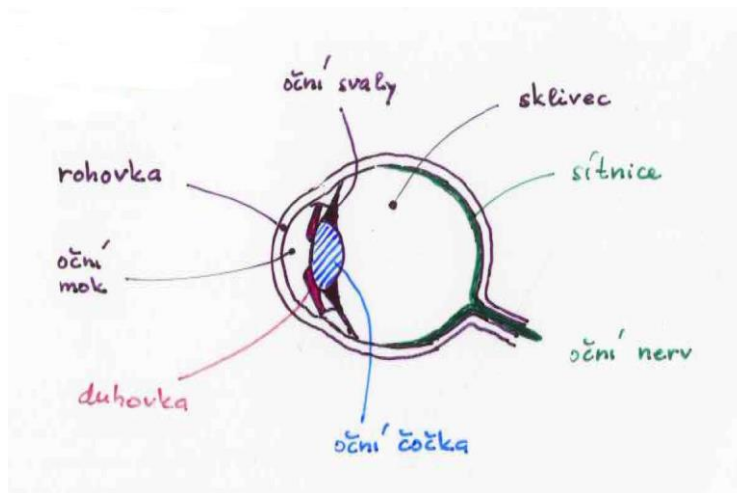


## Optické přístroje

### Lidské oko



Oko je kulovitého tvaru o průměru asi 24 mm, má hlavní části:

**Rohovka**

**Duhovka**

**Zornice** (oční pupila): otvor v duhovce, průměr se mění s osvětlením oka (max. 2,5 mm)

#### **Oční čočka:**

- průměr asi 10 mm, tloušťka asi 4 mm
- dvojbypuklý tvar, přední ploch má větší poloměr
- optická mohutnost – spolu s rohovkou asi **60 D** (rohovka asi **40 D**, oční čočka **20 D**)
- předměťová ohnisková vzdálenost asi 17 mm, obrazová 23 mm

*(pozor na úrazy očí ..... vnější povrch oka – rohovka – tedy není jen nějaký ochranný „obal“ oka, ale je to zásadně důležitý optický prvek s velkou optickou mohutností !!)*

**Sítnice:** obsahuje dva druhy buněk citlivých na světlo:

- čípky** – pro denní, barevné vidění, méně citlivé na světlo, max. spektr. citlivost mají při 555 nm, 6 – 7 miliónů, nejvíce ve středu sítnice ... žlutá skvrna
- tyčinky** – pro noční, nebarevné vidění, vysoce citlivé na světlo, 110 – 120 miliónů, zejména na okraji sítnice.

Citlivost tyčinek ve tmě roste a dosahuje maxima po 30 – 40 minutách ... **adaptace oka**, pak oko vnímá osvětlení  $5 \cdot 10^{-10}$  luxů ..... **práh vidění** (max. při 507 nm)

(**práh bolesti** je pak asi  $10^8$  krát vyšší)

**Oční svaly** (řasnaté tělísko): mění tvar oční čočky:

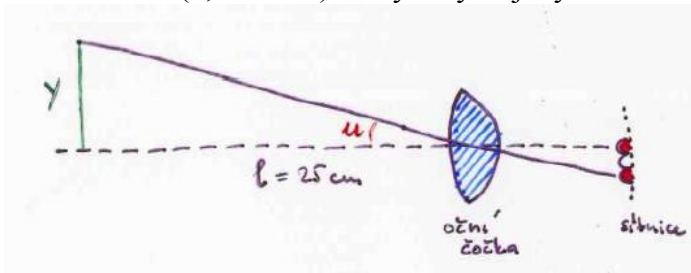
- 1) uvolněné svaly .... **neakomodované oko** .... na sítnici se ostře zobrazí maximálně vzdálené objekty ..... tzv. **daleký bod** ..... u zdravého oka je v **nekonečnu**, u krátkozrakého oka blíže
- 2) při pozorování bližších předmětů se oční svaly napínají .... zakřivují přední plochu oční čočky .... tím se zvětšuje její optická mohutnost ..... **akomodace oka**

Nejbližší bod, který se při nejvyšší akomodaci zobrazí na sítnici ..... **blízký bod**... leží ve vzdálenosti 15 – 20 cm (u krátkozrakého oka je blíže, u dalekozrakého oka dále).

Oko je přitom velmi namáháno – proto se se definuje trochu větší **konvenční zraková vzdálenost**  $l = 25 \text{ cm}$  ..... jako nejvhodnější vzdálenost pro čtení a pozorování drobných předmětů.

(často se doporučuje i ještě větší – 30 cm)

Přitom **rozlišovací schopnost** oka – tj. schopnost rozlišit dva blízké předměty – má svoji mez, danou konečným rozměrem světlocitlivých buněk na sítnici (0,005 mm) a ohybovými jevy na čočce.



Podle situace na obrázku je **(úhlová) rozlišovací mez**:

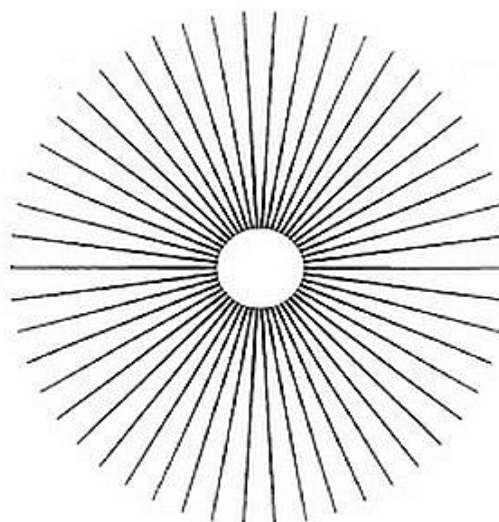
$$u \approx 0,0003 \text{ rad} \approx 1' \text{ (min)}$$

V konvenční zrakové vzdálenosti tomu odpovídá vzdálenost mezi pozorovanými body  $y = 0,075 \text{ mm}$ . Je to jen teoretická hodnota, ve skutečnosti bývá výrazně větší ..... závisí na předmětu – jeho jasu a kontrastu, případně i na množství podrobností.

Ještě jedna zajímavost:

**Setrvačnost zrakových vjemů** .....přerušované světlo s frekvencí vyšší než 13 Hz působí spojitým dojmem .

Pozn.: K již zmíněným vadám oka - krátkozrakosti a dalekozrakosti se často připojuje astigmatismus, který se ale liší od dříve probíraného astigmatismu optických čoček. U lidského oka se nejedná o vadu oční čočky (nebo jen výjimečně), ale o deformaci normálně kulovitého tvaru rohovky do tvaru mírně válcovitého. Kompenzuje se stejně jako krátkozrakost a dalekozrakost brýlovými čočkami, také s válcovitým zakřivením.

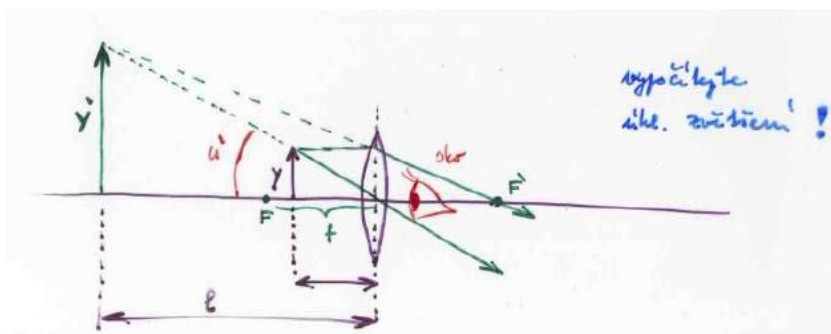


**Jednoduchý test oka na astigmatismus – viz obrázek vpravo.**  
(zdravé oko vidí všechny paprsky stejně tmavé a ostré)

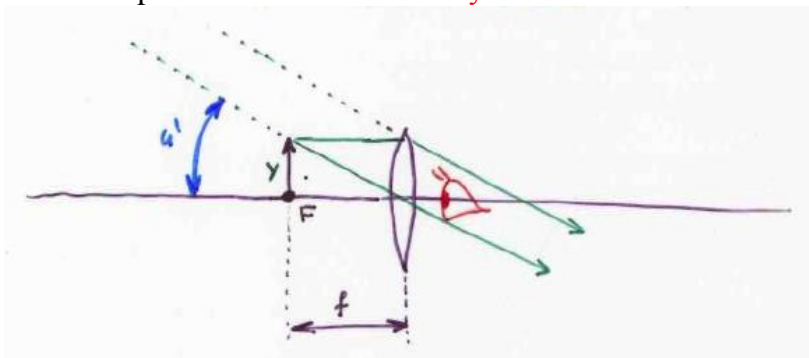
## Lupa

je spojná čočka, která vytvoří zvětšený a zdánlivý obraz, který pozorujeme okem, dvěma možnými způsoby:

- předmět můžeme umístit před obrazové ohnisko, blíže čočce tak, aby jeho obraz vznikl v konvenční zrakové vzdálenosti (viz obr.):



- b) nejčastější způsob použití: předmět umístíme přímo do ohniskové roviny lupy .....pak obraz bude v nekonečnu ..... a lze ho pozorovat **neakomodovaným** okem.

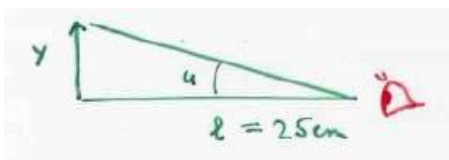


V tomto případě pozoruje oko předmět pod úhlem:

$$u' \cong \operatorname{tg} u' = \frac{y}{f} \quad (\text{neboť zřejmě } u' \rightarrow 0)$$

Kdyby tentýž předmět byl v konvenční zrakové vzdálenosti, úhel pozorování prostým okem by byl pouze:

$$u = \frac{y}{l}$$



Pak úhlové zvětšení lupy je:

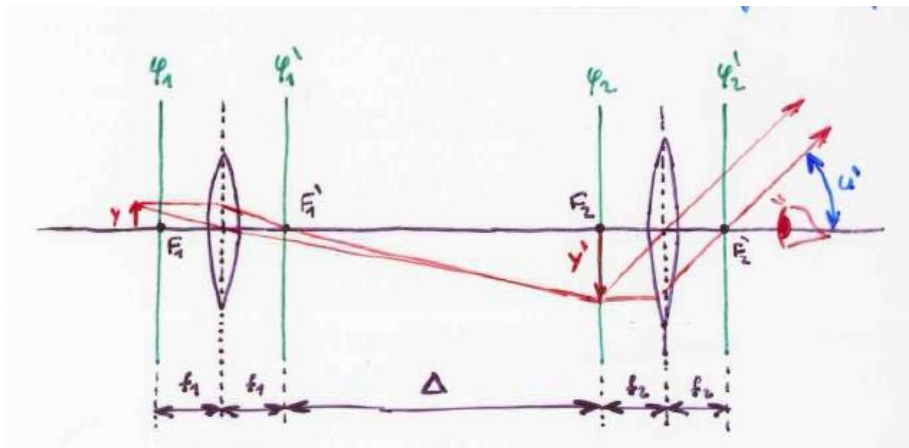
$$Z_u = \frac{u'}{u} = \frac{y/f}{y/l} = \frac{l}{f}$$

Až do  $Z_u = 6$  postačí jednoduchá spojka, pro vyšší zvětšení (max. 30) je nutná korekce vad.

## Mikroskop

je složený ze dvou spojných systémů v určité vzdálenosti (optický interval  $\Delta$ ):

- objektiv vytvoří zvětšený reálný obraz
- který se pozoruje okulárem jako lupou (neakomodovaným okem)



Pro velikost obrazu vytvořeného objektivem platí podle obrázku:

$$Z = \frac{y'}{y} = \frac{\Delta}{f_1} \Rightarrow y' = \frac{\Delta \cdot y}{f_1}$$

Tento obraz pak pozorujeme okulárem jako lupou pod úhlem:

$$u' = \frac{y'}{f_2} = (\text{dosadíme}) = \frac{\Delta \cdot y}{f_1 \cdot f_2}$$

Porovnáním s úhlem pozorování prostým okem při konvenční zrakové vzdálenosti pak získáme úhlové zvětšení mikroskopu:

$$Z_u = \frac{u'}{u} = \frac{y'/f_2}{y/l} = \frac{\Delta \cdot y}{f_1 \cdot f_2} \cdot \frac{l}{y} = \frac{\Delta \cdot l}{f_1 \cdot f_2} = Z_1 \cdot Z_2$$

**Úhlové zvětšení mikroskopu** je dáno součinem **příčného zvětšení objektivu** a **úhlového zvětšení okuláru**:

$$Z_u = Z_1 \cdot Z_2$$

Objektivy mikroskopů mají složité konstrukce s korigovanými vadami, zejména barevnou a otvorovou vadu, pro osově body, nebo i další body obrazového pole (achromáty, planachromáty, apochromáty, ....)

Okuláry jsou často konstruovány na základě dvou typů (okulár Ramsdenův v Huygensův, oba složené ze dvou spojných čoček, mají obdobné vlastnosti).

**Rozlišovací schopnost mikroskopu**, tj. jeho schopnost rozlišit dva body předmětu vzdálené  $y$ , je dána ohybovými jevy při průchodu světla objektivem. Pro mezní případ lze odvodit:

$$y = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{A}$$

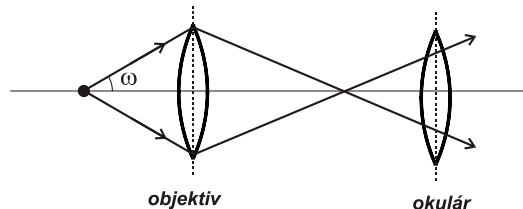
**rozlišovací mez mikroskopu**

Kde  $A$  je číselná apertura objektivu:

$$A = n \cdot \sin \omega$$

(analogicky jako u světlovodu)

a  $n$  je index lomu prostředí před objektivem



Z důvodu současného vlivu konečné rozlišovací schopnosti lidského oka se pro maximální zvětšení mikroskopu udává hodnota:

$$Z_u = 1000 \cdot A$$

**maximální zvětšení optického mikrosko**

Podle uvedených vztahů lze tedy rozlišení mikroskopu zlepšit:

- Zvětšením  $\omega$  ..... lze konstrukčními úpravami objektivu asi až na  $A = 0,6$
- Zmenšením vlnové délky použitého světla  
(modrý či fialový filtr pod okulár, pod držák vzorku)
- Zvýšením indexu lomu prostředí před objektivem.... kapkou glycerinu, cedrového oleje nebo monobromnaftalenu ..... vznikne tzv. **imerzní objektiv** ..... lze dosáhnout až  $A = 1,4$

## Dalekohled

slouží k pozorování vzdálených a velkých předmětů. Základní části jsou objektiv a okulár, tvořené čočkami, případně zrcadly. Existují tak **dvě hlavní konstrukce**:

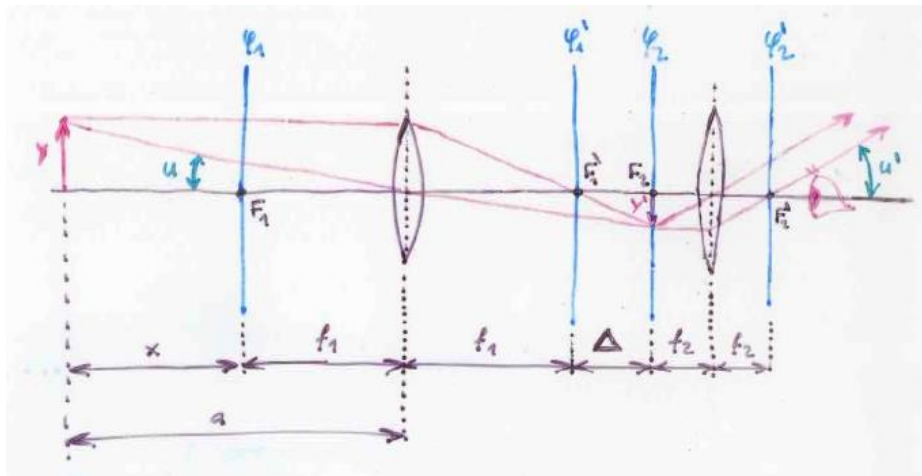
- refraktory** ..... objektivem je **spojná čočka** (spojná soustava čoček)
- reflektory** ..... objektivem je **duté zrcadlo**

**ad 1):** Základním typem refraktoru je **Keplerův (hvězdářský) dalekohled**:

Skládá se stejně jako mikroskop ze dvou spojných systémů v určité vzdálenosti s optickým intervalem  $\Delta$  (viz obr.) a také princip činnosti je podobný jako u mikroskopu:

- objektiv vytvoří reálný obraz předmětu
- který pozorujeme okulárem jako lupou
- 

Z obrázku je zřejmé, že při zaostření na konečnou vzdálenost mají objektiv a okulár (malý) kladný optický interval  $\Delta$ , a při zaostření na nekonečno je optický interval nulový (teleskopická soustava)



Předmět  $y$  je tedy ve velké vzdálenosti  $a$  od objektivu, obraz  $y'$  proto vznikne blízko obrazové roviny objektivu  $\varphi_1'$  (viz obr.) ..... v předmětové ohniskové rovině okuláru  $\varphi_2$  ..... proto jej může pozorovat neakomodované oko okulárem jako lupou ..... pod úhlem:

$$u' = \frac{y'}{f_2}$$

Bez dalekohledu bychom tentýž předmět pozorovali ve vzdálenosti  $a$  pod úhlem (délku dalekohledu zanedbáváme pro velmi vzdálené předměty):

$$u = \frac{y}{a}$$

## Úhlové zvětšení dalekohledu je tedy:

(Při úpravě dosadíme z Newtonovy rovnice:  $y' = -\frac{f_1 \cdot y}{x}$  a převedeme ohniskovou souřadnici na vrcholovou:

$a = x + f_1$ , nebo hned uijeme výraz pro příčné zvětšení ve vrcholových souřadnicích  $\frac{y'}{y} = -\frac{f_1}{a-f_1}$ ,

který je též přímo vidět z pravoúhlých trojúhelníků na obrázku)

$$Z_u = \frac{u'}{u} = \frac{\frac{y'}{f_2}}{\frac{y}{a}} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{a}{f_2} = -\frac{f_1}{x} \cdot \frac{a}{f_2} = \frac{a}{a-f_1} \cdot \frac{f_1}{f_2}$$

Pro **velmi vzdálené** předměty ( $a \rightarrow \infty$ ) zanedbáme  $f_1$  v prvním zlomku a dostaneme:

$$Z_u = -\frac{f_1}{f_2} \quad \text{Úhlové zvětšení dalekohledu}$$

Záporné znaménko znamená, že **obraz je převrácený**.

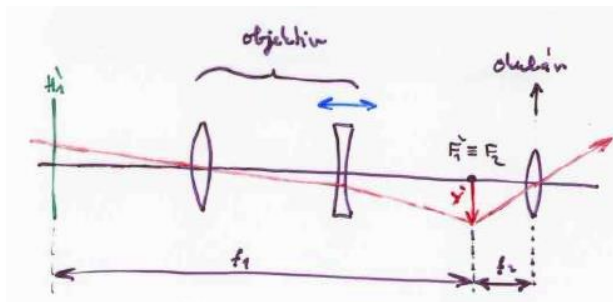
Dalekohled s vysokým zvětšením tedy vyžaduje velkou ohniskovou vzdálenost použitého objektivu a co nejmenší ohniskovou vzdálenost okuláru. Objektiv je většinou pevně spojený s tubusem, zaostřování se provádí posuvem okuláru.

**Objektivy dalekohledů** bývají jednodušší konstrukce než objektivy mikroskopů, neboť paprsky svírají malé úhly s optickou osou - proto jsou i menší požadavky na korekci vad:

- koriguje se zejména vada barevné a otvorová
- tedy achromáty a apochromáty

**Okuláry dalekohledů** jsou v principu stejné jako u mikroskopů (Huygensův, ....)

Dalekohledy geodetických přístrojů mívají zpravidla zvláštní objektiv s **vnitřním zaostřováním** – je to optická soustava ze dvou členů – spojky a rozptylky ..... aby výsledek byla **spojná soustava**.

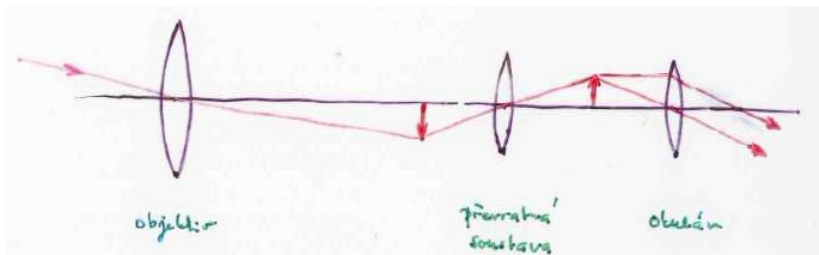


Tato konstrukce má dvě výhody:

- 1) **kratší tubus** dalekohledu, než by odpovídalo ohniskové délce objektivu, protože obrazová hlavní rovina leží daleko před složeným objektivem.
- 2) **pevná délka** tubusu, která také umožňuje **kompaktní** těsnou konstrukci dalekohledu, vhodnou do terénu.
- 3) Pozn.: záměrný kříž se umístí tam, kde vzniká reálný obraz – v ohniskové rovině okuláru.

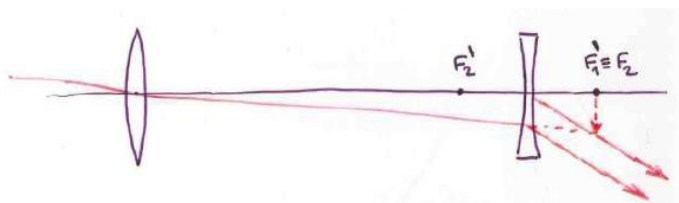
**Použití Keplerova dalekohledu na Zemi** ovšem vyžaduje vzpřímený obraz (při pozorování hvězd nebo při zaměřování převrácený obraz nevadí). Toho lze dosáhnout dvěma způsoby:

- a) mezi okulár a objektiv přidáme ještě jednu spojnou soustavu (tzv. **převratná soustava**, která spolu s okulem vytváří **terestrický okulár**.)  
Je to typická konstrukce **puškového dalekohledu** (záměrný kříž je v ohniskové rovině okuláru).



- b) obraz lze také výškově i stranově převrátit odrazem na dvou pravouhlých hranolech (tzv. **Porrův systém**, jeho použití je typické pro **triedr**.)
- c) je také možno jako **okulár použít rozptylku**, vznikne tak další typ dalekohledu:

**Galileův (holandský) dalekohled**



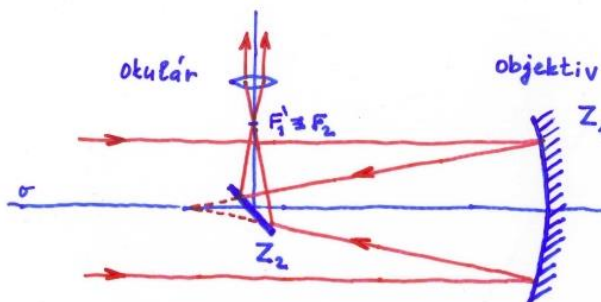
Hodí se jen pro malá zvětšení, např. 4 (**divadelní kukátko**) ..... má malé zorné pole i světelnost..

**ad 2): Hlavní předností reflektorů** je absence barevné vady objektivu, výrazně kratší tubus a snadnější výroba velkých zrcadel, potřebných pro pozorování velmi vzdálených objektů ve vesmíru (plocha objektivu určuje množství přijímaného světla – jeho světelnost).

Základním typem reflektoru je **Newtonův dalekohled**

Objektivem tvoří duté kulové (parabolické) zrcadlo  $Z_1$ , od něj odražené paprsky jsou pomocným rovinným zrcátkem  $Z_2$  vychýleny kolmo stranou mimo tubus dalekohledu do spojného okuláru.

Při zaostření na nekonečno opět splývá (vychýlené) obrazové ohnisko objektivu a předmětové ohnisko okuláru (viz obr.).

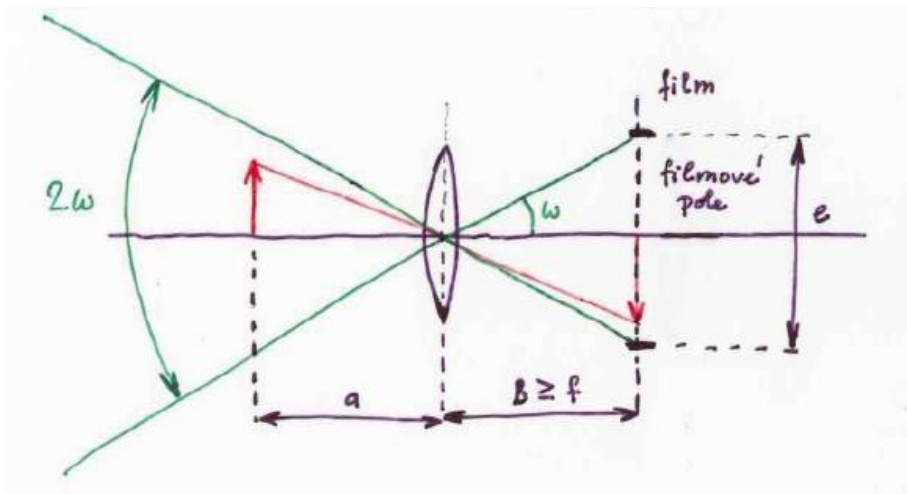


Řada dalších konstrukcí pak využívá zrcadel jiných tvarů a dodatečných korekčních členů (čoček, desek) umístěných před zrcadly pro odstranění nebarevných vad zobrazení (koma, ...).

Například **Hubbleův vesmírný dalekohled** používá systém Ritchey-Chretien, ve kterém obě zrcadla jsou hyperbolického tvaru.

## Fotoaparát

Objektivem je spojka (spojná soustava), která vytváří skutečný obraz předmětů v rovině světlocitlivého záznamového zařízení (fotografická deska, film, senzor - obrazový snímač CCD, CMOS).



Při snímání velmi vzdálených předmětů musí tedy splývat rovina filmu s obrazovou ohniskovou rovinou objektivu, při zaostření bližších předmětů se musí objektiv posunout dál od roviny filmu.

Z obrázku je vidět, že obrysy filmového políčka (snímače) vytvářejí vlastně hranice určité části předmětového prostoru, ve které je možno zobrazovat předměty ..... je to tzv. **zorné pole objektivu** ..... a jeho velikost je **dána úhlem**  $2\omega$

Tento úhel se zjišťuje v poloze objektivu zaostřeného na nekonečno, tedy pro  $b = f$  a pro největší rozměr filmového políčka – pro úhlopříčku  $e$  podle vztahu:

$$\text{tg } \beta = \frac{e/2}{f} = \frac{e}{2f}$$

Např. kinofilm šířky 35 mm má obrazové pole 36 x 24 mm s úhlopříčkou  $e = \sqrt{36^2 + 24^2} = 43,3\text{mm}$  a pro objektiv s ohniskovou vzdáleností  $f = 50\text{ mm}$  je:

$$\text{tg } \beta = \frac{21,65}{50} = 0,433 \rightarrow \omega = 23,4^\circ \rightarrow 2\omega = 46,8^\circ$$

Právě **podle velikosti zorného pole** se rozlišují 3 skupiny objektivů:

- a) **normální objektiv** ..... se zorným polem  $40 - 55^\circ$  a s ohniskovou vzdáleností ne příliš převyšující úhlopříčku filmového políčka ... asi  $40 - 58 \text{ mm}$   
(nejpoužívanější je  $f = 50 \text{ mm}$  pro kinofilm  $35 \text{ mm}$ )
- b) **širokoúhlé objektiv** .... se zorným polem  $55 - 90^\circ$  (**fisheye**  $120 - 180^\circ$ ), tedy s výrazně kratší ohniskovou vzdáleností: např.  $f = 50 \text{ mm} \rightarrow 2\omega = 63^\circ$   
 $f = 21 \text{ mm} \rightarrow 2\omega = 90^\circ$   
(jsou vhodné pro snímky interiérů, architektur,....)
- c) **teleobjektiv**.... se zorným polem **menším než  $40^\circ$** , tedy s delší ohniskovou vzdáleností  
vyrábí se např.  $f = 85 \text{ mm} . 135, 180, 250, 300, 500, 1000$ ,  
také zrcadlové teleobjektivy podobné zrcadlovým dalekohledům

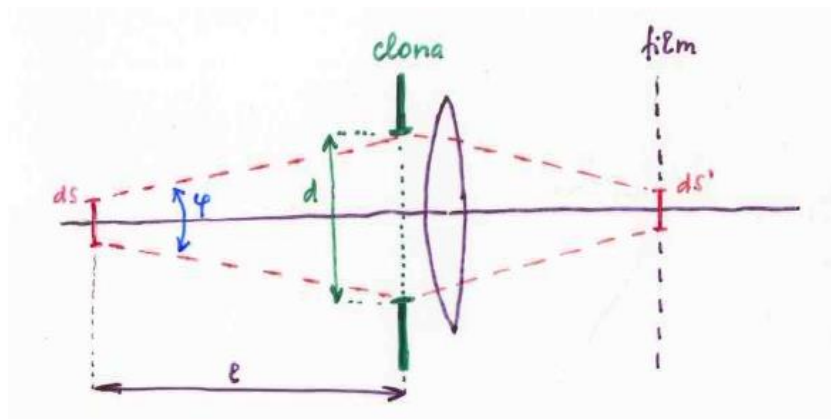
Pozn.1: Existují objektivy typu **zoom** ..... s proměnnou ohniskovou vzdáleností

Pozn.2: *Moderní digitální fotoaparáty mají místo filmu senzory, které jsou výrazně menší než políčko kinofilmu - potom ovšem samotná ohnisková vzdálenost nic neříká o velikosti zorného pole. Proto výrobci často uvádějí **ekvivalentní ohniskovou vzdálenost**, jakou by měl **objektiv** se stejným zorným úhlem na  $35 \text{ mm}$  kinofilmu. Poměr mezi ekvivalentní a skutečnou ohniskovou vzdáleností se nazývá **crop faktor***

Dalším důležitým parametrem je **průměr objektivu**, neboť větším plochou čočky prochází na světlocitlivý senzor více světla a je tedy při jeho stejné citlivosti snímat obrazy předmětů i za **horších světelných podmínek** .....,

.....,naopak při velkém množství světla je nutno plochu objektivu uměle zmenšit, aby senzor nebyl přetížen ..... k tomu slouží **irisová clona** s nastavitelným průměrem otvoru ..... můžeme tak měnit **osvětlení** senzoru:

Podívejme se, jaké veličiny zde mají vliv:



Na **předmětu** vzdáleném  $l$  od clony průměru  $d$  (čočky) vyznačme nekonečně malou plošku  $dS$ , která nechť má jas  $L$  - tj. **světelný tok vyzařený z jednotkové zdánlivé plochy do jednotkového prostorového úhlu**

Pak z této plošky  $dS$  vstupuje do objektivu **světelný tok**:

$$d\Phi = L \cdot \varphi \cdot dS = L \cdot \frac{\pi d^2}{4l^2} \cdot dS$$

(vyjádřili jsme prostorový úhel z definice:  $\varphi = \frac{S}{r^2}$  )

Celý tento tok dopadne po průchodu objektivem na **obraz plošky  $dS'$** .

Jestliže byla ploška  $dS$  např. obdélníková o rozměrech  $dy, dz$ , pak při **příčném zvětšení**  $Z$  je plocha tohoto obrazu:

$$dS' = dy' \cdot dz' = Z \cdot dy \cdot Z \cdot dz = Z^2 \cdot dy \cdot dz = Z^2 \cdot dS$$

**Intenzita osvětlení obrazu** – tedy **světelný tok dopadající** (zde kolmo) **na jednotku plochy** - je potom:

$$E = \frac{d\Phi}{dS'} = \frac{d\Phi}{Z^2 \cdot dS} = \quad (\text{dále dosadíme za světelný tok})$$

$$= L \cdot \frac{\pi d^2 \cdot dS}{4l^2 \cdot Z^2 \cdot dS} = L \cdot \frac{\pi d^2}{4l^2 \cdot Z^2} = \quad (\text{dosadíme za příčné zvětšení z Newtonových rovnic:})$$

$$\left( Z = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{f}{l-f} \approx -\frac{f}{l} \right)$$

$$= L \cdot \frac{\pi d^2}{4l^2} \cdot \frac{l^2}{f^2} = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d^2}{f^2} \quad (\text{většinou } f \ll l)$$

Vidíme, že osvětlení obrazu **není závislé na vzdálenosti** předmětu, ale je funkcí pouze **kvadrátu** veličiny:

$$S = \frac{d}{f}$$

**Světelnost objektivu** (Relativní otvor, apertura objektivu)

Udává se jako jeden z **hlavních parametrů objektivu** - pro nejvyšší možný průměr clony objektivu:

$$S_{obj} = \frac{d_{max}}{f}$$

píše se ve formě  **$I : x$**  ..... tedy např.  **$I : 4$**  znamená .....  $I : 4 = \frac{1}{4} = \frac{d_{max}}{f}$ ,  
tj. průměr clony objektivu je čtyřikrát menší než ohnisková vzdálenost objektivu

Převrácená hodnota relativního otvoru objektivu je:

$$C = \frac{f}{d}$$

**Clonové číslo**

**Stupnice** clonových čísel s proměnným průměrem se vždy dělá v normalizované řadě:

$$1 - 1,4 - 2 - 2,8 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16 - 22 - \dots$$

což je **geometrická řada** s kvocientem  $q = \sqrt{2} \approx 1,4$

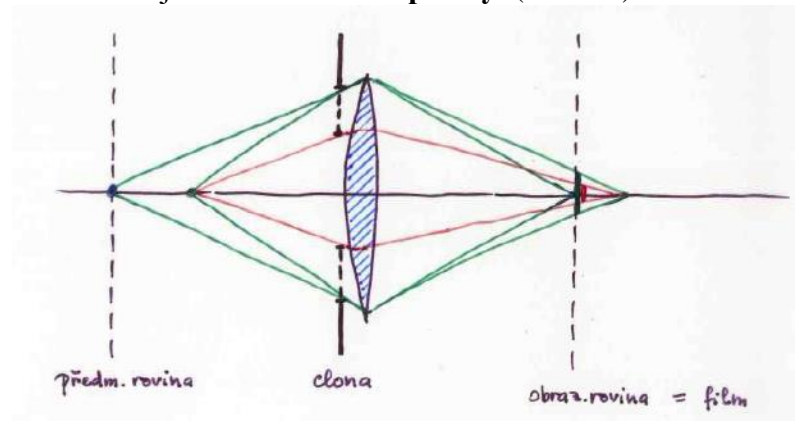
.....pak **při nastavení nejbližší vyšší hodnoty vzroste clonové číslo  $\sqrt{2}$ -krát** ....., tedy světelnost objektivu poklesne  $\sqrt{2}$ -krát

→ → → a **osvětlení obrazu** klesne **2-krát** ....

..... proto **musíme 2-krát prodloužit čas expozice**

**Průměr objektivu (clony) má ještě jeden vliv na zobrazení – konkrétně na **hloubku ostrosti**:**

- protože do roviny filmu se vždy ostře zobrazí pouze body z jediné určité předmětové roviny, pak body **mimo ni** se na filmu zobrazí jako malé kruhové **plošky** (viz obr.)



Z důvodu své **konečné rozlišovací schopnosti** (a také zrnitosti filmu, či hustotě pixelů na senzoru) **bude lidské oko vnímat na obrazu** tyto malé kruhové plošky - až do jejich určitého maximálního průměru - .....**jako ostré body** .....

.....jinak řečeno – na filmu budou dostatečně ostře zobrazeny **nejen body** určité předmětové roviny, ale i body **vzdálenější**, či **blížejší** objektivu.....

Interval těchto vzdáleností definuje veličinu **hloubka ostrosti** fotografického zobrazení (fotografie)

Z obrázku je vidět, že při **menším průměru clony** - větší clonové číslo - budou body mimo předmětové roviny také mít **menší průměr obrazů** (plošek) .....

→ tedy „zaostří“ se i body více vzdálené od této roviny .....a proto fotografie bude mít **větší hloubku ostrosti**.

(Hloubka ostrosti pro konkrétní clonová čísla se často graficky vyznačuje na objektivu fotoaparátu)

## Doplňk: Clony optických soustav

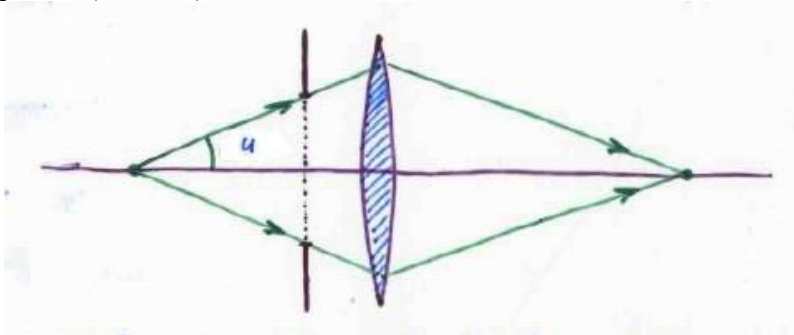
Při grafické konstrukci obrazu vystačíme si se dvěma či třemi paprsky, ale - jak jsme viděli - reálné optické zobrazování se děje celými **širokými svazky paprsků**, které jsou vymezeny buď nějakými „přirozenými“ clonami – **obrubi čoček** případně tubusem optického přístroje, nebo přímo speciálními **clonami**, za účelem regulace nějakých parametrů optického zobrazení:

- 1) jde zejména o **světelnost** optické soustavy, tj. **osvětlení obrazu** ..... to určuje **aperturní clona** (případně **kvalitu** zobrazení.... hloubka ostroty ..... rozlišovací schopnost)
- 2) a **velikost zorného pole** optické soustavy ..... to určuje **polní clona**

Představme si obecně, že nějaká optická soustava má **více čoček a clon** ..... **všechny** jistě nějakým způsobem vymezují (omezují) svazky paprsků .....ale jedna z nich má určitě **největší vliv**, tj. nejvíce omezuje svazek paprsků procházející soustavou -

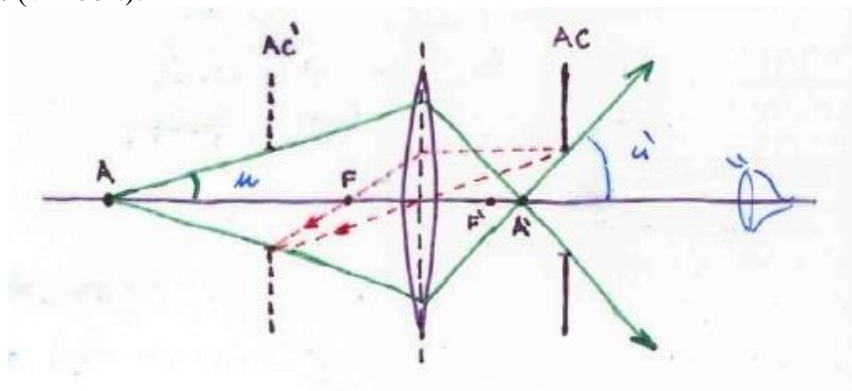
- to je tzv. **aperturní (hlavní) clona soustavy**.

- 1) Nejjednodušší případ nastává, když aperturní clona je před optickou soustavou ....jak jsme ji kreslili u fotoaparátu (viz obr.):



Svazky paprsků vystupující z libovolných předmětových bodů (na ose) jsou pak clonou omezeny na stejný průměr a tento průměr přímo určuje **aperturní úhel svazku  $u$**  (pro daný předmětový bod)

- 2) Složitější a nejčastější případ je ten, když aperturní clona je uvnitř optické soustavy, například za první čočkou (viz obr.):



Pak aperturní úhel svazku  $u$  není „přímo“ určený průměrem aperturní clony AC, ale určuje ho průměr jejího obrazu  $AC'$  (vytvořeného zpětným chodem paprsků zprava doleva) .....

..... tento obraz se nazývá **vstupní pupila soustavy**

Vstupní pupila je tedy **obraz aperturní clony** tou částí optické soustavy, která leží před aperturní clonou.

*Nebo jinak: Ze všech možných obrazů clon a obrub čoček, vytvořených předcházejícími optickými členy, včetně skutečných clon v předmětovém prostoru - je vstupní pupila vidět (z předmětového bodu A na ose) pod nejmenším úhlem.*

**Vstupní pupila tedy určuje aperturní úhel  $u$  - a tím i množství světla vstupujícího do optické soustavy:**

- a konkrétně u fotoaparátu určuje světelnost objektivu  $S = d/f$
- u mikroskopu číselnou aperturu  $A = n \cdot \sin u$

**Záludná otázka:** co je vstupní pupilou v případě, že aperturní clona AC je před vstupní čočkou?

(jsou totožné)

-----

Důležitý je také pojem **výstupní pupila** - která určuje aperturní úhel  $u'$  výstupního svazku (viz obr.).

**Analogicky:** je to buď sama aperturní clona - pokud leží za soustavou, nebo obraz aperturní clony částí soustavy, která leží za aperturní clonou..... je to tedy také **obraz vstupní pupily**

*Jinak řečeno: Ze všech možných obrazů clon a obrub čoček, vytvořených následnými optickými členy, včetně skutečných clon v obrazovém prostoru - je výstupní pupila vidět (z obrazového bodu  $A'$  na ose) pod nejmenším úhlem .*

**Význam výstupní pupily:** U optických přístrojů určených k pozorování okem je nutné, aby **výstupní pupila přístroje splývala se zornicí oka** (ta je vstupní pupilou oka) .....

..... pak **celý světelný svazek** vystupující z přístroje také **vstoupí do oka** (žádné ztráty)

*D. cv.: Zkuste nakreslit výstupní pupilu – tzv. **oční kruh** – u dalekohledu Keplerova a Galileova (aperturní clonou je vstupní obruba objektivu)*

-----

Kromě aperturní clony je u optických soustav také důležitá

**clona zorného pole (polní clona)** ,

která určuje velikost **zorného (vstupního) pole** - tj. části předmětového prostoru, jehož body mohou být zobrazeny do obrazové roviny (**výstupní pole**)

Aby bylo zorné pole **ostře ohraničeno**, musí být polní clona (nebo její obraz) vždy umístěna v **obrazové** nebo předmětové rovině.

Pro fotoaparát:

- úhel zorného pole  $2\omega$  je určen velikostí políčka filmu (čipu) ..... to je tedy **polní clonou** objektivu.