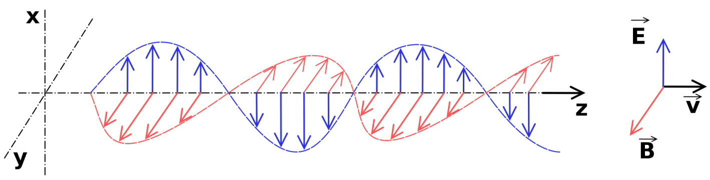
Pracovní list z optiky – Fyzika pro chemiky II (F2091)

Zbyněk Fišer

1 Elektromagnetické vlnění a světlo

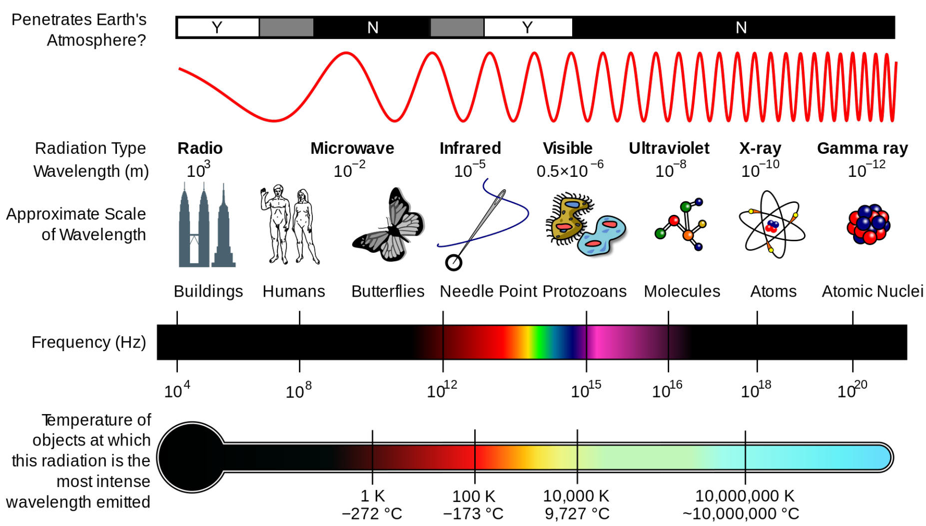
- **elektromagnetické vlnění**:
  - má dvě složky – elektrickou ($\mathbf{E}$) a magnetickou ($\mathbf{B}$)
  - oba vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$ jsou na sebe kolmé a současně jsou kolmé na směr šíření vlnění, tedy na vektor rychlosti vlnění $\mathbf{v}$
  - příčné postupné vlnění, které se šíří rychlostí c (ve vakuu)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \tag{1}$$



Obrázek 1: Elektromagnetické vlnění *(zdroj: en.wikipedia.org)*

- světlo je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou cca 370 až 760 nm (hranice není ostrá)
- různé druhy elektromagnetického vlnění se souhrnně označují jako elektromagnetické spektrum



Obrázek 2: Elektromagnetické spektrum *(zdroj: en.wikipedia.org)*

2 Základy optiky

- **vlnová délka** λ = vzdálenost, na které dochází k opakování tvaru vlny
- **vlnový vektor k** = určuje směr šíření vlnění a jeho velikost je vlnočet $|\mathbf{k}|$

$$\lambda = \frac{2\pi}{|\mathbf{k}|} \quad (2)$$

$$|\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad (3)$$

- **kruhová frekvence** ω:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (4)$$

- **index lomu** n:
  - poměr rychlosti světla ve vakuu c a v daném prostředí v (bezrozměrná veličina)
  - charakterizuje optické prostředí
  - c = $3{\cdot}10^8$ m$\cdot$s^{-1} (rychlost světla ve vakuu)

$$n = \frac{c}{v} \quad (5)$$

Tabulka 1: Určete rychlosti světla v daných prostředích

prostředí	index lomu n	rychlost $v = \frac{c}{n}$
vzduch	1,0	
voda	1,33	
sklo	1,5	
diamant	2,42	

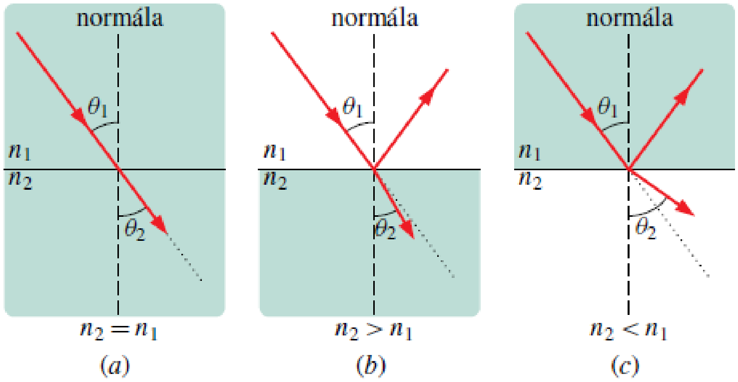
- **zákon odrazu**:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (6)$$

- **zákon lomu (Snellův zákon)**:

$$n_1 \sin\alpha = n_2 \sin\beta \quad (7)$$

  - **Příklad 1.1.: Rychlost světla v kapalině je 2,14$\cdot 10^5$ km$\cdot$s^{-1} a světlo na její hladinu dopadá ze vzduchu pod úhlem 45°. Jaký je úhel lomu světla?** *(30,3°, lom ke kolmici)*
  - **Příklad 1.2.: Světlo dopadá ve vakuu na povrch skleněné desky. Ve vakuu svírá paprsek úhel 32,0° s normálou k povrchu, zatímco ve skle svírá s normálou úhel 21,0°. Jaký je index lomu skla?** *(1,48)*
  - projděte si příklady číslo 5 a 6 ze sbírky příkladů na cvika



Obr. 34.18 Světlo lámající se z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2. (a) Paprsek se neláme (ani neodráží), když $n_1 = n_2$. „Lomené“ světlo se šíří v *nezměněném směru* (tečkovaná čára). (b) Paprsek se lomí směrem k normále, když $n_1 < n_2$, a (c) od normály, když $n_1 > n_2$.

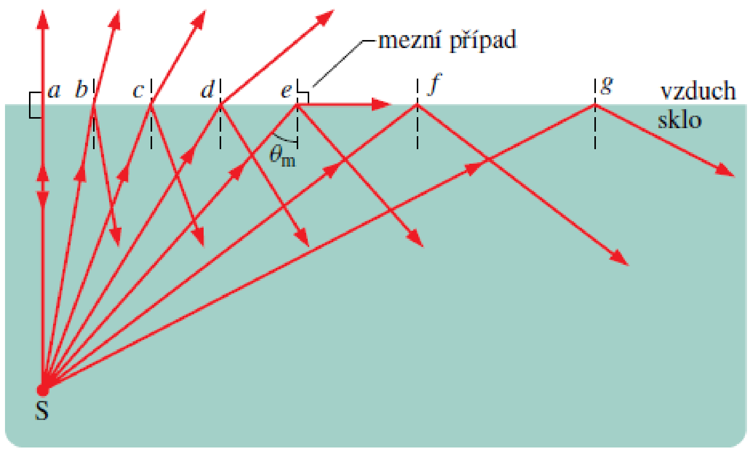
Obrázek 3: (převzato z: D. HALLIDAY, R. RESNICK, J. WALKER, *Fyzika*, Brno: VUTIUM, 2000)

- **mezní úhel** α_m:
  - nastává při průchodu paprsku z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího ($n_1 > n_2$)
  - při mezním úhlu dopadu α_m je úhel lomu β roven 90°
  - ze zákona lomu dostaneme pro $\beta = 90°$:

$$n_1 \sin \alpha_m = n_2 \tag{8}$$

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{9}$$

  - při úhlu dopadu $\alpha > \alpha_m$ nastává úplný odraz



Obr. 34.24 Úplný (totální) vnitřní odraz světla z bodového zdroje S umístěného ve skle nastává při všech úhlech dopadu větších než mezní úhel θ_m. Při mezním úhlu se lomené světlo šíří podél rozhraní vzduch-sklo.

Obrázek 4: (převzato z: D. HALLIDAY, R. RESNICK, J. WALKER, *Fyzika*, Brno: VUTIUM, 2000)

  - projděte si příklady číslo 7, 8, 9 ze sbírky příkladů na cvika

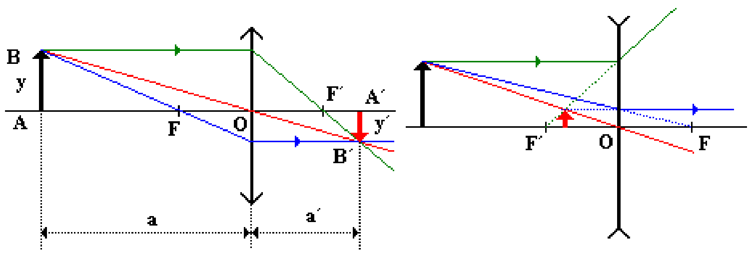
- **Brewsterův úhel ϕ_B:**
  - souvisí s polarizací světla při jeho dopadu na dielektrika
  - při dopadu světla z prostředí o indexu lomu n_1 na prostředí o indexu lomu n_2 pod úhlem ϕ_B dochází k polarizaci světla a odráží se jen S-polarizované světlo

$$\phi_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{10}$$

  - **Příklad 1.4.: Chceme použít skleněnou destičku s indexem lomu $n = 1{,}57$ k polarizaci světla ve vzduchu. Při kterém úhlu dopadu bude odražené světlo úplně polarizováno?** *(57,5°)*

3 Tenké čočky

- vytvoření obrazu pomocí význačných paprsků (viz prezentace k přednáškám)



Obrázek 5: Zobrazení spojkou a rozptylkou *(zrdoj: fyzika.jreichl.com)*

- vlastnosti obrazů čoček – spojky a rozptylky
  - rozptylka ($f < 0$) vytváří vždy vzpřímený, zdánlivý a zmenšený obraz
  - u spojky ($f > 0$) záleží vlastnosti obrazu na předmětové vzdálenosti

Tabulka 2: Doplňte tabulku: vlastnosti obrazů spojek ($f > 0$)

předmětová vzdálenost	obrazová vzdálenost	doplňte vlastnosti obrazu
$a > 2f$	$2f > a' > f$	
$a = 2f$	$a' = 2f$	
$2f > a > f$	$a' > 2f$	
$a = f$	$a' \to \infty$	
$f > a > 0$	$a' < 0$	

- zobrazovací rovnice tenké čočky

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \tag{11}$$

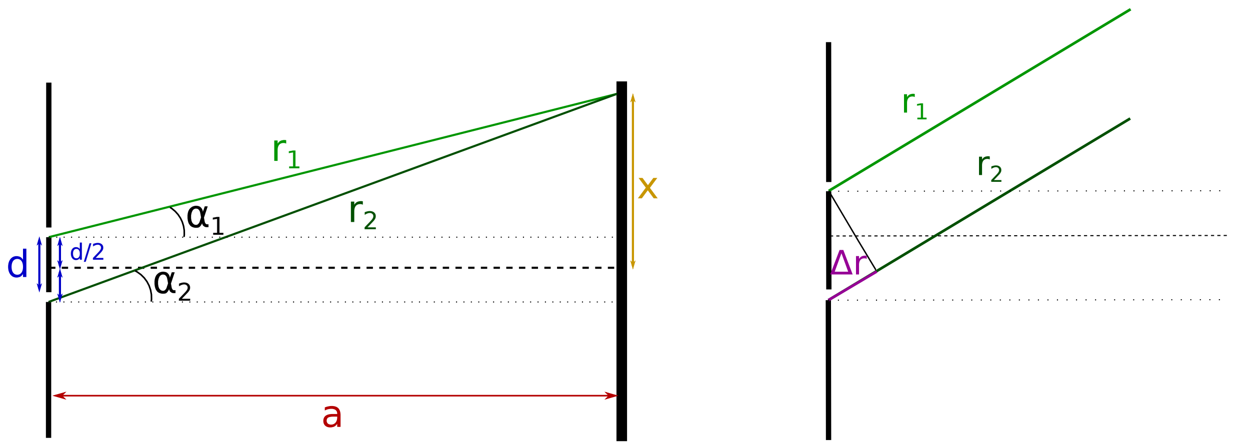
- příčné zvětšení

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{a'-f}{f} = -\frac{f}{a-f} \tag{12}$$

- projděte si příklady číslo 11, 12, 13, 14 ze sbírky na cvika

4 Interference – Youngův experiment

- experimentální důkaz vlnové povahy světla
- světlo dopadá na dvě symetrické štěrbiny, mezi kterými je vzdálenost d a na stínítku ve vzdálenosti a pozorujeme interferenční jev (skládání vln)
- obě štěrbiny jsou podle Huygensova principu zdrojem elementárního vlnění a tyto vlny se skládají na stínítku
- vlny z obou štěrbin jsou vůči sobě posunuty o dráhový rozdíl $\Delta r = r_2 - r_1$, kde r_1 a r_2 jsou vzdálenosti štěrbin a daného místa na stínítku



(a) Nákres dvojštěrbinového experimentu

(b) Detail k vysvětlení dráhového rozdílu Δr

- výsledkem je, že interferenční obrazec obsahuje minima a maxima intenzity, která závisí na dráhovém rozdílu Δr
- pro maxima platí: $\Delta r = \lambda M$
- pro minima platí: $\Delta r = \lambda \left(\frac{1}{2} + m \right)$
- M a m určují řád maxima a minima, jsou to přirozená čísla včetně nuly

4.1 Odvození dráhového rozdílu (pro zájemce)

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \sqrt{a^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2} - \sqrt{a^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2} = a\left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{a} + \frac{d}{2a}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{x}{a} - \frac{d}{2a}\right)^2}\right) \tag{13}$$

- v obou závorkách máme výraz $\sqrt{1+y} = \sqrt{1 + \underbrace{\left(\frac{x}{a} \pm \frac{d}{2a}\right)^2}_{\text{y}}}$
- výraz s odmocninou lze rozvinout do Taylorova rozvoje a za podmínky: $d \ll \sqrt{a\lambda}$ jej lze linearizovat, zanedbáním kvadratických a vyšších členů v rozvoji dostaneme:

$$\sqrt{1+y} \approx 1 + \frac{1}{2}y \qquad \sqrt{1+\left(\frac{x}{a} \pm \frac{d}{2a}\right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{x}{a} \pm \frac{d}{2a}\right)^2 \tag{14}$$

$$\Delta r \approx a\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{x}{a} + \frac{d}{2a}\right)^2 - 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x}{a} - \frac{d}{2a}\right)^2\right) = ... = \frac{xd}{a} \tag{15}$$

- projděte si příklady číslo 15, 16, 17 ze sbírky na cvika

5 Interference na tenké vrstvě – kolmý dopad

- při kolmém odrazu na rozhraní může dojít ke změně fáze a mohou nastat dvě situace:
  - při dopadu vlny na rozhraní z opticky řidšího do optiky hustšího prostředí dochází při odrazu ke změně fáze o π ($\Delta\phi = \pi$), to odpovídá dráhovému rozdílu $\Delta r = \frac{\lambda}{2}$
  - při dopadu vlny na rozhraní z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí ke změně fáze nedochází ($\Delta\phi = 0$)
- **optická dráha** l zohledňuje vlastnosti prostředí, kterým se světlo šíří, máme-li trubku délky d, která má index lomu n, tak optická dráha pro světlo procházející touto trubkou je

$$l = d \cdot n \tag{16}$$

- přírůstek fáze vlny je $\Delta\phi = k \cdot l = \frac{2\pi}{\lambda}dn$
- při interferenci na tenké vrstvě při kolmém dopadu je nutné řešit dráhový rozdíl i fázový rozdíl při odrazu na rozhraních, pro fázový rozdíl $\Delta\phi$ a dráhový rozdíl Δr platí následující přepočet

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r \tag{17}$$

Návod k řešení příkladu 18) ze sbírky na cvika:

Mýdlová bublina vytvoří uvnitř drátěného oka vodní film o tloušťce 320 nm. Index lomu vody je n = 1,33 a index lomu vzduchu je n_0 = 1,00.

a) Jakou barvu bude mít bílé světlo po kolmém odrazu od tohoto filmu? *(zelená)*

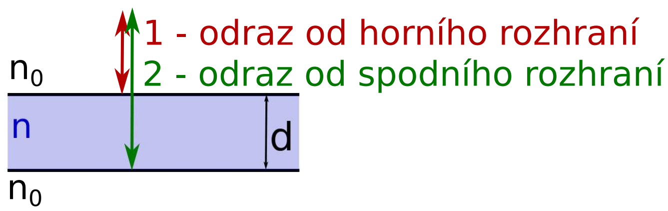
b) Vypočítejte vlnové délky $\lambda_{\max 1}$, $\lambda_{\max 2}$, $\lambda_{\min 1}$, $\lambda_{\min 2}$ pro první dvě maxima a pro první dvě minima intenzity odraženého světla. *(1702 nm, 567 nm, 851 nm, 427 nm)*

c) Určete změnu fáze ϕ_1 při odrazu na prvním a ϕ_2 při odrazu na druhém rozhraní. *($\Delta\phi_1 = \pi$, $\Delta\phi_2 = 0$)*

12) bílé světlo ... $\langle 370, 760 \rangle$ nm

- při odrazu na prvním (horním) rozhraní dojde ke změně fáze o $\Delta\phi = \pi$, jelikož platí $n_0 < n$, této změně fáze odpovídá dráhový rozdíl Δr_1

$$\Delta\phi = \pi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_1 \quad \longrightarrow \quad \Delta r_1 = \frac{\lambda\pi}{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \tag{18}$$



- při odrazu na druhém (spodním) rozhraní ke změně fáze nedojde, jelikož platí $n > n_0$, $\Delta r_2 = 0$
- dráhový rozdíl mezi první a druhou vlnou je $\Delta r_3 = 2dn$
- celkový dráhový rozdíl je: $\Delta r = \Delta r_1 + \Delta r_2 + \Delta r_3 = \frac{\lambda}{2} + 0 + 2nd = \frac{\lambda}{2} + 2dn$
- hledáme maximum, máme tedy podmínku $\Delta r = \frac{\lambda}{2} + 2dn = \lambda M$ a hledáme vhodné λ (vlnovou délku určete v metrech a nanometrech)

$$\lambda \left(M - \frac{1}{2} \right) = 2dn \qquad \longrightarrow \qquad \lambda = \frac{2dn}{\left(M - \frac{1}{2} \right)} \tag{19}$$

$$M = 1 \ \ldots \ \lambda_{M1} = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \tag{20}$$

$$M = 2 \ \ldots \ \lambda_{M2} = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \tag{21}$$

- pro minima platí interferenční podmínka $\Delta r = \lambda \left(m + \frac{1}{2} \right)$, kde $\Delta r = \frac{\lambda}{2} + 2dn$ a opět hledáme vhodné λ (vlnovou délku určete v metrech a nanometrech)

$$\lambda m = 2dn \qquad \longrightarrow \qquad \lambda = \frac{2dn}{m} \tag{22}$$

$$m = 1 \ \ldots \ \lambda_{m1} = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \tag{23}$$

$$m = 2 \ \ldots \ \lambda_{m2} = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \tag{24}$$

- projděte si příklady číslo 18 a 19 ze sbírky na cvika