



Optické zobrazení.

Přednášející:

RNDr. František Adamec, CSc.

Ústav fyziky a biofyziky JČU v Českých Budějovicích

Na základě učebnic:

Halliday, Resnick

Fundamentals of Physics 8th Edition, Wiley 2005

Feynman, Leighton, Snads

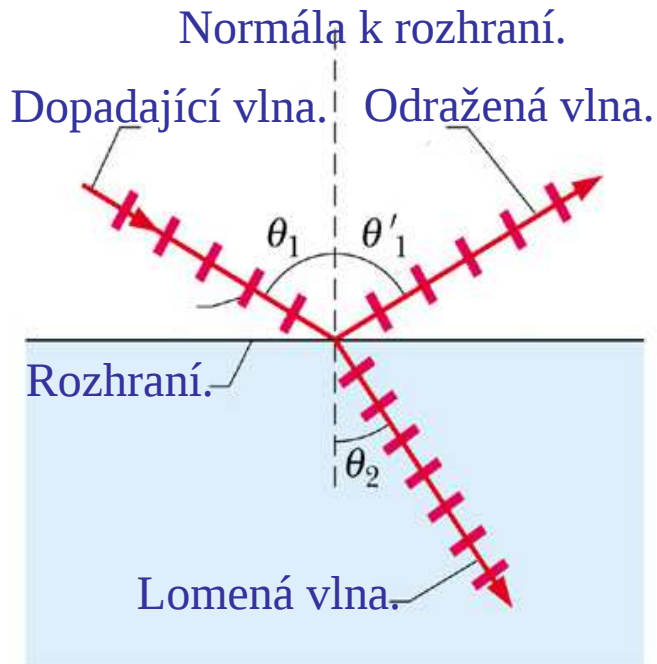
Feynmanovy přednášky z fyziky

Fragment 2000

Eugene Hecht, Optics 4th edition

Odraz a lom světla.

Po dopadu světelné vlny na rozhraní dvou různých prostředí, dochází jednak k odrazu světelné vlny na rozhraní a jednak k lomu světelné vlny procházející rozhraním. Pro odraženou a lomenou vlnu platí zákony:



Zákon odrazu světla:

$$\theta'_1 = \theta_1$$

Snellův zákon lomu světla:

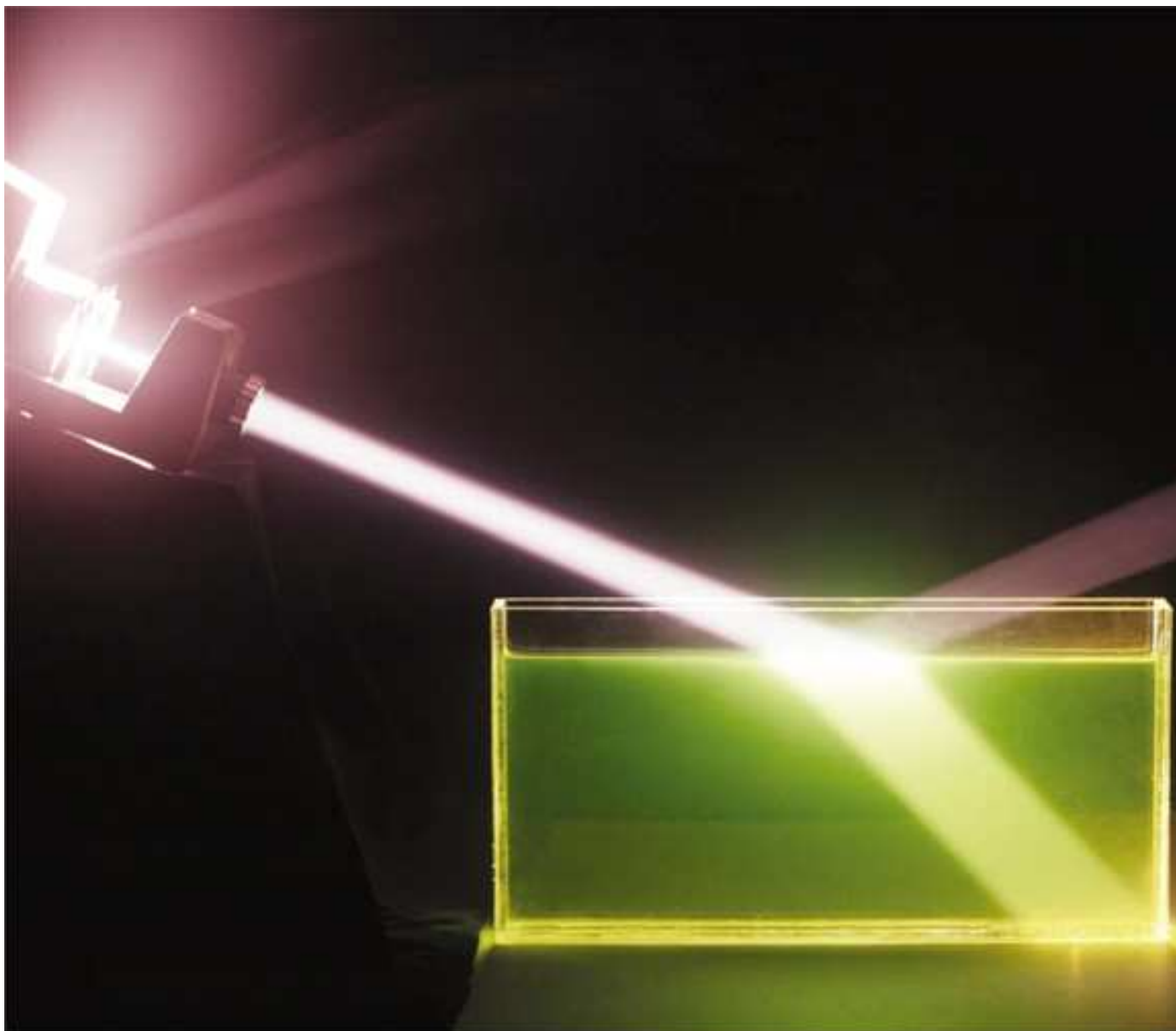
$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

n_1 a n_2 jsou fyzikální charakteristikou prostředí z hlediska šíření světla v prostředí. Nazýváme je **index lomu** prostředí.

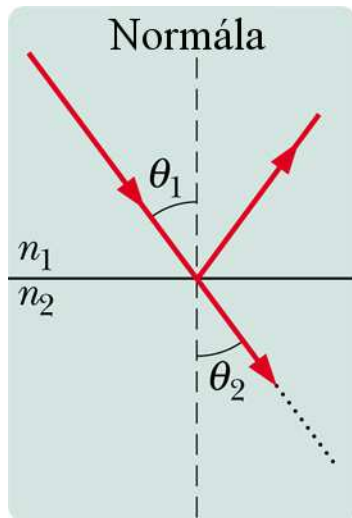
Index lomu n prostředí je definován poměrem rychlosti světla ve vakuu c a rychlosti světla v daném prostředí u .

$$n = \frac{c}{u}$$

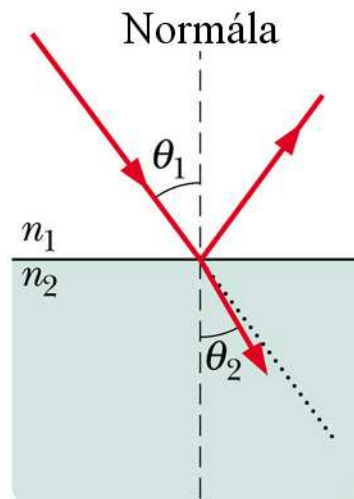
Odraz a lom světla.



Odraz a lom světla.



$n_2 = n_1$
(a)



$n_2 > n_1$
(b)

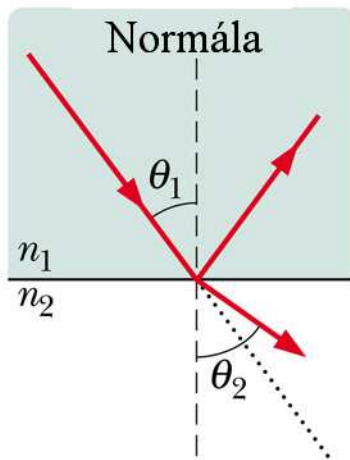
Pro světlo vstupující z prostředí o indexu lomu n_1 do prostředí o indexu lomu n_2 platí:

a) $n_2 = n_1 \rightarrow \theta_2 = \theta_1$

b) $n_2 > n_1 \rightarrow \theta_2 < \theta_1$, lom k normále (kolmici).

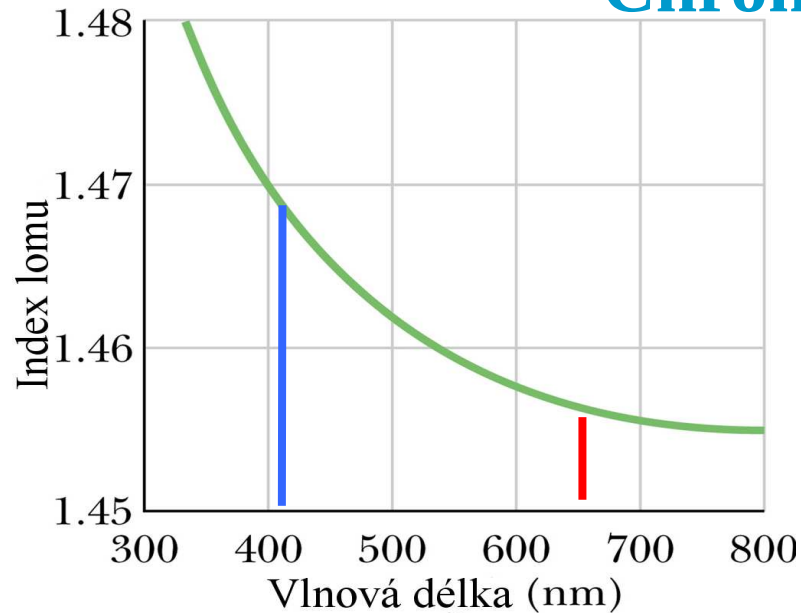
c) $n_2 < n_1 \rightarrow \theta_2 > \theta_1$, lom od normály (kolmici).

Prostředí o větším indexu lomu bývá označováno jako **opticky hustší** než prostředí o nižším indexu lomu, které bývá označováno jako **opticky řidší**.



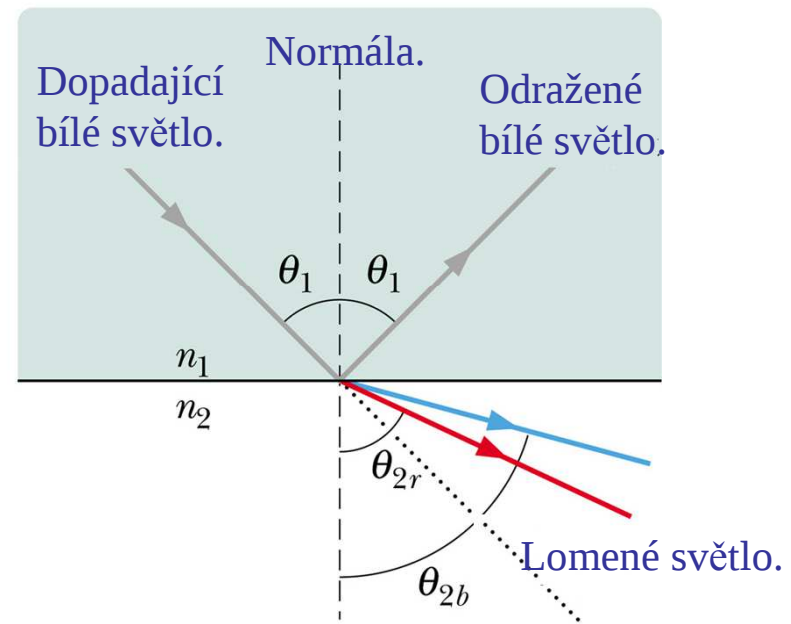
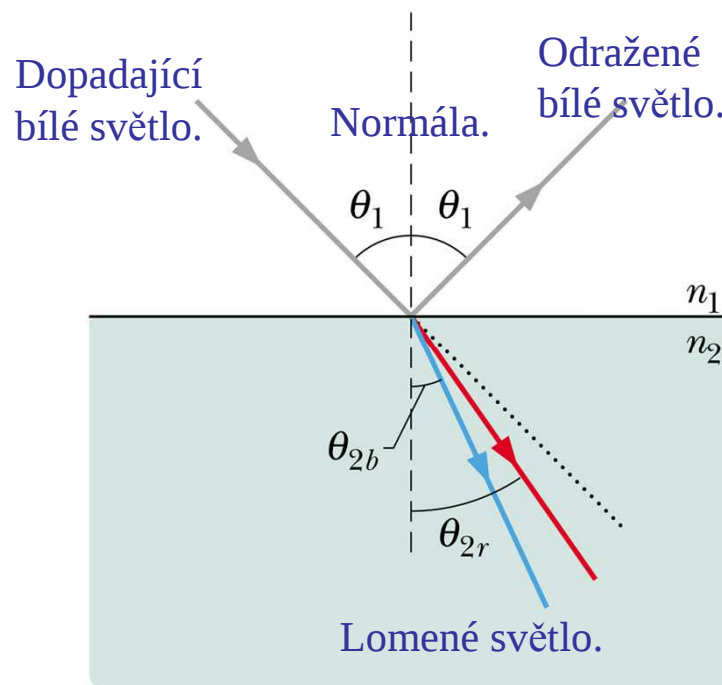
$n_2 < n_1$
(c)

Chromatická disperze.



Lom světla je závislý na vlnové délce světla. Tato závislost je vyjádřena závislostí indexu lomu na vlnové délce světla a nazýváme ji **chromatická disperze**.

$$n_{2, \text{modrá}} > n_{2, \text{červená}}$$

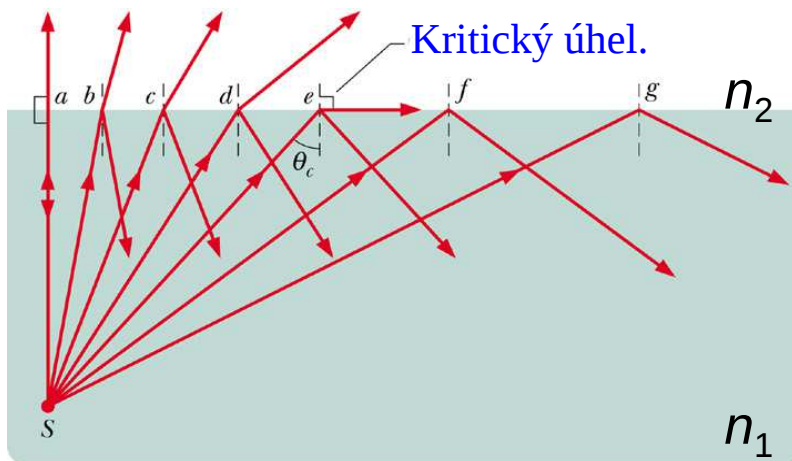


Totální odraz.

Vstupuje-li světlo z prostředí o vyšším indexu lomu do prostředí o nižším indexu lomu, $n_1 > n_2 \rightarrow \theta_2 > \theta_1$, pak vzrůstá-li úhel dopadu θ_1 , pak při určité hodnotě úhlu dopadu bude úhel lomu θ_2 roven 90° , tento úhel dopadu nazýváme **kritický úhel** θ_c . Po překročení hodnoty kritického úhlu se EM vlna nešíří do prostředí nižšího indexu lomu a odráží se zpět do prostředí vyššího indexu lomu, tento jev nazýváme **totální odraz (reflexe)**.

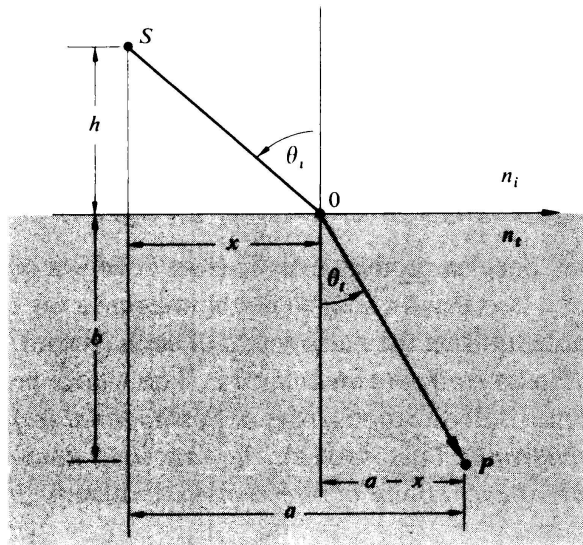
$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

Kritický úhel: $\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$



Světlo se šíří v různých prostředích různými rychlostmi - Fermatův princip.

Dráha po níž se světlo šíří z místa S do místa P je taková, aby čas nutný k překonání vzdálenosti SP byl minimální.



Fermatův princip – lom světla.

Čas t který světlo potřebuje k překonání vzdálenost mezi místem S v prostředí o indexu lomu n_i a místem P v prostředí o indexu lomu n_t :

$$t = \frac{\overline{SO}}{u_i} + \frac{\overline{OP}}{u_t} = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{u_i} + \frac{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}{u_t}$$

Z podmínky minima:
$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{u_i \sqrt{h^2 + x^2}} + \frac{-(a-x)}{u_t \sqrt{b^2 + (a-x)^2}} = 0$$

vyplývá Snellův zákon:
$$\frac{\sin \theta_i}{u_i} = \frac{\sin \theta_t}{u_t}$$

Fermatův princip – optická dráha.

V případě, že paprsek prochází n různých vrstev s různými indexy lomu:

$$t = \frac{s_1}{u_1} + \frac{s_2}{u_2} + \dots + \frac{s_n}{u_n} = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{u_i}$$

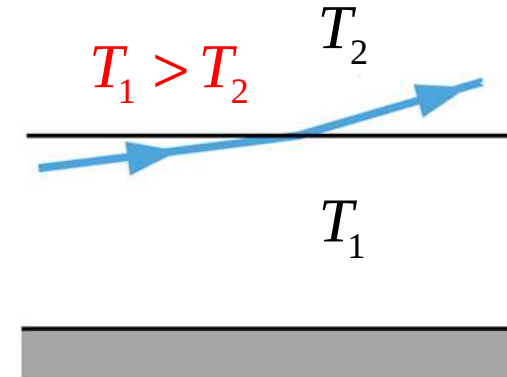
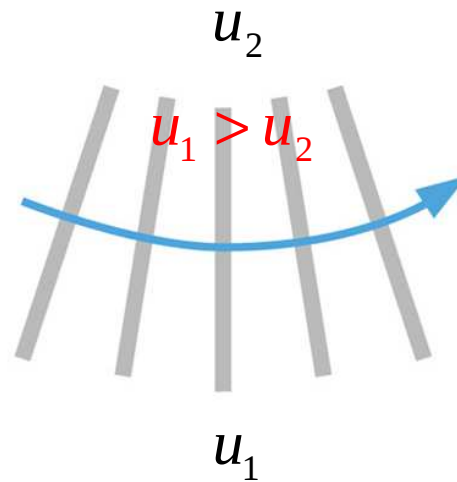
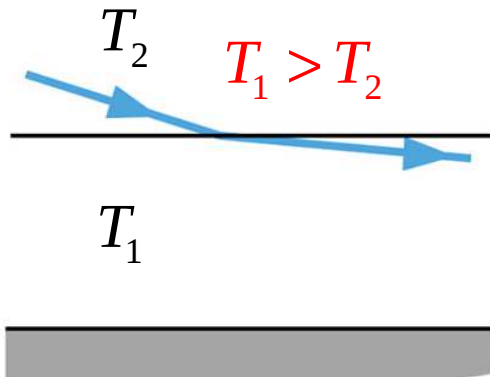
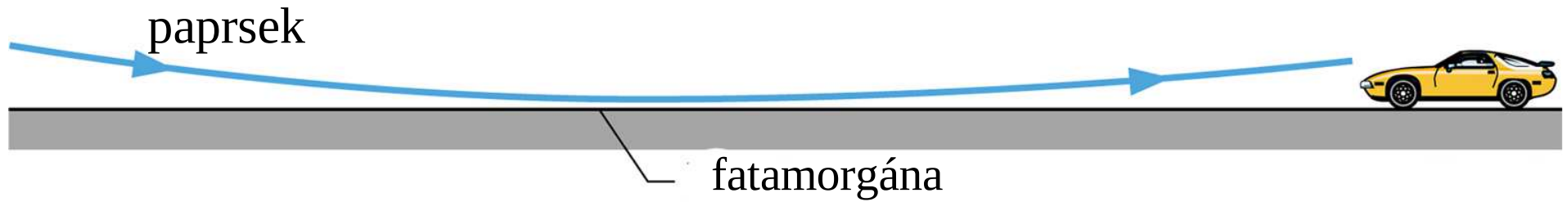
kde s_i je dráha paprsku v i -té vrstvě, u_i je rychlost světla v i -té vrstvě. Rovnici upravíme do tvaru:

$$t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \frac{c}{u_i} s_i = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n n_i s_i$$

Součet nazýváme optickou dráhou OPL:

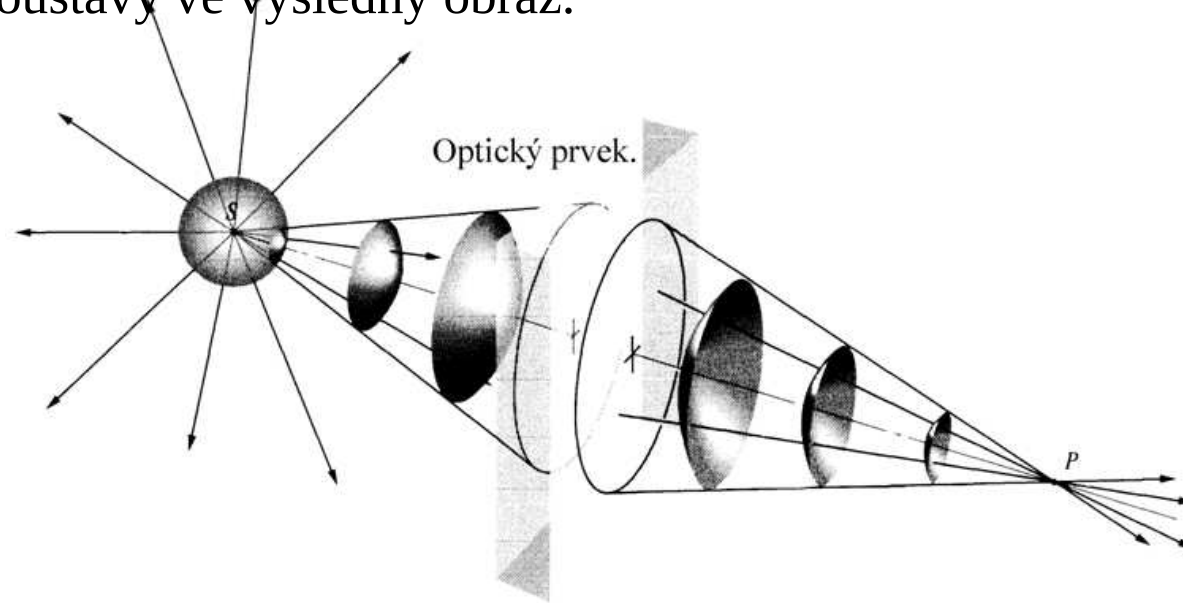
$$OPL = \sum_{i=1}^n n_i s_i$$

Fermatův princip a fatamorgána.



Optické zobrazení.

Zobrazovacím prvkem (zobrazovací soustavou) rozumíme lámavou nebo odraznou plochu, která mění definovaným způsobem dráhu světelného paprsku. Optickým zobrazováním pak rozumíme transformaci světelných paprsků vstupujících do optické zobrazovací soustavy ve výsledný obraz.



Paprsky vycházející z bodového zdroje **S** jsou optickým prvkem zobrazeny do bodu **P**. Prostor je optickým prvkem (optickou soustavou) rozdělen na část předmětovou a část obrazovou. Zobrazované body leží v **předmětové rovině**, zobrazené body v **rovině obrazové**. Předmět a obraz bodu jsou vzájemně **konjugovány**.

Ideální zobrazení je **bodové**, to znamená, že zobrazovaný bod se zobrazí opět na bod.

Základní axiomy optického zobrazení.

Světlo se šíří homogenním a isotropním prostředím přímočaře.

Světelné paprsky se šíří nezávisle na sobě.

Prochází-li světlo rozhraním dvou různých optických prostředí, pak se řídí Snellovým zákonem lomu.

Platí zákon odrazu a lomu.

Směr průchodu paprsku optickou zobrazovací soustavou lze obrátit.

Světlo se šíří ve shodě s Fermatovým principem.

Základní pojmy.

Optická osa je myšlená přímka procházející geometrickými středy optických prvků soustavy, je jejich osou souměrnosti.

Při zobrazení se omezuje na **paraxiální svazky paprsků**, paprsky ležícími blízko **optické osy**.

Zobrazení je **bodové**, to znamená, že zobrazovací soustava transformuje bod opět na bod – zobrazení je **stigmatické**.

Zobrazovaný objekt nazýváme **předmět**, leží v **předmětovém prostoru**, obraz předmětu leží v **obrazovém prostoru**.

Zobrazovací soustava vytváří buď **skutečný (reálný) obraz** nebo **neskutečný obraz**.

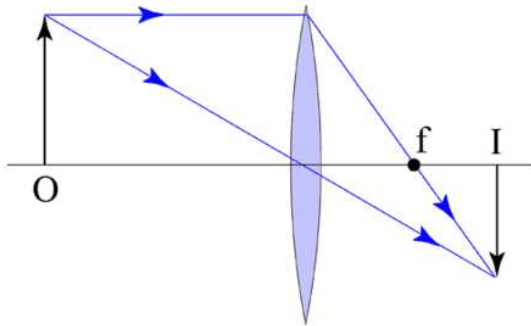
Ohnisko f je bod ležící na optické ose v předmětovém (obrazovém) prostoru, jehož obraz leží v nekonečnu.

Optická mohutnost čočky je rovna:

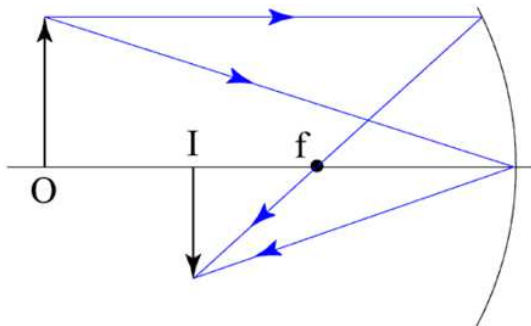
$$D = \frac{1}{f}$$

jednotkou je **1 dioptrie**.

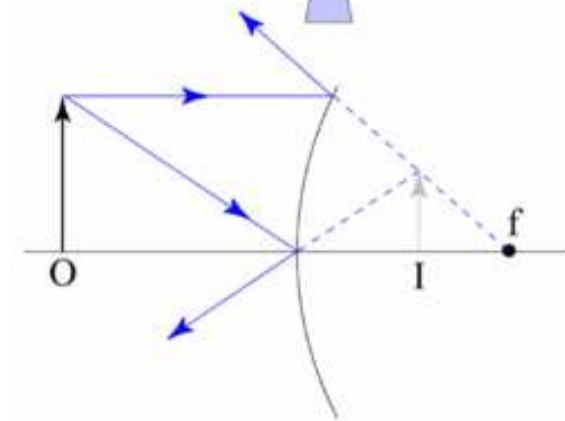
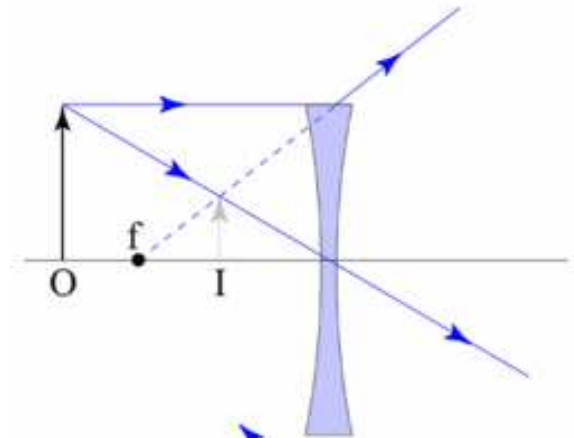
Skutečný a zdánlivý obraz.



Skutečný obraz: Paprsky se protínají v obrazovém prostoru.



Zdánlivý obraz: Paprsky vystupující ze zobrazovací soustavy jsou v obrazovém prostoru divergentní. Tedy se nikdy neprotnou. Obraz lze vytvořit jejich prodloužením do předmětového prostoru, kde vytvoří zdánlivý (virtuální) obraz.



Zvětšení.

Příčné (laterální) zvětšení: $\beta = \frac{y'}{y}$

kde y je příčná velikost předmětu, y' je příčná velikost obrazu.

Podélné (axiální) zvětšení: $\alpha = \frac{x'}{x}$

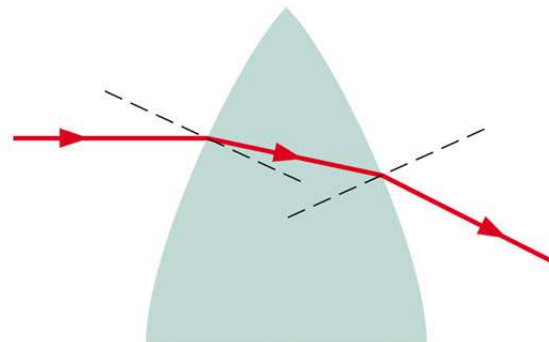
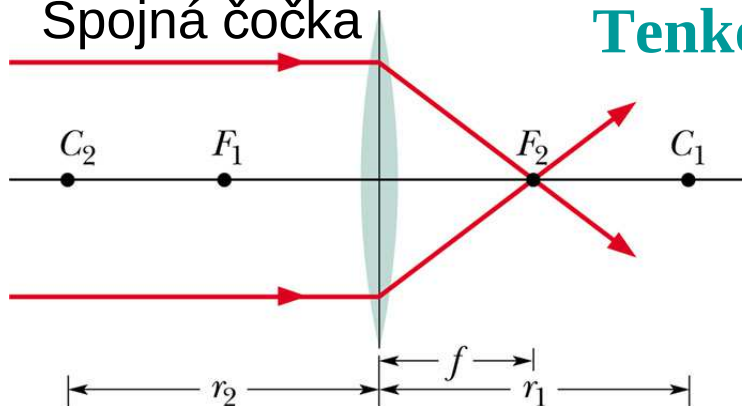
kde x je podélná vzdálenost předmětu od vztažného bodu, x' je podélná vzdálenost obrazu od vztažného bodu.

Úhlové zvětšení: $\gamma = \frac{\sigma'}{\sigma}$

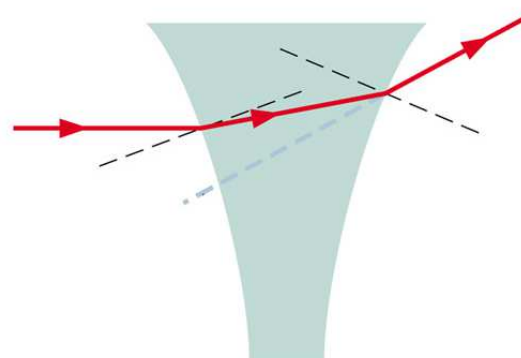
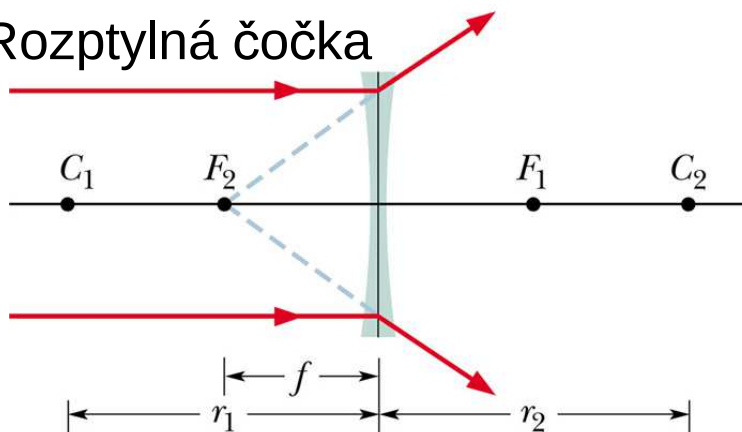
kde σ a σ' jsou úhly, které svírají sdružené paprsky s optickou osou.

Spojná čočka

Tenké čočky.



Rozptylná čočka



Zobrazovací rovnice:

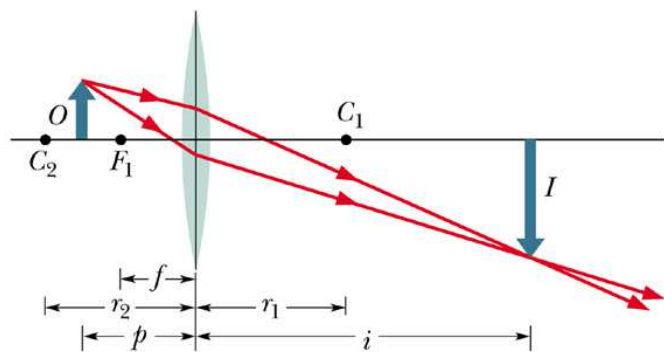
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i}$$

Rovnice tenké čočky:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

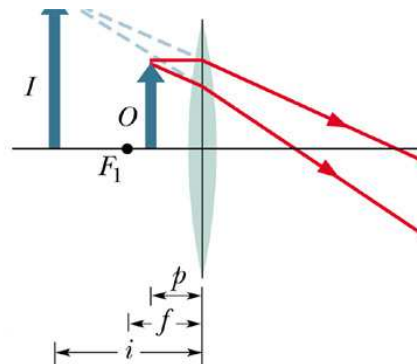
Zobrazení tenkou čočkou.

Spojná čočka



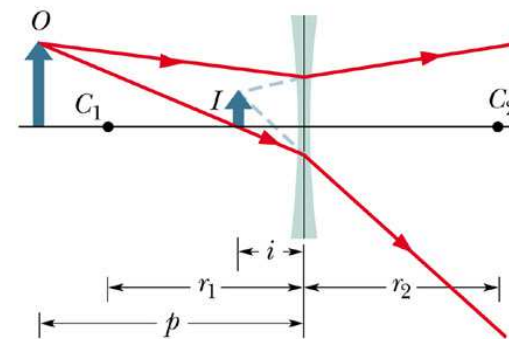
skutečný obraz

Spojná čočka



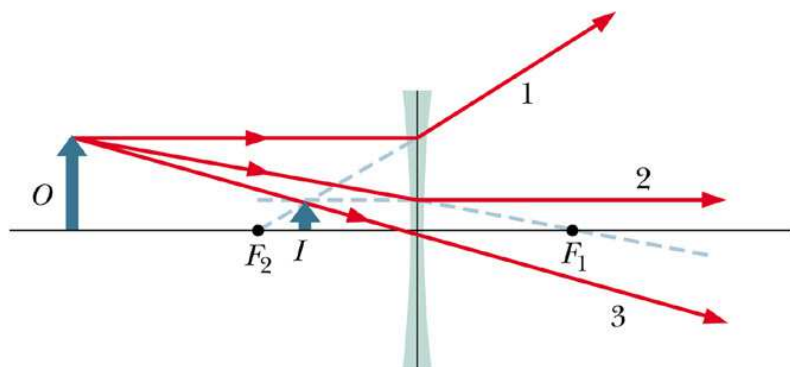
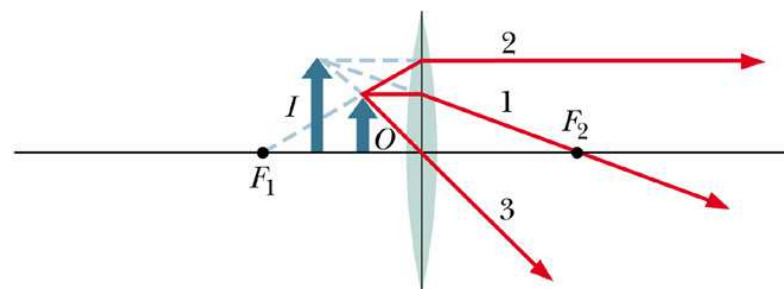
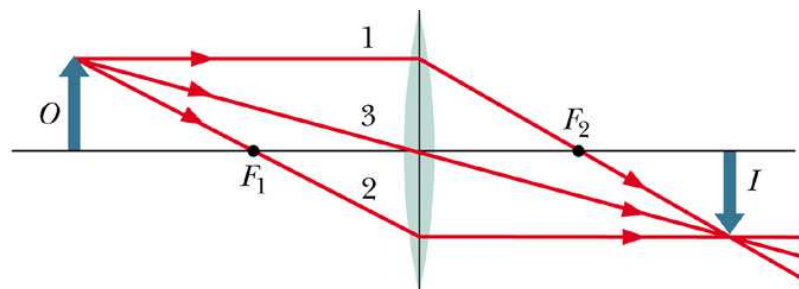
zdánlivý obraz

Rozptylná čočka



zdánlivý obraz

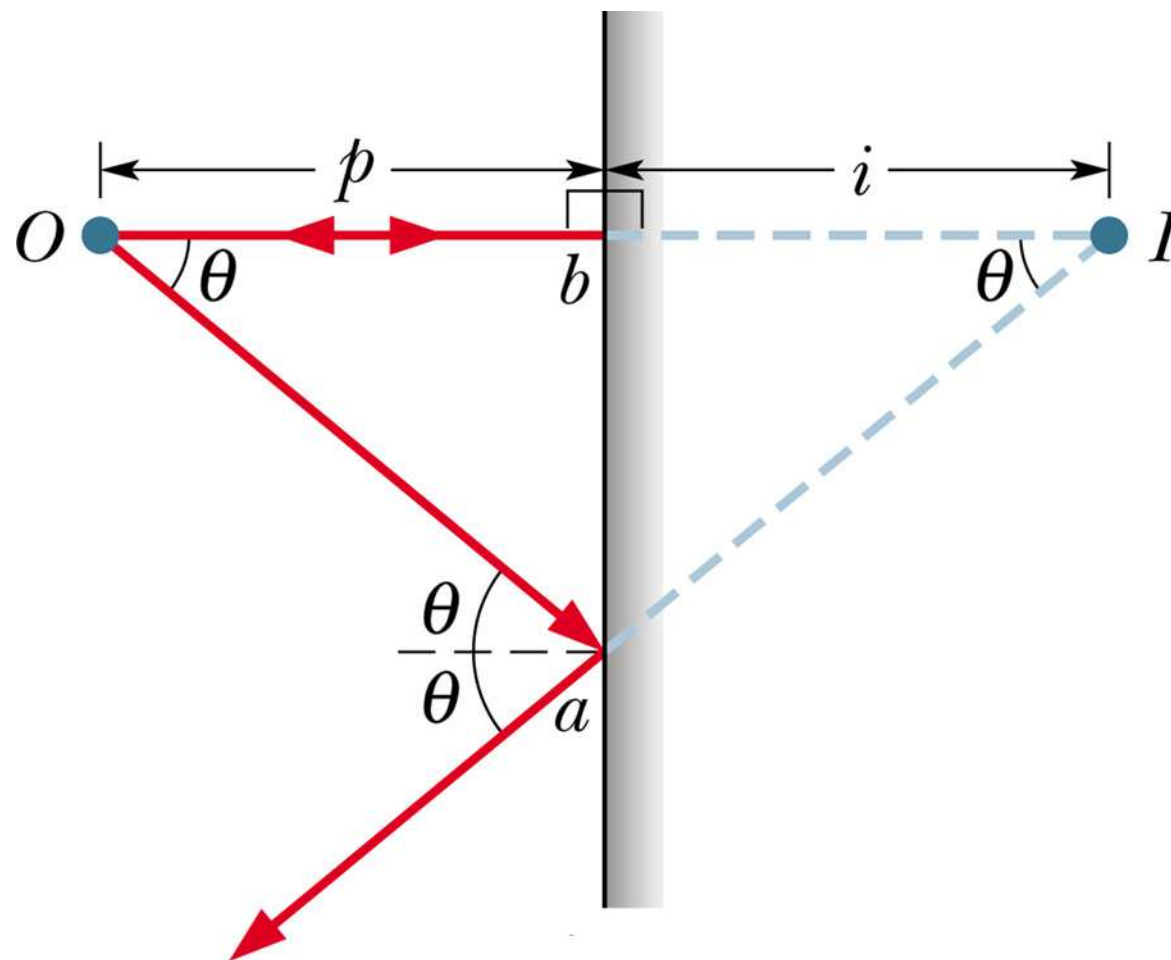
Průchod paprsku tenkou čočkou.



Konstrukce obrazu:

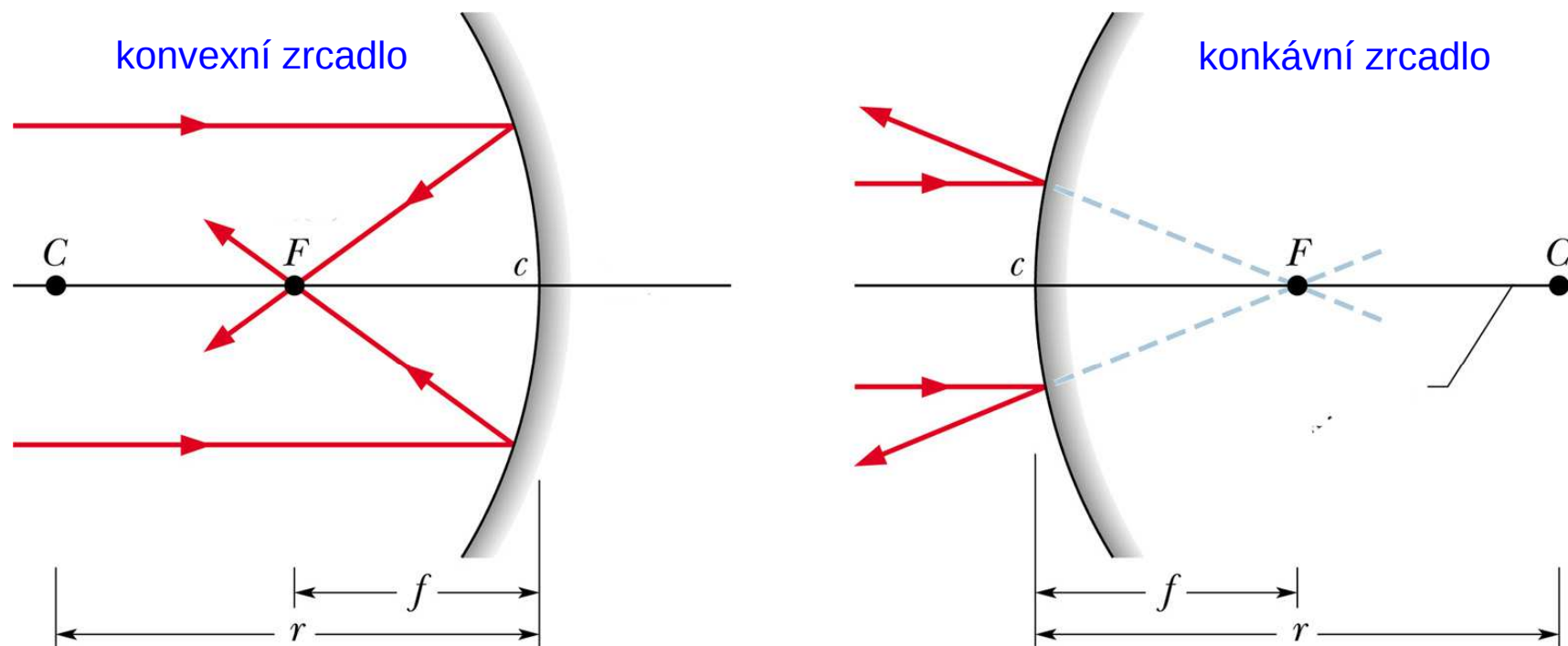
- Paprsek paralelní s optickou osou procházejí ohniskem F_2 .
- Paprsek procházející ohniskem F_1 , se v obrazovém prostoru šíří paralelně s optickou osou.
- Paprsek procházející středem čočky se šíří beze změny.

Rovinné zrcadlo.



Obraz vytvořený rovinným zrcadlem je zdánlivý, vzpřímený a stejně velký jako předmět. Platí: $p = -i$

Sférická zrcadla.



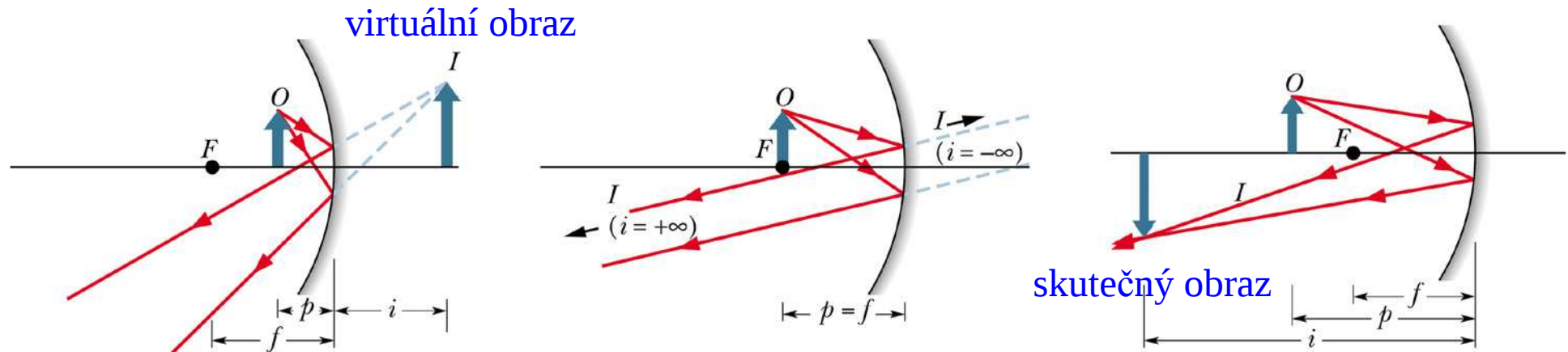
Mezi **poloměrem křivosti r** sférického zrcadla a **ohniskovou vzdáleností f** platí vztah:

$$f = \frac{r}{2}$$

$r > 0$ konvexní plocha (skutečný obraz)

$r < 0$ konkávní plocha (zdánlivý obraz)

Zobrazení sférickým zrcadlem.



Příčné zvětšení:

$$|m| = \frac{h'}{h}$$

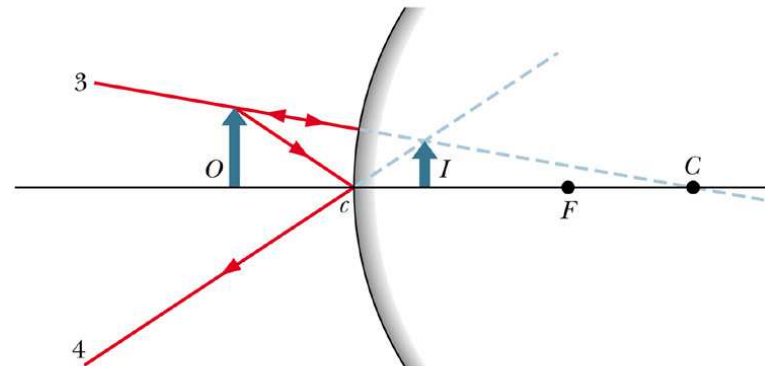
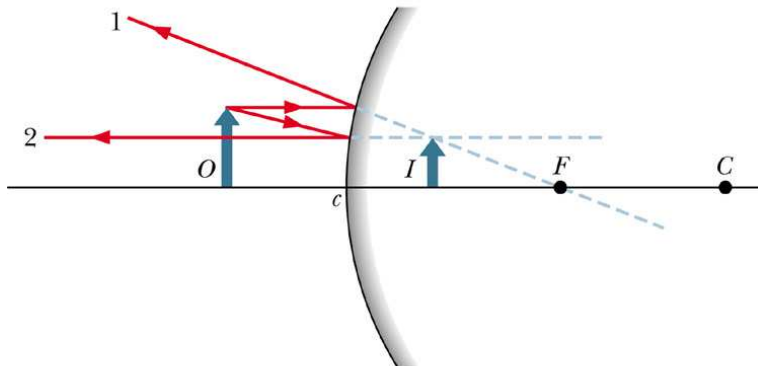
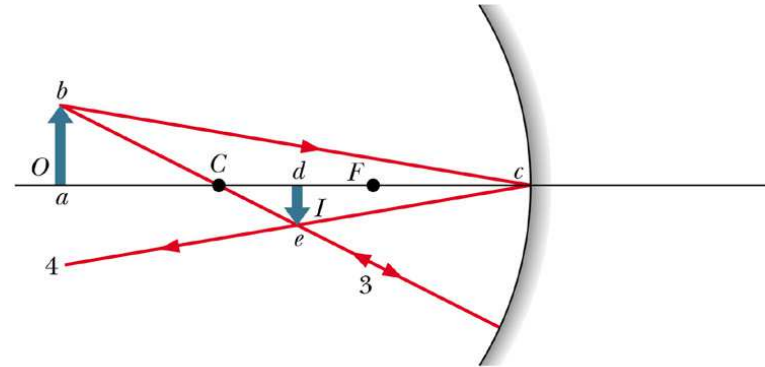
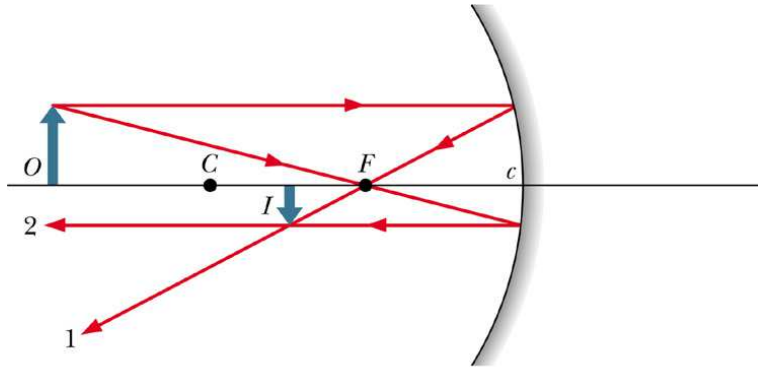
Podélné zvětšení:

$$m = -\frac{i}{p}$$

Mezi **předmětovou** p , **obrazovou** i a **ohniskovou** f vzdáleností sférického zrcadla platí vztah:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

Chod paprsků odražených na sférickém zrcadle.

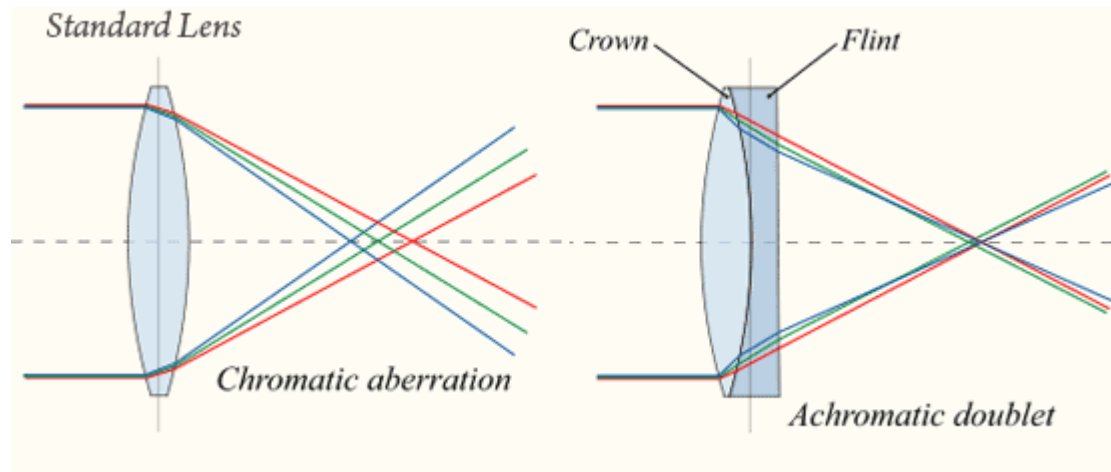


Konstrukce obrazu:

- Paprsky paralelní s optickou osou se zobrazují do ohniska F .
- Paprsky, které procházejí ohniskem se odrazí paralelně s optickou osou.
- Paprsky procházející středem křivosti zrcadla C se odrážejí od zrcadla zpět.
- Paprsky odrážející se ve vrcholu křivosti zrcadla c se odrážejí symetricky s optickou osou.

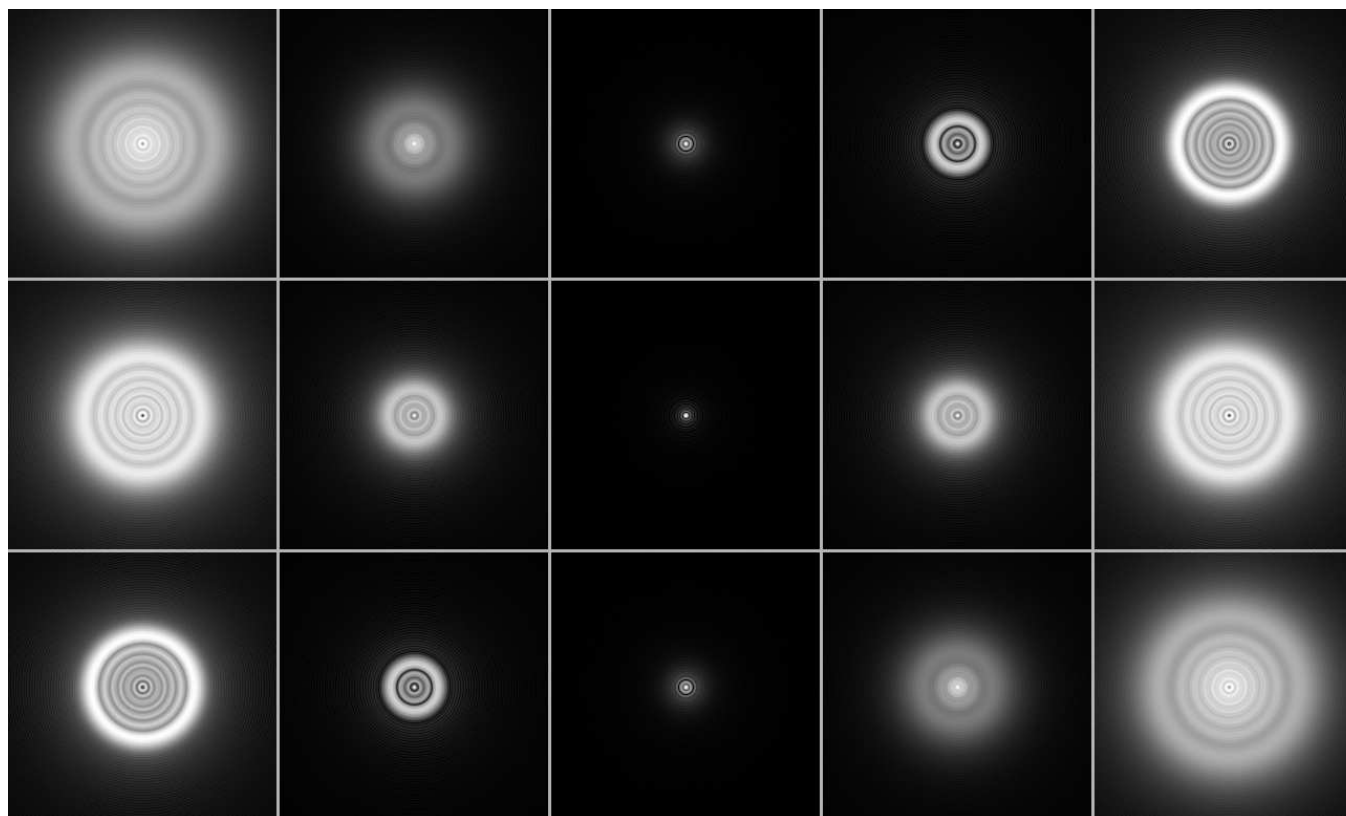
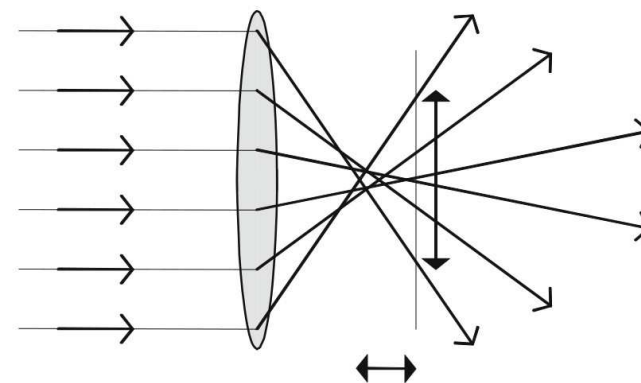
Vady zobrazení - aberace.

Barevná vada – světlo různých vlnových délek je fokusováno v různých místech na optické ose.



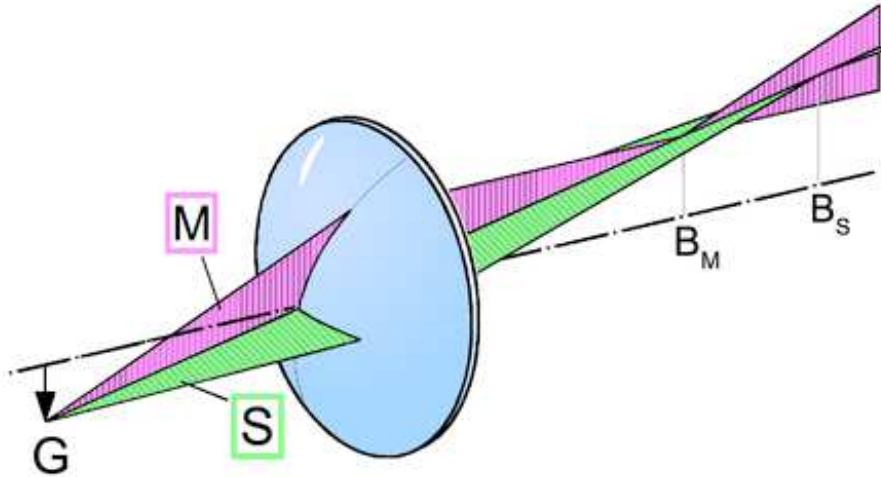
Vady zobrazení - aberace.

Sférická vada - světelné paprsky procházející dále od optické osy (blíže okraji čočky) se lámou víc, než paprsky poblíž optické osy.



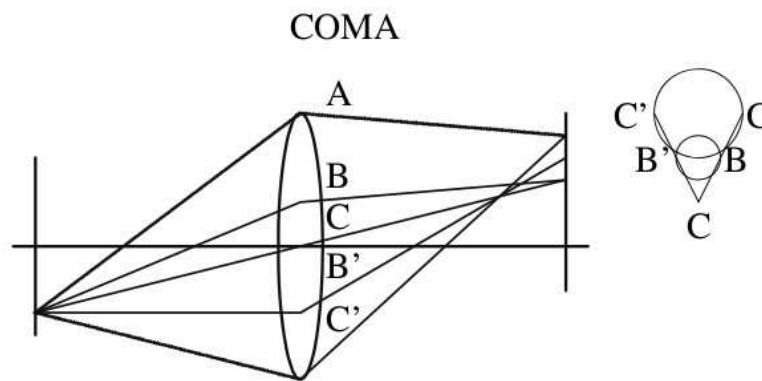
Vady zobrazení - aberace.

Astigmatická vada (astigmatismus) – paprsky zobrazující mimoosový bod procházející čočkou v rovinách **M** a **S** se zobrazí jako úsečky **B_M** a **B_S** v různých vzdálenostech na optické ose. Oblast mezi úsečkami je oblast v níž je obraz rozmazán.



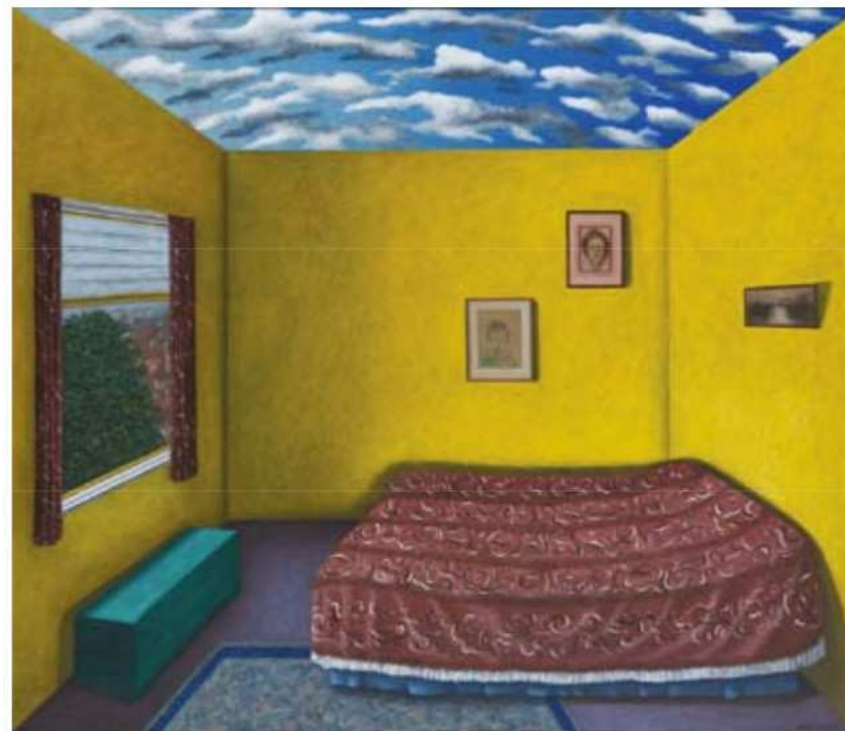
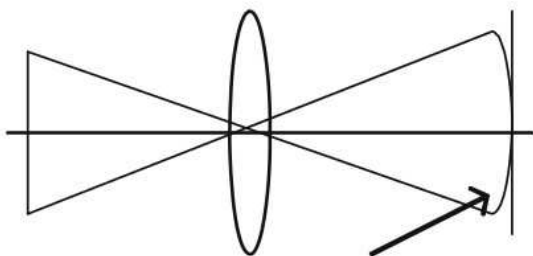
Vady zobrazení - aberace.

Koma – na čočku dopadá široký svazek paprsků, který není rovnoběžný s optickou osou. Pokud je dopadající svazek paprsků dostatečně široký, nebude se bod zobrazovat jako úsečka, ale bude v různě vzdálených rovinách od optické soustavy vytvářet složité obrazce, které tvarem připomínají komety.



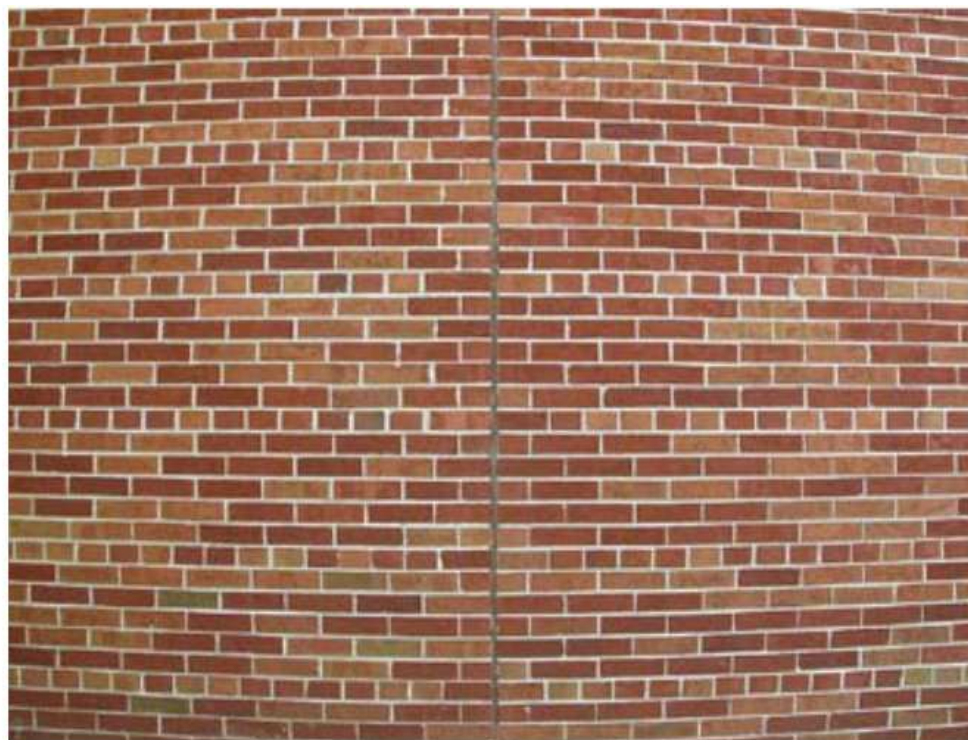
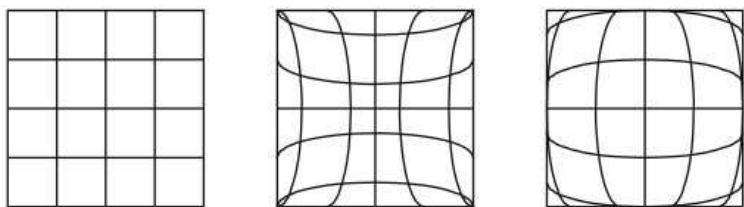
Vady zobrazení - aberace.

Sklenutí zorného pole - body ležící v rovině kolmé k optické ose se nezobrazují v rovině kolmé k ose, ale na zakřivené ploše. V rovině kolmé k optické ose tak nelze získat obraz, který by byl v celém rozsahu stejně ostrý. Tato vada souvisí s astigmatismem a bývá odstraněna současně s astigmatismem.

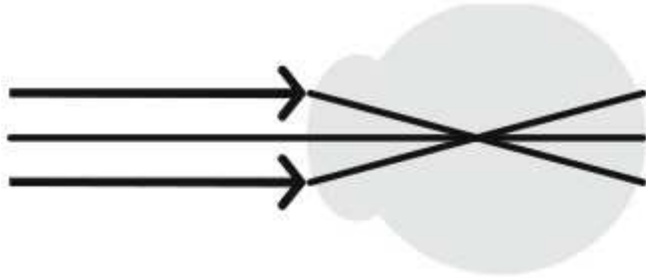


Vady zobrazení - aberace.

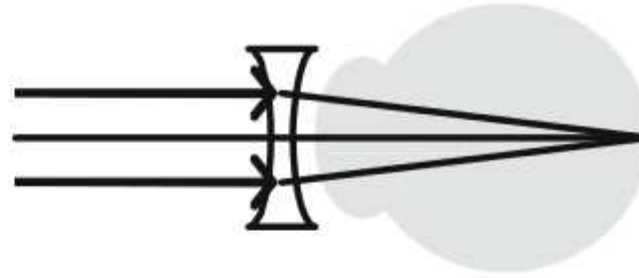
Zkreslení - zvětšení vnějších částí předmětu je odlišné od zvětšení vnitřních částí. Pokud jsou vnější části předmětu zvětšeny více, mluvíme o **poduškovitém zkreslení**, jsou-li naopak zvětšeny méně než vnitřní části, pak se jedná o **zkreslení soudkovité**. Soustava, u níž nedochází ke zkreslení, se nazývá **ortoskopická**.



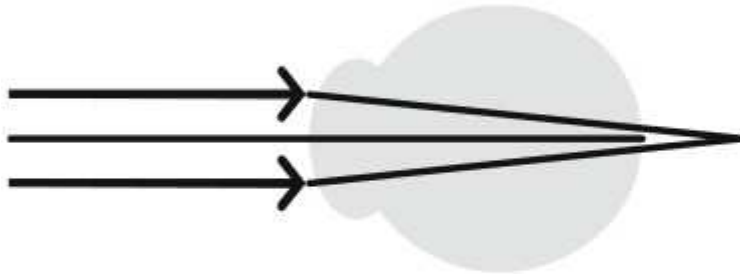
Vady zraku.



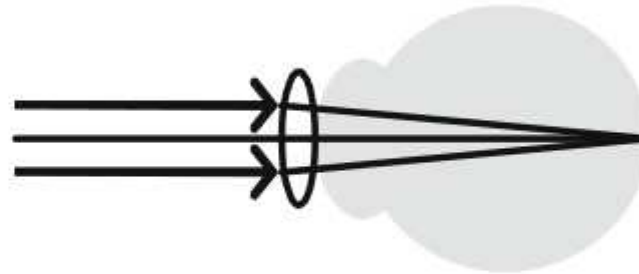
Krátkozrakost.



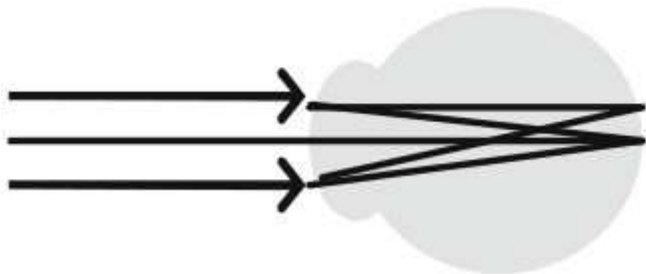
Korigovaná krátkozrakost.



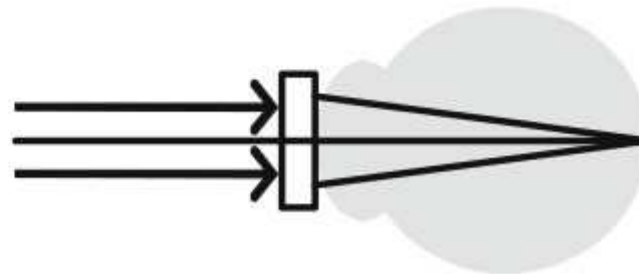
Dalekozrakost.



Korigovaná dalekozrakost.

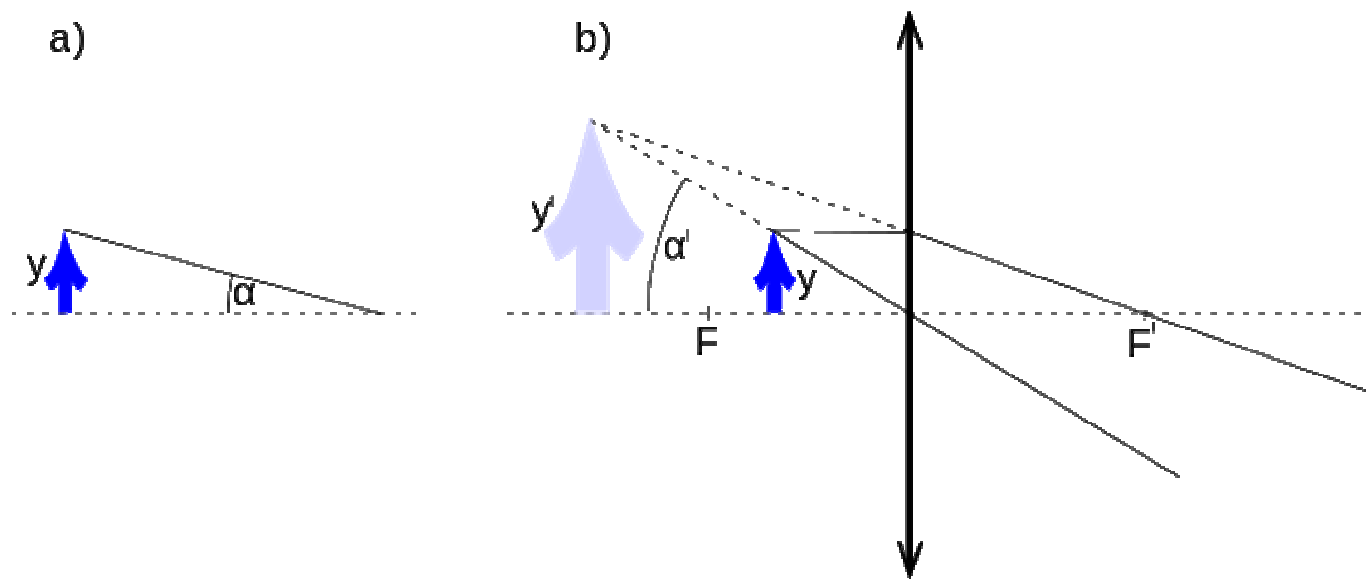


Astigmatismus - nekorigovaný.



Astigmatismus – korigovaný
válcovou čočkou.

Lupa.



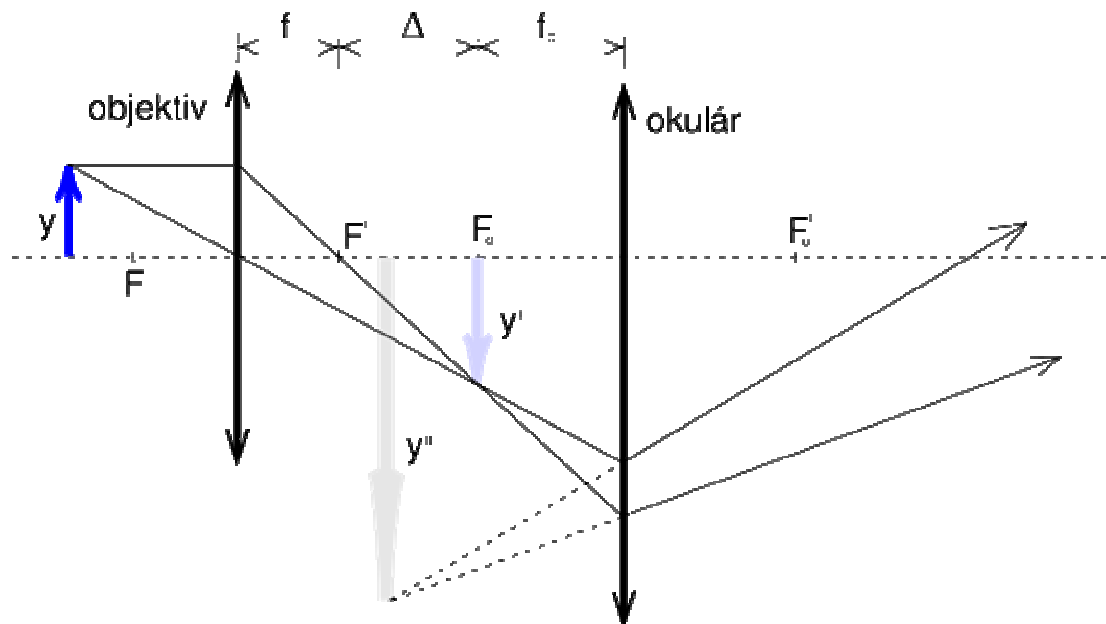
- a) Předmět pozorovaný prostým okem pozorujeme pod **zorným úhlem α** .
b) Předmět pozorovaný lupou vidíme pod **zorným úhlem α'** .

Úhlové zvětšení lupy je dáno poměrem zorného úhlu α' pod nímž vidíme předmět okem s lupou a zorného úhlu α pod nímž vidíme předmět umístěný v **konvenční zrakové vzdálenosti 25 cm** prostým okem

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

Mikroskop.

Objektiv vytvoří obraz v blízkosti okuláru, obraz pak pozorujeme okulárem jako lupou.



Zvětšení mikroskopu je dáno součinem příčného zvětšení objektivu β a úhlového zvětšení okuláru γ_0 . Objektiv vytvoří obraz v blízkosti okuláru, obraz pak pozorujeme okulárem jako lupou. Kde f obrazová ohnisková vzdálenost objektivu, f_0 je předmětová ohnisková vzdálenost okuláru, Δ je optický interval mikroskopu a d je konvenční zraková vzdálenost, 25 cm.

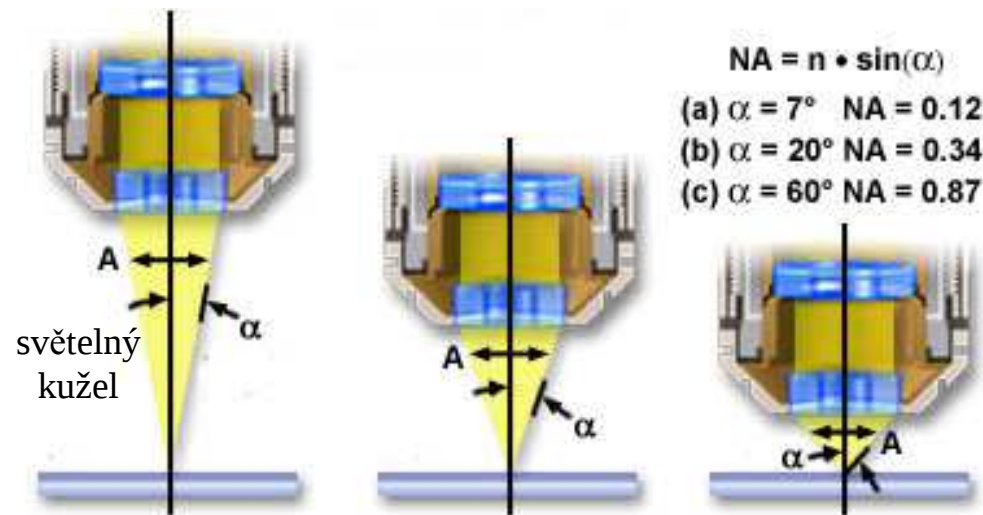
$$Z = \beta \gamma_0 = \frac{\Delta}{f} \frac{d}{f_0}$$

Numerická apertura.

Numerická apertura (N.A.) optického systému je bezrozměrné číslo charakterizující velikost úhlu pod kterým dokáže systém zachytit nebo emitovat světlo. Numerická apertura optického systému (objektiv mikroskopu, kondenzor mikroskopu) je definována vztahem:

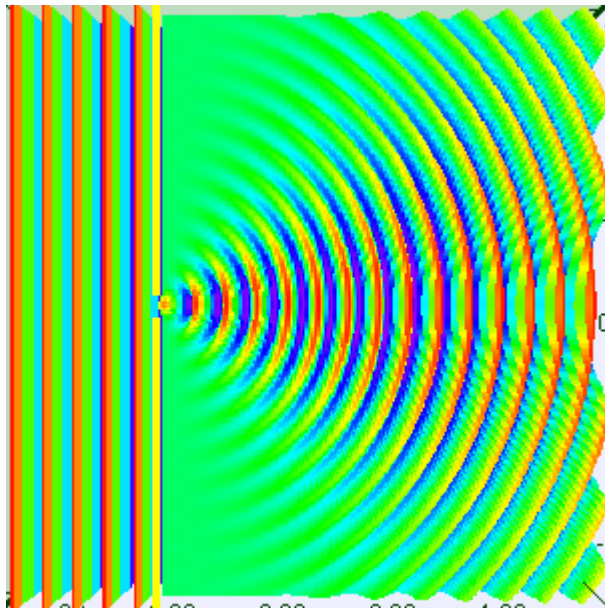
$$N.A. = n \sin \alpha$$

Kde n je index lomu prostředí mezi objektem a optickým systémem (1.00 pro vzduch, 1.33 pro čistou vodu a 1.52 pro běžný imersní olej), and α (aperturní úhel) je polovina vrcholového úhlu světelného kužele vstupujícího do optického systému nebo vystupujícího z optického systému.

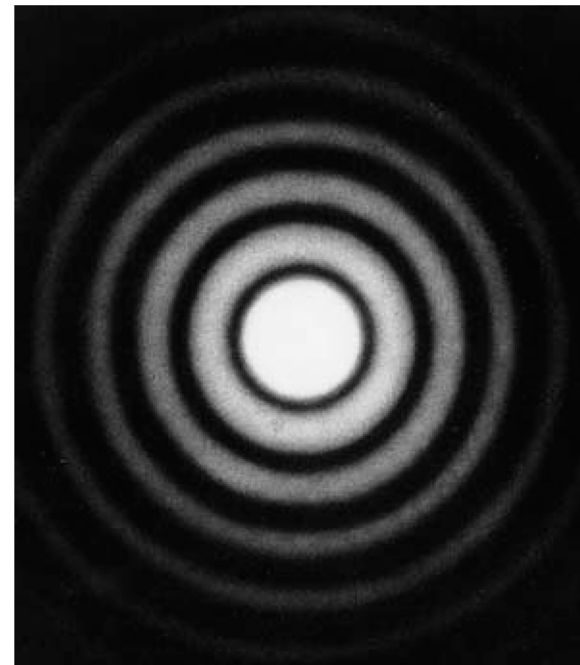


Rozlišení mikroskopu-difrakce světla.

O **difrakci světla** (**ohybu světla**) – hovoříme tehdy, když se světlo za překážkou nešíří přímočaře, ale zahýbá. K ohybu dochází tehdy, je-li vlnová délka srovnatelná s velikostí překážky. Difrakce je projevem vlnové podstaty světla a její vysvětlení vyplývá z **Huygensova principu**. Difrakce významně ovlivňuje zobrazení optickými přístroji jako jsou teleskopy a mikroskopy.



Difrakce vlnění na šterbině.



Airyho – disk: difrakce na kruhovém otvoru, světlé kruhy okolo hlavního maxima jsou vedlejší interferenční maxima oddělená tmavými interferenčními minimy.

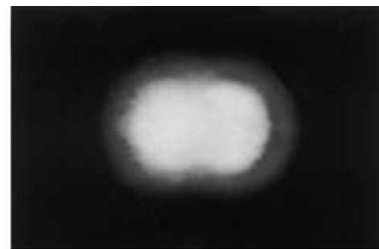
Rozlišení mikroskopu.

V důsledku difrakce světla procházejícího optickou soustavou objektivu nepozorujeme ostře jednotlivé body preparátu, nýbrž difrakční obrazec vzniklý ohybem procházejícího světla na vstupní apertuře objektivu. Schopnost mikroskopu rozlišit dva velmi blízké body je tedy limitována difrakcí a popisujeme jí veličinou kterou nazýváme **rozlišovací schopnost**. Rozlišovací schopnost je definována jako minimální vzdálenost d při níž ještě rozlišíme dva blízké body. Je určena na základě **Rayleighova kritéria**, kdy hlavní difrakční maximum jednoho zdroje spadá do oblasti prvního difrakčního minima sousedního zdroje.

Vzdálenost Airyho disků a Rayleighovo kritérium.



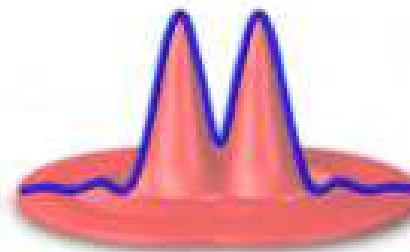
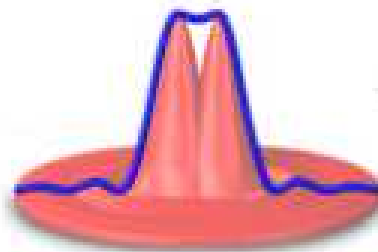
nerozlišitelné



Rayleighův limit



rozlišitelné



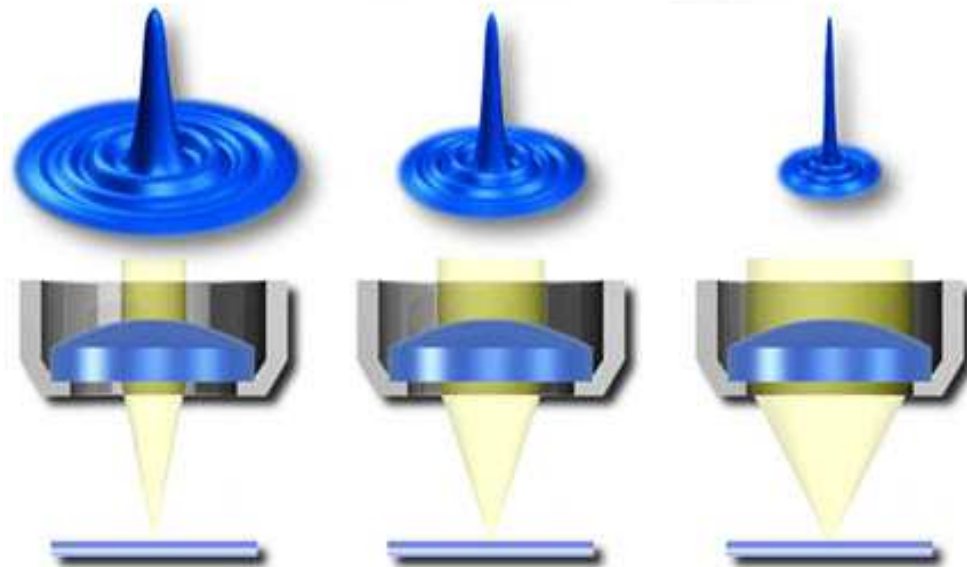
$$d = \frac{1,22\lambda}{2n \sin \alpha}$$

$$(N.A.) = n \sin \alpha$$

Rozlišení mikroskopu.

Rozlišovací schopnost mikroskopu je funkcí vlnové délky použitého světla, indexu lomu prostředí mezi preparátem a objektivem násobeného sinem vrcholového úhlu kužele světla vstupujícího do objektivu, tedy **numerickou aperturou objektivu** $(N.A.)_{\text{objektivu}}$.

Numerická apertura a Airyho disk.



$$d = \frac{1,22\lambda}{2(N.A.)_{\text{objektivu}}}$$

Pro správně nastavený mikroskop s kondenzorem platí:

$$2(N.A.)_{\text{objektivu}} = (N.A.)_{\text{objektivu}} + (N.A.)_{\text{kondensoru}}$$

WWW mikroskopy.

Stránky věnující se podrobně mikroskopii, včetně základů optického zobrazování, je zde spousta appletů kde si můžete vyzkoušet jak věci fungují:

<https://micro.magnet.fsu.edu/primer/>

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/>

<http://www.olympusmicro.com/primer/>