

a optická mohutnosť je

$$D = \frac{1}{f} = -\frac{d - f_1 - f_2}{f_1 f_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (5)$$

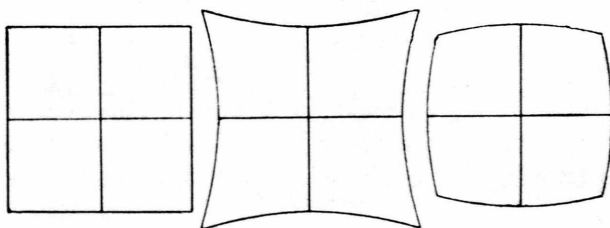
Keď sa dve tenké šošovky dotýkajú ($d = 0$), optická mohutnosť sústavy

$$D = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = D_1 + D_2 \quad (6)$$

rovná sa algebraickému súčtu optických mohutností oboidvoch šošoviek.

11.10. Zobrazovacie chyby šošoviek. Pretože poloha ohniskových a hlavných rovín, a teda aj ich vzájomná vzdialenosť, vzdialenosť ohnisková, sú závislé od indexu lomu svetla, ohniskové a hlavné roviny šošoviek pre rôzne farby nesplývajú a pre rôzne farby sa navzájom nerovnajú ani ohniskové vzdialenosti. Pri zobrazovaní mnohofarebným svetlom napríklad bielym, netvorí sa preto jedinou šošovkou bodový obraz ani pri zobrazovaní v Gaussovom nitkovom priestore. Táto chyba šošoviek (pri zrkadlách nie je) volá sa *chromatická*.

Pri zobrazovaní bodov na osi prístroja pomocou širokého zväzku lúčov, ktoré teda vybočujú z Gaussovho nitkového priestoru, vzniká chyba *sférická* (guľová). Pri zobrazovaní bodov ležiacich mimo optickú os vzniká *astigmatizmus*. Keď dĺžkové zväčšenie úsečky na optickú os kolmé je závislé od jej dĺžky, vzniká *skreslenie obrazu* (poduškové alebo sudové obr. 11.13). Keď obraz roviny na optickú os kolmej je zakrivená plocha, vzniká *kľenutie obrazu*. Všetky tieto posledné chyby v značnej miere spolu súvisia.



Obr. 11.13.

A. Chromatická chyba. Disperzia skla (alebo inej priehľadnej látky) pre Fraunhoferove čiary F a C je daná rozdielom príslušných indexov lomu, $\mu = N_F - N_C$. Optická mohutnosť tenkej šošovky je daná vzorcom $D = \frac{1}{f} = (n - 1) \varrho$, kde ϱ je vypuklosť šošovky. Keď dve tenké šošovky priložíme k sebe na dotyk, vznikne kombinácia, ktorá — podľa vzorca

(11.9.6) — má optickú mohutnosť $D = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$. Keď chceme, aby optická mohutnosť sústavy bola rovnaká pre čiary C aj F , musí byť splnená rovnica

$$\frac{1}{f_C} = \frac{1}{f_F}$$

čiže

$$\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}\right)_C = \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}\right)_F$$

alebo

$$(n_{1C} - 1) \varrho_1 + (n_{2C} - 1) \varrho_2 = (n_{1F} - 1) \varrho_1 + (n_{2F} - 1) \varrho_2$$

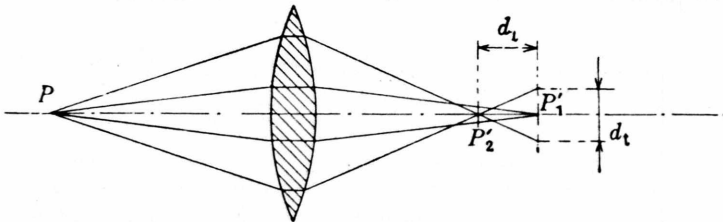
t. j.

$$\frac{\varrho_1}{\varrho_2} = -\frac{n_{2F} - n_{2C}}{n_{1F} - n_{1C}} = -\frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (1)$$

Pretože pomer $\mu_2 : \mu_1$ je kladný, podľa získaného vzorca jedna z obidvoch šošoviek musí byť spojka, druhá — rozptylka.

Pravda, keď sú šošovky hrubé, alebo keď sú ďalej od seba, výpočet achromázie je zložitejší. Dokonalá (*stabilná*) achromázia vyžaduje nielen splnutie ohniskových vzdialeností, ale aj ohniskových rovín. Splývajú potom aj hlavné roviny. Šošovka bez achromatickej chyby sa volá *achromát*.

B. Sférická chyba. Svetelný lúč, vychádzajúci z bodu P na optickej osi (*obr. 11.14*) a idúci šošovkou v blízkosti osi, po lome v šošovke pretína ju



Obr. 11.14.

v bode P'_1 , svetelný lúč krajový však v inom bode: P'_2 . Ich vzájomná vzdialenosť, úsečka $P'_2P'_1$ je tzv. *pozdlžna chyba sférická*. Priemer základne kužela svetelných lúčov s vrcholom v bode P'_2 a so základňou v rovine idúcej bodom P'_1 , volá sa *priečna chyba sférická*. Výpočet odstránenia sférickej chyby je veľmi zložitý. Aj táto chyba sa môže odstrániť alebo aspoň podstatne zmenšiť použitím kombinácie šošoviek vhodného tvaru.

Hoci sa však sférická chyba pre určitý bod osi odstráni, pre body v rovine idúcej týmto bodom a kolmej na optickej os ešte ostáva. Aby nejstvovala

sférická chyba ani pre tieto body, musí byť splnená tzv. *šinusová podmienka*, ktorú odvodil nemecký fyzik, spoluzakladateľ Zeissových podnikov v Jene E. Abbe r. 1873: Keď svetelný lúč vychádzajúci z bodu P na optickej osi šošovky zvierá s ňou uhol u a po lome v šošovke uhol u' , podiel

$$\frac{N \sin u}{N' \sin u'} \quad (2)$$

musí byť nezávislý od veľkosti uhla u (N je absolútny index lomu prostredia pred šošovkou, N' za šošovkou, v prípade lomu len na jednej guľovej lámavej ploche — za ňou). Bod na optickej osi, ktorý túto podmienku splňuje, a jeho obraz nazývajú sa *aplanatické body*. Zobrazovacie zariadenie s aplanatickými bodmi sa nazýva *aplanát*.

Pri guľovom zrkadle, dutom aj vypuklom, aplanatickým bodom je stred zrkadla, ktorý v oboch prípadoch je aj svojim obrazom. Je veľmi zaujímavé, že aj lámavá guľová plocha má dvojicu aplanatických bodov, v tomto prípade však netotožných.

Na obr. 11.15 silnejšia a neúplne vytiahnutá kružnica predstavuje rez lámavou guľovou plochou s polomerom r . Menšia kružnica má polomer r/n a väčšia kružnica polomer nr . Trojuholníky ASC a CSB sú si podobné, lebo vo vrchole S majú spoločný uhol a strany, ktoré ho v oboch prípadoch zvierajú, sú si úmerné. Je totiž

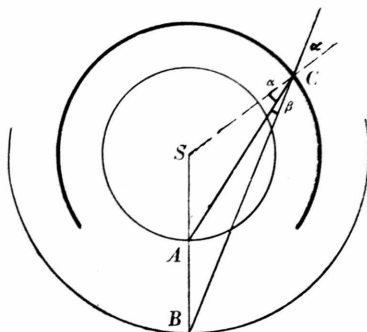
$$\frac{\overline{SC}}{\overline{SA}} = n \quad \text{aj} \quad \frac{\overline{SB}}{\overline{SC}} = n$$

teda $\overline{SC} : \overline{SA} = \overline{SB} : \overline{SC}$, pričom n je relatívny index lomu materiálu gule vzhľadom na jej okolie. Preto uhol γ v trojuholníku SAC a uhol $\alpha + \beta$ v trojuholníku SCB sa tiež rovnajú. V dôsledku toho z trojuholníka ASC pomocou sinusovej vety vyplýva

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \frac{\sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{r : n}{r} = \frac{1}{n} \quad (a)$$

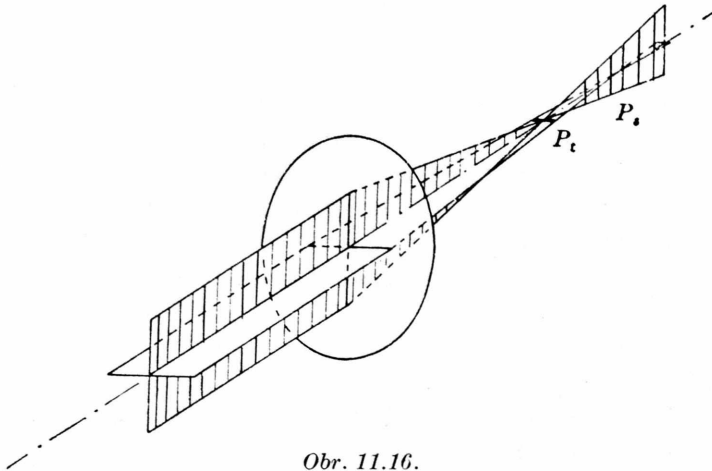
To však značí, že pre lúče \overrightarrow{AC} a \overrightarrow{BC} je splnený zákon lomu pri každej polohe bodu C na povrchu lámavej guľovej plochy, teda bod A sa zobrazuje virtuálne do bodu B bez sférickej chyby. Body A a B splňujú ale aj sinusovú podmienku, ako to bezprostredne vyplýva zo vzťahu (a). Body A a B sú teda aplanatické.

Namiesto toho, aby bodový zdroj svetla A bol tesne priložený k rovinnému



Obr. 11.15.

povrchu vhodne zbrúsenej guľovej šošovky, priestor medzi ním a napríklad šošovkou tvaru poloviny guľe môže byť vyplnený kvapalinou s rovnakým indexom lomu. Tak sa používajú na tomto princípe konštruované objektívy mikroskopov s tzv. olejovou imerziou.



Obr. 11.16.

C. Astigmatizmus. Astigmatizmus sa objavuje pri zobrazovaní bodov ležiacich mimo optickej osi. Takým bodom a stredom šošovky položíme dve roviny. Prvá nech prechádza aj optickou osou, druhá nech je na ňu kolmá. Rez spojnice šošovky touto poslednou rovinou je vypuklejší. Lúče prechádzajúce v tejto rovine po lome v šošovke pretínajú sa preto bližšie k šošovke (vo *fokále tangenciálnej*), lúče postupujúce v rovine predošlej (poludníkovej) až ďalej od šošovky (vo *fokále sagitálnej*, obr. 11.16).

Odstránenie astigmatizmu je veľmi dôležité pri prístrojoch s veľkým zorným uhlom, napríklad pri fotografickom objektíve (*anastigmaty*).

12. HLAVNÉ OPTICKÉ PRÍSTROJE

12.1. Niektoré vlastnosti ľudského oka. Skôr ako sa budeme zaoberať optickými prístrojmi, pripomenieme si niektoré vlastnosti ľudského oka, bez ktorého sú mnohé optické prístroje neupotrebitelné a ktoré samo je veľmi dômyselným optickým zobrazovacím zariadením. Svetelný lúč vstupujúci do oka prechádza postupne *rohovkou r* (obr. 12.1), *očným mocom m*, *šošovkou š* a *sklovcom s*. Jednotlivé tieto priehľadné prostredia sú oddelené približne guľovými plochami a spolu predstavujú tesnú centrovanú sústavu spojnú, ktorá vytvára obraz pozorovaného predmetu na *sietnici* oka. Očné svalstvo môže v malom