

Ústav fyzikálního inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

GEOMETRICKÁ OPTIKA

Přednáška 2

Obsah

- Základy geometrické (papřskové) optiky

Úvod – co to je světlo?

Postuláty geometrické optiky

Index lomu prostředí

Fermatův princip

Zákon odrazu a lomu



Vincent Van Gogh
(30. března 1853,
Zundert – 29.
července 1892,
Auvers-Sur-Oise)
byl nizozemským
malířem a kreslířem.

Výsledkem myšlení nemá být pocit, ale čin.

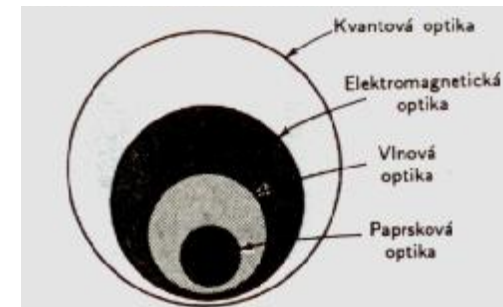
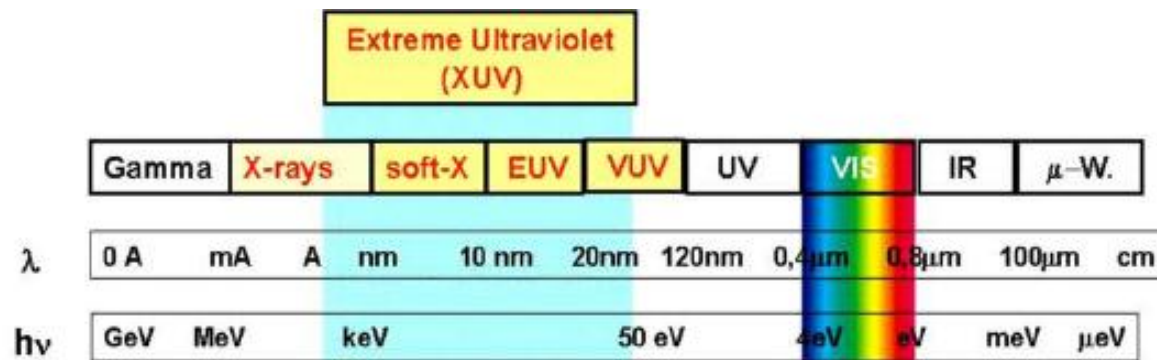
Chci používat barvy, které navzájem kontrastují, aby každá z nich zářila ještě výrazněji, aby kontrastovaly jako muž se ženou.

Zdroj: <http://cs.wikiquote.org/wiki/>

Úvod

- **Světlo** je:

Elektromagnetické vlnění. Šíří se ve tvaru dvou navzájem spjatých vektorových vln, vlny elektrického pole a vlny pole magnetického.



- Mnohé optické jevy je možné popsat skalární teorií, ve které světlo lze popsat pomocí jediné skalární funkce – **vlnová optika**.
- Když se světelné vlny šíří skrze předměty, jejichž rozměry jsou mnohem větší než je vlnová délka a okolo nichž je vlnová podstata slabě rozeznatelná -> může být jeho chování popsáno pomocí paprsků splňujících geometrická pravidla – **paprsková (geometrická) optika**.

Úvod

- Elektromagnetické vlnění (světlo) se většinou charakterizuje buď frekvencí (f) nebo vlnovou délkou (λ). Platí $f = \frac{c}{\lambda}$,
kde c je rychlost světla (v daném prostředí).
- Světlo má částicovou i vlnovou povahu (je emitováno ve formě jednotlivých světlených balíčků – kvant které se nazývají fotony). Energie fotonu je definován jako: $E = hf$, kde h je Planckova konstanta.
- Po dosažení dostaneme: $E = \frac{hc}{\lambda}$, tzn. že energie fotonu s kratší vlnovou délkou roste.

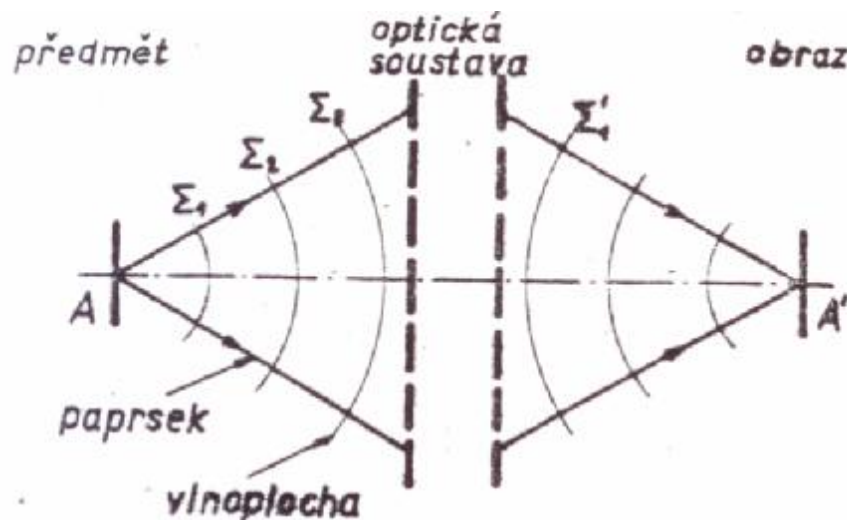
To je jeden z důvodů, proč obecně absorpce záření s kratší vlnovou délkou poškozuje živou tkáň víc než záření s delší vlnovou délkou .

Například vývin šedého zákalu a zhoubného kožního nádoru může být podporován nepříznivým vlivem krátkovlnného ultrafialového (UV) záření.

Definice základních pojmů

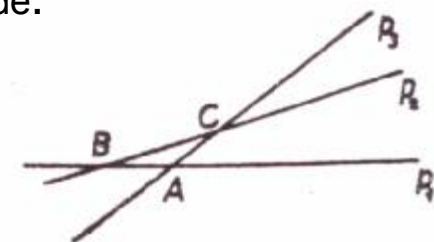
- EM Teorie – světlo se šíří od zdroje jako příčné elektromagnetické vlny podél čar, kolmých na vlnoplochu. Tyto čáry nazýváme světelnými paprsky.
- V transparentním ale nehomogenním prostředí jsou paprsky zakřiveny (zemská atmosféra).
- V anizotropních* prostředí (většina krystalů) není směr paprsků vždy kolmý k vlnoplochám.
- V homogenních, isotropních látkách, jakých se používá k výrobě optických prvků jsou paprsky přímkami, které sice na rozhraní dvou prostředí mohou náhle změnit směr šíření, ale zůstávají dále přímkami.

* Anizotropie je vlastnost, kterou se označuje závislost určité veličiny na volbě směru. Opakem anizotropie je izotropie.



Svazek paprsků – soubor světelných paprsků kolmých k vlnoploše a vyplňujících určitou její část.

Homocentrický svazek – kužel paprsků které se protínají v jediném bodě.

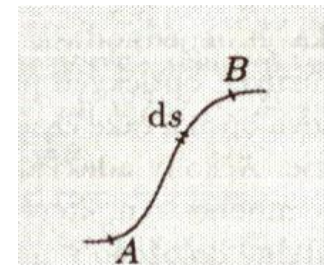


Paprsková (geometrická) optika - POSTULÁTY

- Světlo se šíří ve formě paprsků. Paprsky jsou emitovány světelnými zdroji a mohou být pozorovány, když dosáhnou optického detektoru.
- Optické prostředí je charakterizováno veličinou $n \geq 1$, která se nazývá (absolutní) **index lomu**. Je **poměrem** rychlosti světla ve vakuu c_0 a rychlosti světla v prostředí c . V důsledku toho **čas**, který světlo potřebuje, aby prošlo vzdálenost d , se rovná $d/c = nd/c_0$. Je tedy **úměrné** součinu nd , známému jako **délka optické dráhy**.
- V nehomogenním prostředí je index lomu $n(\mathbf{r})$ funkcí polohy $\mathbf{r} = (x, y, z)$.

Délka optické dráhy mezi dvěma body A a B je tedy

$$\text{délka optické dráhy} = \int_A^B n(\mathbf{r}) ds, \quad \text{kde}$$

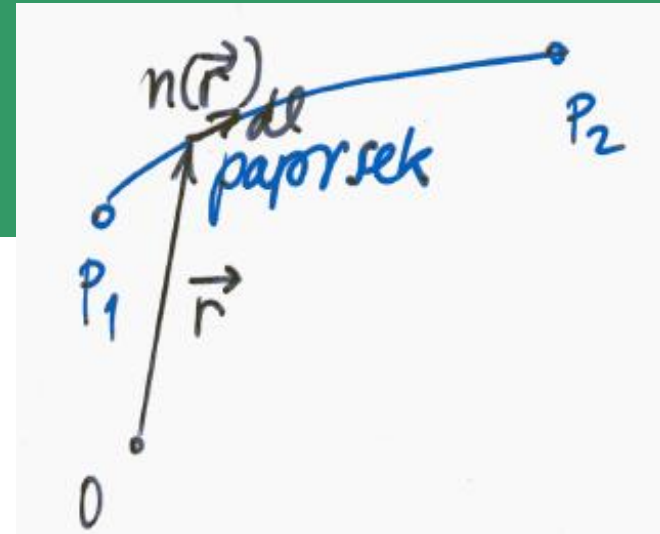


ds je diferenční element délky podél dráhy. **Čas** potřebný k tomu aby světlo prošlo z A do B je **úměrný délce optické dráhy**.

Index lomu prostředí - poznámky

- Velikost indexu lomu závisí na vlnové délce, teplotě a tlaku
- Za normálních podmínek teploty a tlaku (0 °C, 1013 hPa) je pro vlnovou délku $\lambda = 589,3$ nm (sodíková výbojka) index lomu vzduchu $n_{vz,\lambda} = 1,0002920$.
- Indexy lomu optických materiálů jsou udávány vzhledem ke vzduchu. Pro převážnou většinu případů optických problémů jsou zcela vyhovující, a proto do budoucna při praktických výpočtech budeme výhradně používat tyto.
- V případě, kdy je žádoucí znalost absolutních indexů lomu pro konkrétní vlnovou délku, mohou se určit tyto indexy pomocí Cauchyho vzorce, nebo vzorce Cornuova (více v cvičení).

Fermatův princip



- Délka optické dráhy
$$L = \int_{P_1}^{P_2} n(\vec{r}) dl,$$

kteřou se šíří paprsek světla mezi dvěma body P_1 a P_2 je stacionární, tzn. že první variace dL vzhledem k sousedním délkám křivek je rovna

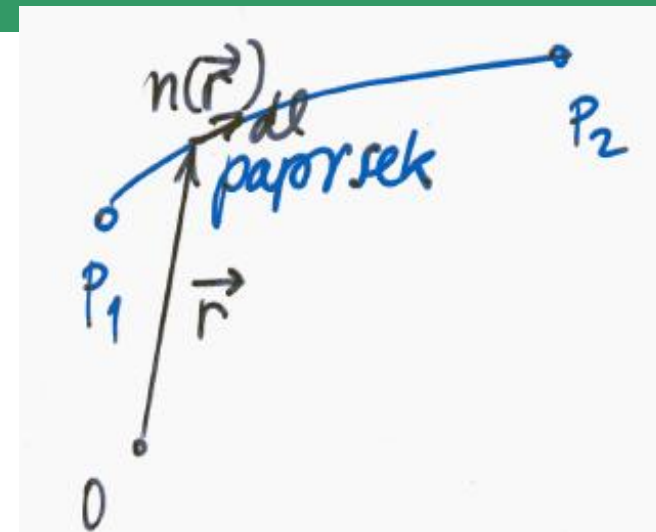
nule. Protože $dl/c = dt$ je čas, který potřebuje světlo šířící se rychlostí c

na uražení dráhy dl , a jelikož $n(\vec{r}) = c_0 / c(\vec{r})$, pak $L = c_0 \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{c} dl$, kde integrál $\int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{c} dl$ je roven času který potřebuje světlo

k uražení dráhy mezi body P_1 a P_2 .

Fermatův princip: Světelné paprsky spojují dva body podél takových čar, které odpovídají stacionárnímu času, potřebnému k uražení potřebné optické dráhy.

Fermatův princip



Světelné paprsky spojují dva body podél takových čar, které odpovídají stacionárnímu času, potřebnému k uražení potřebné optické dráhy.

Toto vyjadřuje extrémální charakter času (maximum nebo minimum) a nevylučuje možnost existence několika cest, spojující dva body během stejného času, tedy cest, majících **stejnou optickou délku**.

Pierre de Fermat



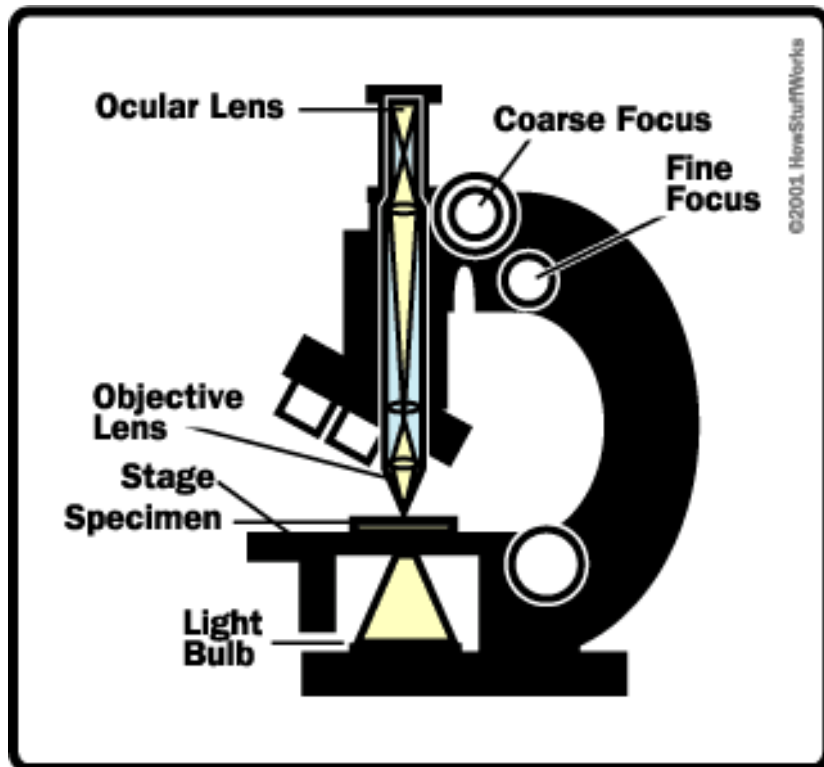
Pierre de Fermat se narodil 17. 8. 1601. Pocházel z francouzského šlechtického rodu, z městečka Beaumont de Lomagne. Vystudoval práva a také se jako právník živil. Matematikou se zabýval jen jako amatér pro vlastní potěšení. Přesto dosáhl vynikajících výsledků hned v několika oblastech. Podobně jako řada jeho současníků v 17. století i **Fermat** nalézal inspiraci při studiu knih, které se dochovaly z antických dob. Velký obdiv budily zejména spisy čtyř starých řeckých matematiků – Euklida, Archimeda, Apollonia a Diofanta.

Při studiu Apolloniova díla o kuželosečkách Fermat vynalezl úplně nový matematický obor - analytickou geometrii. Pro další rozvoj matematiky to byl velmi důležitý objev, neboť umožňoval vyjádřit geometrické útvary číselně a popsat křivky pomocí rovnic. Nenazývá se ovšem Fermatův, nýbrž kartézský, podle jiného francouzského matematika a filozofa Descarta (latinsky Kartezius).

Oba muži vytvořili analytickou geometrii nezávisle a prakticky zároveň, ale Fermat své výsledky jen zřídka publikoval a tak mnohdy přišel o prvenství. Většina jeho matematických prací byla zveřejněna až posmrtně. Podobně tomu bylo i s jeho studiem křivek, při kterém se těsně přiblížil k vytvoření integrálního a diferenciálního počtu. Skutečnými zakladateli tohoto oboru se stali o něco později Newton a Leibnitz.

Další významný Fermatův přínos spočívá ve studiu pravděpodobnosti. Touto otázkou se zabýval už v mládí společně se svým přítelem, matematikem a filozofem Blaisem Pascalem. V r. 1653 Pascal narazil na tento problém znovu, když ho jeden známý požádal, aby odhadl šanci na vítězství při hře v kostky. V následujícím roce si Pascal s Fermatem vyměnili sérii dopisů, ve kterých se fakticky zrodila teorie pravděpodobnosti. Inspirovali tím řadu dalších matematiků a nový obor, u jehož počátků stojí hazardní hry, byl na světě.

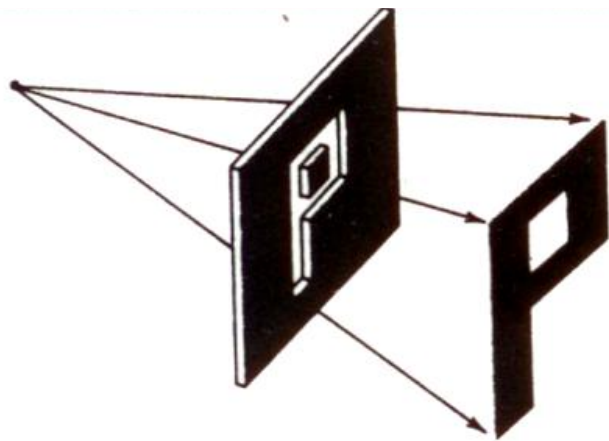
Zákony odrazu a lomu



- Šíření v homogenním prostředí
- Odraz (od zrcadla)
- Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí (s odlišným indexem lomu)

Šíření v homogenním prostředí

- Homogenní prostředí \rightarrow index lomu n je všude stejný, stejně jako rychlost světla.
- Dráha s minimálním časem (Fermatův princip) je proto dráhou s minimální vzdáleností.
- Dráha s minimální vzdáleností mezi dvěma body je přímka (Heroův princip), takže **v homogenním prostředí paprsky šíří přímočaře.**



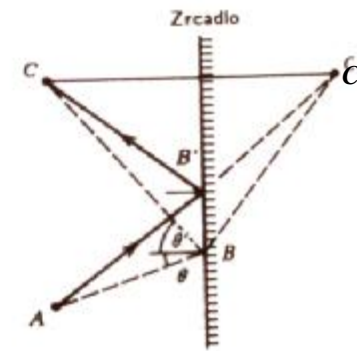
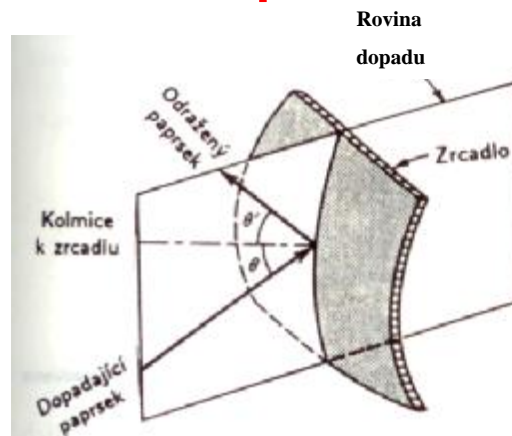
- Světelné paprsky se šíří přímočaře. Stíny jsou dokonalými průměty překážek.

Odraz od zrcadla

- Světlo se od zrcadel odráží tak, že splňuje zákon odrazu:

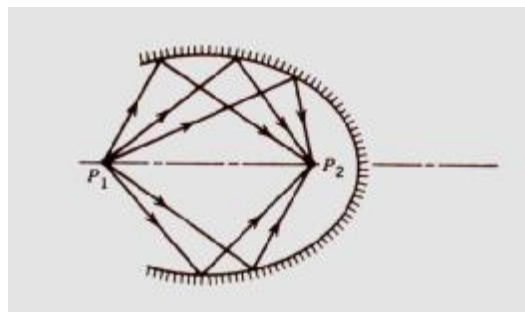
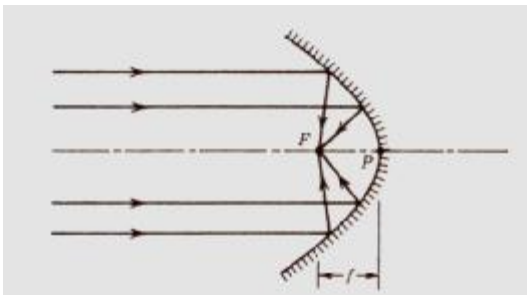
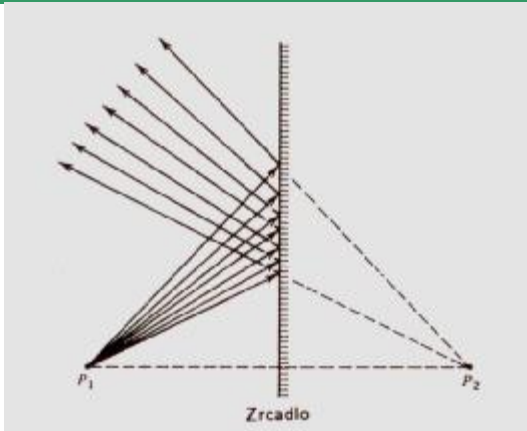
Odražený paprsek leží v rovině dopadu; úhel odrazu se rovná úhlu dopadu.

- Rovina dopadu → rovina vytvořená dopadajícím paprskem a normálou k povrchu v bodě dopadu.



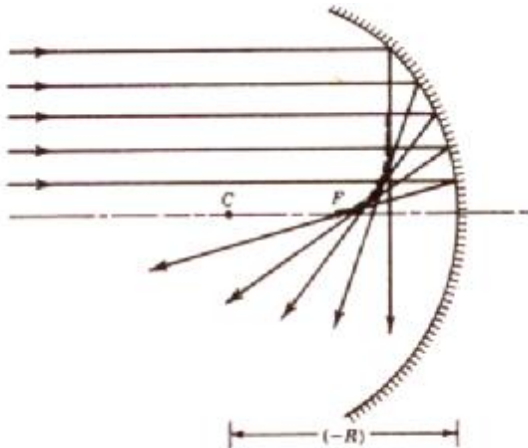
- Důkaz: Zkoumejme paprsek který se šíří z bodu A do bodu C po odrazu od rovinného zrcadla. Podle Heroova principu musí být vzdálenost $|AB| + |BC|$ minimální. Je-li C' zrcadlový obraz C, pak $|BC| = |BC'|$, takže $|AB| + |BC'|$ musí být minimální. To nastane, když je ABC' přímka, tj. když B je totožné s B' a $\theta = \theta'$.

Jednoduché optické prvky - Zrcadla



- **Rovinná zrcadla** odráží paprsky vycházející z bodu P_1 tak, že odražené paprsky jeví jako vycházející z bodu P_2 , který leží za zrcadlem a nazývá se obraz.
- **Parabolická zrcadla** soustřeďují všechny paprsky dopadající rovnoběžně s osou paraboloidu do jediného bodu zvané **ohnisko**. Vzdálenost $|PF| = f$ se nazývá **ohnisková vzdálenost**. (kolektory/reflektory světla)
- **Eliptická zrcadla** odrážejí všechny paprsky z jednoho z jeho dvou ohnisek (např. P_1) a zobrazují toto ohnisko do druhého ohniska. Vzdálenosti které světlo proběhne z bodu P_1 do bodu P_2 podle kterékoli dráhy, jsou v souladu s Heroovým principem stejné.

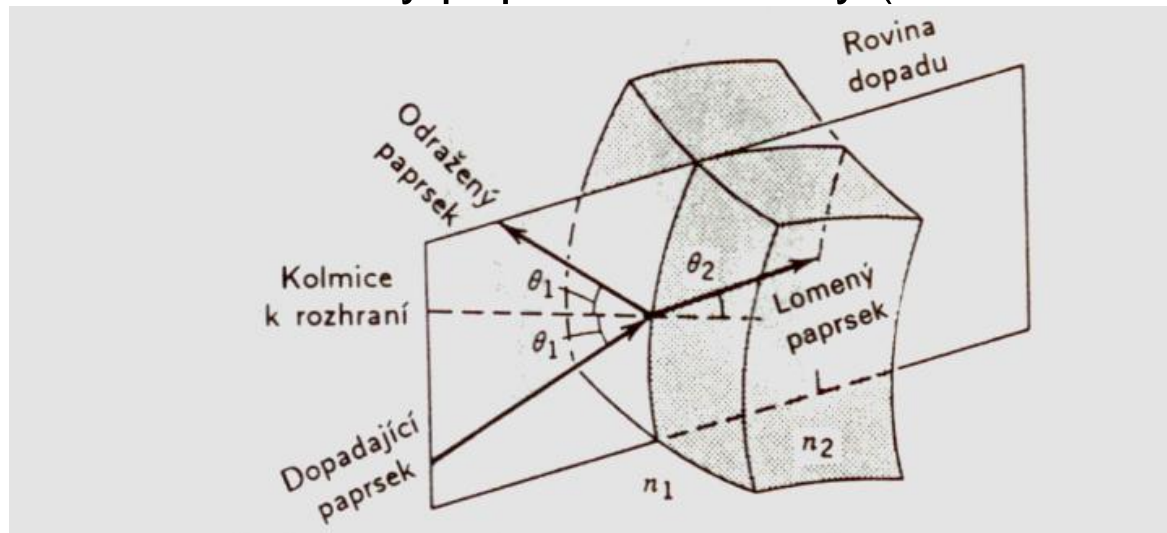
Jednoduché optické prvky - Zrcadla



- **Sférická zrcadla**- snadnější výroba, ale: rovnoběžné paprsky protínají osu v různých bodech. Nicméně rovnoběžné paprsky blízké k ose jsou přibližně fokusovány do jediného bodu F ve vzdálenosti $(-R/2)$ od středu zrcadla C . Podle konvence je R záporné pro dutá zrcadla a kladné pro vypuklá zrcadla.
- **Paraxiální paprsky odražené od sférických zrcadel**
- Paprsky, které svírají malé úhly ($\sin\theta \approx \theta$) s osou zrcadla, se nazývají **paraxiální paprsky**. V **paraxiální aproximaci**, kdy uvažujeme pouze paraxiální paprsky, má sférické zrcadlo podobné fokusační vlastnosti jako parabolické zrcadlo a zobrazovací vlastnosti podobné jako eliptické zrcadlo.
- Sférické zrcadlo o poloměru R proto působí **jako parabolické zrcadlo o ohniskové vzdálenosti $f = R/2$** .
- Všechny **paraxiální paprsky vycházející z určitého bodu na ose** sférického zrcadla jsou odraženy a **soustředěny do jednoho odpovídajícího bodu na ose**.

Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí

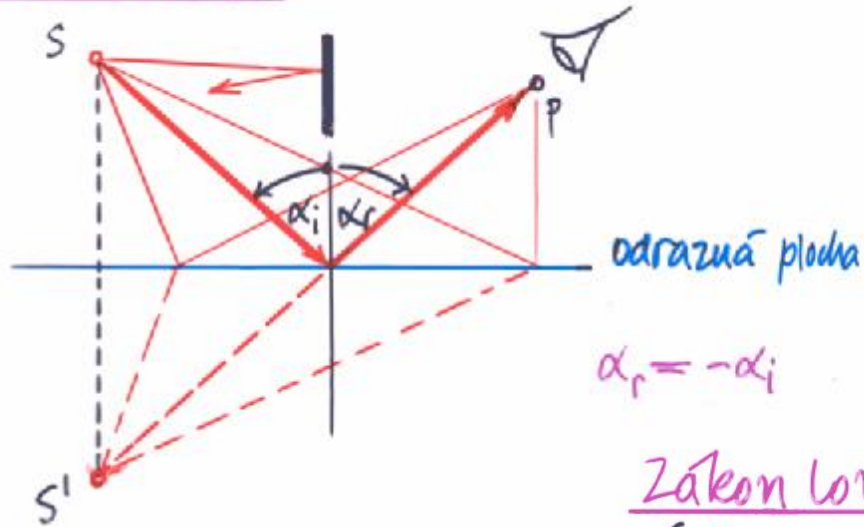
- Na rozhraní mezi dvěma prostředími o indexech lomu n_1 a n_2 se dopadající paprsek štěpí na dva – odražený paprsek a lomený (nebo procházející) paprsek.



- Odražený paprsek splňuje zákon odrazu. Lomený paprsek splňuje zákon lomu: **Lomený paprsek leží v rovině dopadu; úhel lomu θ_2 se vztahuje k úhlu dopadu Snellovým zákonem.**
- Snellův zákon:
$$n_1 \sin q_1 = n_2 \sin q_2$$

Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí

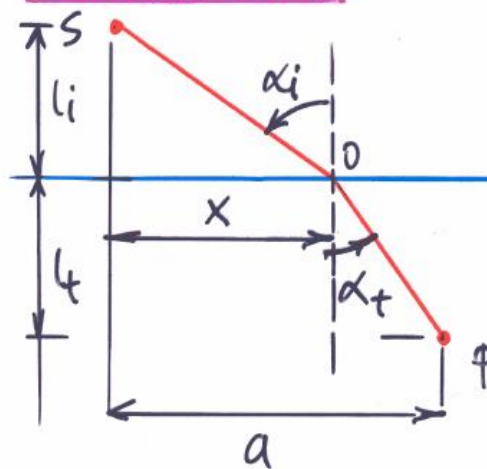
Zákon odrazu



$$\alpha_r = -\alpha_i$$

Pozn.: úhly α_r a α_i měříme od kolmice k paprsku ve směru (proti směru) hodinových ručiček. Příslušný úhel je kladný (záporný). V obrázku α_i je záporný a α_r kladný.

Zákon lomu



$$n_i = \frac{c_0}{c_i}$$

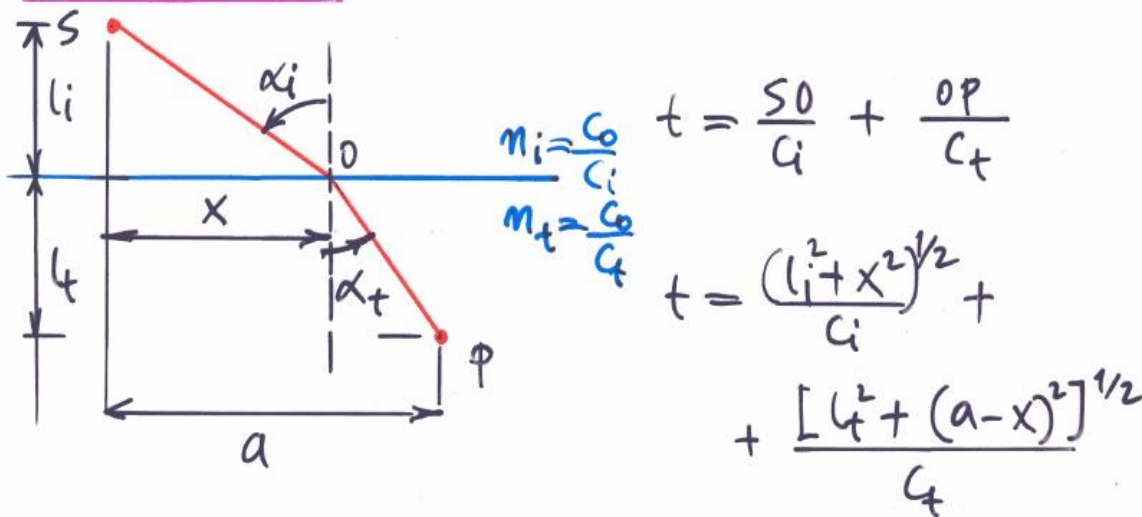
$$n_t = \frac{c_0}{c_t}$$

$$t = \frac{SO}{c_i} + \frac{OP}{c_t}$$

$$t = \frac{(l_i^2 + x^2)^{1/2}}{c_i} + \frac{[l_t^2 + (a-x)^2]^{1/2}}{c_t}$$

Lom na rozhraní dvou prostředí

Zákon lomu



Fermatův princip: Extremální hodnota $t(x)$ vzhledem ke změně x vede k podmínce $dt/dx = 0$, tzn.:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{x}{c_i (l_i^2 + x^2)^{1/2}} + \frac{-(a-x)}{c_t [l_t^2 + (a-x)^2]^{1/2}} = 0;$$

$$\frac{1}{c_i} \sin \alpha_i = \frac{1}{c_t} \sin \alpha_t, \text{ takže } n_i \sin \alpha_i = n_t \sin \alpha_t.$$



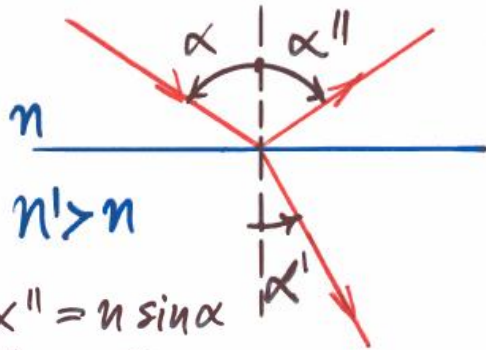
Matematickou formulaci zákona lomu podal první nizozemský fyzik Willebrord Snell (1591 – 1626); k uveřejnění došlo až r. 1662.

Zdroj:
<http://en.wikipedia.org/>

Úplný odraz

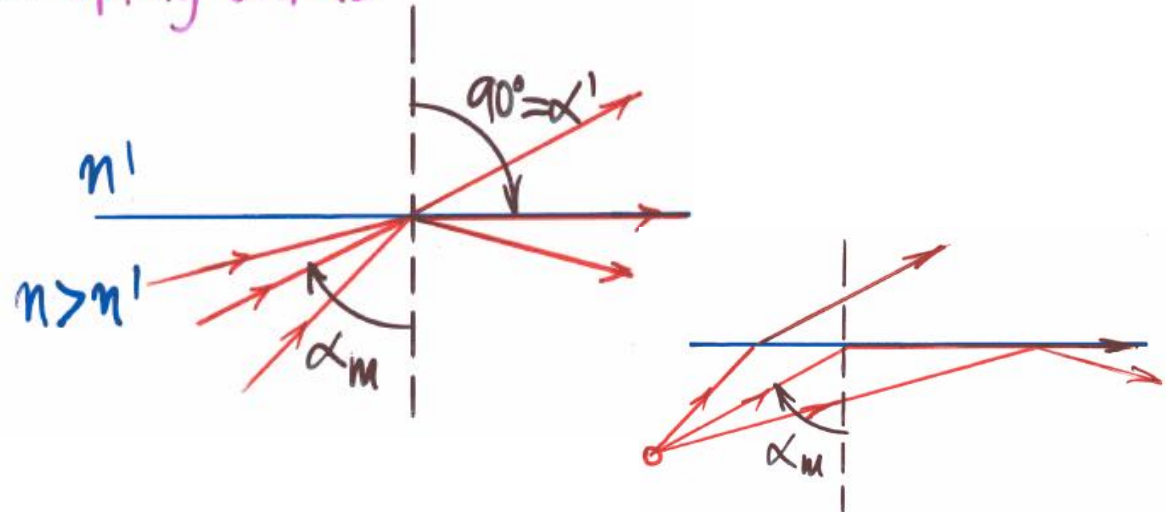
ODRAZ SVĚTLA

1.



$$\begin{aligned}n'' \sin \alpha'' &= n \sin \alpha \\n'' &= -n \\ \alpha'' &= -\alpha\end{aligned}$$

2. Úplný odraz



- Pro vnitřní lom ($n > n'$) je úhel lomu větší než úhel dopadu ($\alpha' > \alpha$), takže růstem α dosáhne hodnoty 90° jako první α' . To nastane pro **mezní úhel** α_m , pro který ze Snellova zákona plyne:

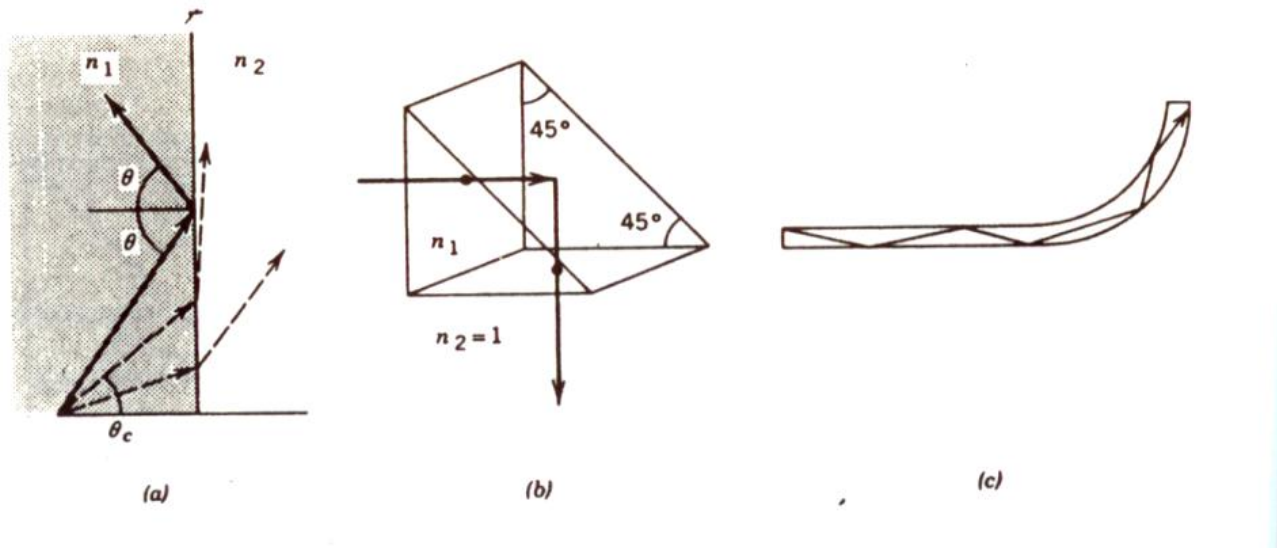
$$n \sin \alpha_m = n' \sin 90^\circ,$$

$$\sin \alpha_m = \frac{n'}{n}.$$

Příklad: Pro $n = 1,5$ (sklo) a $n' = 1$ je mezní úhel $\alpha_m = 42^\circ$.

Úplný odraz

- Úplný odraz je podstatou mnoha optických zařízení a soustav, jako jsou odrazné hranoly a optická vlákna.

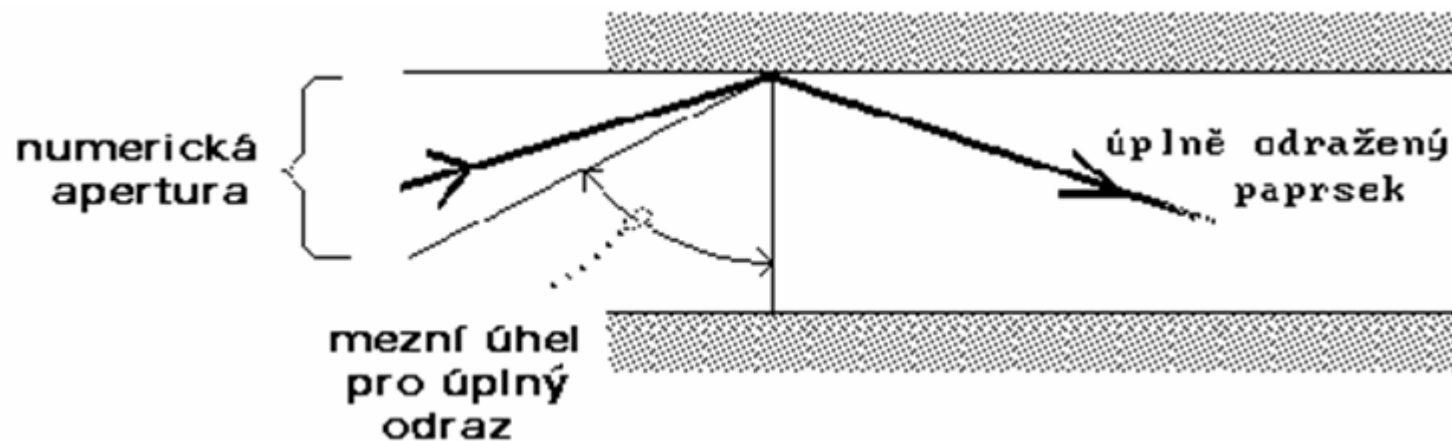


Optická vlákna

- Historie vláknové optiky se datuje asi 200 let zpět. Již v roce 1840 Daniel Collodon a Jacque Babinet prokázali, že světlo může být vedeno podél tryskající vody.
- Na začátku dvacátého století bylo zjištěno, že ohnuté skleněné tyčky vedou světlo. V roce 1930 Heinrich Lamm poprvé demonstroval přenos obrazu pomocí svazku optických vláken a tak to šlo dále až k dnešním optickým vláknům.
- Viditelné světlo, které má frekvenci přibližně 10^{14} Mhz a je velmi lákavé pro použití k přenosu dat. Přenášená číslicová data můžeme reprezentovat pomocí světelných impulzů (přítomnost impulzu může představovat např. log1, zatímco jeho nepřítomnost log0). Pro praktickou realizaci potřebujeme ovšem celý optický přenosový systém, složený ze zdroje, **přenosového média** a přijímače.
- Vlastním zdrojem světla může být obyčejná elektroluminiscenční dioda (**LED, Light Emitting Diode**) nebo nákladnější **laserová dioda**, které emitují světelné pulsy na základě přiváděného proudu. Detektorem na straně přijímače pak bývá **fotodioda**, která naopak převádí dopadající světelné impulzy na elektrické signály.
- Úkolem přenosového média je dopravit světelný paprsek od jeho zdroje k detektoru s co možná nejmenšími ztrátami. K tomuto účelu se používá **optické vlákno (optical fiber)** s tenkým **jádrem (core)** obaleným vhodným **pláštěm (cladding)**. Jádro má průměr v řádu jednotek až desítek mikrometrů (8-10, 50, 62,5 nebo 100), a je vyrobené nejčastěji z různých druhů skla, eventuelně i z plastu.

Optická vlákna

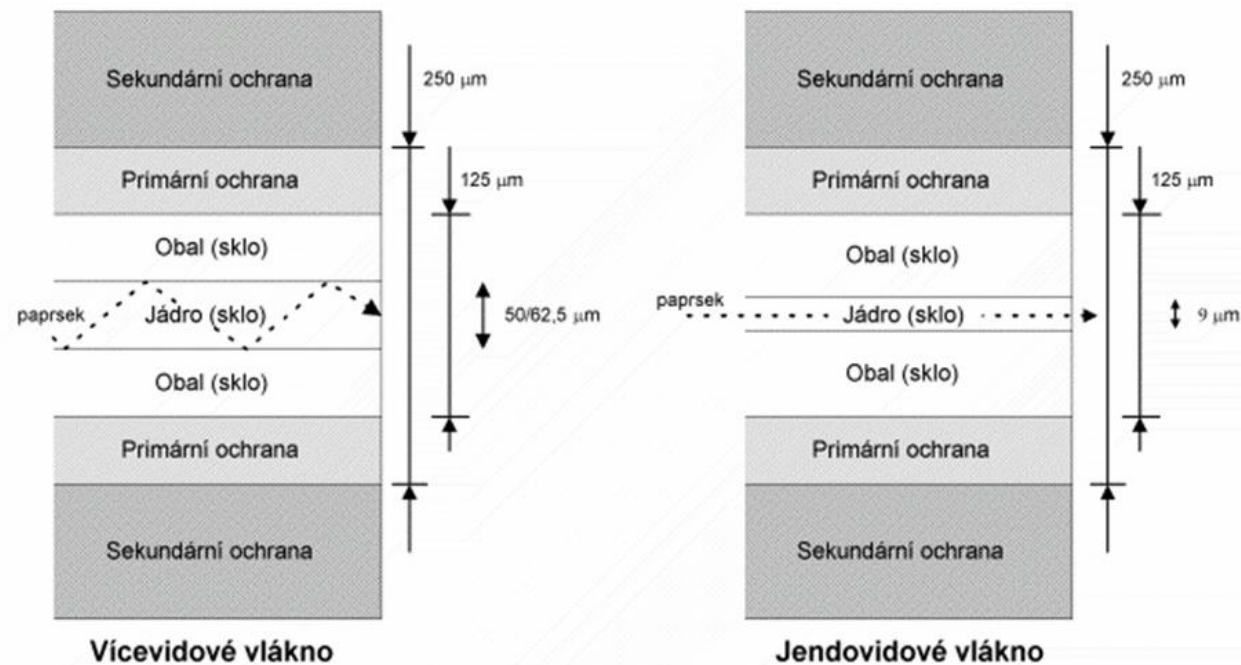
Rozmezí úhlů, pod kterými může světelný paprsek dopadat na optické vlákno tak, aby byl veden, definuje tzv. **numerickou aperturu**.



Optické vlákno je vždy simplexní spoj, tj. na jedné straně je vysílač a na druhé straně přijímač. Pro duplexní spoje (což je téměř vždy) je nutná dvojice vláken – pro každý směr jedno vlákno.

Optická vlákna

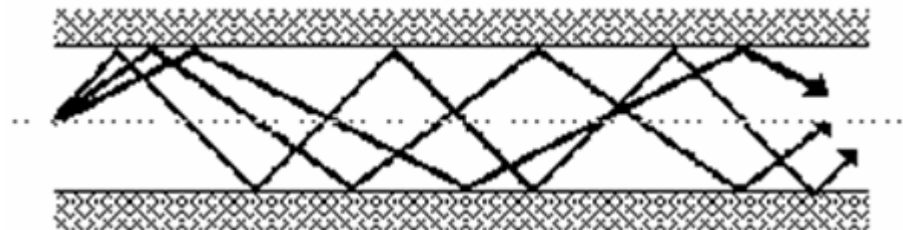
Optická vlákna jsou velmi citlivá na mechanické namáhání a ohyby. Jejich ochranu proto musí zabezpečovat svým konstrukčním řešením **optický kabel**, který kromě jednoho či více optických vláken obvykle obsahuje i vhodnou výplň, zajišťující potřebnou mechanickou odolnost.



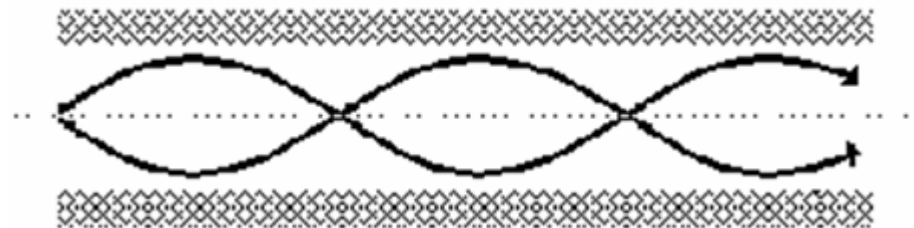
Na obr. je znázorněna ochrana optických vláken. Optická vlákna jsou nejprve obalena tzv. primární ochranou, která zajišťuje pružnost vlákna. Bez primární ochrany je vlákno velice křehké. Sekundární ochrana, pak zvyšuje ochranu vlákna. S odstraněnou sekundární ochranou se běžně setkáváme u optických propojovacích kabelů.

Optická vlákna – Mnohavidová vlákna

Způsob, jakým optické vlákno paprsek vede, záleží také na tom, jak se mění optické vlastnosti (konkrétně **index lomu**) na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm. Mění-li se skokem a je-li průměr jádra dostatečně velký (50-100 mikrometrů), jde o vlákno, schopné vést různé vlny světelných paprsků - tzv. **vidy (modes)**. Jde tedy o **mnohovidové vlákno (multimode fiber)**, v tomto případě se stupňovitým indexem lomu (step index fiber).



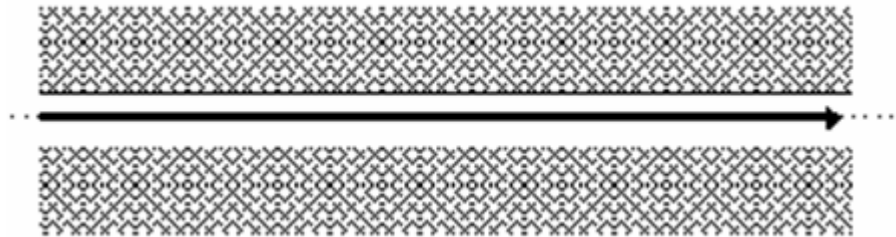
Pokud se index lomu na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm nemění skokem, ale plynule, jde o mnohovidové vlákno s tzv. **gradientním indexem lomu (graded index fiber)**, které přenášené vidy ohýbá.



Výhodou mnohovidových vláken je relativně nízká cena, snazší spojování, velká numerická apertura a možnost buzení luminiscenční diodou.

Optická vlákna – Jednovidová vlákna

Nejvyšších přenosových rychlostí (až Gigabity/sekundu na vzdálenosti do 1 km) lze dosáhnout na tzv. **jednovidových vláknech (single mode fiber)**, které přenáší jen jediný vid.



Schopnosti vést jediný vid se dosahuje buďto velmi malým průměrem jádra (řádově jednotky mikrometrů), nebo velmi malým poměrným rozdílem indexů lomu jádra a jeho pláště. Jednovidová vlákna jsou dražší než mnohovidová, lze je ovšem použít pro přenosy na delší vzdálenosti (až 100 km bez opakovače), než vlákna mnohovidová. Pro své buzení však již vyžadují laserové diody.

Úplný odraz

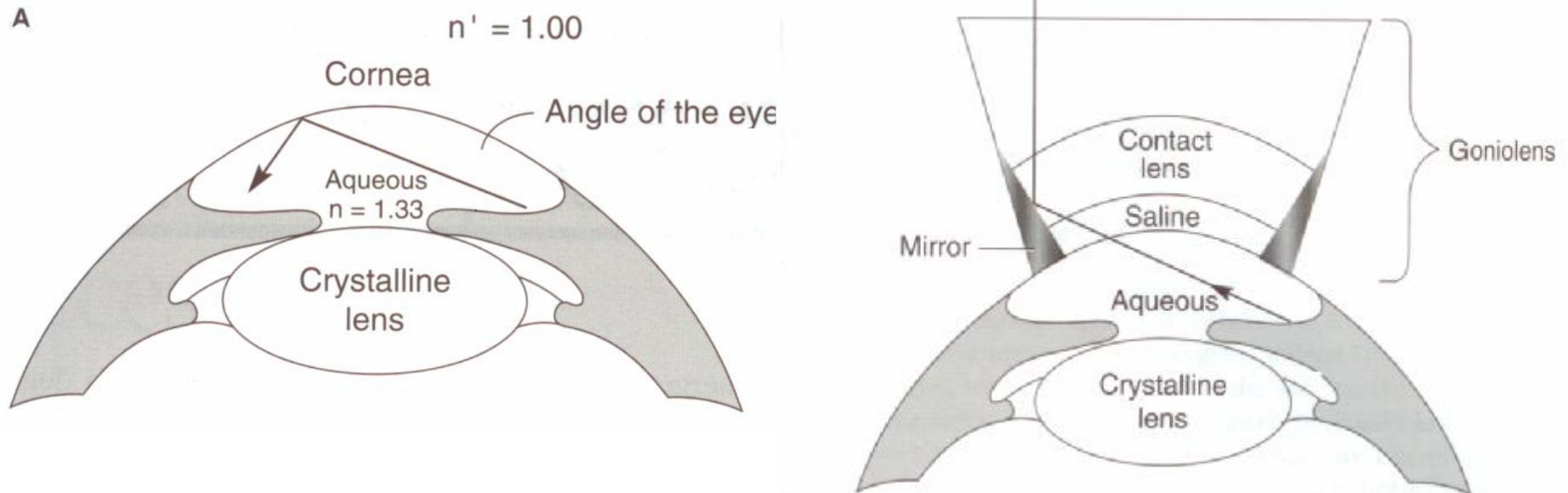


FIGURE 1-11A. A light ray emerging from the angle of the eye undergoes total internal reflection if the angle of incidence (at the cornea) exceeds ~ 49 degrees. (The light ray is traveling from the denser aqueous toward the rarer air.) Total internal reflection prevents the doctor from examining the angle unless he or she uses a device referred to as a *goniolens*. **B.** A goniolens allows visualization of the angle of the eye by reducing total internal reflection. A saline-like fluid is placed between the contact lens that constitutes the front of the goniolens and the cornea. Since the saline and the aqueous humor have about the same index of refraction, total internal reflection is substantially reduced, and the ray emerging from the angle passes out of the eye. It is then reflected by a mirror in the goniolens, thereby allowing examination of the angle. The doctor looks into the mirror and sees a reflection of the structures that constitute the angle. (This diagram is a simplification.)

Odraz při lomu

- Světlo, dopadající na vyleštěnou plochu jakéhokoliv průhledného prostředí se nejen láme, ale zčásti též odráží. Úlohu, jaká část dopadajícího světla se láme a jaká se odráží, řešil první Fresnel.
- Odrazivost (reflektivita): $R = \frac{\text{intenzita odraženého světla}}{\text{intenzita dopadajícího světla}}$
- Propustnost (transmisivita): $T = \frac{\text{intenzita lomeného světla}}{\text{intenzita dopadajícího světla}}$
- Ze zákona zachování energie platí: $T + R = 1$
- Koeficient odrazivosti od hladkého rozhraní dvou prostředí se určí z Fresnelových vztahů, které vedou ke vzorci:

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(a - a')}{\sin^2(a + a')} + \frac{\text{tg}^2(a - a')}{\text{tg}^2(a + a')} \right]$$

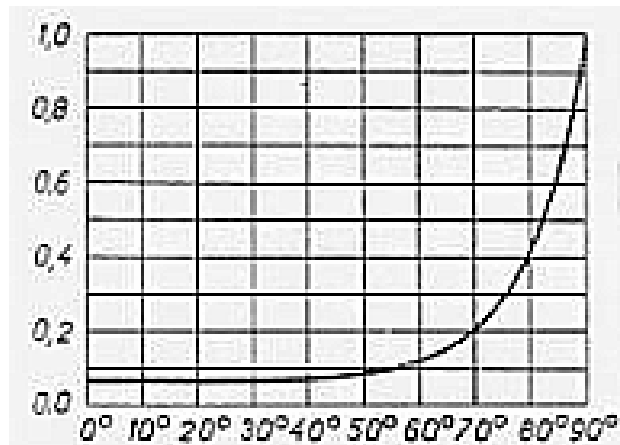


Francouzský fyzik Augustin-Jean Fresnel (1788 – 1827); významně přispěl ke vzniku vlnové teorie světla. Šíření světla studoval jak teoreticky, tak i experimentálně.

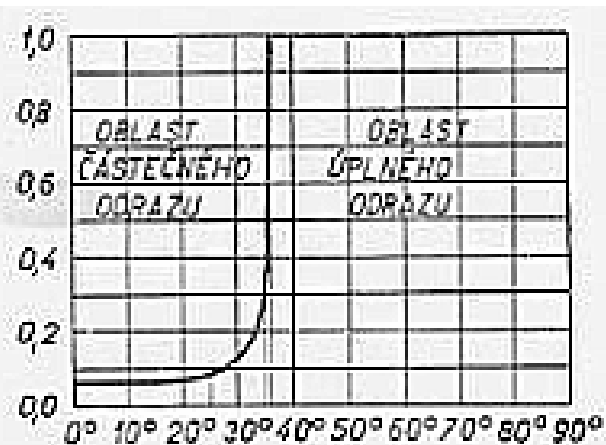
Zdroj:

<http://en.wikipedia.org/>

Odraz při lomu



Obr. 1.5. Odrazivost pro $n < n'$.



Obr. 1.6. Odrazivost pro $n > n'$.

$n = 1$ (vzduch),
 $n' = 1,71$ (sklo).

- Na počátku roste odrazivost velmi pomalu a do úhlu dopadu 20° až 30° je prakticky stejná.
- Pro malé úhly lze funkci sinus a tangens nahradit hodnotami uhlů v radiánech. Koeficient odrazivosti pak můžeme určit jako: $R = \left(\frac{a - a'}{a + a'} \right)^2$, a použitím zákona lomu pro malé úhly $n\alpha = n'\alpha'$:

$$R = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2.$$

Příklad:

Postupuje-li světlo ze vzduchu ($n=1$) do skla ($n' = 1,5$) je $R=0,04$ tj. 4% dopadajícího světla se odráží.

Odraz světla na kovech

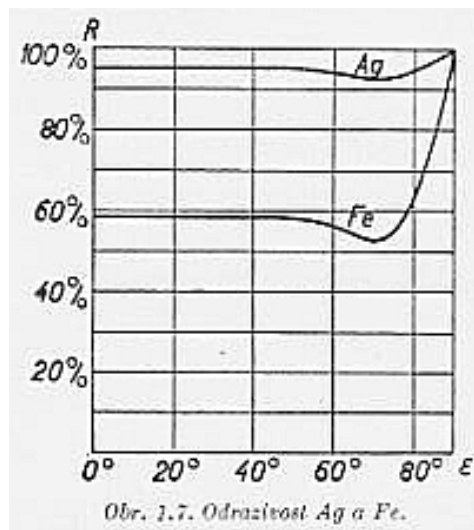
- Kovy mají obecně velkou odrazivost, je to dáno tím, že kovy obsahují volné elektrony, které se uvedou dopadajícím světlem do vynucených kmitů. Jimi vytvořené vlny se skládají s dopadajícími, takže procházející vlny se úplně zruší, převážná část světla se odráží a část energie dopadající vlny se mění v teplo (tato část je tím větší čím menší je el. vodivost kovu).
- Odrazivost (R) kovu je tím větší, čím lépe vede kov proud.
- Každý kov je char. pro určitou vlnovou délku dvěma konstantami – indexem lomu n a indexem absorpce k . Fresnelovy vztahy odvozené pro rozhraní mezi dvěma dielektriky lze použít i pro rozhraní mezi dielektrikem a kovem, jestliže budeme kovové prostředí charakterizovat komplexním indexem lomu $\hat{n} = n + ik$.
- Odrazivost kovu je přibližně dána vztahy:

$$R_p = \frac{\left(n - \frac{1}{\cos a_i}\right)^2 + k^2}{\left(n + \frac{1}{\cos a_i}\right)^2 + k^2}, R_s = \frac{(n - \cos a_i)^2 + k^2}{(n + \cos a_i)^2 + k^2},$$

kteřé pro kolmý dopad světla přejdou na vztah $R = \frac{(n-1)^2 + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2}$.

Odraz světla na kovech

- *Příklad:* pro vlnovou délku světla $\lambda = 589,3$ nm je u stříbra $n = 0,177$; $k = 3,638$ u oceli $n = 2,485$ a $k = 3,423$.
- R závisí na uvedených konstantách, na úhlu dopadu a na polarizačním stavu dopadajícího světla.



Kovy pro výrobu odrazných ploch

- Stříbro – značná odrazivost ve viditelné a IR části světla, nízká v UV oblasti. Ukládá se chemicky, katodickým rozprašováním nebo napařováním ve vakuu. Odrazivost stříbra během doby klesá.
- Hliník – ve viditelné oblasti spektra značně horší, v UV oblasti značně vyšší odrazivost než stříbro. Hliník se nanáší napařováním ve vakuu. Má dobrou stálost.
- Rhodium – dobrá odrazivost v IR oblasti. Vrstvy rhodia jsou velmi odolné a přiléhavé, ukládá se napařováním ve vakuu.
- Germanium – ve viditelné oblasti odráží jako kov, IR záření propouští – vhodný k výrobě tzv, studených zrcadel (promítací přístroje).

