

# 4. OPTIKA A ATOMOVÉ JÁDRO

## 4.1. Vznik a základní vlastnosti elektromagnetických vln

### 4.1.1. Vznik a šíření elektromagnetického vlnění



1. Klasifikovat optiku jako významný obor fyziky a její oborové rozdělení.
2. Objasnit podstatu dualismu světla prostřednictvím historického vývoje názorů na podstatu světla.
3. Odlišit pomocí frekvencí a kvant energií (případně vlnových délek) spojitou a nespojitou oblast elektromagnetického spektra.
4. Znat relativně přesně hodnotu rychlosti světla ve vakuu a obecně vztah závislosti rychlosti světla na permeabilitě a permitivitě prostředí.
5. Umět graficky popsat světelnou vlnu jako postupné elektromagnetické vlnění příčné.
6. Umět matematicky formulovat elektrickou a magnetickou složku elektromagnetického pole.



**Optika** se jako významná fyzikální disciplína zabývá podstatou světla, jeho vznikem, šířením a ději při interakcích mezi světlem a látkou. Kromě světla (viditelné oblasti právě pro lidské oko) se optika zabývá i zářením infračerveným a ultrafialovým, protože tato elektromagnetická záření se světlem a viděním úzce souvisí. Optika okrajově zasahuje i do jiných oborů, např. chemie, biologie, psychologie atd.

Optiku dělíme do tří stěžejních oborů budovaných pomocí fyzikálních jevů a zákonů:

- na optiku **paprskovou (geometrickou)**: její základy položili přibližně do roku 1800 fyzikové Descartes, Fermat, Huygens a Newton; jde o:

- zákon přímočarého šíření světla v homogenních prostředích,
- zákon odrazu (reflexe) světla a jev difúze (rozptylu) světla,
- zákon lomu (refrakce) světla a jev totální reflexe (úplného odrazu) světla,
- zobrazování optickými soustavami;

- na optiku **vlnovou (fyzikální)**: o její rozvoj se především zasloužili v časovém rozmezí do roku 1900 Young, Fresnel, Maxwell a Hertz; jde o:

- interferenci (křížení a superpozici vlnění),
- ohyb (difrakci),
- polarizaci,
- disperzi (rozklad);

- na optiku **kvantovou (fotonovou)**: která se vyvíjí asi od roku 1900 dodnes, a to díky fundamentálním pracím Plancka, Einsteina a de Broglieho.

Názory na podstatu světla se historicky vyvíjely už od starověku. Staří **Řekové a Římané** dokázali popsat přímočaré šíření světla jako děj přírodní povahy, ale jejich představy o vzniku, podstatě, šíření a vlastnostech světla byly velmi nejasné.

Teprve až v 1. polovině **17. století Newton** ve své **korpuskulární (emanační) teorii** vysvětloval podstatu světla fundovaněji, a to jako proud malých hmotných částíček - korpusek, vyletujících ze zdroje obrovskou rychlostí. Jeho teorie však postrádala vysvětlení vlnových vlastností těchto částic. Až ve 2. polovině 17. století byly provedeny první významnější pokusy zacílené na pochopení optických jevů. **Fermat** významně přispěl k pochopení chování přímočarého šíření světla poznatkem, že světlo probíhá prostorem tak, aby

doba mezi dvěma místy pozorování byla uražena v minimálním čase. **Huygens** došel k témuž závěru, tj. dokázal zákon odrazu, lomu i dvojlomu pomocí kulových a rovinných vlnoploch. Jejich **vlnová teorie** sice už vystihovala vlnový charakter světla, ale stále setrvala v zajetí experimentálně neprokázané existence „éteru“, nosného prostředí pro šíření světla, jakéhosi nehmotného plynu, který prostupuje hmotou, vakuem a je nositelem absolutního prostoru.

Ještě v **18. století** totiž fyzikové žili v zajetí analogie šíření zvukové a světelné vlny. Předpokládali, že když se zvuková vlna nemůže šířit bez nosného prostředí, že se bez „podobného“ nosného prostředí nemůže šířit ani vlna světelná. Dnes víme, že zvuk je mechanické vlnění postupné podélné, které se šíří nosným prostředím v důsledku vazeb z částice na částici, takže vakuem šíření zvuku neumožňuje. Světlo je elektromagnetické vlnění postupné příčné, jehož pohyb se realizuje změnou elektrické složky v magnetickou a naopak. Ve vakuu se světlo šíří nejrychleji, prostředí (plyn) jeho rychlost umenšuje, a to v závislosti na jeho materiálových vlastnostech (permeabilitě a permitivitě). V kapalině je světelná energie značně pohlcována, pevnými látkami neprochází vůbec, jen s nimi případně interaguje na povrchu (např. fotoelektrický jev, jevy v tenkých vrstvách apod.).

Počátkem **19. století** Huygensovu domněnku o vlnové povaze světla teoreticky i experimentálně potvrdili **Young** (vysvětlením interference vlnění jako analogie jednoduššího jevu superpozice kmitů), **Fresnel** (popisem ohybu, jehož teoretické vysvětlení bylo podmíněno znalostí interference) a **Malus** (objasněním polarizace, která prokázala, že se světlo nešíří podélně jako zvuk, ale transverzálně - příčně, tj. kolmo ke směru šíření).

Přestože neexistovaly experimentální důkazy, podporující existenci éteru, fyzikové jeho existenci „logicky“ a důsledně předpokládali a obhajovali až do roku 1865. Teprve tehdy nastoupilo místo pojetí mechanického pohybu éteru převratné pojetí elektromagnetické, podle něhož světlo vzniká kmitavými jevy elektricky nabitých atomových částí látky a jako elektromagnetická vlna se šíří do okolního prostoru. **Elektromagnetickou teorii** světla (v podobě matematických rovnic) vytvořil **Maxwell** a definoval tím světlo jako elektromagnetické vlnění. Ve fyzice bývá obvyklejším úkazem, že si praktický objev vyžádá vypracování teoretického výkladu. V tomto případě vznik významné teorie nebyl dlouho doceněn a čekal na experimentální důkaz. Ten byl umožněn až pozorováním chování kmitavého elektrického obvodu. Vhodně uspořádaný kmitavý LC obvod totiž generuje elektromagnetické pole a vysílá vlny, které se šíří rychlostí světla do okolního prostoru. Ve svítícím tělese vznikají vlivem elektricky nabitých součástí atomů elektromagnetické rozruhy, které se šíří stejným způsobem jako rozruhy z elektrického kmitavého obvodu. Nová teorie se všemi důsledky uzavřela nauku o šíření záření prostorem a spojila optiku s naukou o elektřině a magnetismu v jeden kompaktní obor. Maxwellovy teoretické hypotézy byly potvrzeny experimentálními objevy **Hertze** (důkazem existence elektromagnetických vln pomocí elektrického kmitavého obvodu velmi malých rozměrů, který poskytoval vlny o krátké vlnové délce) a **Lebeděva** (studium tlaku dopadajícího světla).

Moderní optiku datujeme až do počátků **20. století**. Naše pochopení vzniku světla, jeho absorpce a přeměny na jinou energii obohatil **Planck**. Při výkladu záření černého tělesa vytvořil základy **kvantové teorie** předpokladem, že změna energie se neděje spojitě, ale po celistvých kvantech energie, a to po kvantech světelných pulsů úměrných frekvenci záření. **Broglie** každému takovému kvantu - elementární částici - přisoudil vlnu a dospěl tak k úzké souvislosti mezi látkou a polem. **Einstein** charakterizoval zrnitou strukturu světla a světelná kvanta konkretizoval a pojmenoval jako fotony. Interakci záření a látky popsal rovnicí fotoefektu. Objasněl, že při fotoelektrickém jevu dopadající elektromagnetická vlna vzbuzuje vynucené kmity elektronů v kovu; pouze při rezonanci mezi vlastní periodou kmitů elektronu a periodou dopadající vlny se amplituda kmitů zvětší natolik, že se elektron může uvolnit z hraniční oblasti povrchu kovu. Rozpolcenou krizi ve výkladu dvojí povahy světla tak ujasnil a ukončil sjednocující **teorií dualismu**.

V souladu s teorií dualismu má hmota dvě formy existence: **látku a pole**. Látky a pole jsou spolu v interakci prostřednictvím **elementárních částic**. Proton a elektron jako látkové částice atomu na sebe působí elektromagneticky proto, že si mezi sebou vyměňují **fotony**, tj. částice polní. Interakce mezi protony a neutrony je zase zprostředkována mezony (tj. částicemi asi

300násobně hmotnějšími, než-li jsou elektrony). Tak jako vlnám v elektromagnetickém poli můžeme přiřadit fotony, tak také můžeme elektronům přiřadit vlny.

Planckovu ideu kvantování energie rozšířil později Einstein i na fotoelektrický jev, Planckova konstanta  $h$  se v jeho pojetí stala univerzální konstantou elektromagnetického záření a článkem spojujícím jeho vlnové a korpuskulární vlastnosti. Bohr Planckovu konstantu zavedl do atomové fyziky a Louis de Broglie ji použil ve vztahu, který připisoval volně se pohybující částici s hybností  $p$  rovinnou vlnu o vlnové délce  $\lambda$ , čímž byl korpuskulárně vlnový dualismus rozšířen i na částice.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m c} \wedge \lambda = c T = \frac{c}{\nu}, \quad 4.1.- 1.$$

kde  $\lambda$  je de Broglieho vlnová délka fotonu [m];  $h$  Planckova konstanta  $6,625 \cdot 10^{-34}$  [J.s];  $p$  hybnost fotonu [kg.m.s<sup>-1</sup>];  $m$  hmotnost fotonu [kg];  $c$  rychlost fotonu ve vakuu [m.s<sup>-1</sup>];  $T$  perioda fotonu [s];  $\nu$  frekvence fotonu [s<sup>-1</sup>].

Dvě základní vlastnosti hmoty jsou její **spojitost a korpuskulární charakter**, hmota je tedy obojetná, „duální“. Dualismus světla se projevuje současně vlnovou povahou (danou jevy interference, ohybu a polarizace) a korpuskulární povahou (danou proudem fotonů, tj. korpuskulí jako kvant o stejné energii, hmotnosti a hybnosti) a lze jej jednoznačně dokázat experimentálně.

V **červené oblasti spektra** (např. u rozhlasových vln) je  $f$  frekvence vlnění relativně malá a tedy i kvantum  $hf$  je relativně velmi malé. **Spojitý vlnový ráz** působení tak dominuje nad nespojitým a nespojitý charakter vlnění není průkazně měřitelný. Ve **fialové oblasti spektra** (např. u rentgenového záření) je frekvence  $\nu$  záření naopak relativně velmi vysoká a tedy i kvantum  $h\nu$  je relativně velmi velké. **Nespojitý kvantový ráz** působení pak dominuje nad spojitým a spojitý charakter záření není průkazně měřitelný.

**Světlo** definujeme jako postupné elektromagnetické vlnění příčné, které se šíří prostřednictvím změn elektrické složky v magnetickou a naopak. Ze všech dosud známých pohybů se největší rychlostí realizuje šíření světla, a to konstantní a maximální rychlostí ve vakuu  $c = 299\,792\,458$  m.s<sup>-1</sup>. Tuto přesnou hodnotu nalezneme v MFCh tabulkách, pro méně náročné výpočty používáme hodnotu zaokrouhlenou:  $3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>. V plynech se světlo šíří pomaleji a v kapalinách nejpomaleji, v pevných látkách se nešíří vůbec. Rychlost šíření světla ve vakuu závisí na vlastnostech prostředí, tj. na permeabilitě vakua  $\mu_0$  a permitivitě vakua  $\epsilon_0$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \text{ kde } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}; \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}. \quad 4.1.- 2.$$

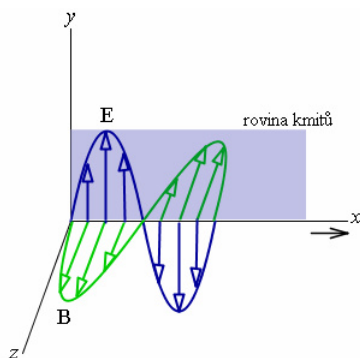
Velikost rychlosti  $v$  světla v jiných prostředích závisí na fyzikálních vlastnostech daného prostředí (na druhu a vlastnostech látky, na její teplotě, tlaku atd., což vystihují fyzikální veličiny relativní permeabilita  $\mu_r$  a relativní permitivita  $\epsilon_r$  prostředí)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}, \text{ kde } \mu = \mu_0 \mu_r \wedge \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r. \quad 4.1.- 3.$$

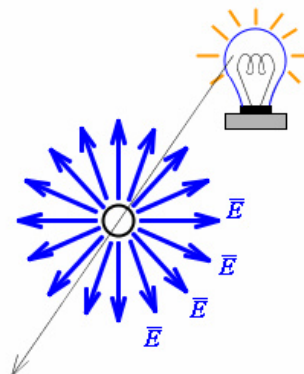
Energie elektromagnetického vlnění se postupně rozšiřuje ve stále větší a větší prostor, takže se její transport dá označit za nejnázornější příklad entropického pohybu.

Elektromagnetická vlna se šíří (obr. 4.1.- 1.) ve směru kladné osy  $x$  prostředím tak, že její elektrické pole o intenzitě  $E$  (ve směru osy  $y$ ) a rovněž její magnetické pole o indukci  $B$  (ve směru osy  $z$ ) kmitají kolmo k ose  $x$  ve směru šíření.

Složky elektromagnetického pole nemohou existovat nezávisle na sobě a jsou k sobě neustále kolmé, přestože se v prostoru obě současně a nahodile stáčíjí kolem osy  $x$  (obr. 4.1.- 2.), jinými slovy: světlo není tzv. lineárně polarizovanou vlnou.



Obr. 4.1.- 1.



Obr. 4.1.- 2.

Pro vzájemný poměr okamžitých (rovněž maximálních a efektivních) hodnot složek elektromagnetické vlny platí vztah

$$\frac{E}{B} = c. \quad 4.1.- 4.$$

Srovnávat složky pole však nemůžeme (měří se v jiných jednotkách:  $V \cdot m^{-1}$ ; T), prakticky nás však více zajímá složka elektrická, protože z hlediska vnímání lidským okem vykazuje fyziologické, fluorescenční a fotografické účinky.

Základní vlastnosti elektromagnetické vlny můžeme vyčíst z **vlnové rovnice**. Složky elektromagnetického pole jsou matematicky formulovány sinovou funkcí času  $t$  a prostoru  $x$ :

$$\begin{aligned} E &= E_{\max} \sin(kx - \omega t) \\ B &= B_{\max} \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \quad 4.1.- 5.$$

přičemž  $E_{\max}$  a  $B_{\max}$  jsou amplitudy složek,  $k$  je úhlový vlnocet a  $\omega$  je úhlová frekvence vlnění.

Viditelné světlo je emitováno zdroji o atomových nebo jaderných rozměrech, a to na principech kvantové optiky. Elektron jako elektricky nabitá částice v atomu kmitá a generuje tak magnetické pole. Tento jev je znám v klasické fyzice z Oerstedova pokusu, kdy elektrický proud iniciuje vznik magnetického pole. Elementární magnetické pole pak indukuje elementární pole elektrické - tento jev je opět znám v klasické fyzice z pokusů Faradayových, kdy změna magnetického indukčního toku vyvolává elektrické napětí a proud... Zánik předchozího typu pole se děje také v souladu se zákony klasické fyziky, a to podle zákona Lenzova...

**Princip vyzařování světla** si můžeme zjednodušeně a analogicky představit také tak, že atomem je přirozený LC oscilátor, tj. elektrický kmitavý obvod (viz kapitola elektromagnetické obvody), který generuje elektromagnetické vlny. Elektrický dipól se chová jako anténa, přičemž velikost elektrického dipólového momentu se mění harmonicky (sinusově) a má směr podél této „antény“. Mění se velikost i směr dipólového momentu, takže se mění i elektrické pole, které dipólový moment budí. Mění se rovněž velikost a směr proudu, takže se mění i magnetické pole, které proud generuje. Proměnné složky pole tvoří

elektromagnetickou vlnu, která se šíří konstantní rychlostí prostředím, a to s úhlovou frekvencí, která odpovídá frekvenci zdroje.



**KO 4.1.-1.** Vyjmenujte základní zákony geometrické (paprskové) optiky.

**KO 4.1.-2.** Vyjmenujte základní jevy vlnové (fyzikální) optiky.

**KO 4.1.-3.** Popište experimenty ověřující dualismus světla.

**KO 4.1.-4.** Objasněte experiment, kterým bylo prokázáno, že je světlo vlnění příčné.

**KO 4.1.-5.** Vysvětlete princip šíření elektromagnetické vlny.



Při katodovém záření se pohybují elektrony rychlostí jedné desetiny rychlosti světla. Jakou vlnovou délku můžeme těmto elektronům přiřadit?

Zapíšeme si zkrácené zadání úlohy

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}; v = \frac{c}{10}, \text{ kde } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}; \lambda = ?$$

Řešení úlohy vychází ze znalosti de Broglieho vlnové délky urychleného elektronu

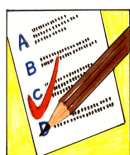
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$

Po dosazení hodnot ze zadání vyjádříme výsledek obecně i numericky

$$\lambda = \frac{10 h}{m c} \Rightarrow \lambda = 2,43 \cdot 10^{-11} \text{ m.}$$



**U 4.1.- 1.** Při katodovém záření se pohybují elektrony rychlostí jedné desetiny rychlosti světla. Jakou frekvenci můžeme těmto elektronům přiřadit?



**TO 4.1.- 1.** Rychlost světla závisí primárně na:

- tlaku a teplotě prostředí;
- na frekvenci světla;
- nezávisí na vlastnostech prostředí, je to univerzální konstanta;
- na permitivitě a permeabilitě prostředí.

**TO 4.1.- 2.** Proč jsou složky elektromagnetické vlny nesrovnatelné fyzikální veličiny?

- měří se v jiných jednotkách;
- v praxi se měří elektrická složka, protože je řádově větší hodnoty;
- mají pouze stejný úhlový vlnčet a úhlovou frekvenci, ale amplitudy různé;
- jsou k sobě kolmé.

**TO 4.1.- 3.** Světlo se ve vakuu šíří konstantní rychlostí a v plynech rychlostí

- menší;

- b) větší;
- c) stejnou;
- d) různě, a to v závislosti na vlastnostech prostředí.

**TO 4.1.- 4.** Foton je

- a) částicí pole;
- b) částicí látky;
- c) částicí hmoty;
- d) pouze světla.

**TO 4.1.- 5.** Spojitý charakter elektromagnetického vlnění vykazuje vlnění, které má

- a) relativně malé frekvence a malé vlnové délky;
- b) relativně velké frekvence a velké vlnové délky;
- c) relativně malé frekvence a velké vlnové délky;
- d) relativně velké frekvence a malé vlnové délky.

### 4.1.2. Šíření světla



1. Vysvětlit podstatu přímočarého šíření světla podle Fermatova principu.
2. Vysvětlit podstatu přímočarého šíření světla podle Huygensova principu.
3. Znat složení a řádově rozsah frekvencí a vlnových délek spojité (červené) oblasti elektromagnetického spektra.
4. Znat složení a řádově rozsah frekvencí a vlnových délek nespojitě (fialové) oblasti elektromagnetického spektra.
5. Znat složení a řádově rozsah frekvencí a vlnových délek světla jako viditelné části elektromagnetického spektra.
6. Rozlišovat spektra spojité, čárová a pásová jako důsledek záření různých typů zdrojů světla.
7. Umět objasnit podstatu jevu disperze světla experimentálně (optickým hranolem).
8. Umět objasnit podstatu jevu disperze světla teoreticky (disperzní křivkou).



**Optickým prostředím** chápeme takové prostředí, kterým se šíří světlo. Průhledným prostředím se světlo šíří bez podstatné absorpce, neprůhledným prostředím s významnou **absorpcí**, jiná prostředí světlo pouze odráží na svých rozhraních.

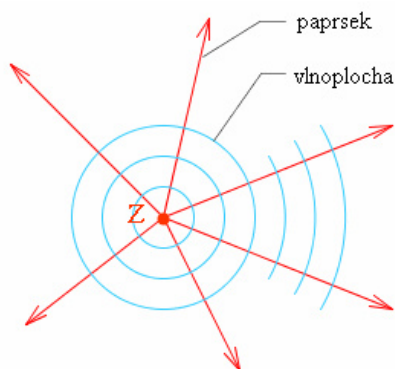
Opticky **stejnorodé (homogenní) prostředí** je takové prostředí, jehož všechny body mají stejnou hodnotu indexu lomu. Světelným paprskem je pak **přímka**. V opticky **nestejnorodém (nehomogenním) prostředí** se index lomu mění spojitě od bodu k bodu. Deformace čela vlny má za následek **zakřivení** paprsku.

Opticky **izotropní prostředí** je takové prostředí, které má ve všech směrech stejné optické vlastnosti, takže se vlnění - záření šíří všemi směry stejně. Opticky **anizotropní prostředí** má v různých směrech různé optické vlastnosti.

Podle zákona přímočarého šíření světla se v homogenním izotropním optickém prostředí světlo šíří přímočaře v rovnoběžných, rozbíhavých, anebo sbíhavých světelných svazcích. Tyto svazky (a světelné paprsky jako jejich součásti) se mohou navzájem protínat, nemohou se ale ovlivňovat, postupují prostředím **nezávisle na sobě**.

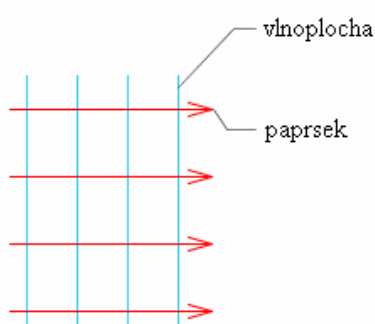


Podle **Fermatova principu** se světlo šíří v homogenním izotropním prostředí přímočaře, a to z jednoho bodu do druhého po takové dráze, že doba potřebná k proběhnutí této dráhy má extrémní hodnotu. Protože nejkratší spojení dvou hmotných bodů v takovém prostředí leží na přímce, potřebuje světlo minimální dobu k tomu, aby došlo z jednoho bodu do druhého. Fermatova metoda je sice myšlenkově jiná, ale dochází ke stejným závěrům jako metoda Huygensova, a to k závěrům o přímočarém šíření světla aplikovaných především na zákon odrazu a zákon lomu.



Podle **Huygensova principu** se světlo šíří v homogenním izotropním prostředí od zdroje do prostoru ve vlnoplochách. **Vlnoplochu** definujeme jako geometrické místo – množinu bodů, kam dospěje rozruch generovaný zdrojem vlnění za určitý čas. V homogenním izotropním prostředí bude vlnoplocha **kulová**, tj. v rovině kružnicí a v prostoru povrchem koule (obr. 4.1.- 3.).

Obr. 4.1.- 3.



Jestliže je světelný zdroj ve velké vzdálenosti od bodu pozorování, můžeme část kulového vrchlíku považovat přibližně za **rovinnou** vlnoplochu a část kružnice za úsečku, přičemž tyto roviny i úsečky můžeme charakterizovat přibližně jako rovnoběžné (obr. 4.1.- 4.).

Obr. 4.1.- 4.

Dále Huygensův princip určuje, že každý bod vlnoplochy se stává zdrojem nového elementárního vlnění a čelo nové vlnoplochy získáme jako obálku elementárních vlnoploch. **Světelný paprsek** je pak přímka kolmá na vlnoplochu a udávající směr šíření vlnění. Principem přímočarého šíření světla však vysvětlujeme pouze odraz vlnění, lom vlnění a vznik stínu, ohyb vlnění na překážce dokážeme objasnit pouze pomocí jevu interference světla.

Část elektromagnetického spektra relativně větších vlnových délek (řádově  $10^4$  až  $10^4$  m) a relativně menších frekvencí (řádově  $10^{13}$  až  $10^{23}$  Hz) nazýváme podle konvence **elektromagnetickým vlněním** (viz následující tabulka). Pro technickou praxi se uměle vytvářejí a využívají zejména dlouhé, střední a krátké rozhlasové vlny. Dále pak jako nosné vlny elektromagnetických impulsů v radarových přístrojích mohou sloužit Hertzovy velmi krátké vlny, dnes se užívají běžně vlny radarové. Uměle elektrickými metodami se generují i vlny milimetrové. Tepelné vlny jsou vlny, které vznikají přirozeně jako průvodní jev všech

dějů tepelné povahy (viz šíření tepla sáláním při teplotě těles zahřátých maximálně na 560<sup>0</sup>C) a souvisí s infračerveným zářením.

**Rozsah vlnových délek a frekvencí vlnění** v rámci elektromagnetického spektra (viz následující tabulka) představuje relativně velmi široký interval o 8-mi význačných oblastech:

<b>Vlnění</b>	$\lambda$ [m]	$f$ [Hz]	<b>Vlnění</b>	$\lambda$ [m]	$f$ [Hz]
<b>dlouhé</b>	$10^4 - 10^3$	$10^5$	<b>ultrakrátké</b>	$10^{-1}$	$10^9$
<b>střední</b>	$10^2$	$10^6$	<b>radarové</b>	$10^{-2}$	$10^{10}$
<b>krátké</b>	$10^1$	$10^7$	<b>milimetrové</b>	$10^{-3}$	$10^{11}$
<b>velmi krátké</b>	$10^0$	$10^8$	<b>tepelné</b>	$10^{-4}$	$10^{12}$

Část elektromagnetického spektra relativně kratších vlnových délek (řádově  $10^{-5}$  až  $10^{-13}$ m) a relativně větších frekvencí (řádově  $10^5$ Hz až  $10^{12}$ Hz) nazýváme konvenčně **elektromagnetickým zářením** (viz následující tabulka). Světlo klasifikujeme jako pro nás nejvýznamnější část spektra a jako vlnění a záření současně (viz dualismus světla). V přírodě a technické praxi ho můžeme považovat za důsledek sálání těles o teplotě nad 560<sup>0</sup>C. Zatímco ultrafialové světlo je ještě přírodní povahy a provází běžné světlo sluneční obdobně jako záření infračervené, měkké rentgenové záření (starší terminologií paprsky X) je opět uměle získávané. Tvrdé, velmi pronikavé rentgenové záření patří do oboru přírodního radioaktivního záření spolu se zářením kosmickým.

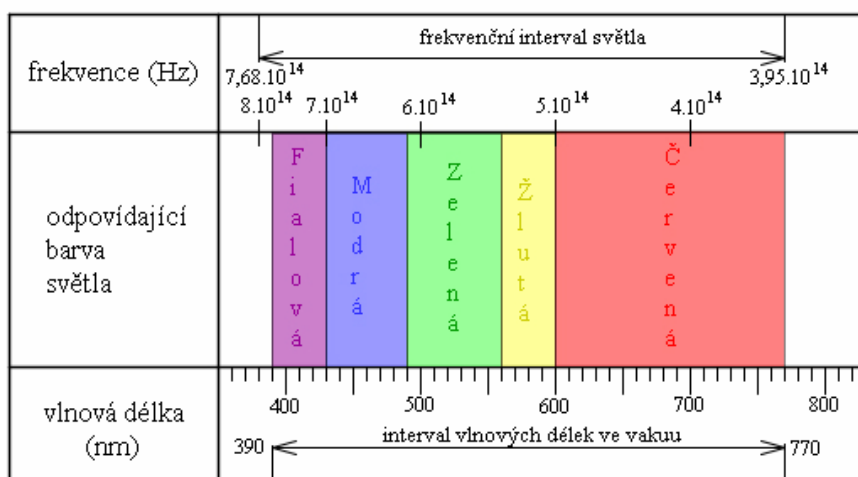
**Rozsah vlnových délek a frekvencí záření** v rámci elektromagnetického spektra (viz následující tabulka) představuje opět relativně velmi široký interval o 8-mi význačných oblastech:



Záření	$\lambda$ [m]	$\nu$ [Hz]	Záření	$\lambda$ [m]	$\nu$ [Hz]
daleké infračervené	$10^{-5}$	$10^{13}$	X měkké rentgenové	$10^{-9}$	$10^{17}$
blízké infračervené	$10^{-6}$	$10^{14}$	X tvrdé rentgenové	$10^{-10}$	$10^{18}$
světlo	$10^{-7}$	$10^{15}$	gama	$10^{-11}$	$10^{19}$
ultrafialové	$10^{-8}$	$10^{16}$	kosmické	$10^{-13}$	$10^{23}$

Termínem **světlo** označujeme pouze viditelnou oblast elektromagnetického vlnění. Hranice této oblasti nemohou být zcela přesně vymezeny a bývají uváděny nejednotně. Křivka citlivosti lidského oka se totiž asymptoticky blíží k nule na dlouhovlnné i na krátkovlnné straně, a to v závislosti na intenzitě světla, kromě toho vnímání světla je velmi subjektivní. Přibližně a relativně objektivně jde o interval 390nm až 770nm, který odpovídá frekvencím  $7,68 \cdot 10^{14}$  až  $3,95 \cdot 10^{14}$  Hz (viz následující tabulka). Části slunečního spektra jsou opět relativně velmi úzké intervaly a přibližně je lze určit jako monofrekvenční barvy. Dílčí složky spektra bílého světla jsou: **červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigová, fialová** (jejichž konkrétní a přesná vlnové délky byly v optice opět určeny konvenčně).

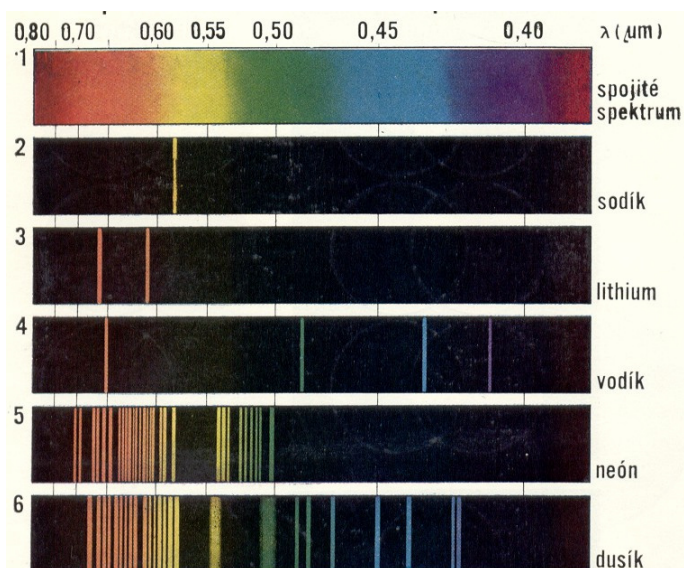
**Tabulka** (obr. 4.1.- 5.) ukazuje **rozsah vlnových délek a frekvencí slunečního světla** v intervalu relativně velmi úzkém



Obr. 4.1.- 5.

Elektromagnetické vlnění - záření nepřenáší ani hmotu, ani elektrický náboj, pouze energii. Z fyzikálního hlediska jsou však velmi důležité také jiné typy záření, např. **anodové paprsky** a **katodové paprsky**, které nesou kromě energie i hmotu a elektrický náboj. Hmotu bez náboje dokážou přenášet **molekulové paprsky** nebo **atomové paprsky** a **neutronové záření**. Tyto typy záření však leží mimo oblast elektromagnetického spektra.

Rozlišujeme různé druhy spekter (obr. 4.1.- 6.). **Spojité spektrum** se jeví jako souvislý pruh, v němž barvy přecházejí plynule jedna v druhou. Vysílají je rozžhavené látky ve skupenství pevném nebo kapalném, výjimečně plyny při velmi vysokém tlaku. Spojité spektrum nezávisí na chemickém složení zdroje a je ve všech případech stejné.



**Čárové spektrum** (sodík, lithium, vodík) se skládá z jednotlivých jasných, ostrých a úzkých čar, které jsou odděleny různě širokými mezerami. Vysílají je především rozžhavené plyny a páry chemických prvků při přibližně normálním tlaku.

**Pásové spektrum** (neon, dusík) obsahuje pruhy neostře ohraničené, anebo složené z velkého počtu jemných čar. Vyzářují je molekuly prvků nebo sloučenin ve stavu par, které se ani při vysoké teplotě nerozkládají ve své dílčí prvky.

Obr. 4.1.- 6.

Za **primární světelný zdroj** považujeme těleso, které vyzářuje světlo na základě přeměny energie v elektronových obalech atomů. Přírodním zdrojem světla je Slunce, umělým zdrojem světla např. žárovka, rtuťová výbojka apod. Frekvence světla je určena jen zdrojem světla a nezávisí na prostředí, kterým se světlo šíří. Protože rychlost světla  $c$  je v daném homogenním a izotropním prostředí (vakuu) konstantní, vlnová délka světla  $\lambda_0$  se ve vakuu mění pouze v závislosti na frekvenci  $f$  tohoto monofrekvenčního zdroje

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

4.1.- 6.

V jiném optickém prostředí je fázová rychlost světla  $v$  menší, vlnová délka  $\lambda$  kratší, jen frekvence  $f$  zdroje světla zůstává konstantní.

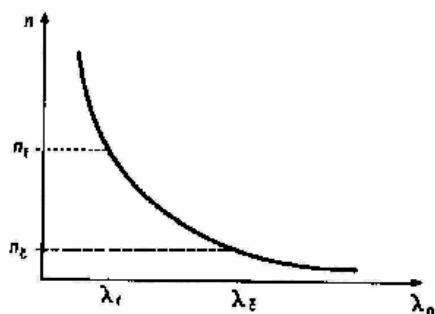
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

4.1.- 7.



„Zviditelnění“ světelných paprsků (obr. 4.1.- 7.) se děje vlivem **rozptylu (difúze) světla** na částicích prostředí (např. na makroskopických částicích prachu ve vzduchu, a to menších než je vlnová délka světla), kterým světlo prochází. Projevuje se odchylováním světla od původního směru do všech možných úhlů ostrých i tupých, proto při pohledu se strany vidíme světelný kužel, vytvořený postupujícím svazkem paprsků. Měsíc je např. **sekundárním zdrojem světla**, protože vysílá pouze odražené sluneční světlo. Obdobně např. v místnosti, kde nemáme žádný přímý zdroj světla, většinou dobře vidíme světlo dopadající oknem a následně mnohonásobně odražené.

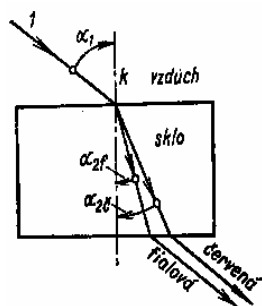
Obr. 4.1.- 7.



Jev **disperze (rozkladu) světla** pozoroval už Newton, ale nedokázal jej správně interpretovat. Disperzní křivka vyjadřuje závislost fázové rychlosti světla  $v$  v optickém prostředí (ne ve vakuu) na vlnové délce světla  $\lambda$ , a to při konstantní frekvenci  $f$  zdroje světla. Tzn. že i index lomu  $n$  závisí na vlnové délce světla  $\lambda$  (obr. 4.1.- 8.).

Obr. 4.1.- 8.

Disperzní křivka ukazuje, že se paprsky složeného světla (dopadajícího pod úhlem  $\alpha_1$ ) lámou pod různými úhly lomu  $\alpha_2$ . Protože je vlnová délka červeného světla větší než vlnová délka fialového světla, je naopak index lomu červeného světla menší než index lomu světla fialového. Nejvíce se tedy láme paprsek fialového světla a nejméně paprsek světla červeného (obr. 4.1.- 9.):  $\alpha_{2f} < \alpha_{2c}$ .

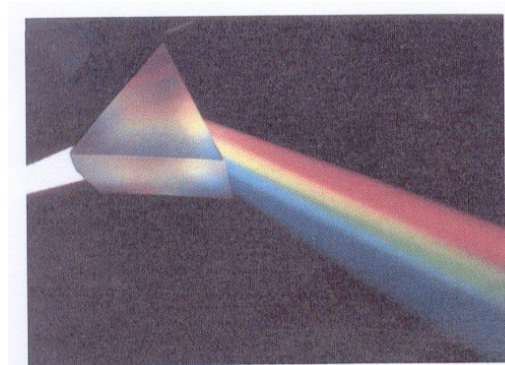


Obr. 4.1.- 9.

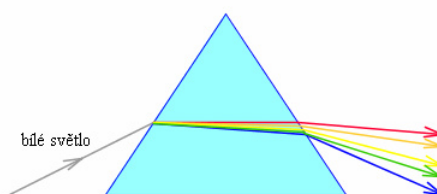
Protože se při průchodu optickým prostředím nemění frekvence  $f$  světla, je v něm vlnová délka  $\lambda$   $n$ -krát menší než je vlnová délka  $\lambda_0$  ve vakuu

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \wedge n = \frac{c}{v} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n};$$

4.1.- 8.



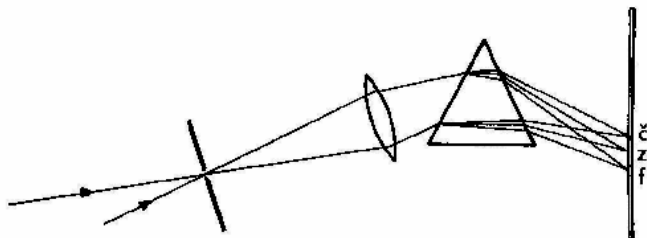
Obr. 4.1.- 10.



Obr. 4.1.- 11.

V technické praxi realizujeme rozklad světla optickým hranolem (fotografie na obr. 4.1.-10. a schéma na obr.4.1.-11.). Rozkladné hranoly bývají významnou součástí optických přístrojů (především spektrometrů). Na schématu štěrbina vymezuje svazek paprsků bílého světla, který je čočkou soustředěn na optický hranol. Na stěnách hranolu se pak světlo dvakrát láme,

příčemž se světla různých frekvencí (barev) více či méně odchylojí od původního směru. Na stínítku se pak zobrazí **hranolové spektrum** jako soustava spojitého proužků, a to v posloupnosti: červená *č*, oranžová, žlutá, zelená *z*, modrá, indigová a fialová *f* (obr.4.1.-12.). V případě bílého slunečního spektra je rozložení proužků na stínítku spojitě a nerovnoměrně (pozor: u mřížkového spektra je pořadí barev opačné a rovnoměrné), v přírodě ho známe pod názvem duha. V případě pouze složeného světla nějakého umělého světelného zdroje se mohou na stínítku zobrazit proužky čárové, diskrétní.



Obr. 4.1.- 12.



**KO 4.1.- 6.** Odlište Huygensovu vlnoplochu kulovou a rovinnou.

**KO 4.1.- 7.** Vyjmenujte spojitě (vlnové) oblasti elektromagnetického spektra a určete řádově jejich vlnové délky, případně frekvence.

**KO 4.1.- 8.** Vyjmenujte nespojitě (kvantové) oblasti elektromagnetického spektra a určete řádově jejich vlnové délky, případně frekvence.

**KO 4.1.- 9.** Vyjmenujte barvy bílého (slunečního) světla a určete řádově vlnové délky, případně frekvence okraje spektra.

**KO 4.1.- 10.** Popište průběh tzv. disperzní křivky.



Jak se změní vlnová délka světla šířícího se ve vakuu při průchodu sklem? Index lomu skla uvažujeme 1,5.

Zapíšeme si zkrácené zadání úlohy

$$n_0 = 1 ; n_S = 1,5 ; \lambda/\lambda_0 = ?$$

K řešení úlohy potřebujeme znát index lomu skla

$$n_S = \frac{c}{v}$$

a vlnovou délku světla ve vakuu a ve skle

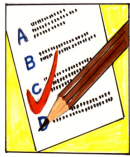
$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} \wedge \lambda = \frac{v}{\nu}$$

Z předcházejících vztahů odvodíme výsledek obecný a numerický

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \wedge v = \frac{c}{n_S} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n_S} \Rightarrow \lambda = \lambda_0/1,5.$$



**U 4.1.- 2.** Jak se změní vlnová délka světla šířícího se sklem při průchodu vakuem? Index lomu skla uvažujeme 1,5.



**TO 4.1.- 6.** Změní se frekvence světla při průchodu ze vzduchu do skla?

- a) změní se frekvence, ale nikoliv vlnová délka;
- b) změní se vlnová délka a současně s ní i frekvence;
- c) změní se vlnová délka, ale frekvence se nezmění;
- d) nezmění se frekvence, ani vlnová délka.

**TO 4.1.- 7.** Jestliže je vlnová délka monofrekvenčního světla ve vakuu  $\lambda$ , pak po přechodu tohoto světla do prostředí o indexu lomu  $n$  je vlnová délka v tomto prostředí

- a)  $\lambda$  ;
- b)  $n \lambda$  ;
- c)  $\frac{\lambda}{n}$  ;
- d)  $(n-1) \lambda$  .

**TO 4.1.- 8.** Při průchodu bílého světla rozkladným hranolem

- a) se nejvíce odchyluje (láme) červené světlo, protože má nejmenší vlnovou délku;
- b) se nejvíce odchyluje (láme) fialové světlo, protože má nejmenší vlnovou délku;
- c) se nejvíce odchyluje (láme) červené světlo, protože má největší vlnovou délku;
- d) se nejvíce odchyluje (láme) fialové světlo, protože má největší vlnovou délku.

**TO 4.1.- 9.** Světlo se šíří jako

- a) elektromagnetické vlnění podélné;
- b) elektromagnetické vlnění příčné;
- c) mechanické vlnění podélné;
- d) mechanické vlnění příčné.

**TO 4.1.- 10.** Světlo se šíří

- a) prostřednictvím interakce mezi částicemi nosného prostředí;
- b) prostřednictvím indukce magnetického pole v pole elektrické;
- c) prostřednictvím periodických změn své elektrické a magnetické složky;
- d) prostřednictvím pružného éteru.

### 4.1.3. Energie přenášená elektromagnetickými vlnami



1. Formulovat přenos energie elektromagnetického záření pomocí Poyntingova vektoru.
2. Definovat intenzitu elektromagnetického záření pomocí Poyntingova vektoru.
3. Nalézt souvislost mezi intenzitou elektromagnetického záření a výkonem zdroje světla.
4. Odlišit okamžité, efektivní a maximální složky elektromagnetického záření.





Elektromagnetická vlna přenáší **zářivou energii** a předává ji tělesu, na které dopadá. Tzv. **Poyntingův vektor**  $\vec{S}$  udává rychlost přenosu energie (udává výkon jako energii za určitý čas) na jednotku plochy

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}; \vec{E} \perp \vec{B} \Rightarrow S = \frac{1}{\mu_0} E B \text{ W.m}^{-2} \quad 4.1.- 9.$$

Směr Poyntingova vektoru elektromagnetické vlny odpovídá v každém bodě směru přenosu zářivé energie. V homogenním optickém prostředí je pak tento směr rovněž totožný se směrem šíření vlny.

Z výše uvedených vztahů můžeme odvodit okamžitý tok energie a zavést prakticky měřitelnou střední hodnotu zářivé energie  $\overline{S}$  za určitý čas na jednotku plochy jako **intenzitu elektromagnetické vlny**

$$S = \frac{1}{\mu_0} E B \wedge \frac{E}{B} = c \wedge E = E_{\max} \sin(kx - \omega t) \Rightarrow S = \frac{1}{c \mu_0} E_{\max}^2 \sin^2(kx - \omega t); \overline{S} = I. \quad 4.1.- 10.$$

Obdobně jako u střídavých proudů pak nahradíme amplitudu  $E_{\max}$  elektrické složky elektromagnetické vlny efektivní hodnotou  $E_{ef}$

$$E_{ef} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad 4.1.- 11.$$

a intenzitu elektromagnetického vlnění pak vyjádříme pomocí lépe měřitelné efektivní hodnoty elektrické složky

$$I = \frac{1}{c \mu_0} E_{ef}^2. \quad 4.1.- 12.$$

Ve zjednodušeném případě bodového zdroje světla, který konstantně a izotropně vyzařuje (ve všech směrech stejnou intenzitu), můžeme uvažovat Huygensovy vlnoplochy jako povrchy koule o poloměru (tj. vzdálenosti od světelného zdroje)  $r$ .

Výkon zdroje  $P$  je podle klasické definice zářivá energie vyslaná za určitou dobu zdrojem. Energie prošlá za jednotku času povrchem koule tedy odpovídá energii vyslané za tentýž čas světelným zdrojem. Intenzita elektromagnetického záření vysílaného bodovým izotropním zdrojem světla o výkonu  $P$  klesá se čtvercem vzdálenosti  $r$  od zdroje

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}. \quad 4.1.- 13.$$



**KO 4.1.- 11.** Definujte tzv. Poyntingův vektor.

**KO 4.1.- 12.** Odvodte, v jakých jednotkách se měří Poyntingův vektor.

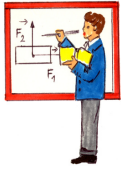
**KO 4.1.-13.** Definujte intenzitu elektromagnetické vlny ve vztahu k Poyntingově vektoru.

**KO 4.1.- 14.** Definujte intenzitu elektromagnetické vlny ve vztahu k výkonu zdroje světla.

**KO 4.1.- 15.** Odvodte, v jakých jednotkách se měří intenzita elektromagnetické vlny.



**U 4.1.- 3.** Ověřte výpočtem známou hodnotu rychlosti světla ve vakuu, a to pro efektivní hodnoty složek elektrického a magnetického pole  $27,4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  a  $9,1\cdot 10^{-8} \text{ T}$ .



Vypočítejte efektivní hodnoty elektrického a magnetického pole v místě  $2\text{m}$  vzdáleném od bodového zdroje světla o výkonu  $100\text{W}$ .

Zapišeme zkrácené, matematizované zadání úlohy

$$r = 2\text{m} ; P = 100\text{W} ; c = 3\cdot 10^8 \text{m}\cdot\text{s}^{-1} ; \mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7} \text{H}\cdot\text{m}^{-1} ; E_{ef} = ? ; B_{ef} = ?$$

K řešení úlohy potřebujeme znát obecný vztah pro intenzitu elektromagnetické vlny pomocí efektivní hodnoty elektrické složky

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{ef}^2,$$

dále vztah pro intenzitu elektromagnetického záření na povrchu Huygensovy kulové vlnoplochy

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

a poměr okamžitých (resp. maximálních či efektivních) hodnot složek elektrického a magnetického pole

$$\frac{E}{B} = c.$$

Skloubením uvedených vztahů vyjádříme výsledek obecný a numerický

$$E_{ef} = \sqrt{\frac{P c \mu_0}{4 \pi r^2}} \Rightarrow E_{ef} = 27,4 \text{V}\cdot\text{m}^{-1} ;$$

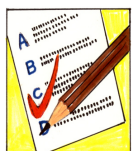
$$B_{ef} = \sqrt{\frac{P \mu_0}{4 \pi r^2 c}} \Rightarrow B_{ef} = 9,1\cdot 10^{-8} \text{T}.$$



**U 4.1.-4.** Vypočítejte intenzitu elektromagnetického záření, které vysílá bodový izotropní zdroj světla o výkonu  $100\text{W}$ , a to v místě  $2\text{m}$  vzdáleném od tohoto zdroje.



**U 4.1.- 5.** Vypočítejte velikost Poyntingova vektoru, a to pro okamžité hodnoty elektrického a magnetického pole  $27,4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  a  $9,1\cdot 10^{-8} \text{ T}$ .



**TO 4.1.- 11.** Směr Poyntingova vektoru elektromagnetické vlny udává

- v každém bodě směr přenosu zářivé energie;
- v každém bodě směr šíření vlny;
- v každém bodě směr vektoru intenzity elektromagnetického pole;



d) v každém bodě směr vektoru indukce elektromagnetického pole.

**TO 4.1.- 12.** Intenzita elektromagnetické vlny se měří v jednotkách

- a)  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ;
- b)  $\text{W}\cdot\text{m}^2$ ;
- c)  $\text{J}\cdot\text{m}^2$ ;
- d)  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**TO 4.1.- 13.** Intenzita elektromagnetického záření vysílaného bodovým izotropním zdrojem světla

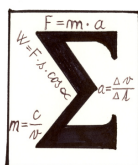
- a) klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje;
- b) je na vzdálenosti od zdroje nezávislá;
- c) závisí nepřímo úměrně na vzdálenosti od zdroje;
- d) závisí lineárně na vzdálenosti od zdroje.

**TO 4.1.- 14.** Intenzita elektromagnetického vlnění vyjádřená pomocí amplitudy elektrické složky je

- a)  $I = \frac{1}{c \mu_0} E_{\max}^2$  ;
- b)  $I = \frac{1}{4 c \mu_0} E_{\max}^2$  ;
- c)  $I = \frac{1}{c \mu_0} E_{\max}$  ;
- d)  $I = \frac{1}{4 c \mu_0} E_{\max}$  .

**TO 4.1.- 15.** Intenzita elektromagnetické vlny

- a) je totožná se zářivou energií za určitý čas na jednotku plochy;
- b) je totožná se zářivou energií za určitý čas na dopadající plochu;
- c) je totožná se střední hodnotou zářivé energie za určitý čas na jednotku plochy;
- d) je totožná s rychlostí přenosu energie na jednotku plochy.



- Vlnová délka fotonu podle de Broglieho a vlnová délka světla obecně

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m c} \wedge \lambda = c T = \frac{c}{\nu}$$

- Rychlost světla ve vakuu a rychlost světla v jiném prostředí

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} ; v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}}$$

- Elektrická a magnetická složka elektromagnetické vlny a jejich poměr

$$E = E_{\max} \sin(kx - \omega t) ; \frac{E}{B} = c ;$$
$$B = B_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

- Vlnová délka světla ve vakuu a v jiném optickém prostředí

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} ; \lambda = \frac{v}{\nu} ;$$

- Disperze světla jako závislost vlnové délky světla na indexu lomu prostředí

$$v = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \wedge n = \frac{c}{v} \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n} ;$$

- Poyntingův vektor  $S$  jako rychlost přenosu energie na jednotku plochy

$$S = \frac{1}{\mu_0} E B ;$$

- Srovnání střední hodnoty velikosti Poyntingova vektoru a intenzity  $I$  elektromagnetické vlny

$$\bar{S} = I ;$$

- Intenzita elektromagnetické vlny  $I$  v závislosti na efektivní hodnotě  $E_{ef}$  elektrické složky

$$I = \frac{1}{c \mu_0} E_{ef}^2 ; \text{ kde } E_{ef} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} ;$$

- Intenzita elektromagnetické vlny  $I$  v souvislosti s výkonem zdroje světla  $P$ , a to ve vzdálenosti  $r$

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} .$$

# Klíč



$$\text{U 4.1.- 1. } \nu = \frac{m c^2}{100 h} \Rightarrow \nu = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$$

$$\text{U 4.1.- 2. } \lambda = \frac{\lambda_0}{n_s} \Rightarrow \lambda_0 = 1,5 \cdot \lambda ; \text{ tzn. zvětší se 1,5krát.}$$

$$\text{U 4.1.- 3. } c = \frac{E_{ef}}{B_{ef}} \Rightarrow c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\text{U 4.1.- 4. } I = \frac{P}{4\pi r^2} = 1,99 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\text{U 4.1.- 5. } S = \frac{E B}{\mu_0} = 1,98 \text{ W.m}^{-2}$$



**TO 4.1.- 1.** d)

**TO 4.1.- 2.** a)

**TO 4.1.- 3.** a)

**TO 4.1.- 4.** a)

**TO 4.1.- 5.** c)

**TO 4.1.- 6.** c)

**TO 4.1.- 7.** c)

**TO 4.1.- 8.** b)

**TO 4.1.- 9.** b)

**TO 4.1.- 10.** c)

**TO 4.1.- 11.** a)

**TO 4.1.- 12.** d)

**TO 4.1.- 13.** a)

**TO 4.1.- 14.** b)

**TO 4.1.- 15.** c)