Geometrická optika

Je nauka o optickém zobrazování.
Byla vybudována na 4 zákonech, které vyplynuly z pozorování a ke kterým nejsou potřeba znalosti o podstatě světla:

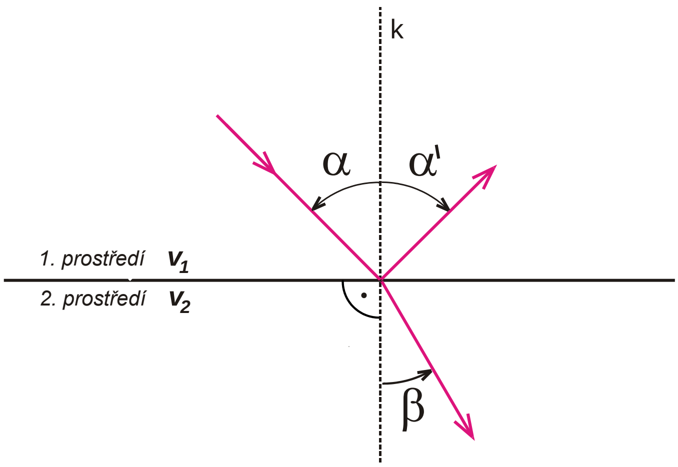
1) přímočaré šíření světla (paprsky)
2) nezávislost světelných paprsků (a dva možné směry jejich šíření)
3) odraz světla
4) lom světla

Zákony odrazu a lomu světelných paprsků, i jejich přímočaré šíření, lze odvodit z **Fermatova principu** nejmenšího času, potřebného k proběhnutí dráhy mezi dvěma body. (Pierre de Fermat, 1601 - 1665)

Zákon odrazu a lomu světla

Jestliže světelný paprsek prochází 1. prostředím, kde je jeho rychlost v_1 a dopadá na rovinné rozhraní se 2. prostředím, ve kterém je jeho rychlost v_2 ,
pak se část světla odrazí zpět do 1. prostředí a část vniká do 2. prostředí.

Vznikají tak dva paprsky – **odražený** a **lomený**, které spolu s kolmicí v místě dopadu leží v jedné rovině a platí:



$$\boxed{\alpha = \alpha'}$$ ***zákon odrazu***

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12}}$$ ***zákon lomu*** (Snellův zákon)

Přitom se tedy definuje nová veličina:

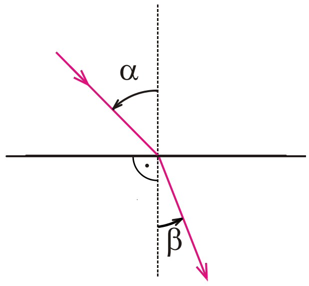
n_{12} ……… **relativní index lomu** (2. prostředí vzhledem k 1. prostředí)

Lze rozlišit dva základní případy: **lom ke kolmici** a **lom od kolmice** :

a) Jestliže je v 1. prostředí rychlost světla **větší** (tzv. **opticky řidší** prostředí) než rychlost světla ve druhém prostředí (tzv. **opticky hustší** prostředí),

tedy jestliže $\boxed{v_1 > v_2}$,
pak ze zákona lomu plyne:

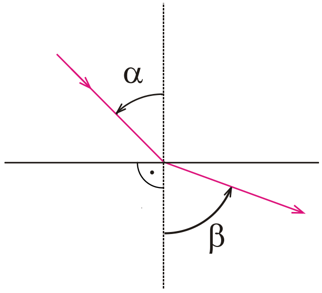
$\boxed{\alpha > \beta}$ tzv. ***lom ke kolmici***



b) jestliže naopak platí nerovnost opačná,

tedy jestliže $\boxed{v_1 < v_2}$,
pak ze zákona lomu dostaneme:

$\boxed{\alpha < \beta}$ tzv. ***lom od kolmice***



V tomto případě můžeme pozorovat zajímavý jev:
Když postupně **zvětšujeme** úhel dopadu ***α***, pak podle zákona lomu se **také** musí postupně zvětšovat i úhel lomu ***β*** ……….. až dosáhne **maximální** možné hodnoty 90° - kdy lomený paprsek už vlastně **nevniká** do druhého prostředí - a to při úhlu dopadu $\alpha_m < 90°$ …. to je tzv. ***mezní úhel***

A **pro větší úhly dopadu,** tedy **pro** $\boxed{\alpha > \alpha_m}$ už **neexistuje** úhel *lomu β* takový, aby byl zákon lomu splněn.

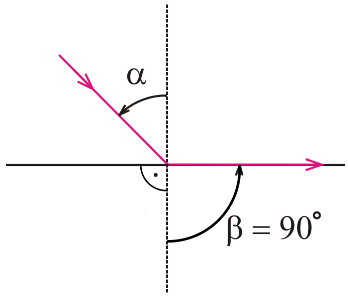
Pro tyto větší úhly dopadu už **neexistuje lom**,

ale pouze odraz – tzv. **totální (úplný) odraz světla**

Pro mezní úhel tak platí:

$$n_{12} = \frac{\sin \alpha_m}{\sin 90°} = \sin \alpha_m$$

Totální odraz světla se velmi často využívá
v optických přístrojích – viz dále.



Nevýhodou relativního indexu lomu je, že závisí na parametrech dvou prostředí. Proto se zavádí další veličina, daná vlastnostmi pouze jednoho prostředí:

$$\boxed{n = \frac{c}{v}}$$

Absolutní index lomu

v …… rychlost světla v daném prostředí
c …… rychlost světla ve vakuu

Absolutní index lomu zkoumaného prostředí tedy popisuje lom světla z vakua do tohoto prostředí.

Absolutní index lomu je základní optická charakteristika prostředí:

- pro vakuum je $n = 1$
- pro hmotné prostředí je vždy $n > 1$, např.: voda *1,33*

sklo ....1,45 – 1,95

vzduch ... 1,0003, tj. prakticky jako vakuum

Lze ho také jednoduše zavést do zákona lomu:

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (= n_{12})}$$

Disperze světla

Ve vakuu je rychlost světla pro všechny barvy stejná, ale ve hmotném prostředí je funkcí vlnové délky:

$v = v(\lambda)$

Proto také absolutní index lomu $n = c/v$ musí záviset na vlnové délce:

$$\boxed{n = n(\lambda)}$$

Pak prostředí má **disperzní** vlastnosti .... tj. nastává **jev disperze** (rozklad) světla:

Protože indexy lomu paprsků různých barev (s různou λ) jsou různé, pak při lomu složeného (bílého) světla ..... při daném úhlu dopadu α se různobarevné paprsky lámou pod různými úhly lomu β ... .dochází k **<u>rozkladu</u>** světla na jednotlivé složky ......vzniká **<u>spektrum</u>** (viz níže):

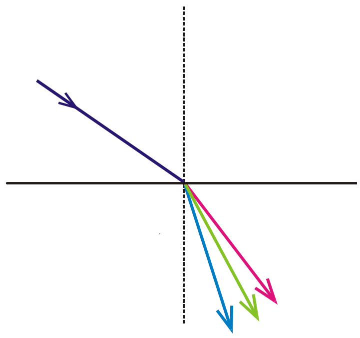
U většiny látek klesá index lomu s vlnovou délkou,
to je tzv. **normální disperze** .

Tedy jestliže např. pro vlnové délky červeného a fialového světla platí: $\boxed{\lambda_{červ} > \lambda_{fial}}$,

potom podle grafu platí: $n_{červ} < n_{fial}$

a ze Snellova zákona plyne pro úhly lomu: $\boxed{\beta_{červ} > \beta_{fial}}$

.... ***tedy více se láme světlo s kratší vlnovou délkou***



<u>Pozn:</u> Výjimečně, a jen v <u>úzkém intervalu</u> vlnových délek, mají některé látky tzv. **anomální disperzi**, kdy index lomu s vlnovou délkou roste.

Využití disperze světla

1) Vznik spektra ve hranolovém spektrometru (monochromátoru) :

- viz dále odstavec Aplikace odrazu a lomu

2) **Při optickém zobrazení je ale disperze nežádoucím jevem**

……… způsobuje tzv. **barevnou vadu** optických prvků (čoček)

3) **Průběh funkce $n = n(\lambda)$ lze pro každou látku samozřejmě přesně stanovit,** v praktické optice se ale často udávají jen hodnoty pro 3 vlnové délky – pro vybrané Fraunhoferovy čáry:

	C	D (e)	F
	červená	***žlutá***	***modrá***
	656,3 nm	***589,3 nm***	***486,1 nm***
Příslušné hodnoty indexu lomu se označují:	n_C	n_D	n_F

Za základní hodnotu indexu lomu se považuje $\boxed{n_D}$ (pro žluté světlo, přibližně ve středu intervalu viditelného světla)……… a dále se definují veličiny:

$\boxed{\mu = n_F - n_C}$ ***střední disperze***

$\boxed{\nu = \dfrac{n_F - n_C}{n_D - 1}}$ ***střední relativní disperze***

$\boxed{\nu^* = \dfrac{1}{\nu} = \dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C}}$ ***Abbeho číslo*** (převrácená střední relativní disperze)

Optická skla se vyrábějí v širokém rozsahu indexů lomu a Abbeho čísel:

$\boxed{n_D \in (1{,}45 \ \dots \ 1{,}95)}$

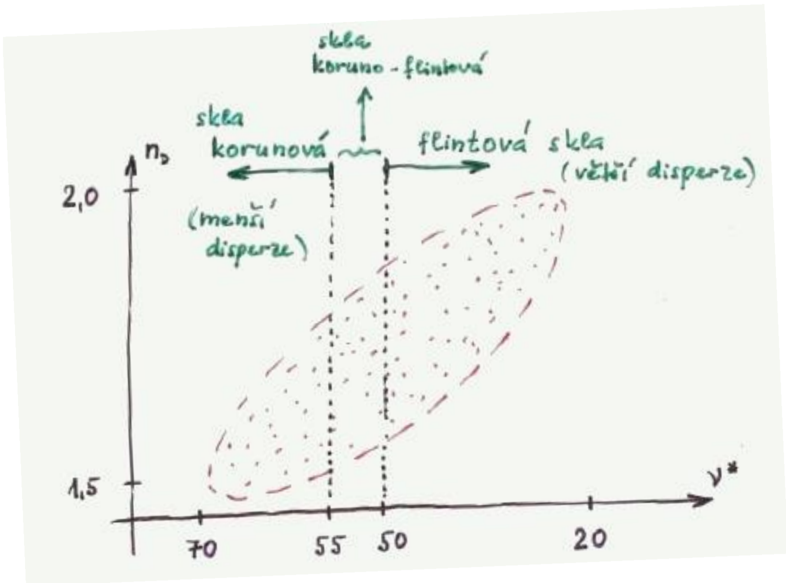
$\boxed{\nu^* \in (20 \ \dots \ 70)}$

Např. určité korunové sklo:

$$\left.\begin{aligned} n_C &= 1{,}5114 \\ n_D &= 1{,}5127 \\ n_F &= 1{,}5253 \end{aligned}\right\} \nu^* = 52$$

Pro srovnání: voda

$$\left.\begin{aligned} n_C &= 1{,}3314 \\ n_D &= 1{,}3332 \\ n_F &= 1{,}3373 \end{aligned}\right\} \nu^* = 56$$



4) **Disperzní jev je také velmi důležitý při studiu přenosu energie zářením** (vlněním)

V odstavci „*Skládání (interference) vlnění*“ jsme poznali, že **grupová rychlost**, kterou se šíří energie a informace, je ve hmotném disperzním prostředí vždy **odlišná** od rychlosti fázové ………. ………… je **menší při normální** disperzi ……………. a je větší při **anomální disperzi**.

(*ale podle principů teorie relativity nemůže ovšem nikdy převýšit rychlost světla ve vakuu*)

Aplikace odrazu a lomu (na rovinných plochách)

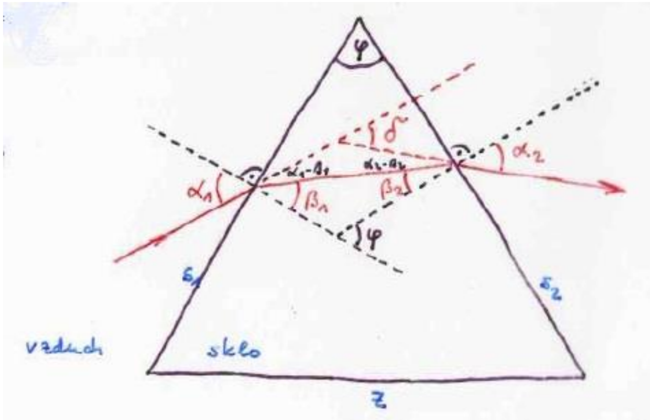
Optický hranol

Používá se trojboký skleněný hranol (viz obr.):

z ….. základna,

s_1 , s_2 ……lámavé stěny,

φ ….. lámavý úhel hranolu



Na obrázku je zakreslena obecná dráha světelného paprsku. Jeho úhlová odchylka od původního směru je označena jako **δ – tzv. deviace paprsku**

Vyznačení úhly dopadu a lomu na sobě vzájemně závisí podle zákonů lomu na obou lámavých stěnách a závisí také na lámavém úhlu hranolu:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1} = n \qquad \frac{\sin\alpha_2}{\sin\beta_2} = n \qquad \varphi = \beta_1 + \beta_2$$

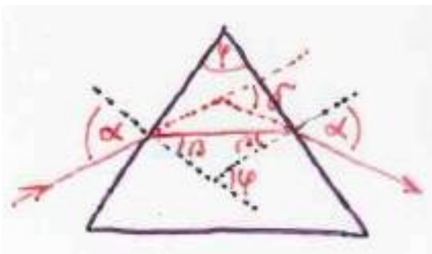
Stanovit velikost deviace δ je pak tedy zřejmě možno například v závislosti na α_1 , přičemž parametrem bude lámavý úhel hranolu a také index lomu.

Ne příliš obtížným postupem pak zjistíme, deviace paprsku není konstantní, ale že jako funkce má extrém (minimum) – tzv. **minimální deviaci**, která nastane při symetrickém průchodu paprsků hranolem, kdy :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \qquad \beta_1 = \beta_2 = \beta \qquad \beta = \frac{\varphi}{2}$$

a její velikost je:

$$\delta_{min} = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi = 2\alpha - \varphi$$

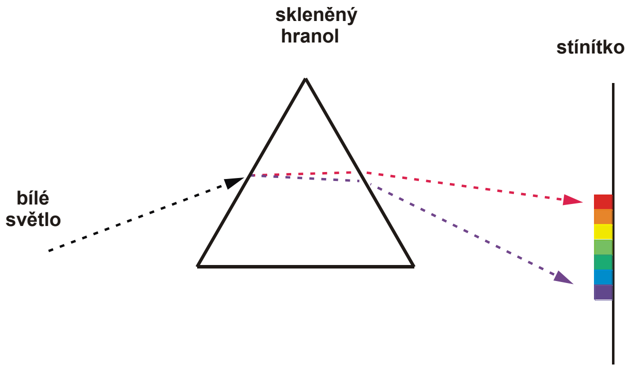


Při daném lámavém úhlu hranolu pak (minimální) deviace paprsku závisí už jen na indexu lomu – je jeho funkcí:

$$\boxed{\delta = \delta(n)}$$

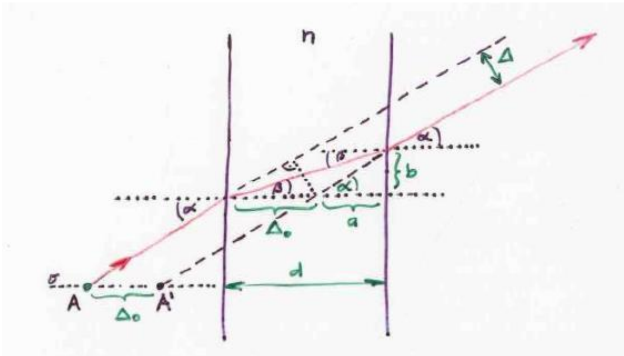
A protože paprsky různých vlnových délek mají v disperzním prostředí také různé indexy lomu, mají i různé deviace …… nastává **rozklad složeného světla**.

Trojboký hranol je proto základním prvkem **hranolového spektrometru**.



Planparalelní deska

Skleněná (index lomu n) deska s rovnoběžnými plochami, obklopená vzduchem (index lomu 1) (viz obr.)



Z obrázku je zřejmé, že světelný paprsek není odchýlený od původního směru, jen je **posunutý**:

Označíme :

Δ ……. příčné posunutí

$\boldsymbol{\Delta_o}$ ……. osové posunutí

(virtuálního obrazu A' předmětu A na optické ose o)

Aplikací zákona lomu pro oba povrchy pak dostaneme pro malé úhly $\boldsymbol{\alpha}$ jednoduchý vztah::

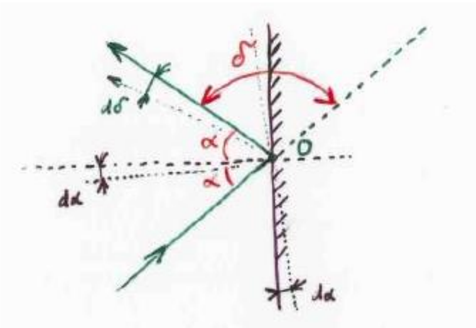
$$\Delta_o = d \cdot \frac{n-1}{n} \qquad \Delta = \Delta_o \cdot \sin\alpha = \alpha \cdot d \cdot \frac{n-1}{n}$$

Tedy příčné posunutí je přímo úměrné úhlu dopadu paprsku na desku: $\boxed{\Delta = konst \cdot \alpha}$

Aplikace: Otáčením planparalelní desky vložené do cesty světelnému paprsku můžeme dosáhnout přesného posunu paprsku (měřicí mikrometr nebo dalekohled)

Všimněme si dále úhlové deviace paprsků při odrazu na jednom a na dvou zrcadlech:

Rovinné zrcadlo



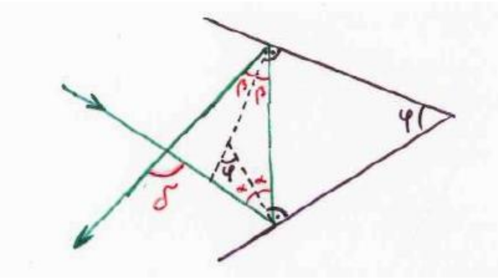
Pro velikosti úhlové odchylky – **deviace** δ – paprsku od původního směru platí:

$$\delta = 2\pi - 2\alpha$$

Jestliže pootočíme zrcadlem (okolo bodu O) o malý úhel $d\alpha$, změní se o stejnou hodnotu úhel dopadu a musí se změnit i deviace paprsku:

$d\delta = d(2\pi - 2\alpha) = 0 - d(2\alpha) = 2 \cdot d\alpha$ ….. tj. změní se dvojnásobně.

Úhlová zrcadla



jsou tvořena dvěma rovinnými zrcadly svírajícími úhel $\boldsymbol{\varphi}$

Dávají zajímavý výsledek výsledné deviace paprsku:

Podle obrázku platí (vnější úhly): $\varphi = \alpha + \beta$
Potom výsledná deviaci paprsku po dvou odrazech:

$\boxed{\delta = 2\alpha + 2\beta = 2(\alpha + \beta) = 2\varphi = konst.}$ ……….**nezávisí na úhlu dopadu !**

Tedy v tomto případě při pootočení zrcadel o úhel $d\alpha$, se sice změní o stejnou hodnotu i úhel dopadu, ale **změna deviace bude nulová**:

$$\boxed{d\delta = d(2\varphi) = 0}$$

Aplikace úhlových zrcadel: ***- vytyčování úhlů***

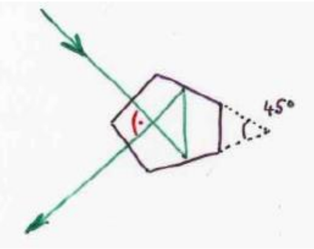
Odrazné hranoly

Nahrazují rovinná zrcadla nebo úhlová zrcadla.

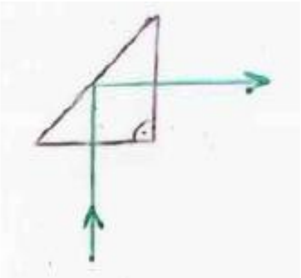
- světlo se odráží na pokoveném povrchu hranolu, nebo se s výhodou využije totální odraz.
- jsou kompaktnější než zrcadla
- úhly odrazných ploch jsou skutečně konstantní

Příklady:

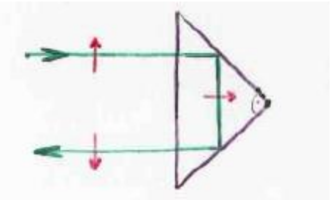
1) pentagonální hranol ….pro vytyčování pravého úhlu



2) pravoúhlý hranol ….. jako náhrada rovinného zrcadla

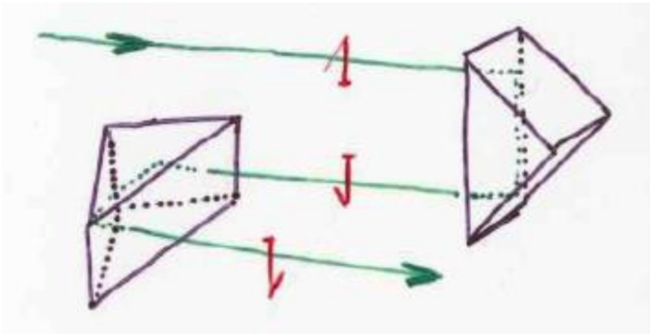


„„„„ nebo pro obrácení chodu paprsků
(převrácený obraz)



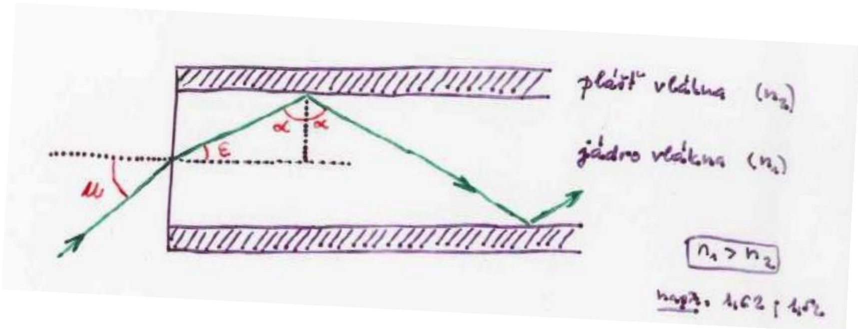
3) kombinace dvou pravoúhlých hranolů
tzv. Porrův systém 1. druhu …..pro triedry

(dává úplně převrácený obraz
– výškově i stranově)



<u>Optický světlovod</u> (optický kabel)

Je to svazek tenkých světlovodných vláken …….až několik tisíc vláken ve společném obalu – vlákna jsou nejčastěji skleněná válcového průřezu, průměru např. 5 – 200 mikronů.
Vedení světla v každém vlákně probíhá **postupnými totálními odrazy** na rozhraní jádra a pláště.

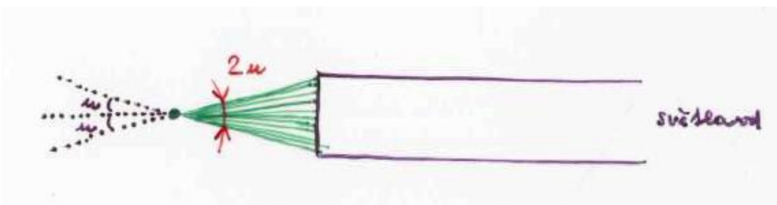


Podmínka úplných odrazů na plášti vlákna vede k tomu, že úhel dopadu paprsku na čelní stěnu nemůže být větší než určitý maximální úhel dopadu u (viz obr.)

Pro tento úhel platí vztah (zkuste odvodit na cvičení):

$$\boxed{A = \sin u = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

…….. tzv. ***<u>číselná apertura světlovodu</u>***



Úhel u určuje maximální vrcholový úhel kuželového svazku $\boxed{2u}$, který může (z bodového zdroje) vstoupit do světlovodu ………. a bude dále světlovodem veden.

V **komunikačních sítích** jsou optické kabely nejperspektivnějším přenosovým prostředkem, s vysokou přenosovou rychlostí (Tbit/s).

Používají se většinou jednovláknové, vyrobené z křemenného skla, jádra průměru 8 - 60 mikronů, s obalem 125 mikronů, vnější ochranný akrylový plášť 250 – 900 mikronů

Zdroje jsou diody LED nebo laserové diody, vyzařující infračervené světlo 850 – 1550 nm.

Ve **stavebnictví** existují světlovody pro přívod denního světla do tmavých místností. Na rozdíl od výše uvedených světlovodů to většinou jsou pouze pevné (plechové) tubusy s vnitřní odraznou plochou, průměru desítek centimetrů, s délkou několika metrů.

D.cv.: Mohlo by být optické vlákno jen z jednoho druhu skla a místo pláště být pokoveno ? Na plášti by se pak realizoval obyčejný odraz - jako na zrcadle - a do světlovodu by mohl vstupovat **maximálně široký** svazek světla ($u \to 90°$)

----

konec kapitoly K. Rusňák, verze 03/2016, uprav. 04/2020