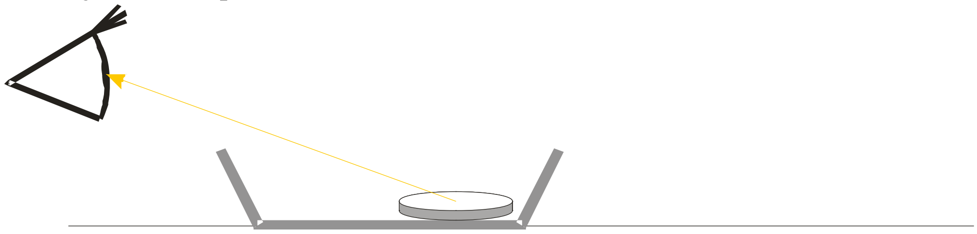
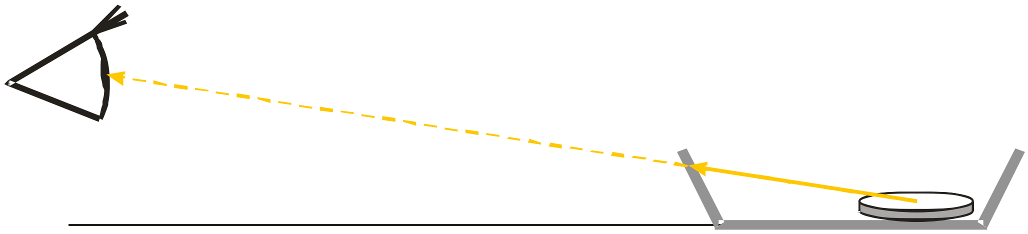
5.1.3 Lom světla

Předpoklady: 5101, 5102

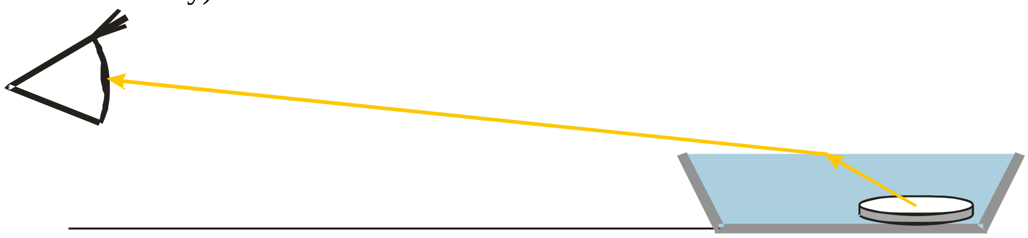
Pokus s mincí a miskou:
Opřu bradu o stůl a pozoruji minci v misce. Paprsky odražené od mince se šíří přímočaře ke mně, miska jim nesmí překážet v cestě.



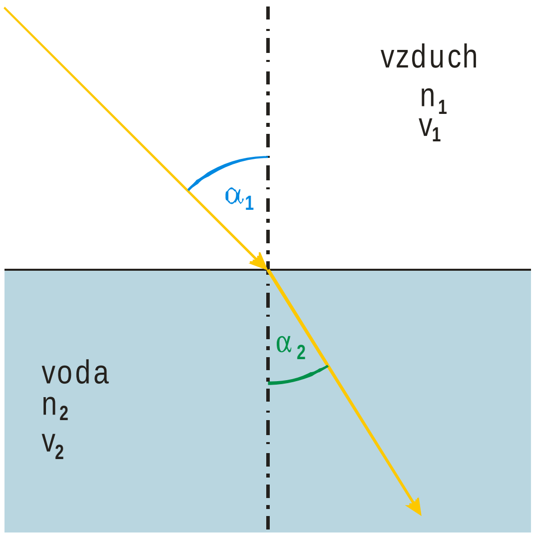
Posunu misku po lavici dál od oka. Mince se ztratí. Paprsek, který by letěl z mince do oka, narazí na misku a nedostane se do oka.



Do misky naliji vodu, mince se opět ukáže ⇒ paprsky světla letící z mince musely změnit dráhu, aby se vyhnuly okraji nádoby ⇒ světlo se láme na rozhraní dvou prostředí (v tomto případě vzduchu a vody)



Jak se světlo láme?



Zákon lomu světla (Snellův zákon): $\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{n_2}{n_1}$

n- index lomu v prostředí, $n=\frac{c}{v}$ *c*- rychlost světla ve vakuu, *v*- rychlost světla v prostředí

Př. 1: Světlo je vlnění a musí pro něj platit zákon lomu pro vlnění $\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{v_1}{v_2}$. Dokaž, že tento zákon je ekvivalentní se zákonem lomu světla.

Dosadím za index lomu poměr rychlosti světla vůči rychlosti šíření .

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}}=\frac{v_1}{v_2}$$

Oba zákony jsou ekvivalentní, z jednoho jde odvodit druhý a naopak.

Př. 2: Obrázek lomu světla na rozhraní vody a vzduchu odpovídá skutečnosti. Rozhodni ve kterém prostředí se světlo šíří rychleji.

Platí: $\alpha_1>\alpha_2 \quad \Rightarrow \quad \sin\alpha_1>\sin\alpha_2 \quad \Rightarrow \quad n_2>n_1 \quad \Rightarrow \quad n_2=\frac{c}{v_2}>n_1=\frac{c}{v_1} \quad \Rightarrow$

$v_2<v_1$, světlo se ve vodě šíří pomaleji než ve vzduchu.

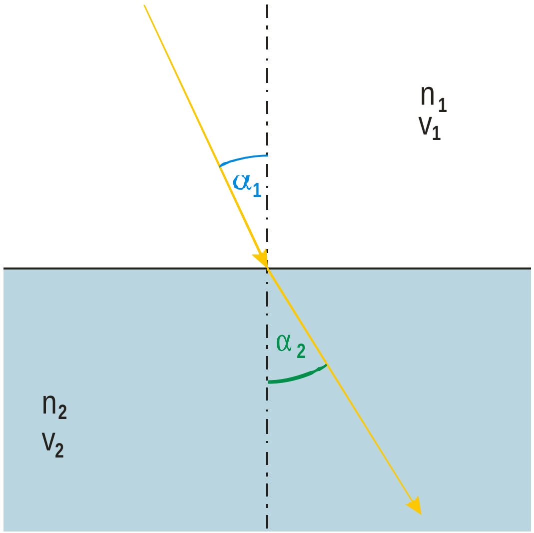
Prostředí, ve kterém se šíří světlo pomaleji, se nazývá **opticky hustší**.
Prostředí, ve kterém je světlo rychlejší, se nazývá **opticky řidší**.

Světlo si lomem zkrátilo cestu přes vodu a prodloužilo cestu vzduchem $\Rightarrow$ chová se tak, aby doletělo od mince k oku za nejkratší možný čas
$\Rightarrow$ **Fermatův princip - světlo se šíří ze zdroje k pozorovateli tak, aby vzdálenost urazilo za nejkratší možný čas**

Fermatův princip vysvětluje i zákon odrazu – světlo se odráží tak, aby z výchozího místa dorazilo do cílového včetně dotyku zrcadla a při tom urazilo trasu za nejkratší čas
http://ufo.fme.vutbr.cz/Fyzika1/optika/Fermatuv_princip/

Pedagogická poznámka: Fermatův princip sice není obsažen v klasických osnovách, ale je tak jednoduchý, tak snadno zapamatovatelný a vyplývá z něj tolik jiných pravidel, která by si studenti jinak museli pamatovat, že jej považuji za velmi užitečný.

Př. 3: Na obrázku je zachycen lom světla na rozhraní dvou prostředí. Urči, které prostředí je opticky hustší a které opticky řidší.



Platí: $\alpha_1 < \alpha_2 \quad \Rightarrow \quad \sin\alpha_1 < \sin\alpha_2 \quad \Rightarrow \quad n_2 < n_1 \quad \Rightarrow \quad n_2 = \frac{c}{v_2} < n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \Rightarrow$

$v_2 > v_1$, světlo se v prostředí s indexem 1 šíří pomaleji než v prostředí s indexem 2.

Když světlo přechází z prostředí opticky **řidšího do opticky hustšího**, zkracuje si cestu a **láme se ke kolmici**.
Když světlo přechází z prostředí opticky **hustšího do opticky řidšího**, prodlužuje si cestu a **láme se od kolmice**.

Index lomu pro vakuum $n_{\text{vakuum}} = 1$
Ve vzduchu se světlo šíří téměř rychlostí světla ve vakuu $n_{\text{vzduch}} = 1{,}0003$ budeme používat $n_{\text{vzduch}} = 1$

Př. 4: Urči index lomu skla, pokud se v něm světlo šíří rychlostí 200 000 km/s.

$n = \frac{c}{v} = \frac{300000}{200000} = 1{,}5$

Index lomu skla je 1,5.

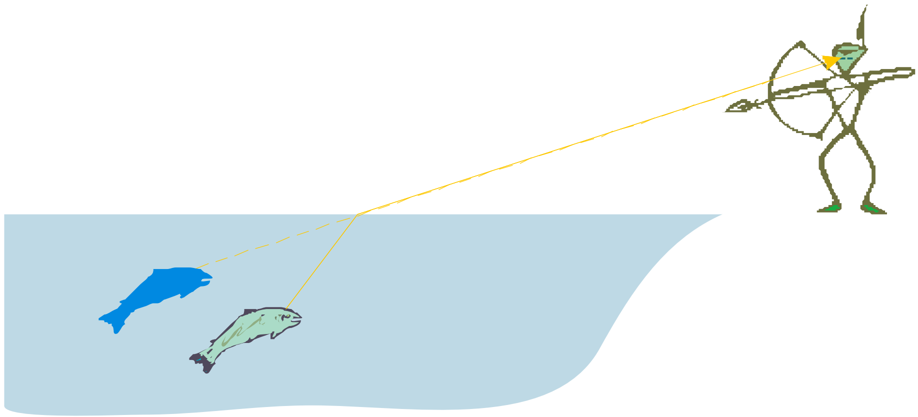
Př. 5: Urči rychlost světla v ledu, pokud index lomu ledu je 1,31.

$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{300000}{1{,}31}\,\text{km}\cdot\text{s}^{-1} = 229\,000\,\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$

Rychlost světla v ledu je 229 000 km/s.

Některé důsledky lomu světla:

- Hůl do vody ponořená vypadá jak nalomená.
- Voda se zdá méně hluboká.
- Předměty ve vodě vidíme ze břehu jinde, než kde skutečně jsou:



Mozek lovce předpokládá, že světlo se šíří přímočaře a vidí rybu v místě modrého obrysu. Ve skutečnosti je ryba jinde, protože světlo se ve vodě nešíří po tečkované, ale po plné čáře.

Př. 6: Světlo dopadá ze vzduchu do vody pod úhlem 35°. Urči pod jakým úhlem se bude světlo ve vodě šířit. Index lomu vody je 1,33.

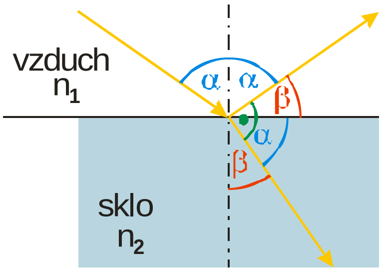
$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{n_2}{n_1}\Rightarrow \sin\alpha_2=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\alpha_1$$

$$\sin\alpha_2=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\alpha_1=\frac{1}{1{,}33}\cdot\sin 35°\Rightarrow\alpha_2=25°35'$$

Světlo se bude ve vodě šířit pod úhlem 25°35´.

Př. 7: Světelný paprsek dopadá ze vzduchu na rozhraní se sklem pod úhlem 55°. Urči index lomu skla, jestliže lomený paprsek je kolmý na odražený paprsek.

Nakreslím si obrázek situace a určím si úhel, pod kterým se paprsek šíří ve skle.



Z obrázku můžeme ihned určit velikost úhlu $\beta=35°$

Nyní můžeme dosadit do Snellova zákona: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1}\Rightarrow n_2=\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\cdot n_1$

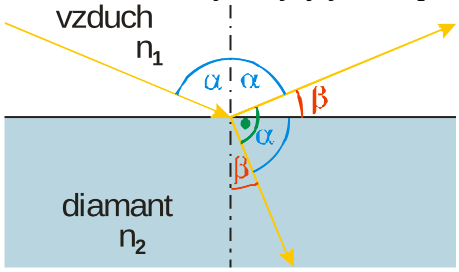
Dosadíme: $n_2=\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\cdot n_1=\frac{\sin 55°}{\sin 35°}\cdot 1=1{,}43$

Zkoumané sklo má index lomu 1,43.

Pedagogická poznámka: Následující příklady patří mezi učiteli k velmi populárním. Já je většinou nepočítám, protože jejich řešení studenti většinou sami nezvládnou a i když se ho naučí, rychle ho zapomenou. Ani jeden z příkladů pak není důležitý k pochopení další látky. Zde je uvádím pro zájemce. Moje hodina končí většinou dopočítáním předchozího příkladu 7.

Př. 8: Urči pod jakým úhlem musí dopadat světelný paprsek na rozhraní vzduch-diamant, aby byl lomený paprsek kolmý na odražený paprsek. Index lomu diamantu je 2,42.

Obrázek situace je stejný jako v předchozím příkladu:



Neznáme velikost úhlu α $\Rightarrow$ nemůžeme určit velikost úhlu β, pouze víme, že platí $\beta=90°-\alpha$

Nyní můžeme dosadit do Snellova zákona: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1}$ $\Rightarrow$ $\frac{\sin\alpha}{\sin(90°-\alpha)}=\frac{n_2}{n_1}$

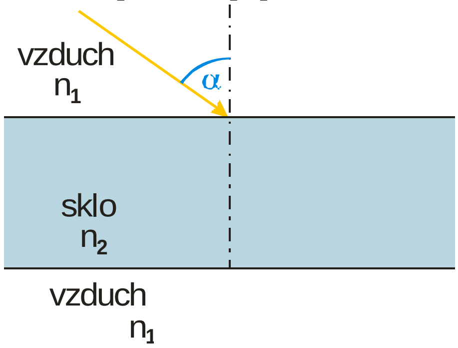
Potřebujeme, aby se úhel α vyskytoval v rovnici pouze jednou $\Rightarrow$ použijeme součtový vzorec: $\sin(90°-\alpha)=\sin 90°\cos\alpha-\cos 90°\sin\alpha=1\cdot\cos\alpha-0\cdot\sin\alpha=\cos\alpha$

Dosadíme: $\frac{\sin\alpha}{\sin(90°-\alpha)}=\frac{n_2}{n_1}$ $\Rightarrow$ $\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}=\mathrm{tg}\,\alpha=\frac{n_2}{n_1}$

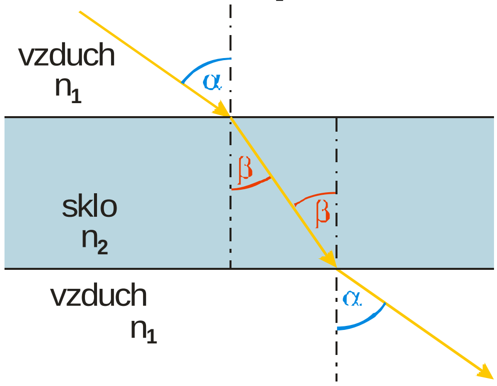
Dosadíme: $\mathrm{tg}\,\alpha=\frac{n_2}{n_1}=\frac{2{,}42}{1}\Rightarrow\alpha=67{,}5°$

Paprsek světla musí dopadat na rozhraní pod úhlem $67{,}5°$.

Př. 9: Světelný paprsek dopadá na skleněnou destičku tvaru kvádru (planparalelní destička). Nakresli průchod paprsku.

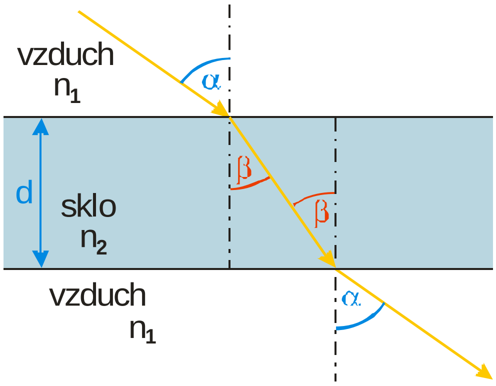


Paprsek při přechodu do skla zalomí ke kolmici, po návratu do vzduchu se zalomí od kolmice a vrátí se do původního směru.

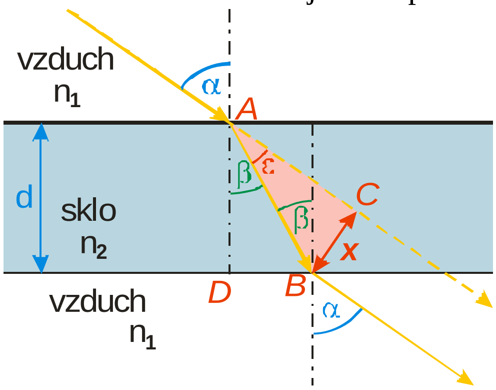


Př. 10: Světelný paprsek se v předchozím příkladu po průchodu sklem vrátil do původního směru, ale paprsek se kvůli průchodu sklem posunul. Urči toto posunutí pokud paprsek dopadl na sklo pod úhlem 55° a index lomu skla je 1,7. Tloušťka destičky je 1,5 cm.

Nakreslíme si obrázek:



Hledanou vzdálenost nejsnáze spočítáme z pravoúhlého trojúhelníku *ABC*:



V pravoúhlém trojúhelníku *ABC* platí: $\sin\varepsilon=\frac{x}{|AB|} \quad\Rightarrow\quad x=\sin\varepsilon\cdot|AB|$

Z úhlů u vrcholu *A* vidíme: $\varepsilon=\alpha-\beta$.

Z pravoúhlého trojúhelníka *ABD*: $\cos\beta=\frac{d}{|AB|} \quad\Rightarrow\quad |AB|=\frac{d}{\cos\beta}$

Dosadíme do vztahu: $x=\frac{d\cdot\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta}$

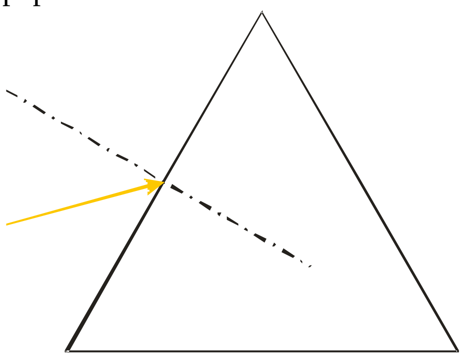
Ještě musíme určit velikost úhlu β : $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1} \quad\Rightarrow\quad \sin\beta=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\alpha$

Dosadíme: $\sin\beta=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\alpha=\frac{1}{1,7}\cdot\sin 55°\Rightarrow\beta=28,8°$

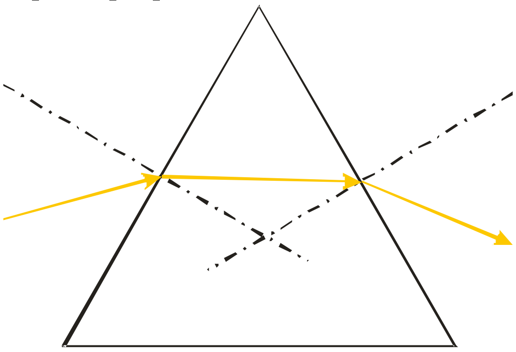
$$x=\frac{d\cdot\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta}=\frac{1,5\cdot\sin(55°-28,8°)}{\cos 28,8°}\text{cm}=0,76\,\text{cm}$$

Paprsek se posunul o 0,76 cm.

Př. 11: Světelný paprsek dopadá boční stěnu lámavého optického hranolu. Nakresli průchod paprsku hranolem.



Paprsek při průchodu do skla zlomí ke kolmici, při výstupu se láme od kolmice.



Př. 12: Světelný paprsek z předchozího příkladu projde hranolem. Urči odchylku mezi původním směrem paprsku a směrem paprsku po průchodu hranolem. Vrcholový úhel hranolu je 60°, index lomu skla 1,5 a úhel dopadu $45°$.

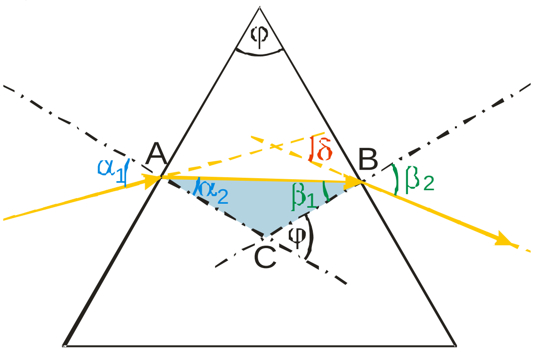
Budeme postupně počítat u jednotlivé úhly:

Výpočet α_2:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{n_2}{n_1}\Rightarrow\sin\alpha_2=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\alpha_1$$

Dosadím: $\sin\alpha_2=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\alpha_1=\frac{1}{1,5}\cdot\sin 45°$ $\Rightarrow$ $\alpha_2=28,1°$

Výpočet β_1:



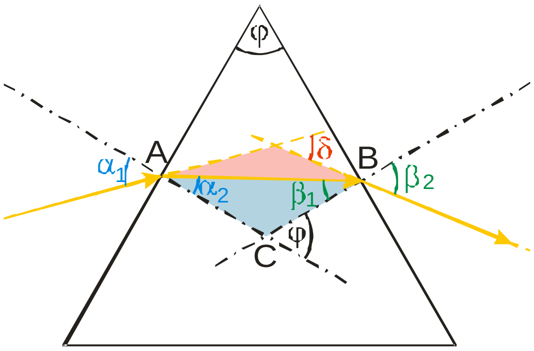
v modrém trojúhelníku platí: $180°=\alpha_2+\beta_1+(180°-\varphi)$ $\Rightarrow$ $\varphi=\alpha_2+\beta_1$ $\Rightarrow$ $\beta_1=\varphi-\alpha_2=60°-28,1°=31,9°$

Výpočet β_2:

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2}=\frac{n_2}{n_1}\Rightarrow\sin\beta_2=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\beta_1$$

Dosadím: $\sin\beta_2=\frac{n_1}{n_2}\cdot\sin\beta_1=\frac{1,5}{1}\cdot\sin 31,9°$ $\Rightarrow$ $\beta_2=52,4°$

Výpočet δ:



v červeném trojúhelníku platí: $180° = (\alpha_1 - \alpha_2) + (\beta_2 - \beta_1) + (180° - \delta) \quad \Rightarrow$

$\delta = (\alpha_1 - \alpha_2) + (\beta_2 - \beta_1) \quad \Rightarrow \quad \delta = (45° - 28{,}1°) + (52{,}4° - 31{,}9°) = 37{,}4°$

Odchylka mezi původním směrem paprsku a směrem paprsku po průchodu hranolem (většinou se nazývá deviace) je $37{,}4°$.

Shrnutí: Při přechodu s jednoho prostředí do druhého se světlo láme tak, aby svou dráhu urazilo za nejkratší čas.