

Úloha č. 1B: Optika – zobrazování, optické přístroje

podzimní semestr 2021

Obsah

<b>1</b>	<b>Základní experimenty k zobrazování</b>	<b>3</b>
	E 1 Zobrazení spojkou . . . . .	3
	E 2 Měření ohniskové délky spojně čočky . . . . .	3
	E 3 Zobrazení rozptylkou a rovinným zrcadlem . . . . .	4
	E 4 Dírková komora ( <i>camera obscura</i> ) . . . . .	6
	E 5 Soustava dvou tenkých čoček . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Vady zobrazení</b>	<b>8</b>
	E 6 Otvorová vada čočky na optické lavici . . . . .	8
	E 7 Otvorová vada čočky na optické desce . . . . .	9
	E 8 Hloubka pole, hloubka ostrosti . . . . .	10
	E 9 Barevná vada čoček na optické lavici . . . . .	13
	E 10 Chromatická disperze na optické desce . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Jednoduché optické přístroje</b>	<b>15</b>
	E 11 Lupa a mikroskop . . . . .	15
	E 12 Mikroskop s temným polem . . . . .	16
	E 13 Keplerův dalekohled na optické lavici . . . . .	16
	E 14 Keplerův a Newtonův dalekohled na optické desce . . . . .	17
	E 15 Rozlišovací schopnost dalekohledu . . . . .	17





# 1 Základní experimenty k zobrazování

## E 1 – Zobrazení spojkou

---

*I když by spojná čočka měla zobrazit předmět na stínítko, konkrétní realizace tohoto pokusu nemusí být triviální.*

### Potřeby

- optická lavice, LED zdroj, diapozitiv, spojně čočky 20 cm, 50 cm
- irisová clona pro vytvoření „bodového zdroje“

### Provedení

1. Zobrazte spojkou na stínítku skutečný obraz diapozitivu. Použijte nejprve čočku s 50 cm ohniskovou vzdáleností. Měňte vzdálenost čočky a předmětu, komentujte vlastnosti obrazu.
2. Navrhněte, kam přemístit na lavici čočku, aby při pevné poloze předmětu a stínítka byl obraz opět ostrý. Opět komentujte vlastnosti obrazu.
3. Vytvořte spojkou rovnoběžný svazek. Zdroj zablokujte irisovou clonou. Do jaké vzdálenosti od čočky clonu umístíte? Přesvědčte se o rovnoběžnosti svazku pomocí listu papíru, kterým pohybujete podél svazku.
4. Umístěte předmět do takové předmětové vzdálenosti, aby spojka poskytovala pouze virtuální obraz. Listem papíru se přesvědčte, že skutečný obraz nevzniká v žádné dostupné poloze (nestačí ukázat, že na stínítku v konkrétní poloze obraz není).

### Fyzikální interpretace

Počáteční obtíže se obvykle týkají těchto záležitostí:

- Při hledání obrazu nemusí stačit pohybovat jen čočkou, může být zapotřebí pohnout i stínítkem. Jaká je nutná podmínka, abychom na lavici obraz mohli vůbec najít?
- Při zmenšení předmětové vzdálenosti se obrazová vzdálenost zvětšuje a naopak (viz zobrazovací rovnice). Při přisunutí čočky ke zdroji se tedy obraz od čočky vzdálí. Posunem čočky (bez změny polohy stínítka) ale současně změníme i obrazovou vzdálenost. O tom, zda je potřeba stínítko přisunout nebo odsunout, nakonec rozhoduje zvětšení obrazu.
- Význam ohnisek a v jakých polohách předmětu obrazu je zvětšení rovno jedné (resp.  $-1$ , je-li obraz převrácený).
- Žádný zdroj není skutečně bodový, „rovnoběžný“ svazek má svou rozbíhavost (divergenci). Jaká čočka poskytne svazek s menší divergencí?

## E 2 – Měření ohniskové délky spojně čočky

---

*Pro hrubý odhad, žákovskou úlohu či přesné měření ohniskové délky se hodí odlišné metody.*

### Potřeby

- optická lavice, LED zdroj, spojná čočka s ohniskovou vzdáleností kolem 20 cm
- plexisklové pravítko se stupnicí

Ohniskovou vzdálenost spojně čočky můžeme stanovit různými metodami: metodou dalekého předmětu, přímoú metodou, Besselovou, Abbeho, metodou ze zvětšení

$$f_p = \frac{aa'}{a + a'}, \quad f_{\text{Bessel}} = \frac{D^2 - d^2}{4D}, \quad f_{\text{Abbe}} = \frac{a_2 - a_1}{1/m_1 - 1/m_2}, \quad f_m = \frac{|m|}{|m| + 1} a.$$

## Provedení

1. Promítneme zkoušenou spojkou vzdálený zdroj světla (např. sluncem osvětlenou budovu za oknem) na list papíru. Čemu je rovna ohnisková délka?
2. Na optické lavici vytvoříme obraz pravítka na stínítku. Odhadneme ohniskovou délku přímo ze zobrazovací rovnice ( $f_p$ ).
3. V této poloze určíme též zvětšení  $m_1$  a z něj dopočítáme ohniskovou délku ( $f_m$ ).
4. Přemístíme čočku do druhé polohy (aby při pevné poloze předmětu a stínítka byl obraz opět ostrý). Na lavici odečtíme posun čočky  $d$ .
5. V nové poloze určíme zvětšení  $m_2$  a dopočítáme hodnoty  $f_{\text{Bessel}}$  a  $f_{\text{Abbe}}$ .

## Fyzikální interpretace

Promyslete si, jaké výhody poskytují jednotlivé metody.

## E 3 – Zobrazení rozptylkou a rovinným zrcadlem

---

*Samotný zdánlivý obraz na stínítku neuvidíme, spojná čočka ho ale zobrazí. Dělá to i oční čočka při pohledu do zrcadla.*

## Potřeby

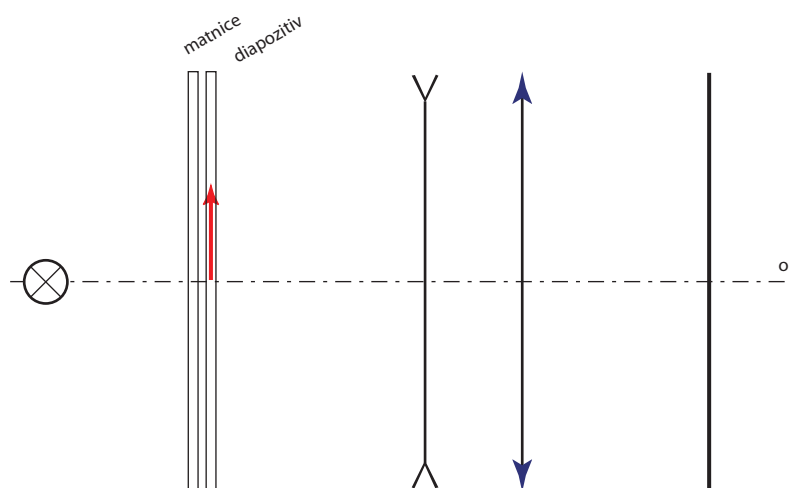
- optická lavice, LED zdroj, diapozitiv, rozptylná čočka, list papíru
- spojná čočka, stínítko
- rovinné zrcadlo

## Provedení

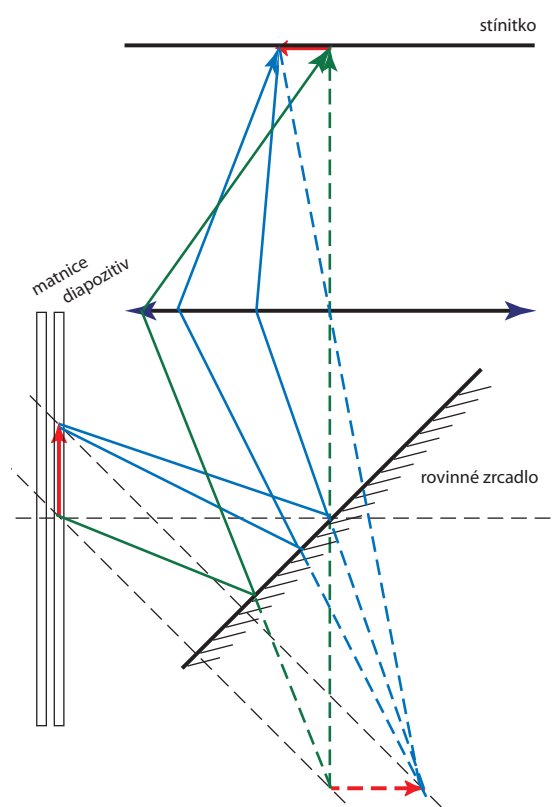
1. Na optickou lavici dáme zdroj s diapozitivem a rozptylnou čočku. Měníme polohu čočky a listem papíru vždy ukážeme, že skutečný obraz v žádné dostupné poloze nevzniká. Opakujeme pro několik poloh čočky.
2. Na lavici přidáme spojku a stínítko. Ukážeme, že při vhodné poloze spojky a stínítka skutečný obraz vznikne.
3. Totéž provedeme s rovinným zrcadlem. Skutečný obraz chytáme kolmo na zdi nebo na listu papíru.

## Fyzikální interpretace

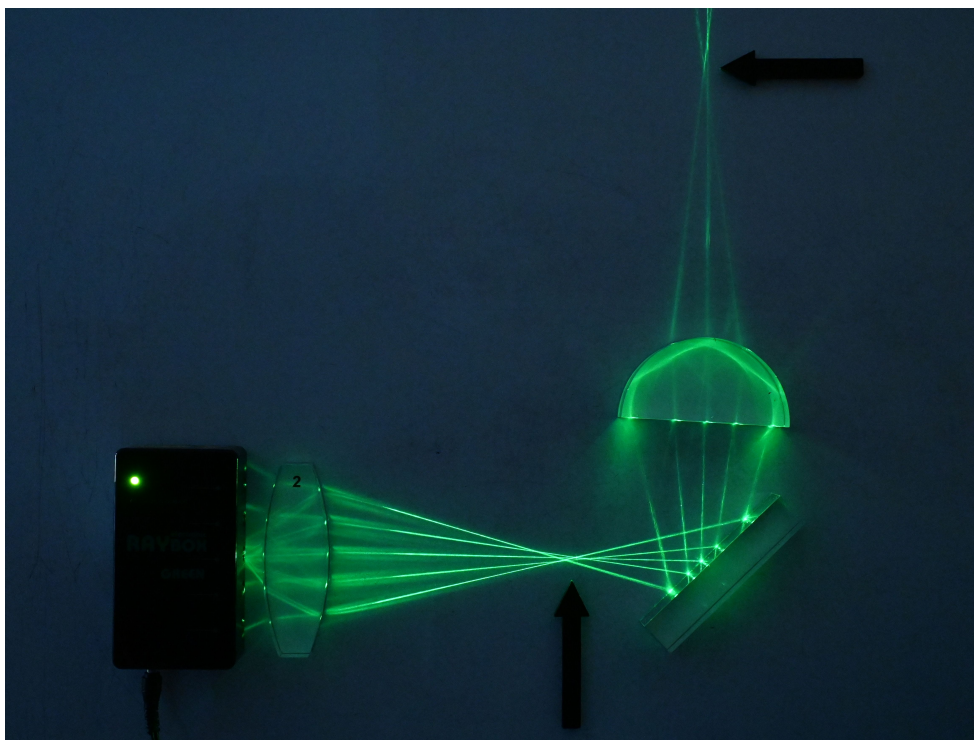
Pro určení vhodné polohy spojně čočky je zapotřebí nejprve najít polohu virtuálního obrazu rozptylky (zrcadla). To nám umožní nastavit čočku tak, aby sama neposkytovala virtuální obraz nebo obraz, který by byl mimo dosah stínítka. Rozvahu provedeme buď konstrukcí obrazu na tabuli, nebo využijeme optickou desku (viz obrázek 3).



Obrázek 1: Virtuální obraz vytvořený rozptylkou



Obrázek 2: Virtuální obraz vytvořený zrcadlem



Obrázek 3: Simulace chodu paprsků na rovinném zrcadle. První čočka spojí rovnoběžný laserový svazek do „bodového“ zdroje (první šipka), který je předmětem pro zrcadlo. Povšimněte si rozbíhavých paprsků za rovinným zrcadlem a jejich seběhnutí po průchodu spojnou čočkou (druhá šipka).

#### **E 4 – Dírková komora (*camera obscura*)**

*Dírková komora v plejádě moderních optických přístrojů působí jako historický relikt. Ve výkladu principů zobrazování má však důležité místo.*

##### **Potřeby**

- dírková komora, optická lavice, žárovkový zdroj světla (stolní lampa)

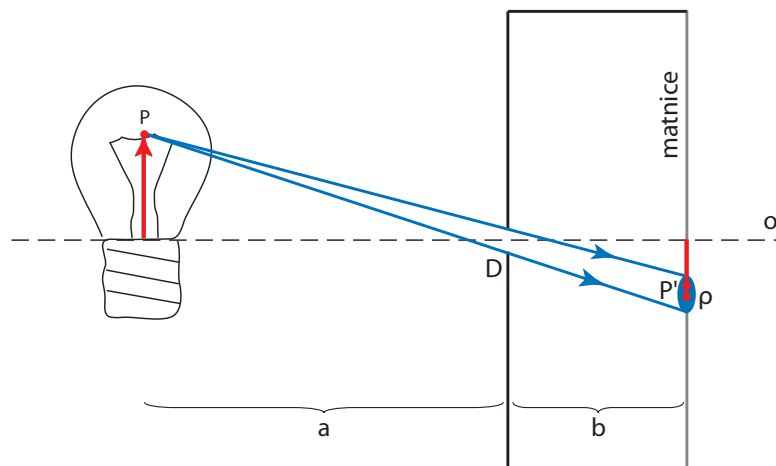
##### **Provedení**

1. V případě pěkného počasí se komorou podíváme z okna na jasný objekt.
2. Dírkovou komoru umístíme na optickou lavici a namíříme ji na jasný zdroj světla (např. 230V žárovku). Měníme průměr vstupní apertury.

##### **Fyzikální interpretace**

- Na první pohled může být nejasné, jak soustava bez kladné optické mohutnosti může vytvořit skutečný obraz. Protože na matnici komory obraz skutečně vzniká (je tam lokalizován), nejde o vliv čočky lidského oka.
- Jaké je zvětšení skutečného obrazu?
- Jaké je rozlišení při zobrazení komorou? Lze rozlišení libovolně zlepšovat?
- Popište hlavní nevýhody dírkové komory, porovnejte ji s aparátem se spojnou čočkou.

Stránky věnované dírkovým komorám, jejich výrobě a fotografování lze nalézt v [ph].



Obrázek 4: Obraz vytvořený dírkovou komorou



Obrázek 5: Klasická dírková komora. Převzato z [mf].

## E 5 – Soustava dvou tenkých čoček

*Další spojka na optické lavici nemusí zvýšit optickou mohutnost soustavy. A může kombinace spojné a rozptylné čočky stejných ohniskových délek svazky spojovat?*

### Potřeby

- optická lavice, LED zdroj, diapozitiv, spojné i rozptylné čočky různých optických mohutností, stínítko

### Provedení

1. Na optické lavici přisuneme spojku a rozptylku stejné absolutní hodnoty optické mohutnosti těsně k sobě. Pokusíme se najít obraz diapozitivu.
2. Čočky od sebe mírně poodsuneme a pokusíme se najít obraz diapozitivu znovu. Pozorování vysvětlíme pomocí vztahu (1).

3. Místo rozptylky použijeme další spojku. Sledujeme se, co se stane při odsunutí čoček (a doladění polohy stínítka). Vysvětlíme opět pomocí vztahu (1).

### Fyzikální interpretace

Při experimentu můžeme využít vztahu pro optickou mohutnost soustavy tenkých čoček

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}. \quad (1)$$

Zkoumáme, zda je výsledná optická mohutnost kladná či záporná. Situace současně zakreslujeme i na tabuli konstrukčními paprsky.

## 2 Vady zobrazení

### E 6 – Otvorová vada čočky na optické lavici

*I okrajovými paprsky jde zobrazovat, není to však příliš praktické.*

#### Potřeby

- optická lavice, LED zdroj, diapozitiv, velká spojná čočka, papírové clony různého průměru, papírový kotouček na vystínění centrálních paprsků, stínítko

#### Provedení

1. Spojnou čočkou zaostříme zvětšený obraz diapozitivu na stínítko. Pozorujeme velmi nekvalitní obraz, překrytý světelným halem.
2. Spojnou čočku postupně stále více zaočňujeme papírovými clonami, které vkládáme symetricky do optické osy těsně za čočku. Pozorujeme výrazné zlepšení kvality obrazu.
3. Nyní místo clon vložíme papírový kotouček. Stínítko musíme posunout několik desítek centimetrů, abychom našli obraz vytvořený okrajovými paprsky. Co se s okrajovými paprsky stane, nenajdou-li v místě svého zaostření stínítko?

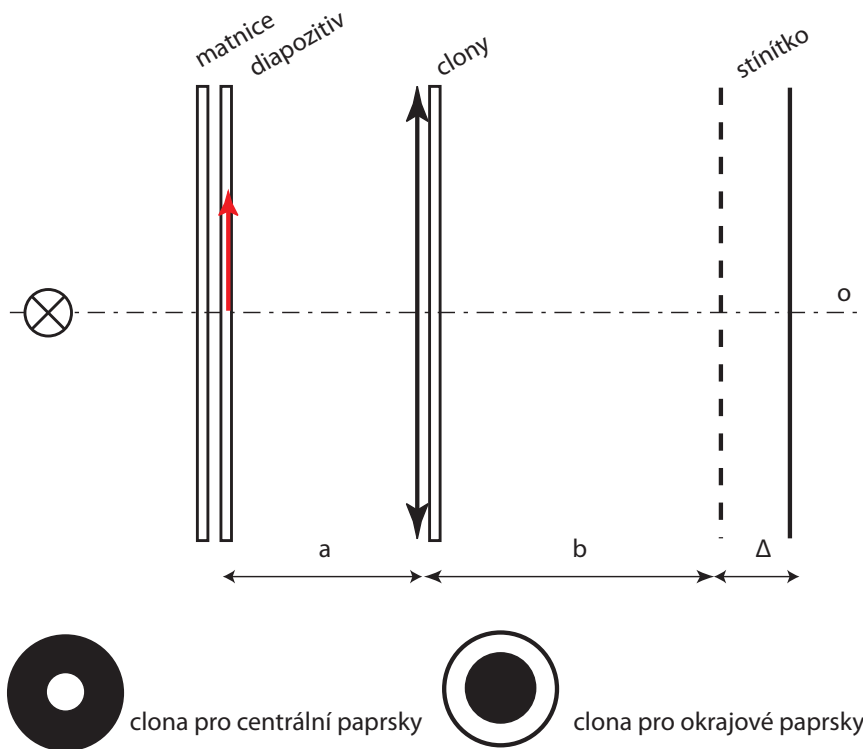
#### Modifikace pokusu

Místo velké čočky a papírových clon lze použít i standardní čočku, irisovou clonu a terčík na vystínění centrálních paprsků. Tato varianta lépe zobrazuje pomocí okrajových paprsků. Je však zapotřebí zvolit takovou čočku, aby paprsky dopadaly na čočku pod velkými úhly.

### Fyzikální interpretace

Otvorová vada je důsledkem omezené platnosti zobrazovací rovnice, odvozené pro paraxiální prostor. Pro paprsky jdoucí pod většími úhly vůči optické ose je náhrada goniometrických funkcí  $\tan$  a  $\sin$  úhlů samotnými úhly nepřesná. Paprsky potom nejsou fokusovány do stejného ohniska jako paraxiální paprsky. Otvorovou vadu lze omezit zaočněním čočky.





Obrázek 6: Uspořádání pro demonstraci otvorové vady na optické lavici

## E7 – Otvorová vada čočky na optické desce

Otvorová vada je na optické desce dobře pozorovatelná.

### Potřeby

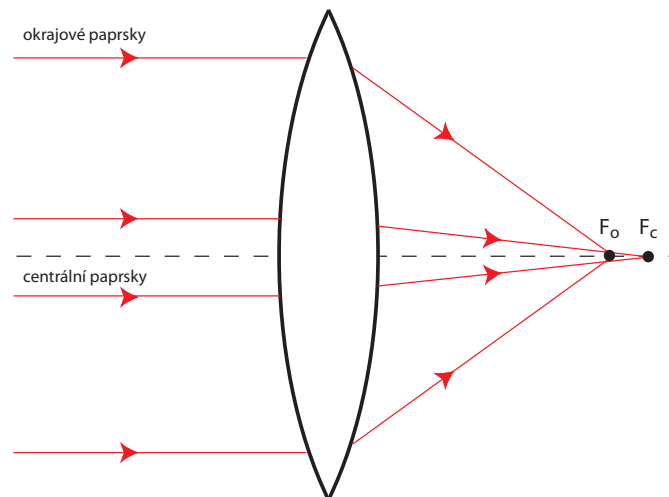
- optická deska, laserový paprskový zdroj, model spojně čočky

### Provedení

1. Na optickou desku umístíme potřebné komponenty. Čočku symetricky osvítíme širokým laserovým svazkem tak, aby se centrální a okrajové paprsky viditelně protínaly jako na obrázku 7.

### Fyzikální interpretace

Otvorovou vadu můžeme zmenšit vhodnou orientací čoček. Nastavíme-li plankonvexní čočku rovnoběžnému svazku tak, jak je zachyceno na obrázku 8a), lom je realizován pouze druhým optickým rozhraním. Otvorová vada je výrazná. Obrátíme-li čočku, aby se na lomu podílela rozhraní obě, otvorová vada se zmenší. Při práci s rovnoběžným svazkem bychom proto měli vždy plankonvexní čočku orientovat podle obrázku 8b).



Obrázek 7: K otvorové vadě spojně čočky.

## E 8 – Hloubka pole, hloubka ostrosti

*Jak docílit na fotografii ostrého pozadí? A naopak rozostřeného?*

### Potřeby

- optická lavice, přípravek s dvěma svítícími vlákny, spojná čočka, irisová clona, stínítko

### Provedení

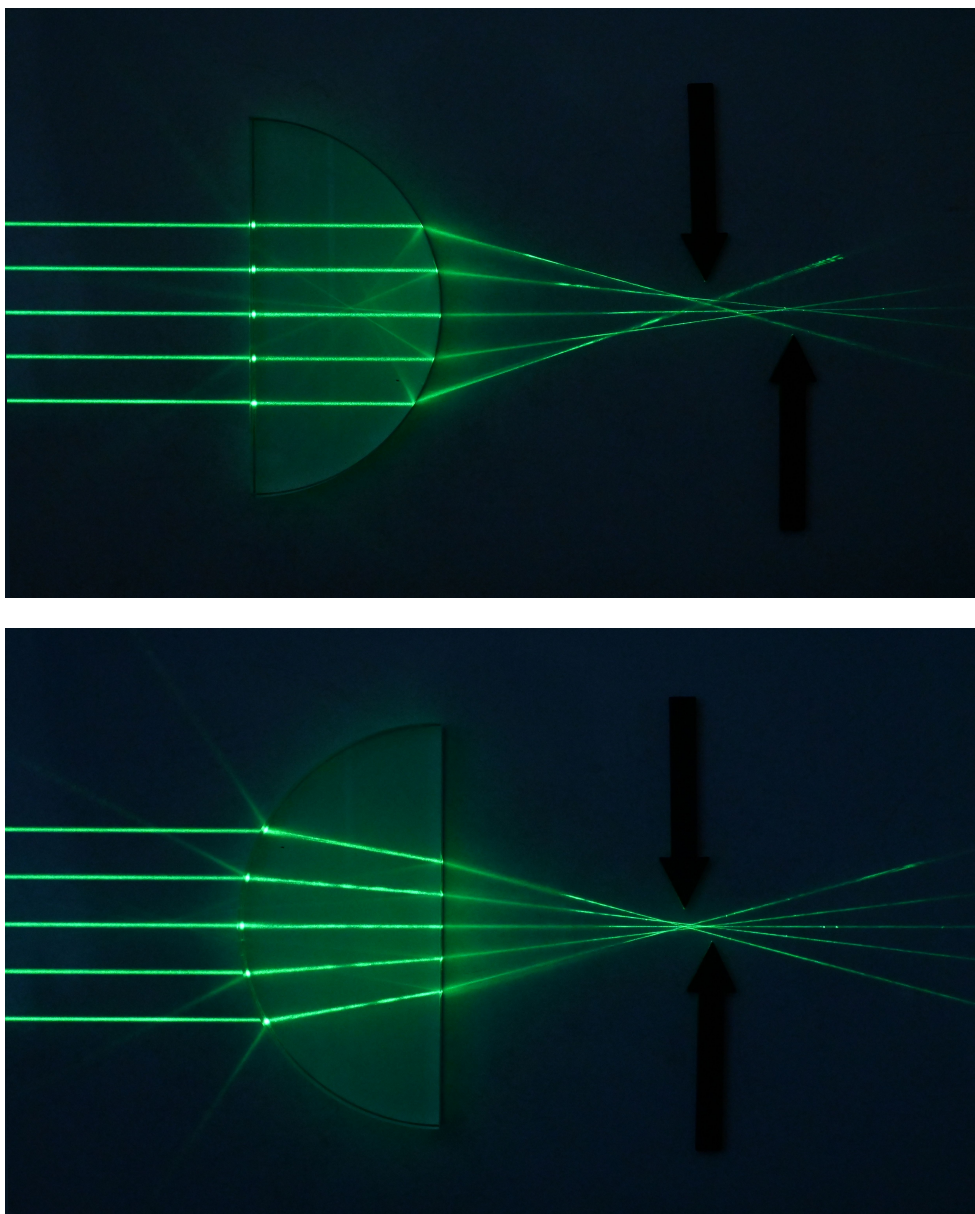
1. Spojnou čočkou zaostříme obraz přípravku na stínítko. Irisovou clonu otevřeme na maximum. Pozorujeme, že vždy lze zaostřit jen jedno vlákno.
2. Irisovou clonu přivřeme. Pozorujeme, že se rozdíly mezi obrazy obou vláken se zmenšily. Při velmi malém otvoru neostrost nezaostřeného vlákna zmizí.
3. Experiment lze provést i s jednou žárovkou. S otevřenou clonou snadno najdeme polohu čočky, při které je obraz zaostřen. Poté čočku zacloníme. Nyní můžeme čočkou pohnout podstatně více, aniž bychom viděli rozdíl v ostrosti. Když poté clonu otevřeme, zjistíme, že obraz není zaostřen. *Tj. čočka není v poloze, při které předmětová i obrazová vzdálenost splňuje zobrazovací rovnici!*
4. Pokus si můžeme vyzkoušet i na svém oku. Podíváme-li se na LCD displej z velmi krátké vzdálenosti (pár cm), obraz bude nezaostřený. Dáme-li před oko prsty tak, aby vytvořily jen velmi malý otvůrek, uvidíme přes něj i jednotlivé RGB pixely.

### Technické problémy

K zvýšení hloubky pole je zapotřebí objektiv obvykle dobře zaclonit. Pro demonstraci tak potřebujeme na místě předmětu jasný zdroj světla.

### Fyzikální interpretace

Tento experiment na první pohled vypadá podobně jako předešlý experiment k otvorové vadě – zacloněním objektivu se neostrost snižuje. V předešlém experimentu ale ke zlepšení obrazu došlo

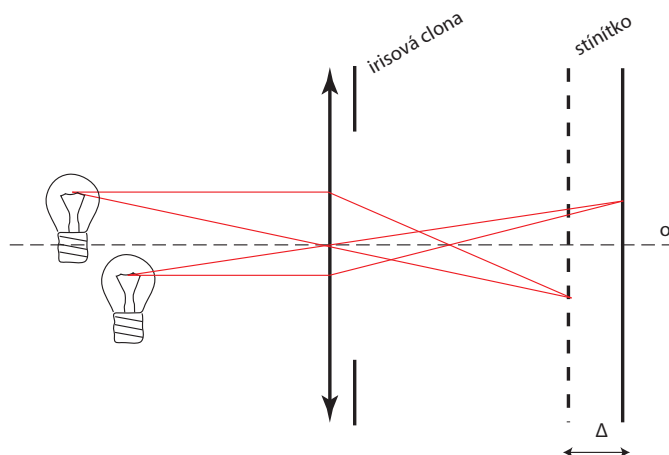


Obrázek 8: Otvorovou vadu spojně čočky můžeme přímo pozorovat na optické desce. a) láme jedno rozhraní, b) lámou obě rozhraní.

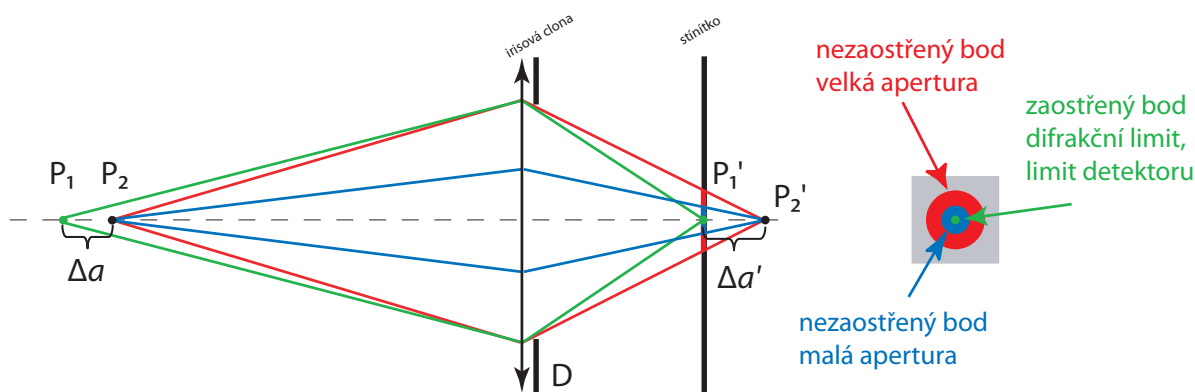
v pozici čočky, která splňovala zobrazovací rovnici. V tomto experimentu je potlačena neostrost způsobená polohou nesplňující zobrazovací rovnici, potlačení otvorové vady je sekundární.

Problém vystihuje obrázek 10. Podle zobrazovací rovnice čočka umožňuje ostřit jen na jednu předmětovou vzdálenost, odpovídající obrazové vzdálenosti dané polohou stínítka. Body s jinou předmětovou vzdáleností budou nezaostřeny a na stínítku se projeví jako plošky o průměru, která závisí na průměru použité čočky. Zacloněním čočky irisovou clonou se průměry plošek zmenší, neostrost se tedy sníží.

V reálných zobrazovacích soustavách je ve skutečnosti neostřý i obraz „zaostřený“ podle zobrazovací rovnice. Na vině jsou optické vady, z nichž některé nelze zcela odstranit (např. difrakční vada). Plošné detektory (oko, CCD/CMOS čip, film) mají navíc svou vlastní rozlišovací schopnost (danou velikostí světločivých buněk, pixelů, zrn filmu). Dostaneme-li se s neostrostí na tuto úroveň, rozdíl v ostrosti nepoznáme.



Obrázek 9: Hloubka pole a ostrosti na optické lavici



Obrázek 10: K vysvětlení hloubky pole a hloubky ostrosti

Pro dané rozlišení detektoru (průměr plošky  $d$ ) tedy můžeme najít intervaly obrazové vzdálenosti  $\Delta a'$  (hloubka ostrosti) a předmětové vzdálenosti  $\Delta a$  (hloubka pole), ve kterých nezaostřené předmětové a obrazové body budou vnímány stejně jako body zaostřené:

$$\Delta a' = \frac{d}{D} a' \quad (2)$$

$$\Delta a = \frac{a^2}{a'^2} \Delta a' = \frac{a^2 d}{a' D} \approx \frac{a^2 d}{f D}. \quad (3)$$

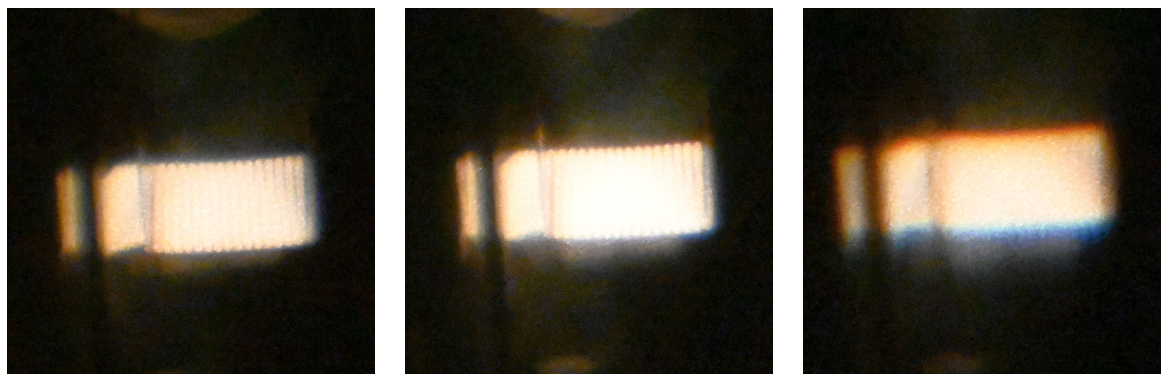
Zavedeme-li relativní otvor  $1/c$  a clonové číslo  $c$  jako

$$\frac{1}{c} = \frac{D}{f}, \quad (4)$$

dostaneme pro hloubku pole fotoaparátu

$$\Delta a = \frac{a^2}{f^2} cd. \quad (5)$$

V praxi je hloubka ostrosti (na straně detektoru) či pole (na straně předmětu) velmi důležitou charakteristikou. Velká hloubka pole nám umožňuje fotit ostře i bez ostření. Fixní objektiv fotoaparátu je nastaven na tzv. hyperfokální vzdálenost  $h$ , poskytující ostrý obraz od  $h/2 \dots \infty$ .



Obrázek 11: Barevná vada čočky při a) symetrickém, b) mírně asymetrickém a c) asymetrickém osvětlení čočky.

Malá hloubka pole v mikroskopu nám naopak umožňuje pozorovat jen správnou vrstvu preparátu. Hloubka ostrosti má význam i ve výuce; při měření ohniskové délky čočky v praktiku potřebujeme mít malou hloubku ostrosti, jinak správnou polohu čočky jednoduše nenalezneme.

**Příklad:** Jaká je hloubka pole pro fotoaparát NIKON Z50 při zaostření do vzdálenosti 10 m nastaveným clonovým číslem 22 a ohniskovou vzdáleností 16 mm? Vzdálenost pixelů na čipu je  $4,2 \mu\text{m}$ .

## E 9 – Barevná vada čoček na optické lavici

*Barevná vada vynikne, když chod paprsků čočkou je asymetrický jako v optickém hranolu.*

### Potřeby

- optická lavice, halogenová lampa, velká plankonvexní spojná čočka, stínítko
- papír s kruhovým otvorem

### Provedení

1. Žárovku zobrazíme spojnou čočkou na stínítko. Na rovnou stranu čočky přiložíme symetricky papír s otvorem, barevnou vadu takřka nepozorujeme.
2. Nyní papír vychýlíme z optické osy. Pozorujeme ztelné zhoršení barevné vady.

### Fyzikální interpretace

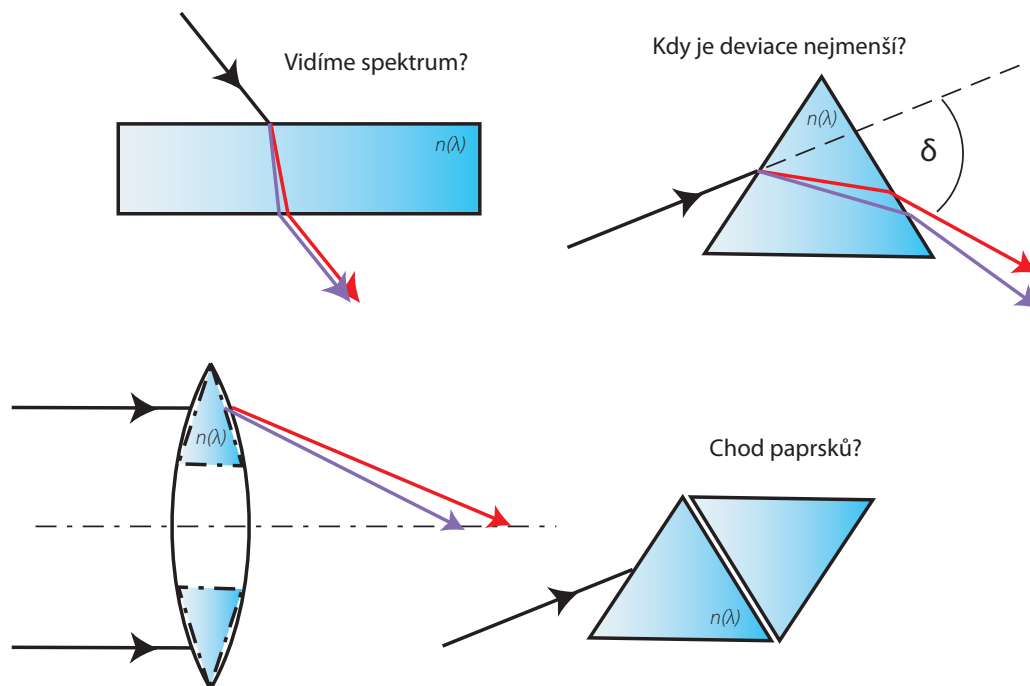
Jak vysvětlíme, že nejvíce zbarvené jsou obrysy předmětu (viz obrázek 11)?

## E 10 – Chromatická disperze na optické desce

*Optická deska dovoluje názornou demonstraci chodu paprsků ve optických soustavách. Na pozorování výsledného obrazu se ale nehodí.*

### Potřeby

- optická deska, halogenový paprskový zdroj,
- modely optických hranolů, planparalelní desky, . . .



Obrázek 12: Pokusy na optické desce na chromatickou disperzi



Obrázek 13: Fresnelova čočka. Převzato z [wk].

### Provedení

1. Na optické desce necháme procházet bílé světlo zmíněnými modely (viz obrázek 12). Do cesty vystupujícího svazku můžeme vložit bílý papír. Pozorujeme zřetelné oddělení barev v případě spektroskopického hranolu.
2. Pomocí menších hranolů můžeme simulovat lom paprsků čočkou (Fresnelova čočka, viz obrázek 13).
3. Vyzkoušíme si i další experimenty dle pracovních šablon (modely lidského oka a jeho vad, fotoaparát, ...)

### Fyzikální interpretace

Rozbor chromatické disperze je proveden v návodu Optika 1A.

### 3 Jednoduché optické přístroje

#### E 11 – Lupa a mikroskop

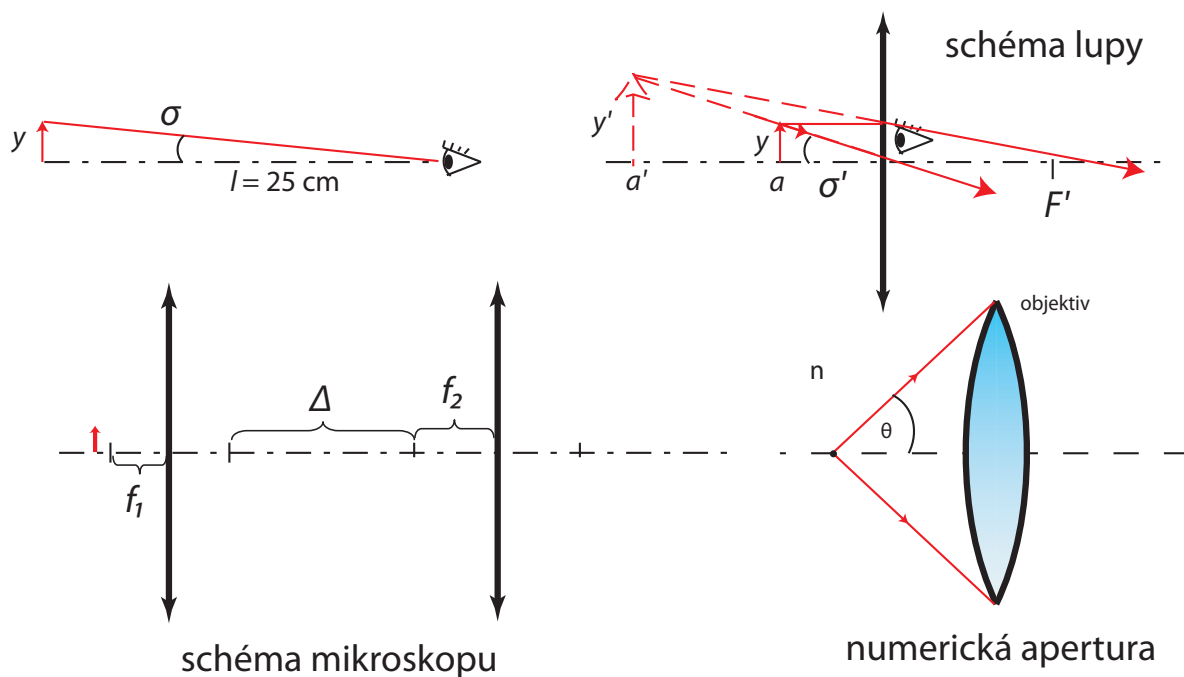
Při demonstraci klasického mikroskopu s okulárem pro lidské oko se nevyhne střídání očí u okuláru.

#### Potřeby

- optická lavice, LED zdroj, preparát (na tiskárně potištěný papír), dvě spojné čočky (nejlépe objektivy s korigovanými vadami), matnice

#### Provedení

1. Na optickou lavici umístíme zdroj světla s preparátem (nekoherentně osvětleným), jako stínítko použijeme matnici. Objektivovou čočku umístíme od preparátu do vzdálenosti o něco větší, než je její ohnisková délka. Čočka potom vytvoří na matnici zvětšený skutečný (mezi)obraz. Druhou, okulárovou, čočku použijeme jako lupu. Po usazení okuláru matnici odstraníme.
2. Odhadneme zvětšení a porovnáme se vztahem (6).
3. Prohlédneme si skutečný mikroskopový okulár. Jaký význam má jeho přední čočka?
4. Kam umístíme USB okulár pro záznam obrazu v PC?



Obrázek 14: Mikroskop na optické lavici

#### Technické problémy

Pro demonstrační účely je vhodné sestavovat mikroskop poskytující jen menší zvětšení. V případě vysokého zvětšení je zorné pole mikroskopu velmi malé, aparatura je citlivá na otřesy a také optické vady se projevují výrazněji. Preparát ve formě potištěného kancelářského papíru vhodně zeslabí (a také rozptýlí) světlo i z koherentního zdroje. Při pohledu do mikroskopu tak nebudeme oslněni.

## Fyzikální interpretace

Důležitými charakteristikami mikroskopu je zvětšení a rozlišení. Pro úhlové zvětšení lze odvodit

$$g = \frac{\Delta L}{f_1 f_2}, \quad (6)$$

kde  $f_1$  a  $f_2$  jsou postupně ohniskové vzdálenosti objektivu a okuláru,  $\Delta$  je optický interval (viz obrázek 14) a  $L$  je konvenční zraková vzdálenost rovná 25 cm.

Rozlišení mikroskopu se posuzuje pomocí schopnosti rozlišit periodickou strukturu. Podle Abbeho rozlišovacího kritéria je perioda struktury  $a$ , která bude ještě rozlišena, rovna

$$a = \frac{\lambda_0}{\text{NA}}, \quad (7)$$

kde  $\lambda_0$  je vakuová vlnová délka použitého světla, NA je numerická apertura objektivu daná vztahem

$$\text{NA} = n \sin \theta,$$

viz obrázek 14. Numerická apertura bývá na objektivu uvedena.  $n$  je index lomu prostředí před objektivem.

## E 12 – Mikroskop s temným polem

---

*Paprsky nepodílející se na zobrazení preparátu jednoduše vycloníme, pokud preparát osvětlíme rovnoběžným svazkem.*

### Potřeby

- optická lavice, LED zdroj světla (případně žárovka s kolimátorem), spojná čočka, stínítko
- nekontrastní preparát (lak na skle, otisk palce na skle)
- terčík

### Provedení

1. Vytvoříme rovnoběžný svazek paprsků a osvětlíme jím nekontrastní preparát.
2. Preparát promítneme spojnou čočkou na stínítko. Do ohniska zobrazovací čočky vložíme terčík.
3. Před preparát vložíme matnici. Jak se obraz na stínítku změní?

## E 13 – Keplerův dalekohled na optické lavici

---

*Na demonstraci Keplerova dalekohledu stačí dvě spojně čočky různé ohniskové délky.*

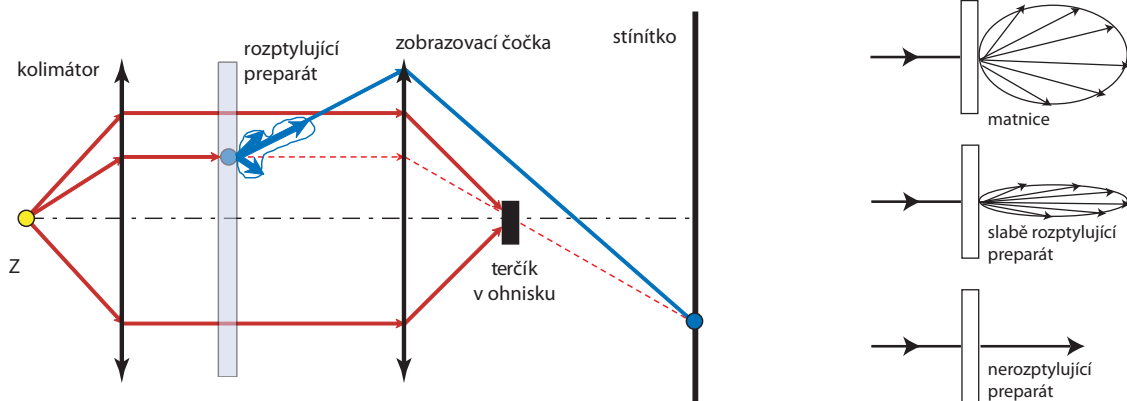
### Potřeby

- malá optická lavice, spojně čočky (10 a 30 cm)

### Provedení

1. Na optickou lavici umístíme obě spojně čočky do vzdálenosti rovné součtu jejich ohniskových délek. Přes dalekohled se podíváme na vzdálený předmět (ideálně oknem ven).
2. Pozorováním vzdáleného objektu střídavě ozbrojeným a neozbrojeným okem dokážeme odhadnout i úhlové zvětšení dalekohledu.
3. Všimneme si barevné vady čočkového dalekohledu.





Obrázek 15: Mikroskop s temným polem

## E 14 – Keplerův a Newtonův dalekohled na optické desce

*Pro vizualizaci chodu paprsků v dalekohledech je lepší modelovat dalekohledy v ploše.*

### Potřeby

- optická deska, laserový paprskový zdroj, dvě spojné čočky, malé a velké zrcadlo

### Provedení

1. Na optické desce sestavíme Keplerův dalekohled. Přední čočka (objektiv) by měla mít větší ohniskovou vzdálenost. Pokud paprsky do soustavy pustíme zešikma vůči ose přístroje, můžeme pozorovat převrácení obrazu i úhlové zvětšení (viz obrázek 19).
2. Na optické desce sestavíme Newtonův dalekohled. Jako velké zrcadlo volíme buď zrcadlo na skle nebo vyleštěný pásek. Před ohnisko vložíme paprskům do cesty rovinné zrcadélko, kterým paprsky odchýlíme do okulárové spojné čočky. Výstupní paprsky z okuláru by měly být rovnoběžné.

### Fyzikální interpretace

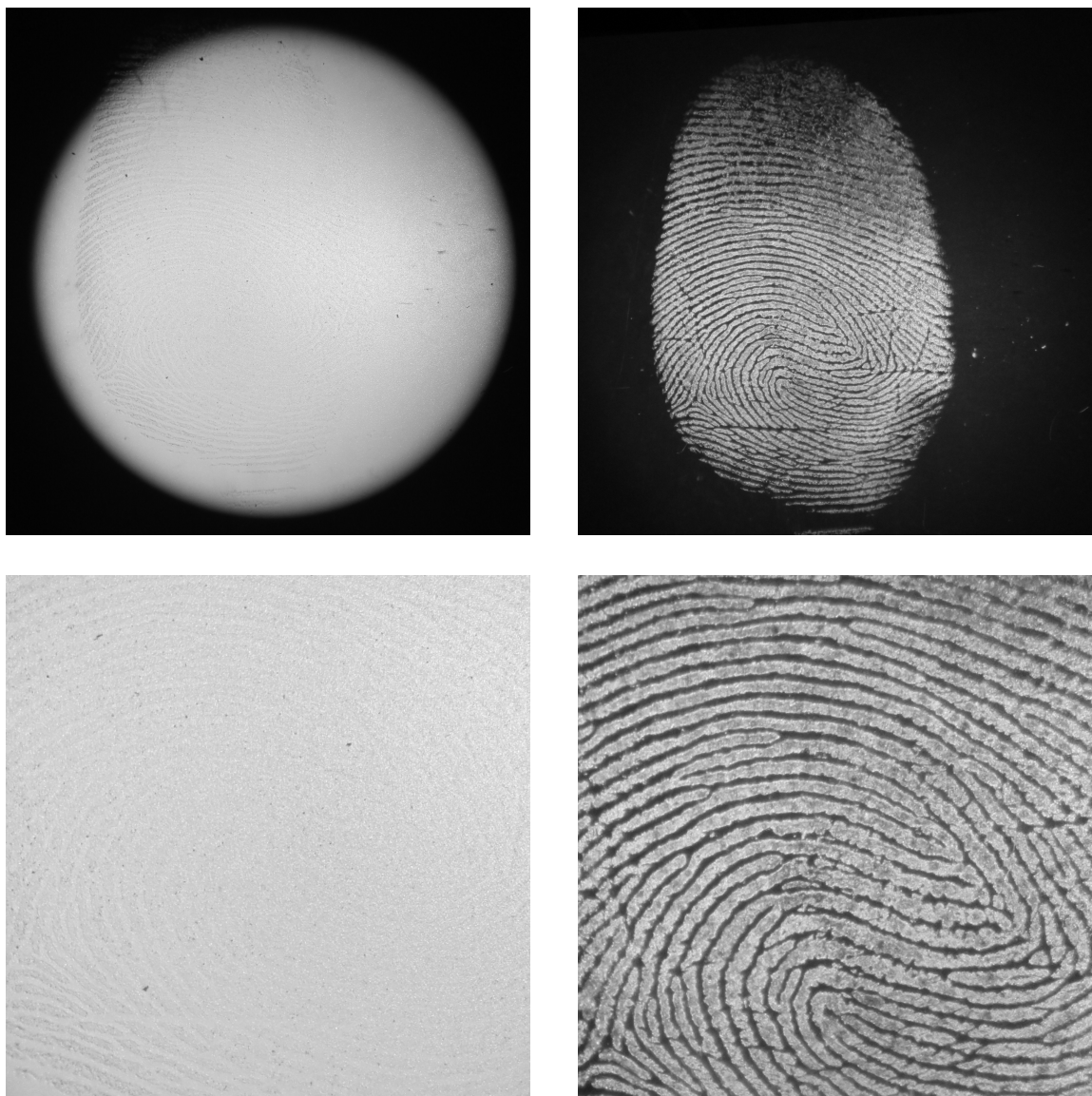
- Čemu je rovné úhlové zvětšení dalekohledu?
- Jak dalekohled ovlivňuje intenzitu světla dopadající do oka?

## E 15 – Rozlišovací schopnost dalekohledu

*Když není jednoduše možné určit rozlišení normálního dalekohledu, můžeme dalekohled znehodnotit vstupní aperturou natolik, že nezobrazí dobře ani předměty v místnosti.*

### Potřeby

- přípravek se dvěma svítícími body,
- dalekohled,
- posuvka, svinovací metr



Obrázek 16: Porovnání světlého a temného pole mikroskopu na vzorku otisku palce.

### Provedení

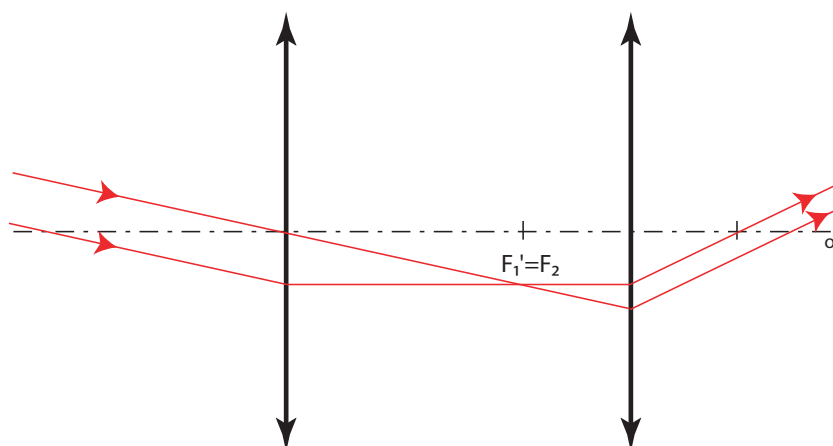
1. Dalekohled a přípravek se svítícími body umístíme na chodbě asi 20 m daleko. Dalekohled zaostříme.
2. Měníme průměr vstupní pupily dalekohledu a pozorujeme oba body v dalekohledu. Nastavíme takový průměr pupily, při které body ještě taktak rozlišíme.
3. Jejich úhlovou vzdálenost srovnáme s Rayleighovým kritériem.

### Fyzikální interpretace

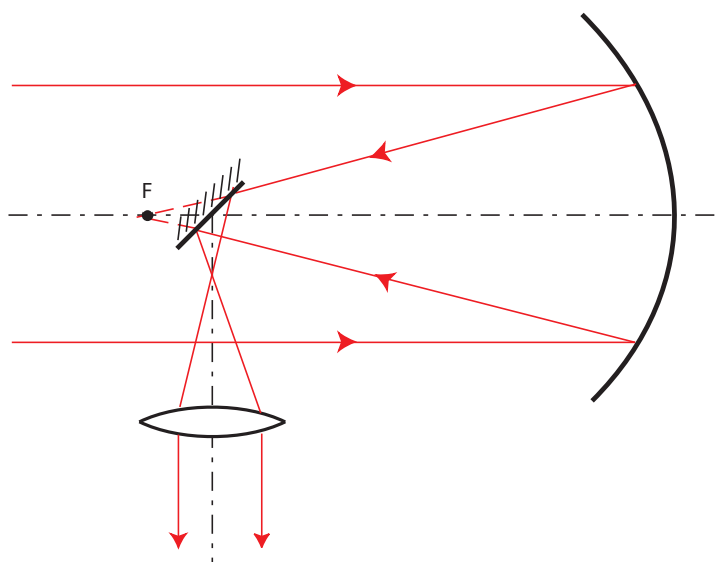
Rayleighovo rozlišovací kritérium udává, že rozlišeny budou body vzdálené minimálně o úhel  $\sigma$

$$\frac{d}{a} \approx \sin \sigma = 1,22 \frac{\lambda}{D}.$$

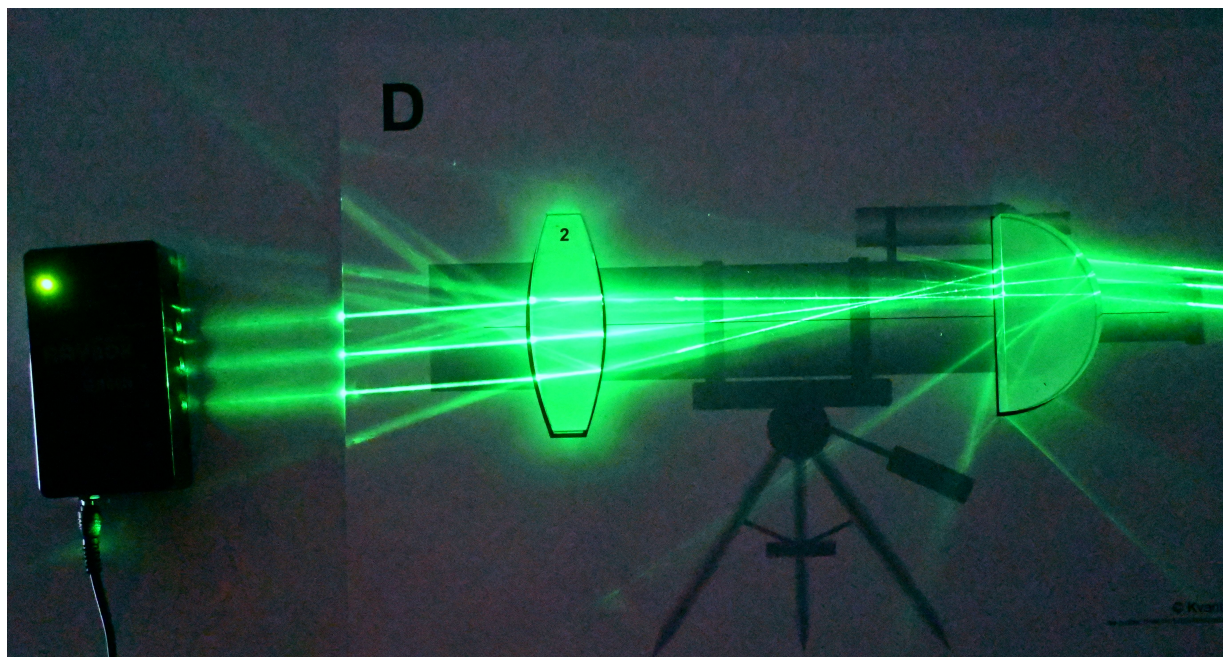
Tato hodnota je ale teoretická a nemusí odpovídat realitě. Nejkritičtějším místem experimentu je právě nastavení vstupní pupily dalekohledu.



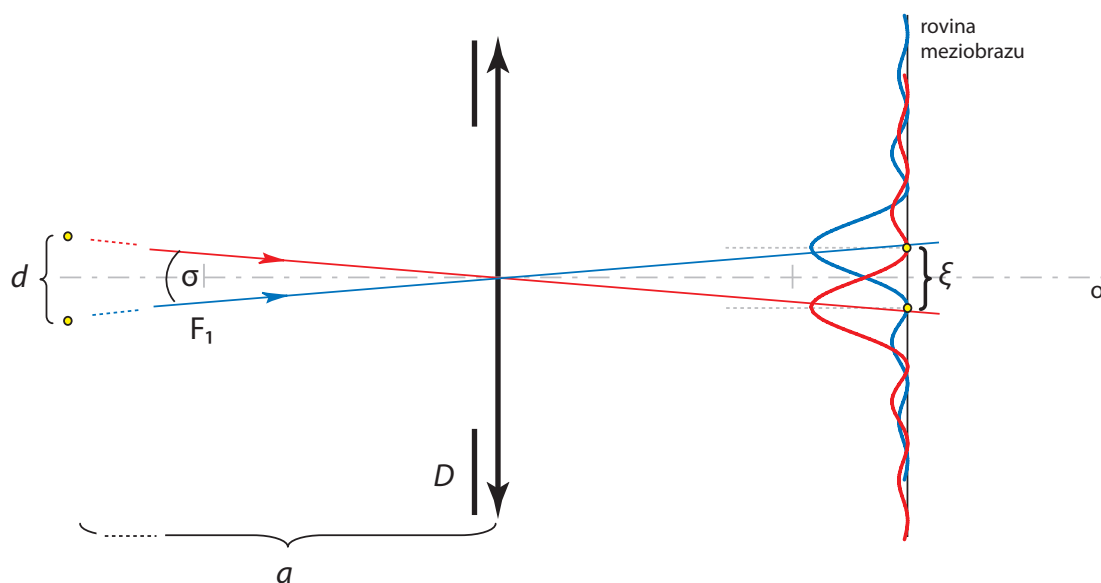
Obrázek 17: Keplerův dalekohled



Obrázek 18: Newtonův dalekohled



Obrázek 19: Běh paprsků v Keplerově dalekohledu



Obrázek 20: Rayleighovo kritérium pro mezní rozlišení dalekohledu

## Literatura a další odkazy

[ph] <http://www.pinhole.cz>

## Zdroje obrázků

[mf] <https://www.milujemefotografii.cz/wp-content/uploads/2014/08/header3.jpg>

[wk] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lentille\\_de\\_fresnel.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lentille_de_fresnel.jpg)