

26. Optické zobrazování lomem a odrazem, jeho využití v optických přístrojích

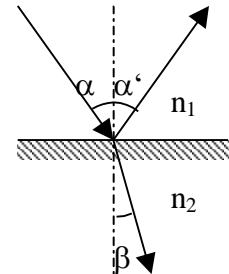
Světlo je elektromagnetické vlnění, které můžeme vnímat zrakem. Rozsah jeho vlnových délek je 390 nm – 760 nm.

Prostředí, kterým se šíří světlo se nazývá **optické prostředí**. Prostředí opticky **hustší (řidší)** je prostředí, ve kterém se světlo šíří pomaleji (rychleji).

ODRAZ A LOM SVĚTLA

Zákon odrazu světla:

Velikost úhlu odrazu se rovná velikosti úhlu dopadu $\alpha = \alpha'$;
Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu.



Zákon lomu světla (Snellův zákon) lze matematicky vyjádřit vztahem:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

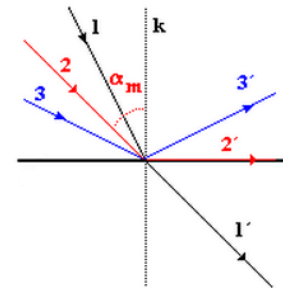
v_1, v_2 jsou rychlosti světla v 1. a 2. prostředí, n_1 a n_2 jsou absolutní indexy lomu 1. a 2. prostředí, n je relativní index lomu pro danou

dvojici prostředí. Platí: $n_1 = \frac{c}{v_1}$, $n_2 = \frac{c}{v_2}$,

Poznámka: Úhel lomu závisí na barvě (frekvenci) světla (viz. disperze světla).

Ze Snellova zákona lomu plyne:

- $v_2 < v_1$ ($n_2 > n_1$) $\Rightarrow \beta < \alpha$... Prochází-li světlo z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, láme se ke kolmici.
- $v_2 > v_1$ ($n_2 < n_1$) $\Rightarrow \beta > \alpha$... Prochází-li světlo z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, láme se od kolmice.



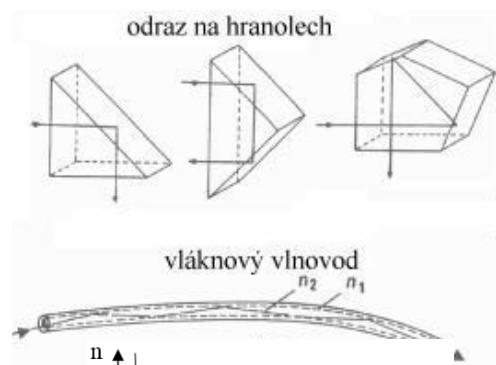
Pokud je při lomu od kolmice úhel dopadu roven **meznímu úhlu α_m** , je úhel lomu $\beta = 90^\circ$ a lomený paprsek "odchází" po rozhraní.

Pro $\alpha > \alpha_m$ nastává **úplný (totální) odraz**.

$$\sin \alpha_m = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

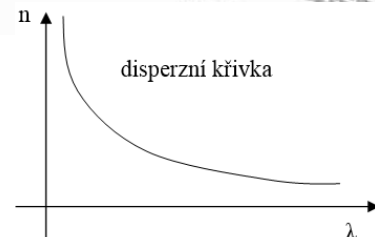
Užití totálního odrazu světla:

- refraktometr – přístroj na měření indexu lomu na základě měření mezního úhlu.
- odrazné optické hranoly – využívají se v optických přístrojích, ve kterých je třeba měnit směr paprsků
- optická vlákna (vlnovody) – slouží pro přenos obrovského množství dat v kabelových sítích

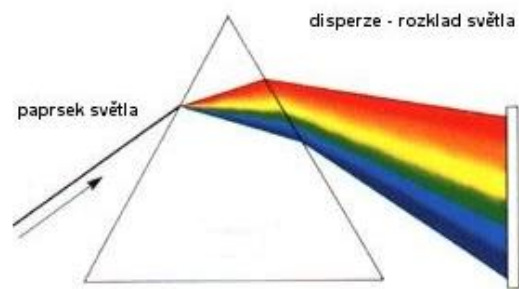


Disperze světla je jev závislosti indexu lomu na vlnové délce světla, jak je patrné z *disperzní křivky*.

Poznámka 1: Disperze je důsledkem skutečnosti, že v jakémkoliv prostředí kromě vakua závisí rychlost světla na vlnové délce. Čím je vlnová délka větší, tím větší rychlostí se v daném prostředí toto světlo pohybuje a tím se při lomu méně láme. Ve vakuu je rychlost světla pro všechny vlnové délky stejná.



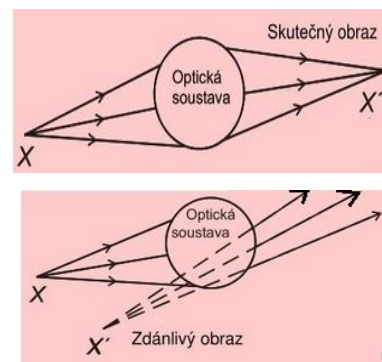
Poznámka 2: Vlivem disperze se světelné paprsky lámou pod různými úhly (fialové nejvíce – vyšší frekvence, kratší vlnová délka; červené nejméně – nižší frekvence, delší vlnová délka). Při jednom lomu není rozložení tak patrné, proto se používá vícenásobný lom (optický hranol). Tento hranol je vyrobený ze skla, hladké roviny hranolu svírají **lámavý úhel** φ , paprsek se lomí dvakrát a odchylka různých barev je větší, na stínítku se jev zobrazí jako řada na sebe navazujících barevných proužků – **hranolové spektrum**.



Optická soustava je soustava optických prostředí, která mění směr chodu paprsků.

Poznámka: Z každého bodu viditelného tělesa vychází rozbíhavý svazek světelných paprsků.

- Tvoří-li paprsky po průchodu soustavou sbíhavý svazek, vzniká **skutečný** (reálný) **obraz**.
- Tvoří-li rozbíhavý svazek, pak vzniká obraz **nescutečný** (virtuální, zdánlivý) v místě, ve kterém by byl průsečík paprsků prodloužených proti směru jejich šíření. Tento obraz nelze zachytit na stínítku.



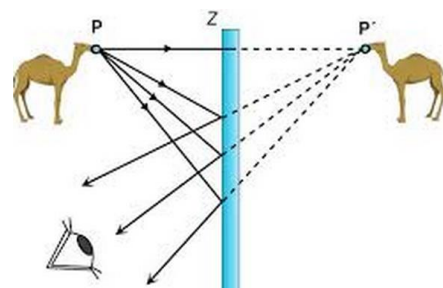
Postup získávání optických obrazů nazýváme **optické zobrazování**. Vytvářením optických obrazů se zabývá **paprsková optika**. Vychází z následujících předpokladů:

- 1) přímočaré šíření světla ve stejnorodém optickém prostředí
- 2) platnost zákona odrazu a lomu
- 3) chod světelných paprsků je na sobě nezávislý

ZOBRAZOVÁNÍ ODRAZEM - ZRCADLA

1) Zobrazování rovinným zrcadlem

Rovinné zrcadlo vytváří obraz zdánlivý, vzpřímený, stranově převrácený a stejně velký jako předmět a je s předmětem souměrný podle roviny zrcadla.



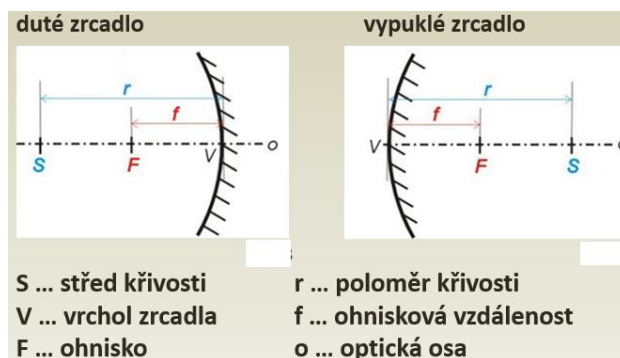
2) Zobrazování kulovými zrcadly

Kulová zrcadla dělíme na **dutá** a **vypuklá**, jak je patrné z obrázku.

Poznámka: Při zobrazování používáme nejvíce **paraxiální paprsky**, což jsou paprsky blízkosti optické osy, kterými se bod zobrazí jako bod, přímka jako přímka a vedou k tzv. ideálnímu zobrazení.

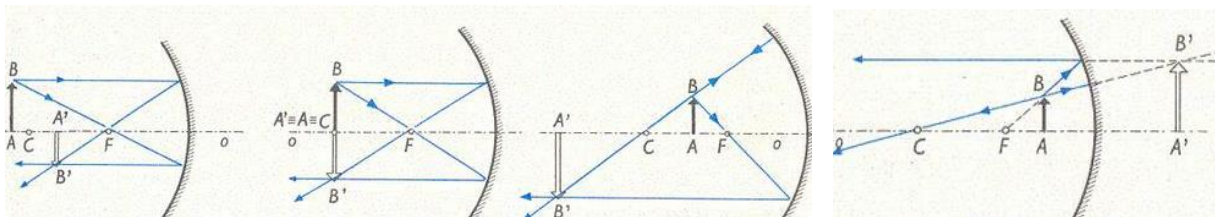
Nejčastěji používané paprsky:

- 1) Paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou se odráží do ohniska.
- 2) Paprsek procházející ohniskem se odráží rovnoběžně s optickou osou.
- 3) Paprsek procházející středem křivosti se odráží se zpět do středu křivosti.



a) Zobrazování dutým kulovým zrcadlem

Na obrázcích jsou sestrojeny obrazy předmětů, nacházejících se v různých vzdálenostech od dutého zrcadla. Při konstrukcích byly využity pouze první dva ze tří uvedených paprsků.



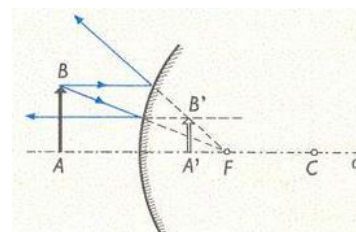
Získané výsledky lze zapsat do přehledné tabulky

Vzdálenost předmětu	Vzdálenost obrazu	Velikost obrazu	Druh obrazu
$a > r$	$r > a' > f$	$ y' < y $	skutečný, převrácený, zmenšený
$a = r$	$a' = r$	$ y' = y $	skutečný, převrácený, stejně velký
$r > a > f$	$a' > r$	$ y' > y $	skutečný, převrácený, zvětšený
$a = f$	$a' \rightarrow \infty$	$ y' \rightarrow \infty$	-
$a < f$	$0 < a' < \infty$	$ y' > y $	zdánlivý, přímý, zvětšený

Poznámka: V tabulce značí: a ... předmětovou vzdálenost, a' ... obrazovou vzdálenost, y ... velikost předmětu, y' ... velikost obrazu.

b) Zobrazování vypuklým kulovým zrcadlem

Při zobrazování vypuklým zrcadlem získáme nezávisle na vzdálenosti předmětu od zrcadla vždy obraz, který je zdánlivý, přímý a zmenšený.



Při **početním řešení** používáme pro duté i vypuklé zrcadlo stejnou zobrazovací rovnici i další vztahy. Je nutné dát pozor na znaménkovou konvenci a správnou fyzikální interpretaci získaných výsledků.

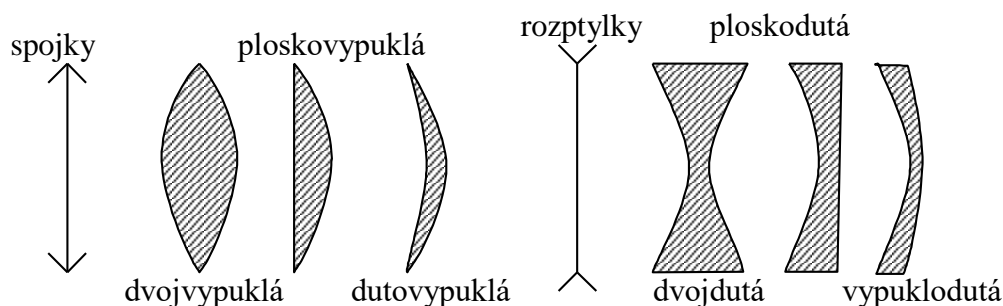
Zobrazovací rovnice: $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}$ **Zvětšení:** $Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{f}{a-f} = -\frac{a-f}{f}$

Znaménková konvence: r, f, a, a' – pokud jsou před (za) zrcadlem, jsou kladné (záporné).

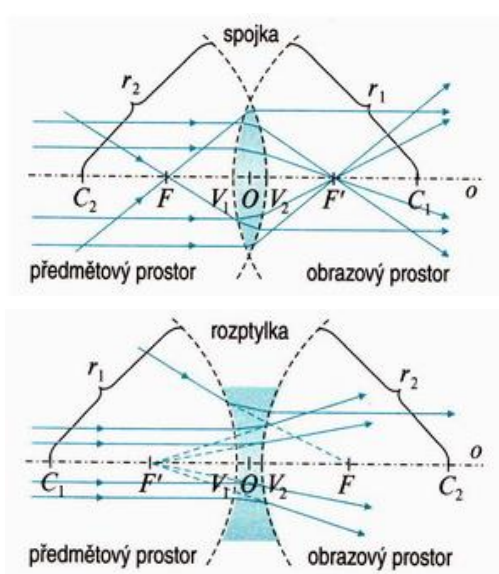
Fyzikální interpretace výsledků:

- $a' < 0, Z > 0$ obraz neskutečný
- $a' > 0, Z < 0$ obraz skutečný
- $|Z| < 1$ obraz zmenšený
- $|Z| > 1$ obraz zvětšený

ZOBRAZOVÁNÍ LOMEM - ČOČKY



Čočky zobrazují pomocí dvojího lomu světla. Dále uvedené skutečnosti platí s dobrou přesností pro „tenké“ čočky,



Názvosloví platí pro spojky i rozptylky

- O – optický střed čočky
- o – optická osa
- C_1, C_2 – středy optických ploch
- r_1, r_2 – poloměry křivosti kulových ploch
- V_1, V_2 – vrcholy čočky
- F – předmětové ohnisko
- F' – obrazové ohnisko
- $f = |FO| = |F'O|$ – ohnisková vzdálenost

Ohnisková vzdálenost: $\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$, kde n_2 je index lomu čočky a n_1 index lomu okolního prostředí.

Znaménková konvence:

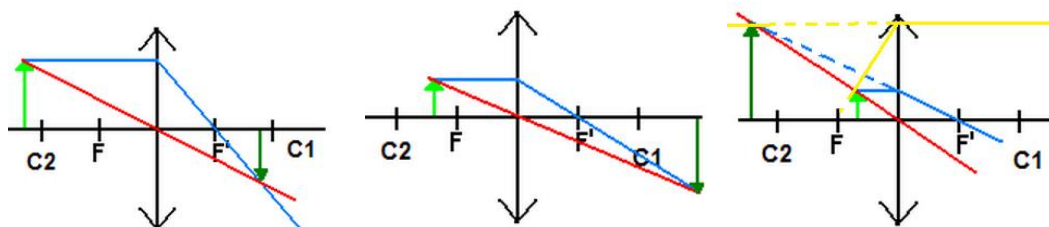
- $r_1 > 0$ příp. $r_2 > 0$ pokud je příslušná plocha do prostoru vypuklá, např. u dvojvypuklé spojky.
- $r_1 < 0$ příp. $r_2 < 0$ pokud je příslušná plocha do prostoru dutá, např. u dvojduté rozptylky.

Optická mohutnost: $\varphi = \frac{1}{f}$ $[\varphi] = D \dots$ dioptrie

1) Zobrazování spojkou

Nejčastěji používané paprsky:

1. Paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou se láme se do obrazového ohniska.
2. Paprsek procházející předmětovým ohniskem se láme se rovnoběžně s optickou osou.
3. Paprsek procházející optickým středem čočky nemění při průchodu čočkou svůj směr.



skutečný, převrácený, zmenšený

skutečný, převrácený, zvětšený

zdánlivý, přímý, zvětšený

Získané výsledky lze zapsat do přehledné tabulky

Vzdálenost předmětu	Vzdálenost obrazu	Velikost obrazu	Druh obrazu
$a > 2f$	$2f > a' > f$	$ y' < y $	skutečný, převrácený, zmenšený
$a = 2f$	$a' = 2f$	$ y' = y $	skutečný, převrácený, stejně velký
$2f > a > f$	$a' > 2f$	$ y' > y $	skutečný, převrácený, zvětšený
$a = f$	$a' \rightarrow \infty$	$ y' \rightarrow \infty$	-
$a < f$	$0 < a' < \infty$	$ y' > y $	zdánlivý, přímý, zvětšený

Poznámka: V tabulce značí: a ... předmětovou vzdálenost, a' ... obrazovou vzdálenost, y ... velikost předmětu, y' ... velikost obrazu.

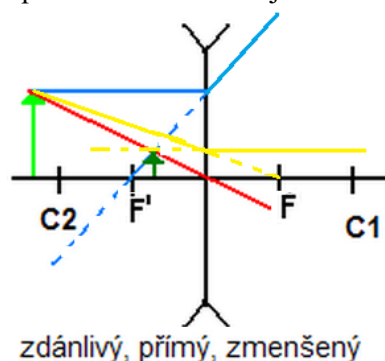
2) Zobrazování rozptylkou

Nejčastěji používané paprsky:

1. Paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou se láme se od obrazového ohniska.
2. Paprsek, který míří do předmětového ohniska, se láme se rovnoběžně s optickou osou.
3. Paprsek procházející optickým středem čočky nemění při průchodu čočkou svůj směr.

Při zobrazování rozptylkou získáme nezávisle na vzdálenosti předmětu od zrcadla vždy obraz, který je zdánlivý, přímý a zmenšený.

Při **početním řešení** používáme pro spojku i rozptylku stejnou zobrazovací rovnici i další vztahy. Je nutné dát pozor na znaménkovou konvenci a správnou fyzikální interpretaci získaných výsledků.



Zobrazovací rovnice: $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}$ **Zvětšení:** $Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{f}{a-f} = -\frac{a'-f}{f}$

Znaménková konvence: a je kladná, a' je kladná za čočkou (v obrazovém prostoru) a záporná před čočkou (v předmětovém prostoru), f je kladná u spojky a záporná u rozptylky.

Fyzikální interpretace výsledků:

- $a' < 0, Z > 0$ obraz neskutečný
- $a' > 0, Z < 0$ obraz skutečný
- $|Z| < 1$ obraz zmenšený
- $|Z| > 1$ obraz zvětšený

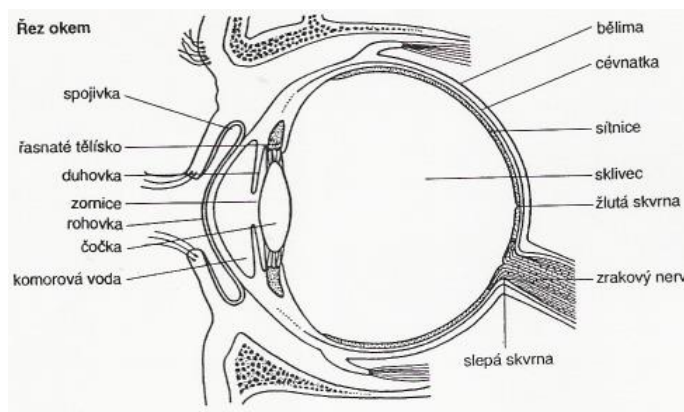
OKO

- spojná optická soustava s měnitelnou ohniskovou vzdáleností
- vytváří obraz předmětů v různých vzdálenost vždy ve stejné vzdálenosti na citlivé sítnici oka
- **obraz je vždy zmenšený, převrácený a skutečný**

Poznámka: Skutečnost, že pozorované předměty nevidíme převrácené, ale vzpřímené, je způsobeno centrální nervovou soustavou.

Složení oka:

- citlivost sítnice není všude stejná, největší je v okolí průsečíku s optickou osou (nejhustší oblast tyčinek a čípků) – **žlutá skvrna**
- **akomodace oka** – čočka oka je spojená s kruhovými svaly, které mění její mohutnost a ohniskovou vzdálenost (zaostřování) podle vzdálenosti předmětu od oka



- **vzdálený bod** oka – největší vzdálenost, na kterou může oko akomodovat, u zdravého oka v nekonečnu
- **blízký bod** oka – nejbližší bod, který se ještě zobrazí ostře, u zdravého oka 15 cm
- **konvenční zraková vzdálenost** – doporučená vzdálenost na čtení, psaní, oko se neunaví tak rychle, jako při menší vzdálenosti, u zdravého oka 25 cm

Vady oka – korekce brýlemi

1) krátkozrakost

- vzdálený bod má v konečné vzdálenosti a blízký bod posunutý k oku
- obraz „vzdálených“ objektů vzniká před sítnicí a oko je bez brýlí nezaostří
- oko příliš protáhlé nebo čočka moc vypuklá, velká optická mohutnost oka
- optickou mohutnost oka zmenšujeme rozptylkou

2) dalekozrakost

- blízký bod má posunutý od oka a vzdálený je v nekonečnu
- obraz „blízkých“ objektů vzniká za sítnicí a oko je bez brýlí nezaostří
- oko příliš zploštělé nebo čočka málo vypuklá, malá optická mohutnost oka
- optickou mohutnost oka zvětšujeme spojkou

- **zorný úhel** τ je úhel, který svírají okrajové paprsky předmětu, které procházejí středem oční čočky. Pokud chceme předmět lépe vidět, pozorujeme ho z menší vzdálenosti, čímž zorný úhel zvětšíme. Čím je zorný úhel větší, tím vidíme zřetelněji detaily na předmětu. Nejmenší zorný úhel, kdy je ještě oko schopno rozlišit dva body je $\tau \geq 1'$.

Podmínky zřetelného vidění

- 1) obraz vzniká na sítnici
- 2) předmět je dostatečně osvětlen
- 3) zrakový vjem musí trvat přiměřenou dobu

Prostorové vidění: Oběma očima se v mozku zpracovávají nepatrně odlišné obrazy, což vede k trojrozměrnému vidění do vzdálenosti asi 50m.

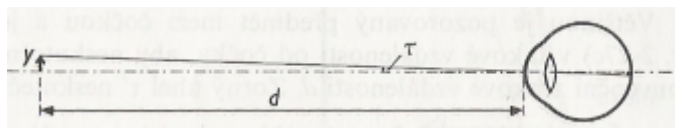
OPTICKÉ PŘÍSTROJE

- vytvářejí zdánlivý (neskutečný) obraz, který pozorujeme okem (subjektivně) pod zvětšeným zorným úhlem
- jsou charakterizovány veličinou úhlové zvětšení $\gamma = \frac{\tau'}{\tau}$

1. Lupa (spojná čočka)

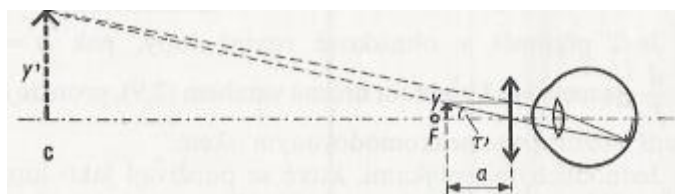
Slouží ke zvětšení zorného úhlu při pozorování drobných předmětů. Poskytuje 5 až 12 - ti násobné zvětšení.

- Pozorování drobného předmětu z konvenční zrakové vzdálenosti bez lupy:



- Pozorování drobného předmětu lupou:

Předmět umístíme mezi spojnou čočku a její ohnisko. Vzniká neskutečný, zvětšený, přímý obraz.

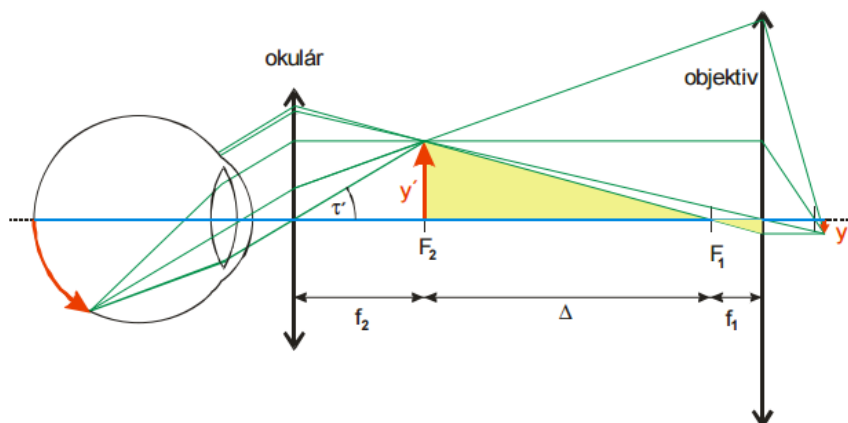


Úhlové zvětšení: $\gamma = \frac{\text{tg } \tau'}{\text{tg } \tau} = \frac{d}{f}$,

kde d je konvenční zraková vzdálenost a f je ohnisková vzdálenost lupy.

2. Mikroskop

Slouží ke zvětšení zorného úhlu při pozorování malých objektů, zvětšení až 1000x. Pozorovaný předmět umístíme do malé vzdálenosti před předmětové ohnisko objektivu. Objektiv vytvoří skutečný, převrácený, zvětšený obraz, který pozorujeme okulárem jako lupou.



Zvětšení mikroskopu: $Z = Z_{ob} \cdot \gamma_{ok} = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{d}{f_2}$, kde f_1 je ohnisková vzdálenost objektivu a

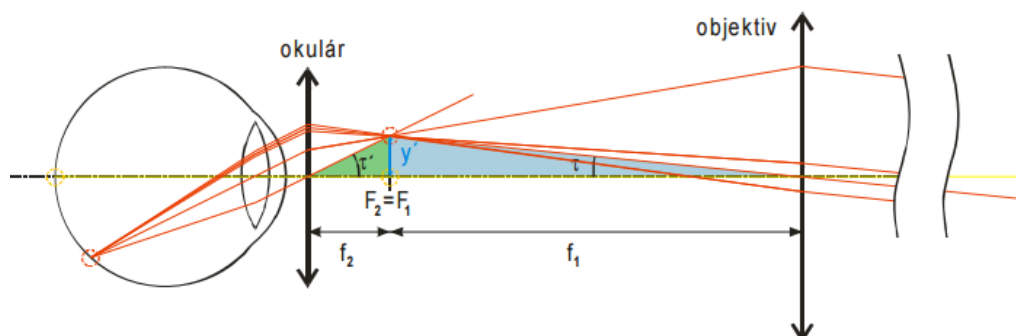
f_2 okuláru, Δ je optický interval mikroskopu a d je konvenční zraková vzdálenost.

3. Dalekohled

Slouží k zvětšení zorného úhlu při pozorování velkých, ale velmi vzdálených předmětů.

1. Refraktory používají jako objektiv spojnu čočku:

a) **Keplerův dalekohled:** objektiv je spojná čočka s velkou ohniskovou vzdáleností, okulár je lupa. Vnitřní ohniska splývají. Obraz je převrácený, neskutečný, zvětšený.



Z obrázku plyne pro zvětšení dalekohledu:

$$\gamma = \frac{\tau'}{\tau} \doteq \frac{\text{tg } \tau'}{\text{tg } \tau} = \frac{y'}{f_2} : \frac{y}{f_1}$$

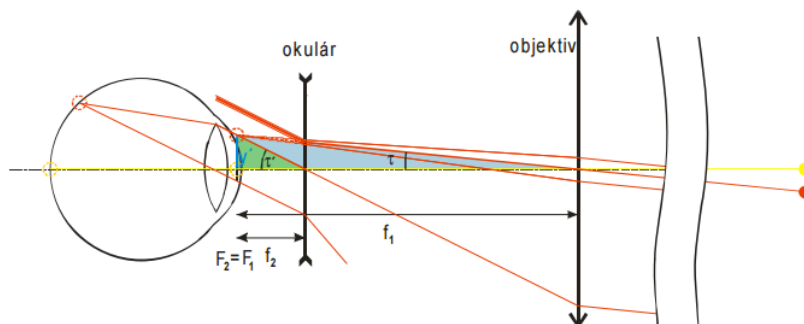
Potom pro úhlové zvětšení dalekohledu platí:

f_1 ... ohnisková vzdálenost objektivu

f_2 ... ohnisková vzdálenost okuláru

$$\gamma \doteq \frac{f_1}{f_2}$$

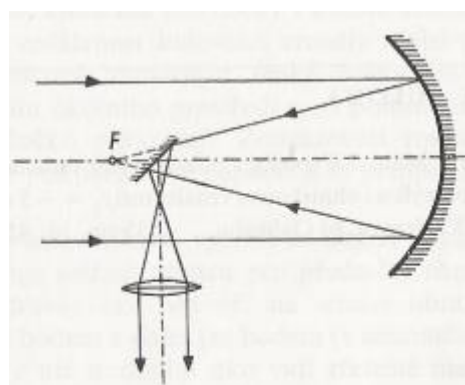
b) **Galileiho dalekohled:** objektiv = spojka, okulár = rozptylka. Obraz vzpřímený, neskutečný, zvětšený. Na tomto principu pracují např. divadelní kukátka.



c) **Hranolový dalekohled - triedr:** součástí konstrukce jsou optické odrazné hranoly, které převrací obraz stranově i výškově (do “vzpřímené polohy”).

2. Reflektory používají jako objektiv duté zrcadlo.

Newtonův dalekohled: objektiv tvoří duté parabolické zrcadlo, okulár tvoří spojka. Vzniká skutečný obraz vzdáleného předmětu.

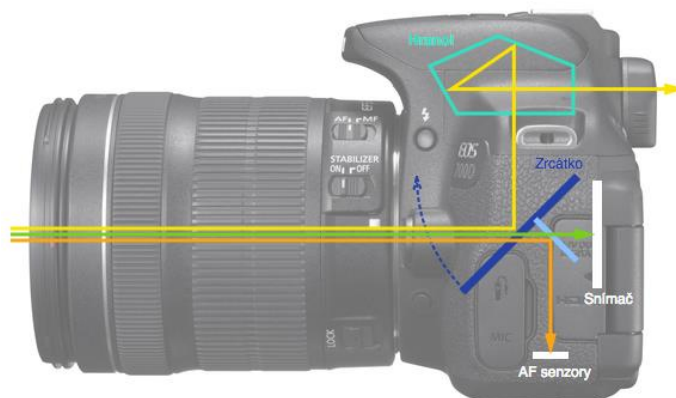
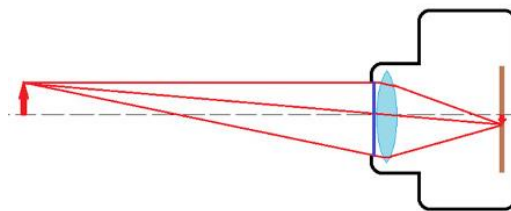


4. Fotografický přístroj

se skládá z:

- **objektivu** - je tvořen spojnou soustavou čoček
- **komory**
- **zařízení, na kterém se zachycuje obraz** – u klasických fotoaparátů šlo o fotografický film, u digitálních se používá křemíkový CCD čip

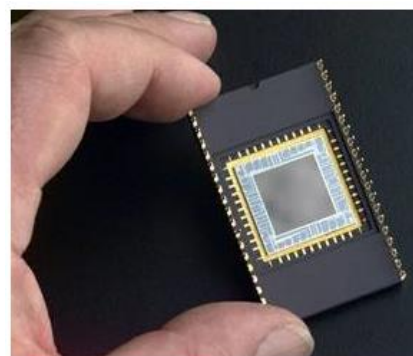
Vzdálenost předmětu bývá větší než $2f$ objektivu, obraz předmětu vzniká v obrazovém prostoru ve vzdálenosti mezi f a $2f$, je skutečný, převrácený, zmenšený.



Rozšiřující učivo (pro zájemce)

Digitální fotoaparát:

Konstrukce digitálního fotoaparátu je podobná konstrukci fotoaparátu klasického, avšak způsobem vzniku a zaznamenání obrazu se digitální fotoaparát liší od klasického naprosto diametrálně. Digitální obraz vzniká na plošce polovodičového obrazového snímače - čipu. Tento křemíkový čip CCD (zkratka slov Charge-Coupled Device) o ploše několika cm^2 je tvořen několika milióny světlocitlivých obrazových bodů neboli pixelů. Pro posouzení kvality výsledného obrazu je hlavním kritériem počet pixelů na čipu (fotoaparáty v mobilu mají rozlišení kolem 2 megapixelů, kvalitní přístroje pro běžné amatérské použití jsou schopny zobrazit 8 i více megapixelů).



Detail obrazového snímače - čipu CCD

Princip vzniku obrazu: Obrazový snímač využívá citlivosti polovodičů na světlo. Jakmile stiskneme spoušť fotoaparátu, světlo procházející objektivem vytvoří na plošce čipu obraz fotografovaného předmětu podobně jako na fotografickém filmu.

Dopadem světla se v každé z buněk čipu z vazeb uvolňují elektrické náboje. Čím víc je určitá buňka osvětlena, tím větší náboj na ní vznikne. Obraz vytvořený světlem se čipem přemění na neviditelný "elektrostatický obraz", tvořený náboji na jednotlivých buňkách čipu. Další operace s obrazem už provádějí elektronické obvody, které jsou "srdcem" každého digitálního přístroje. Tzv. analogově-digitální převodník přemění elektrostatický obraz na elektrické impulzy, které se po zpracování ukládají v digitální podobě (jako série "nul" a "jedniček") do paměťové karty fotoaparátu. Takto zaznamenaný digitální obraz by byl pouze černobílý. Současné čipy jsou schopny rozlišovat jen rozdíly v jasů, ale ne v barvě.

Pro zaznamenání barevného obrazu musí čip zaznamenávat informace zvlášť pro každou ze tří základních barev. Proto jsou jednotlivé pixely čipu tvořeny trojicemi světlo - citlivých buněk, překrytých filtrem jedné ze základních barev: červené, modré nebo zelené. Každá z trojice buněk tedy předává elektronickým obvodům informace o intenzitě světla odpovídající barvy. Na obrazovce počítačového monitoru pak dochází k opačnému ději. Informace o intenzitě červené (modré nebo zelené) barvy se předávají bodům zářícím červeně (modře nebo zeleně). Naše oko z těchto tří barevných složek vytvoří výslednou barvu. Pro každý bod obrazu existuje asi 16 miliónů možných kombinací jasů základních barev, tedy 16 miliónů barevných odstínů!

Některé vady zrcadel a čoček:

- *Vada otvorová*: vychází-li svazek paprsků z jednoho bodu na optické ose, nespojuje se po průchodu čočkou či po odrazu od zrcadla v jednom bodě. Odstranění pomocí clony nebo použitím spojek a rozptylek z různých materiálů.
- *Vada barevná*: záření různých frekvencí (barev) se láme různě. Odstranění použitím spojek a rozptylek z různých materiálů.

