hu následujícího roku dosp l Planck k jeho fyzikálnímu zd vodn ní - za nev íitelného p edpokladu, že **vyza ování elektromagnetické energie** povrchem zah átého t lesa se d je ne spojit - ale po ástech ó **kvantech** ó o velikosti :

$$\varepsilon = h \cdot \nu$$

kde $h \approx 6,62618 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ je nová univerzální konstanta ó **Planckova konstanta**.

Planck ov-em nepochyboval, že po této nespojité emisi se elektromagnetická energie dále v prostoru í í jako **spojité (elektromagnetické) vln ní**.

Dal-í krok u inil afl **Albert Einstein**, kdyfl p i vysv tlování fotoelektrického jevu (1904, Nobelova cena) p edpokládal, že elektromagnetické vln ní nejen vzniká, ale také se í í jako kvanta energie.

Tato kvanta nazval je **fotony** í . a p i adil jim **vlastnosti jako klasickým ásticím** - rychlost, hmotnost, hybnost a energii - následujícími úvahami:

Rychlost fotonu musí být stejná jako rychlost elektromagnetického vln ní, tedy jako rychlost sv tla :

$$\nu = c = 299792458 \text{ m/s}$$

Pro takové vysoké rychlosti je nutno pouflít vztahy ze speciální teorie relativity - pro hmotnost platí:

$$m = m(\nu) = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \nu^2/c^2}}$$

Protože p i rychlosti sv tla nemá tento vztah smysl, je jedinou mořností **nulová klidová hmotnost** fotonu (tj. foton v klidu neexistuje) :

$$m_o = 0$$

Pro celkovou energii fotonu platí Planck v vztah:

$$E = h \cdot \nu$$

A jestliže pouflijeme dal-í známý relativistický vztah:

$$E^2 = p^2 \cdot c^2 + m_o^2 \cdot c^4$$

pak z n ho pro foton s nulovou klidovou hmotností dostaneme dal-í vztah pro energii:

$$E = p \cdot c$$

Porovnáním obou výraz :

$$h \cdot \nu = p \cdot c$$

pak získáme hybnost fotonu :

$$p = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Elektromagnetické vln ní tedy m fle (za r zných podmínek - experiment) projevit jak vlastnosti typické pro **vln ní** (frekvence, vlnová délka), tak i vlastnosti **hmotných ástic** (hmotnost, hybnost) ó to je tzv. š **ásticov ó vlnový dualismus** elektromagnetického vln ní.

O posledním vztahu pro hybnost pak vyslovil roku 1924 francouzský fyzik **Louis de Broglie** hypotézu, fle by mohl platit také **obrácen** ó tedy fle i **hmotná ástice** s hybností **p** by se mohla za n jakých podmínek chovat jako vln ní s vlnovou délkou ó velikosti:

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

de Broglieho vlnová délka

Tato hypotéza byla za t i roky skv le potvrzena experimenty (**DavissonóGermer**) s difrakcí elektron na krystalické m ífci.

Moderní **kvantová fyzika** pak p ipisuje vlnové vlastnosti v-em ásticím mikrosv ta.

Korpuskulárn ó vlnový dualismus tedy charakterizuje v-echny kvantové ástice, v etn foton .