

## 2 ÚVOD DO ZÁKLADŮ OPTIKY

Optika – část fyziky („fysis“ – příroda), která se zabývá světlem (chceme-li být přesnější tak optickým zářením, jehož podmnožinou je i světlo – viz následující podkapitola), jeho podstatou, vlastnostmi, šířením a interakcí s látkou. Jinak řečeno optika je věda, která studuje původ a zákonitosti optických jevů, děje vzájemného působení světla a látky a zabývá se i detekcí světla.

Následující podkapitola je věnována přehledu celého elektromagnetického spektra, jehož součástí je i optické a tedy i světelné vlnění.

### 2.1 Elektromagnetické spektrum a optické záření

Položíme-li si otázku, jaká je podstata světla, čili co je to vlastně světlo, může odpověď vypadat vyhybavě: světlo je elektromagnetické vlnění a současně i proud částic, což znamená, že světlo má vlastnosti vlnění i vlastnosti odpovídající pohybu jednotlivých izolovaných částic (např. kuliček) čili korpuskulí. Více o podstatě světla v následující kapitole, nyní se v přehledu seznámíme s členěním celého v přírodě se vyskytujícího spektra elektromagnetických vln.

#### **ÚKOL K ZAMYŠLENÍ 1**

*Vzpomenete si z předchozích kurzů fyziky, co je vlnění, jaký je princip šíření vlnění a jak se vzájemně liší vlnění mechanické a elektromagnetické?*



Každé vlnění můžeme charakterizovat jeho vlnovou délkou, frekvencí a v případě postupného vlnění také rychlostí šíření. V tabulce, která následuje, vidíme, jak celé existující spektrum elektromagnetických vln třídí dle rostoucí frekvence  $\nu$  (čili dle klesající vlnové délky  $\lambda$ ) [1]:

$\nu$ (Hz)	$\lambda$ (m)	vlnový obor		
$10^4$	$10^4$			Elektro- magnetické vlny (v užším smyslu)
$10^5$	$10^3$	1 až 15 km	dlouhé	
$10^6$	$10^2$	200 až 700 m	střední	
$10^7$	$10^1$	2 až 100 m	krátké, velmi krátké	
$10^8$	$10^0$			
$10^9$	$10^{-1}$	0,1 až 2 m	Hertzovy vlny	
$10^{10}$	$10^{-2}$			
$10^{11}$	$10^{-3}$	1 až 100 mm	Mikrovlny	
$10^{12}$	$10^{-4}$			
$10^{13}$	$10^{-5}$	10 až 1 000 $\mu\text{m}$	Infračervené záření (tepelné sálání)	
$10^{14}$	$10^{-6}$	0,75 až 10 $\mu\text{m}$	Infračervené	světlo
$10^{15}$	$10^{-7}$	0,35 až 0,75 $\mu\text{m}$	Viditelné	
$10^{16}$	$10^{-8}$	0,35 až 0,014 $\mu\text{m}$	Ultrafialové	
$10^{17}$	$10^{-9}$	1 až 100 nm	Měkké záření X	Záření X
$10^{18}$	$10^{-10}$		Tvrdé záření X	
$10^{19}$	$10^{-11}$	0,01 až 1 nm	Měkké záření $\gamma$	Záření $\gamma$
$10^{20}$	$10^{-12}$	0,000 1 až 0,01 nm	Tvrdé záření $\gamma$	→ Zánikové záření
$10^{21}$	$10^{-13}$			
$10^{22}$	$10^{-14}$			Elektromagnetická složka kosmického záření
$10^{23}$	$10^{-15}$		Penetrantní záření (ultragama)	

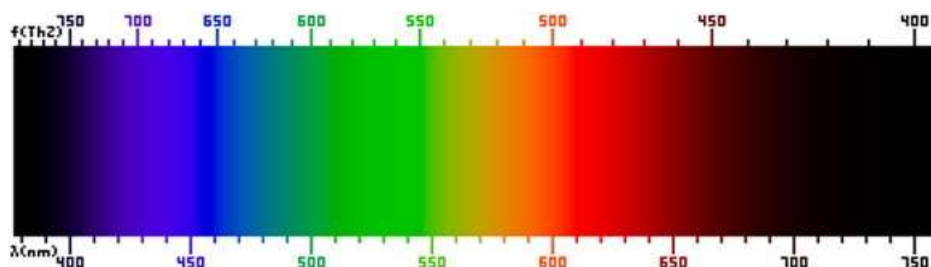
Tabulka nám dává dobrou představu o vlnových délkách (respektive frekvencích) z běžného života známých druhů záření (tj. rozsahů elektromagnetických vln) – vidíme např.,

že rozhlasové vlny mají ve vzduchu vlnové délky řádově desítky a stovky metrů a frekvence řádově miliony až stamiliony hertzů (Hz).

Nás však především zajímá optické záření, kterým se zabývá optika - optickým zářením rozumíme infračervené, viditelné a ultrafialové záření. Vidíme tedy, že viditelné světlo, kterým rozumíme záření, které v nás vyvolává zrakový vjem, má podle naší tabulky ve vzduchu (a také ve vakuu) vlnovou délku  $0,35 \mu\text{m}$  až  $0,75 \mu\text{m}$ , tj. 350 až 750 nm (nanometrů). Protože statistika zjistila, že co člověk to poněkud odlišný interval záření vnímaného jako světlo, můžeme v literatuře najít i mírně odlišné vymezení intervalu záření odpovídajícího světlu – např. interval 400 nm - 800 nm, čemuž odpovídá interval frekvencí  $3,75 \cdot 10^{14}$  Hz pro červenou barvu ve vzduchu -  $7 \cdot 10^{14}$  Hz pro fialovou barvu ve vzduchu.

Různé frekvence totiž vnímáme jako různé barvy:

Obrázek 2-1: Barvy viditelného světla dle Wikipedie.

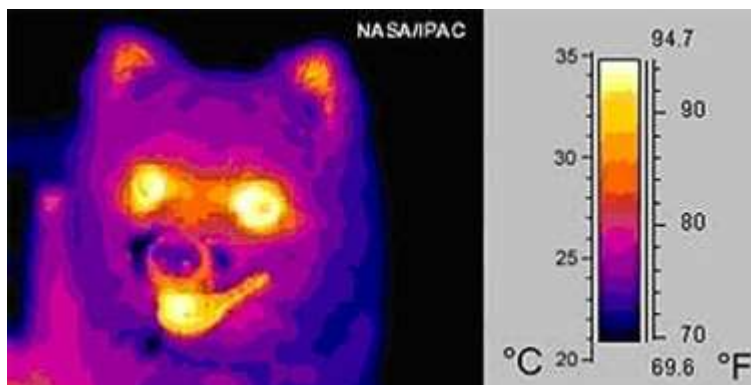


Ultrafialové světlo (objeveno r. 1801, zkráceně UV záření z angličtiny – ultraviolet) má kratší vlnovou délku než viditelné světlo, navazuje tedy na fialovou část spektra viditelného světla a nakonec přechází v navazující Röntgenovo záření [viz tabulka výše]. I když je toto záření pro člověka neviditelné, existují živočichové, kteří je vnímají. Přírodním zdrojem UV záření je Slunce, umělým mnohé výbojky.

Infračervené světlo (zkráceně IR záření, z angličtiny - infrared) má delší vlnovou délku než viditelné světlo, navazuje tedy na červenou část spektra viditelného světla a postupně přechází v tepelné záření – sálání, které pocítujeme jako teplo vyzařované do okolí např. horkými kamny či radiátory.

I když je IR světlo pro člověka samozřejmě neviditelné, existují detektory, které je registrují a mohou vytvořit obraz předmětu (v optice se zobrazovaný objekt - ať již živý či neživý - nazývá předmětem) v infračerveném světle, tj. obraz předmětu vytvořený IR světlem (takový obraz bychom viděli, kdybychom místo viditelného světla vnímali světlo infračervené, my však samozřejmě vnímáme obraz vytvořený viditelným světlem). Protože např. živočichové bývají teplejší než okolí, je možno je i v noci vidět právě v infračerveném světle užitím vhodného infrapřístroje:

Obrázek 2-2: Obraz psa v IR světle z Wikipedie.



Obecně platí - a je to z logiky věci samozřejmou skutečností, že v principu můžeme vytvořit obraz předmětu v záření libovolné vlnové délky (např. tedy rentgenový či mikrovlnný obraz), je jen otázkou, zda je to v konkrétním případě smysluplné, užitečné, možné či pro předmět (zejména živý objekt) bezpečné.

## 2.2 Podstata, dualismus a rychlost světla

### 2.2.1 Newtonova (=korpuskulární, částeczková) teorie světla

Jde o teorii Isaaca Newtona (rok 1705), který je pokládán za největšího fyzika své doby. Světlo je v Newtonově teorii pokládáno za proud částeczek produkovaných zdrojem světla. Odraz, lom se vysvětlují dle mechanických zákonů, rozklad nestejnou hmotností částeczek pro různé barvy.

Z teorie plyne, že rychlost světla v prostředí je větší než ve vakuu – po změření rychlosti světla zásadní nedostatek.

### 2.2.2 Huygensova vlnová (undulační) teorie

Světlo je vlnění s obdobnými vlastnostmi jako má mechanické vlnění – kmity částic zdroje se přenášejí na nehmotné nevažitelné prostředí – tzv. éter – nosné prostředí pro vlny. Protože rychlost světla je velká, vycházel éter velmi tuhý, musel by bránit pohybu těles, to je rozpor.

Navrch měla Newtonova teorie – N. Einstein své doby.

Ke změně došlo, když v letech 1849 - 1850 Foucault změřil rychlost světla ve vodě a ve vzduchu – rychlost ve vodě byla menší než ve vzduchu, což je krach Newt. teorie. Navrch H. teorie zvláště když Thomas Young provedl experimenty s interferencí světla a Fresnel prokázal ohyb světla – tedy pokusy, které prokázaly, že světlo interferuje a ohýbá se, což jsou jevy vysvětlitelné jen vlnovou povahou světla, tj. F. a Y. dokázali, že světlo má vlnovou povahu, neboť interferuje a láme se. Stále ale vadí éter, bez kterého tehdejší věda nedokázala vysvětlit princip šíření světla.

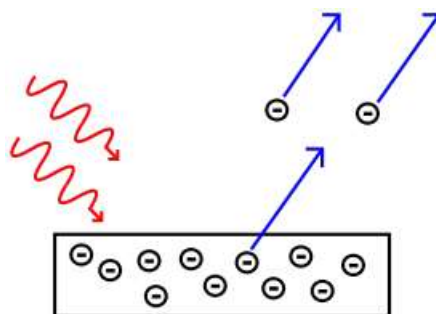
### 2.2.3 J. C. Maxwell – M. teorie světla

V roce 1865 americký fyzik James Clarc Maxwell přišel s teorií, že světlo je příčné elektromagnetické (dále EM) postupné vlnění, tím není pro šíření světla zapotřebí éteru, jelikož elektromagnetické vlnění se šíří na základě elektromagnetických vazeb a nikoli vazeb mechanických. Elektromagnetické vlnění se z principu dokonce nejlépe šíří ve vakuu (v němž žádné částice nejsou), z čehož vyplývá, že ke svému šíření žádné nosné prostředí nepotřebuje – není tedy zapotřebí ani tzv. éteru.

Zhruba do r. 1900 úplně stačilo, že světlo je příčné EM vlnění, o žádných dalších rysech povahy světla nebylo zapotřebí uvažovat, jelikož představa, že světlo je příčné EM vlnění umožňovala beze zbytku vysvětlit všechny jevy, které se světla týkaly.

Problémy se objevily po objevu fotoelektrického jevu - fotoefekt (jak se zkráceně fotoelektrický jev také nazývá) byl objeven v r. 1888 (někde se uvádí i 1887) ruským fyzikem Stoletovem a Němcem Hertzem. Fotoefekt [viz následující obr.] stručně řečeno spočívá v tom, že ze záporně nabitých kovových destiček se po absorpci světla (obecně i jiného EM záření) mohou uvolňovat elektrony, což se projeví tak, že destička ztrácí svůj záporný elektrický náboj. Uvolněným elektronům se v tomto kontextu říká fotoelektrony.

Obrázek 2-3: Princip fotoefektu dle [www.nationmaster.com](http://www.nationmaster.com)



V obrázku je červeně vyznačeno světlo dopadající na záporně nabitou kovovou destičku, modře pak z destičky emitované elektrony.

Pro vznik emitovaných elektronů platí 3 zákonitosti:

1. Počet fotoelektronů je přímo úměrný intenzitě dopadajícího záření (světla).
2. Rychlost emitovaných elektronů závisí jen na frekvenci (tj. vlnové délce) dopadajícího záření a vůbec nezávisí na intenzitě záření.
3. Existuje tzv. mezní frekvence (vlnová délka) dopadajícího záření a platí, že pokud má dopadající záření frekvenci rovnu nebo vyšší než je mezní frekvence, pak k fotoemisi dochází, avšak pokud je frekvence dopadajícího záření nižší než je mezní frekvence, pak ani při sebevětší intenzitě dopadajícího světla žádný fotoelektron nevznikne.

A v čem je nyní problém? Z Maxwellovy představy, že světlo je příčné elektromagnetické vlnění, můžeme vysvětlit 1. zákonitost fotoefektu, avšak nikoli druhou a třetí.





## OTÁZKY

Proč užitím Maxwellovy teorie, která říká, že světlo je příčné EM vlnění, jehož energie se spojitě šíří prostorem, nejsme schopni vysvětlit 2. a 3. zákonitost fotoefektu?

r. 1900 Max Planck na to řekl svou převratnou hypotézou:

Emise ani absorpce světla nejsou spojitě – kvantová hypotéza (s tím se dosud nepočítalo, nikdo takto neuvažoval), ale probíhají po skocích, kvantech (teď ano, teď ne)

r. 1905 Albert Einstein hypotézu rozšířil i na šíření záření (světla), kvanta nazval fotony – foton kvantum energie.

- Planckův zákon pro záření černého tělesa a Einstein pak rovnici fotoel. jevu

### 2.2.4 Fotonová teorie světla (vznikla z objevů Plancka a Einsteina).

Druhou a třetí zákonitost fotoefektu nebylo a není možné vysvětlit při představě, že světlo je čistě EM vlnění, jehož energie se šíří spojitě. Situaci řeší slavná kvantová hypotéza, tj. pohled na záření, se kterým v r. 1900 přišel slavný německý fyzik Max Planck.

Planck říká: Emise ani absorpce světla nejsou spojitě, ale probíhají po skocích, po kvantech.



## OTÁZKY

Planckova hypotéza je revoluční myšlenkou - v čem přesně?

V roce 1905 rozšířil A. Einstein Planckovu hypotézu i na šíření záření - záření se nešíří spojitě, ale po kvantech. Kvantum záření nazval fotonem.

Fotonová teorie světla: světlo je proudem fotonů, fotony však nechápeme mechanisticky, ale kromě impulsu a energie jim přiřazujeme také vlnovou délku  $\lambda$  a frekvenci  $\nu$ , tj. vlnové vlastnosti.

Pro energii  $E$  jednoho fotonu záření (světla) platí vztah:

$$E = h \nu, \quad (2-1)$$

kde  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  je Planckova konstanta (Planck ji zavedl v r. 1899) a  $\nu$  frekvence fotonu (záření).

Užitím kvantových představ o šíření a absorpci světla A. Einstein v r. 1905 beze zbytku vysvětlil fotoelektrický jev, za vysvětlení fotoefektu pak obdržel Nobelovu cenu za fyziku v r. 1921.

Základní vlastnosti fotonu:

1. Foton se vždy pohybuje rychlostí světla  $c$ .
2. Foton v klidu tedy neexistuje, klidová hmotnost fotonu je tedy nulová, v pohybu nenulová.
3. Energie fotonu je  $E = h\nu$ , kde  $h$  je Planckova konstanta (viz výše).

4. Foton je bez elektrického náboje (tj. má nulový el. náboj).
5. Spin (vlastní rotace fotonu) je celočíselný – pro foton platí Boze-Einsteinova statistika, což znamená, že foton patří mezi bozony.

### 2.2.5 Zkloubená teorie světla

Světlo má dvojakou povahu (vykazuje vlastnosti dvojího druhu): vlnovou i částicovou, u některých jevů vystupuje do popředí vlnová povaha světla, u jiných částicová.

Typickými vlnovými vlastnostmi jsou: interference, ohyb, polarizace. Částicová (tj. kvantová) povaha záření (světla) vystupuje do popředí při interakci záření (světla) s látkou - tedy při absorpci, emisi záření, u fotoelektrického jevu, Comptonově jevu (rozptyl světla na elektronech, při němž se světluje vlnová délka záření), Čerenkovově záření apod. Právě popsané dvojí povaze světla říkáme **dualismus** světla.

Záření je jednou z forem hmoty - proč by však záření (jakožto jedna z forem hmoty) měla vykazovat dualismus a látka (jakožto druhá forma hmoty) nikoli? Lui de Broglie dospěl v r. 1924 k názoru, že světlo nemůže mít výjimečné vlastnosti a že i látka má dualistickou povahu, že jí tedy kromě hmotnosti (obvyklá charakteristika látky) můžeme přiřadit také vlnění - tomuto vlnění říkáme **de Broglieho vlnění** o vlnové délce  $\lambda$  dané de Broglieho vztahem:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2-2)$$

kde  $h$  je Plancova konstanta,  $m$  je hmotnost tělesa a  $v$  jeho rychlost, součinn ve jmenovateli je tedy roven hybnosti  $p$  tělesa.

Vlnovou povahu částic se podařilo experimentálně prokázat v r. 1927, když američané Davis, Thomson pozorovali typicky vlnové chování elektronů, neutronů, protonů, tedy částic s nenulovou klidovou hmotností. Dá se předpokládat, že de Broglieho vlnění lze přiřadit libovolné částici, avšak pozor - de Broglieho vlnění není vlněním elektromagnetickým.

### 2.2.6 Rychlost světla ve vakuu (vzduchu)

Budeme se zabývat fázovou rychlostí světla, což je rychlost šíření vlnoplochy světla (viz dále Huygensův princip šíření vlnění). Rychlost světla můžeme měřit metodami přímými (tj. přímo z definice rychlosti) nebo nepřímými.

O změření rychlosti světla se pokoušel např. Galileo Galilei v r. 1607, a to změřením doby, za kterou světelný paprsek urazí vzdálenost mezi dvěma kopci. Tehdy se ještě ani nepodařilo rozhodnout, zda je rychlost světla vůbec rychlostí konečnou.

První vědeckou přímou metodou měření rychlosti světla byla metoda dánského astronoma Roemera v r. 1675. Roemerova metoda byla metodou astronomickou, protože rychlost světla měřil z astronomických pozorování, konkrétně z doby dvou po sobě následujících zatmění měsíčku Io planety Jupiter. Výhodné je, že rovina dráhy měsíčku Io kolem Jupitera je stejná jako rovina oběžné dráhy Jupitera kolem Slunce. Po jednoduchém výpočtu Roemer dospěl k

rychlosti světla  $c = 215000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Roemerovo měření přineslo zjištění, že rychlost světla je konečná a orientačně byla stanovena velikost rychlosti.

První úspěšná pozemká měření rychlosti světla provedl francouzský fyzik Fizeau v r. 1849 užitím rotujícího ozubeného kola. Během experimentu se nastavila taková stálá frekvence otáčení kola, aby světlo vždy prošlo od zdroje mezi neprůhledným zuby kotouče směrem k zrcadlu umístěnému ve vzdálenosti asi 30 km a po odraze na zrcadle se světlo po stejné dráze vydalo zpět, avšak vzhledem k tomu, že kotouč se potočil, světlo dopadlo na neprůhledný zub sousedící s mezerou, kterou světlo prošlo k zrcadlu. Pozorovatel tedy světlo přicházející od zrcadla neviděl. Jednoduchým výpočtem byla zjištěna rychlost světla  $c = (315300 \pm 500) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Fizeauovu metodu zdokonalil Michelson spolu se svými žáky, místo rotujícího kotouče použil rotující víceboký hranol. Měření dospěl obdobným výsledkům jako Fizeau.

Rychlost světla byla měřena mnoha dalšími metodami - např. Foucaultova metoda rotujícího zrcadla z r. 1868 atd. Nejlepší přímou metodou měření rychlosti světla byla Froomova metoda mikrovlnného interferometru v letech 1952 - 1958, kterou byla stanovena rychlost světla  $c = (299792,5 \pm 0,1) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Všechny zde uvedené i neuvedené výsledky měření rychlosti světla zhodnotil švédský fyzik Bergstrand v r. 1957 a dospěl k názoru, že rychlost světla je  $c = (299793,0 \pm 0,3) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Současná (od roku 1983) tabulková hodnota rychlosti světla ve vakuu pak činí  $c = 299792,458 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  přesně, chyba není uvedena již např. proto, že užitím rychlosti světla je v současnosti definována jednotka délky metr.

## 2.2.7 Rychlost světla v obecném prostředí

Rychlost světla ve vakuu  $c = 299792,458 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  je mezní rychlostí ve vesmíru, je to tedy nejvyšší možná rychlost šíření energie prostorem. Ve vakuu (přibližně ve vzduchu) se světlo touto rychlostí šíří všemi možnými směry (což jinak řečeno znamená, že z hlediska rychlosti šíření světla je vakuum prostředím izotropním), tuto rychlost má světlo v každém bodě vakua (z hlediska rychlosti světla je vakuum prostředím homogenním) a tuto rychlost má ve vakuu elektromagnetické záření (tedy i světlo) libovolné vlnové délky - jinými slovy rychlost světla ve vakuu je pro všechny barvy světla stejná čili vakuum je prostředím nedisperzním.

V obecném prostředí to s rychlostí světla není zdaleka tak jednoduché, můžeme stručně shrnout:

1. rychlost šíření světla  $v$  je v každém jiném prostředí (než je vakuum) nižší než ve vakuu. Je-li  $v$  rychlost šíření světla v daném prostředí a  $c$  je rychlost světla ve vakuu, pak se vztahem



### DEFINICE 2-1

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-3)$$



zavádí index lomu  $n$  jakožto důležitá charakteristika (zejména optických) vlastností každého prostředí.

2. z hlediska rychlosti světla je obecné prostředí nehomogenní, anizotropní a disperzní.

**ÚKOL K ZAMYŠLENÍ 2**



Vysvětlete, co znamená, že obecné prostředí je z hlediska rychlosti světla prostředím nehomogenním, anizotropním a disperzním.