

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

Albert Arnulf

Oko a optické přístroje. [I.]

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 75 (1950), No. 2, D178--D186

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/120783>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1950

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

OKO A OPTICKÉ PŘÍSTROJE.

Část I.

ALBERT ARNULF, Paříž.

Práce, kterou předkládáme čtenáři, je přednáška, kterou autor, profesor na Sorbonně a ředitel laboratoří Optického ústavu v Paříži, konal v rámci zasedání Přípravného komitétu Mezinárodní optické komise v Praze dne 3. června 1947. Obsahem přednášky je přehled výsledků prací, které ozřejmily význam vlastností oka pro zhodnocení vizuálních optických přístrojů. Ukázalo se, že rozlišovací schopnost oka je funkcí jasu, kontrastu a průměru pupily a tedy že všechny tyto veličiny se mají uvažovat při zhodnocování optických přístrojů. K experimentálnímu zhodnocení se definuje účinnost a výkonnost přístroje. K theoretickému zhodnocení „a priori“ z konstrukčních dat se studuje rozložení osvětlení na sítnici a příslušné vlastnosti oka.

Úvod. Oko je jediný orgán, který umožňuje člověku vnímat obrazy a to i tehdy, když tyto obrazy pocházejí z optického přístroje. Dovolují si připomenout pravdu tak samozřejmou proto, že byla opomíjena dlouhá léta, během kterých optikové sice ustavičně zlepšovali jakost obrazů, ale dovedli předvídat jen v hrubém přiblížení jakost a výkonnost skutečných přístrojů.

Vskutku, oko rozhoduje vždycky v poslední instanci v celku přístrojů, které mají umožnit vnímání obrazu, ale jeho úloha je důležitější nebo méně důležitá podle případu, o který právě jde. Oko úplně rozhoduje v přístrojích, kde se přímo pozoruje nějaký prostorový obraz. Když se však vloží mezi oko a obraz prostředkující přijímač, na příklad fotografická emulze nebo televizní přístroj, může se stát, že přetržitá struktura tohoto přijímače nebo jeho uzpůsobení k reprodukci kontrastu učiní vnímání obrazu v širokých mezích nezávislým na oku, které je k němu přidruženo. Můžeme tedy bez velké chyby mluvit o vlastnostech vnímání vzhledem k prostředkujícímu přijímači.

Omezíme svůj výklad na případ, kdy je účast oka nejdůležitější, totiž na případ vizuálních přístrojů s obrazem v prostoru (image aérienne), typu dalekohledu nebo mikroskopu, při čemž zatím nebudeme hledět k porušení obrazu aberacemi, absorpcí a parazitním světlem; přístroj bude tedy opticky dokonalý, struktura obrazu bude podmíněna jen ohybem.

Vnímání budeme charakterisovat mezi rozlišení, lineárním nebo úhlovým rozměrem nejmenšího předmětu, vnímatelného přístrojem.

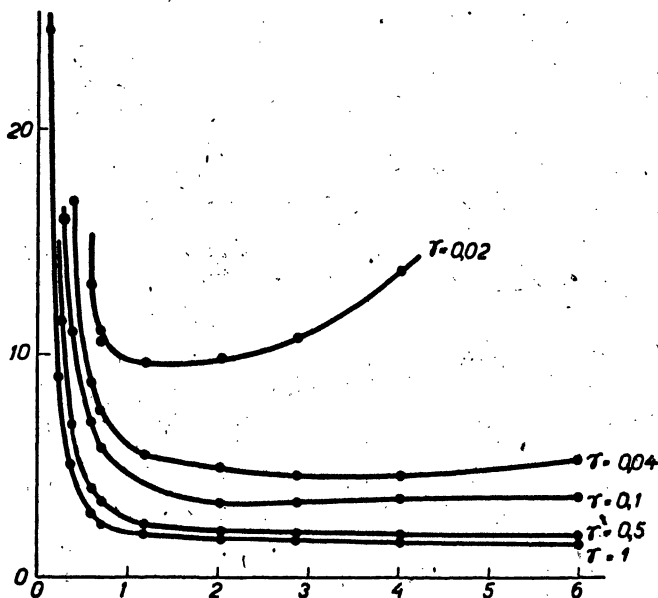
Theoretické vzorce a aplikace. Omezím se na vypsání vzorců pro mez rozlišení bez jejich odvození.¹⁾ Označme T lineární mez rozlišení v předmětovém prostoru, $n \sin u$ předmětovou numerickou aperturu, Ω průměr vstupní pupily přístroje, S úhlovou mez rozlišení v předměto-

¹⁾ La vision dans les instruments. Editions de la Revue d'Optique théorique et instrumentale: A. ARNULF, Etude de la limite de résolution visuelle. Applications à la vision dans les instruments (Réunion de l'Institut d'Optique du 28 Janvier 1936).

vém prostoru, ω_n přirozený průměr pupily, ω průměr okulárového kroužku, s úhlovou mez rozlišení oka, odpovídající průměru pupily ω . Lineární a úhlové meze rozlišení souvisejí s úhlovou mezí rozlišení oka vztahy:

$$2n \sin u \cdot T = S\Omega = s\omega. \quad (1)$$

Je-li průměr okulárového kroužku menší než přirozená oční pupila, $\omega < \omega_n$, vstupní pupila přístroje souhlasí s užitečným otvorem objek-



Obr. 1. Křivka $s = f(\omega)$; $B = 0,15$ stilb. Na vodorovné ose průměr pupily v mm, na svislé ose mez rozlišení v obloukových minutách.

tivu. V opačném případě, $\omega > \omega_n$, výstupní pupila přístroje je realizována vstupní pupilou oka o průměru ω_n a odpovídá vstupní pupile menší než užitečný otvor objektivu.

Srovnáme nyní výsledky (2) s klasickými vzorci (3):

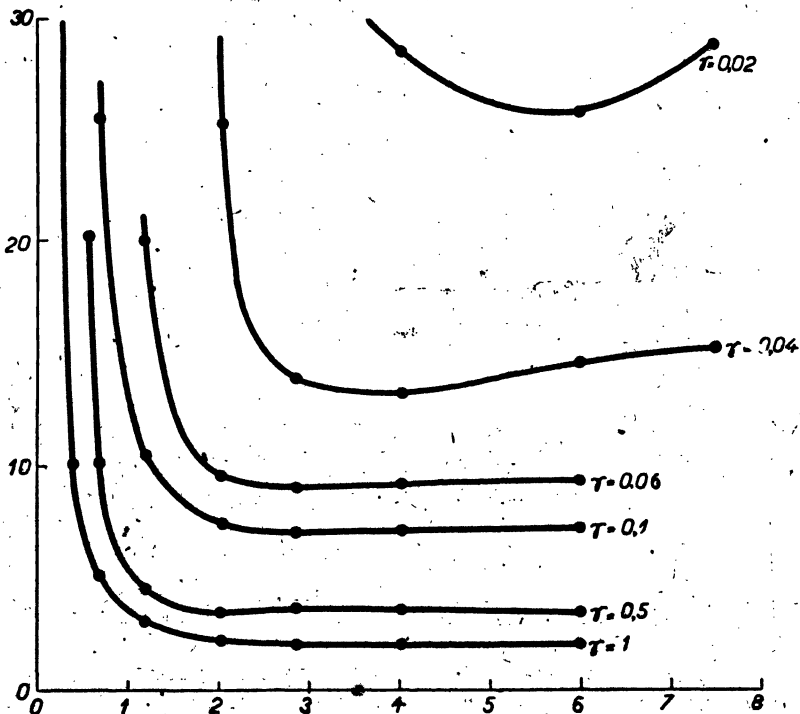
$$T = \frac{s\omega}{2n \sin u} \quad S = \frac{s\omega}{\Omega} \quad (2)$$

místo

$$T = \frac{1,22\lambda}{2n \sin u} \quad S = \frac{1,22\lambda}{\Omega} \quad (3)$$

Výraz $1,22\lambda$ je nahrazen výrazem $s\omega$, který souvisí jen s vlastnostmi oka. Vzorce (2) byly ověřeny dostatečně přesně velmi četnými pokusy s pří-

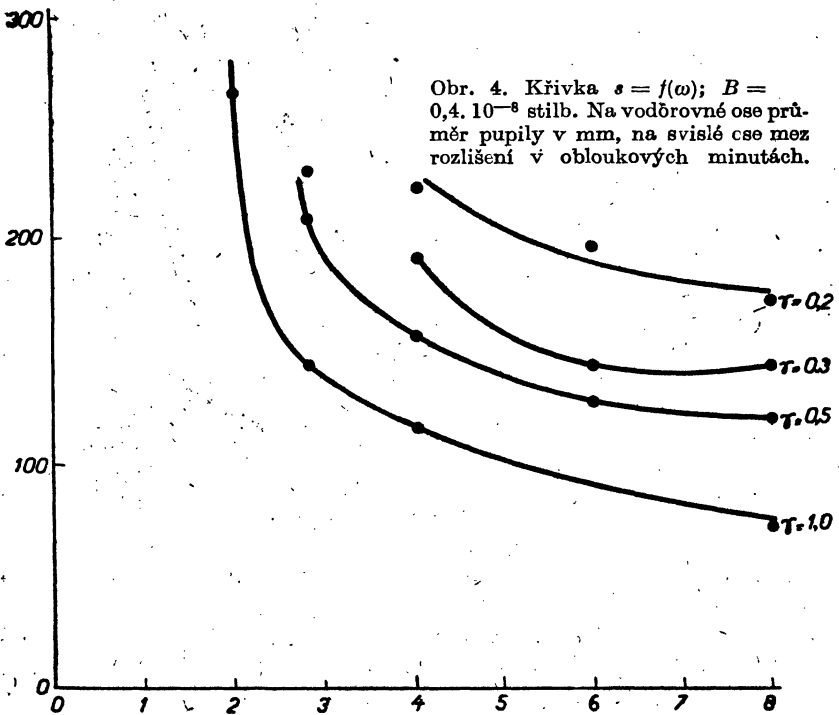
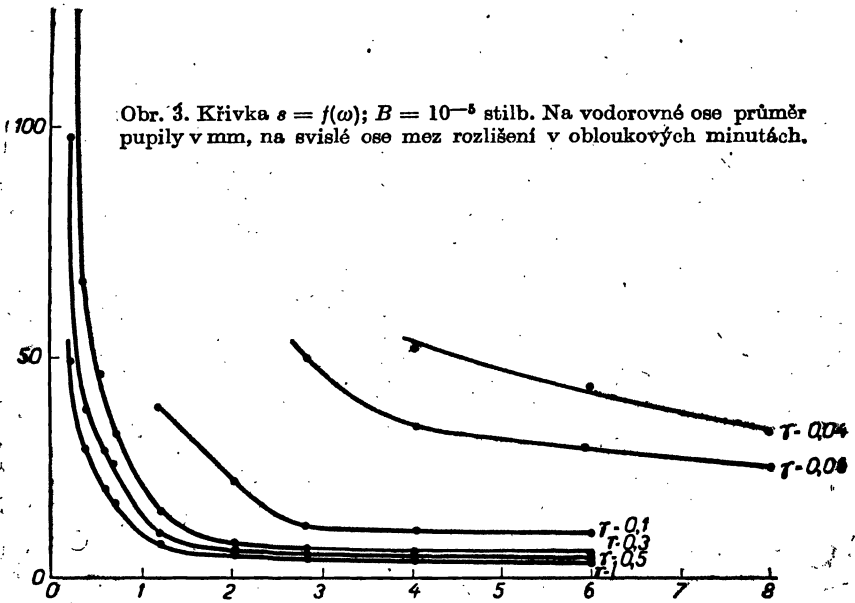
stroji různých typů a to v oblasti denního i nočního vidění. Zjišťuje se, že vzorce (3) souhlasí s předcházejícími jen ve velmi omezeném okruhu případů, kdy průměr okulárního kroužku je blízký 0,7 mm, jas předmětu větší než 10^{-2} stilb a kontrast blízký 1. Za těchto podmínek je optická soustava oka dostatečně zacloněná, stává se opticky dokonalou a přetřžitá struktura sítnice se neuplatňuje, poněvadž ohybová skvrna obrazu je velká vzhledem k rozměrům sítnicových čípků.



Obr. 2. Křivka $s = f(\omega)$; $B = 10^{-4}$ stilb. Na vodorovné ose průměr pupily v mm, na svislé ose mez rozlišení v obloukových minutách.

Je tedy možno počítat z teorie ohybu rozdělení osvětlení v očním obraze a odvodit z toho na základě známého minima vnímatelného kontrastu mez rozlišení;²⁾ dochází se ke skvělé shodě s experimentálními údaji a poněvadž jde o kontrasty okolo 1, také k velmi přibližné shodě se vzorcí (3). Tento výsledek je dokladem o základní úloze oka, naznačené vzorcí (2); dokazuje, že ohyb se uplatňuje v mezi rozlišení dokonalých

²⁾ A. ARNULF: l. c., str. 46—58.

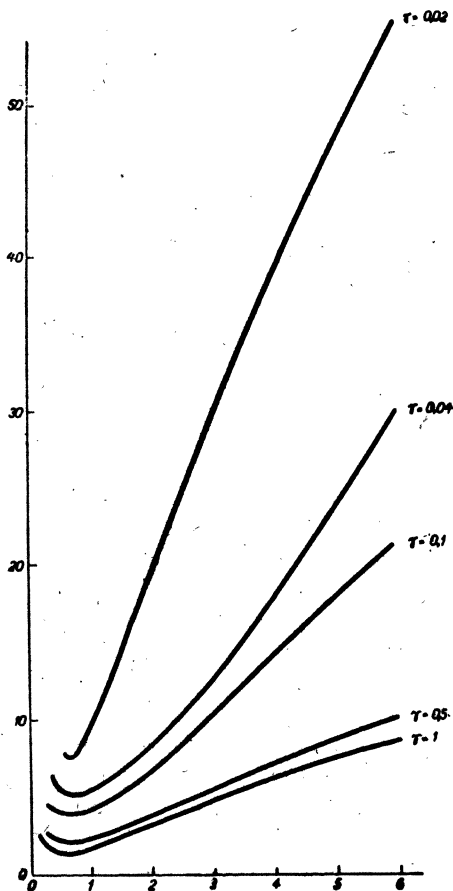


přístrojů jen v případě, že struktura očního obrazu je sama určována ohybem.

Z platnosti vzorců (2) lze vyvodit bezprostřední praktické závěry.

U přístroje se stálým zvětšením se předměťová mez rozlišení mění s otvorem právě tak, jako mez rozlišení oka s :

$$S = \frac{s\omega}{\Omega} = \frac{s}{G}, \text{ kde } G \text{ je konstantní.}$$



Obr. 5. Křivky $s\omega = f(\omega)$; $B = 0,15$ stilb. Na vodorovné ose průměr pupily v mm, na svislé ose specifická mez rozlišení v mm × oblouková minuta.

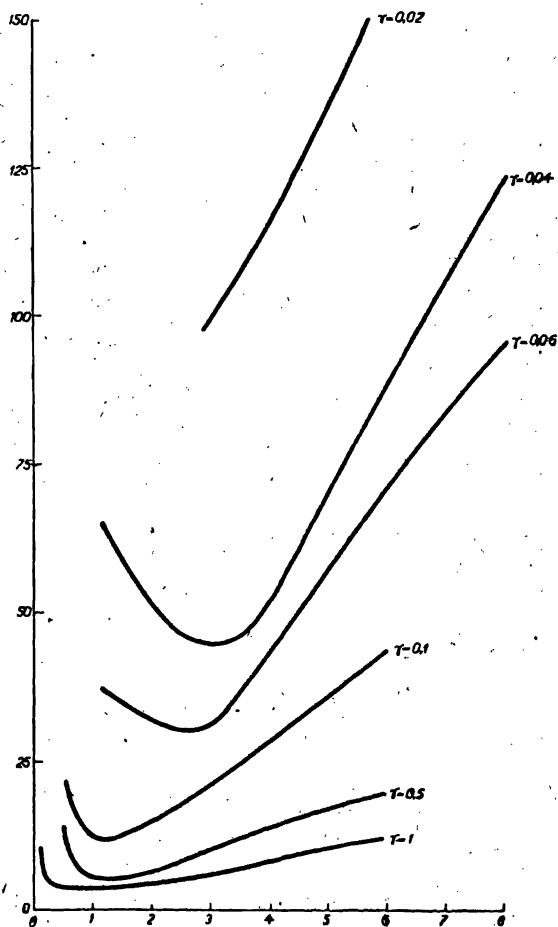
Známe-li funkci $s = f(\omega)$, můžeme určit pro přístroj daného zvětšení optimální otvor.

U přístroje s daným otvorem se mez rozlišení mění s ω , jinak řečeno, se zvětšením, stejně jako součin $s\omega$:

$$S = \frac{s\omega}{\Omega}, \text{ kde } \Omega \text{ je konstantní.}$$

Známe-li funkci $s\omega = f(\omega)$, můžeme určit optimální zvětšení přístroje s daným otvorem.

Mez rozlišení oka a určení optimálních charakteristik visuálních přístrojů. Otázka meze rozlišení dokonalého přístroje nás dovedla k určování meze rozlišení oka. Na neštěstí známe oko příliš nedokonale, takže nemůžeme vyjádřit jeho vlastnosti dostatečně přesně obecnými vzorci, ať theoretickými nebo empirickými. Obrátím se tedy k výsledkům



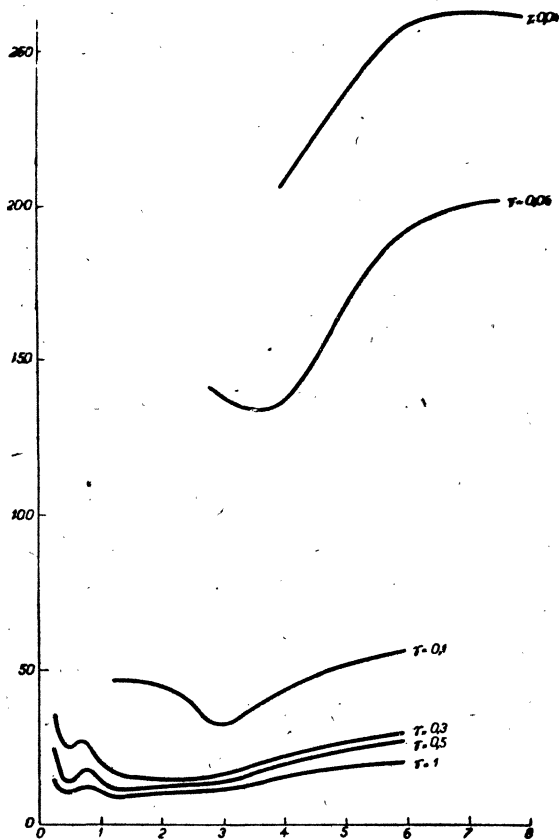
Obr. 6. Křivky $s\omega = f(\omega)$; $B = 10^{-4}$ stilb. Na vodorovné ose průměr pupily v mm, na svislé ose specifická mez rozlišení v mm × oblouková minuta.

měření meze rozlišení oka v závislosti na otvoru pupily, jasů a kontrastu předmětu, která propátrala přibližně celou oblast vidění.

Jas B je vyjádřen ve stilbech (svíčka/cm²), kontrast je dán vzorcem

$$\gamma = \frac{\Delta B}{B} = \frac{B - B'}{B},$$

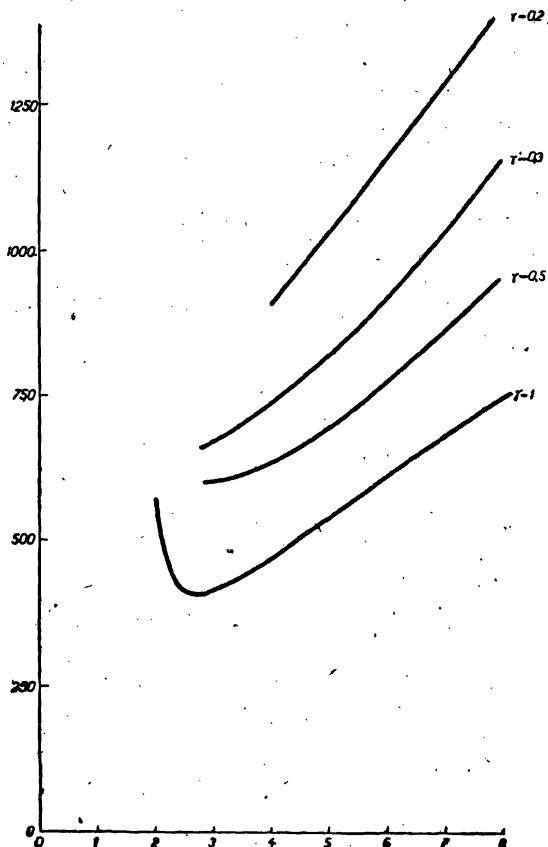
průměr pupily ω je v milimetrech, mez rozlišení v obloukových minutách.



Obr. 7. Křivky $s\omega = f(\omega)$; $B = 10^{-5}$ stilb. Na vodorovné ose průměr pupily v mm, na svislé ose specifická mez rozlišení v mm × oblouková minuta.

Obrazy 1, 2, 3, 4 představují křivky $s = f(\omega)$ pro čtyři charakteristické jasy a různé kontrasty. U přístrojů daného zvětšení, v případech silných denních jasů a značných kontrastů, které poskytují křivky s vodorovnými úseky, optimální průměr okulárového kroužku bude odpovídat okraji úseku ve směru menších hodnot ω ; jsou-li kontrasty slabé,

- křivka má v obecném případě minimum, určující hodnotu ω . V případě pozorovacího přístroje je nejdůležitější vnímání slabých kontrastů a to určí průměr okulárového kroužku (viz obr. 1). Pro jas $0,5 \cdot 10^{-8}$ stilb, čtyřikrát slabší než jas noční oblohy, ukazují křivky na obr. 4 nejlepší



Obr. 8. Křivky $s\omega = f(\omega)$; $B = 0,4 \cdot 10^{-8}$ stilb. Na vodorovné ose průměr pupily v mm, na svislé ose specifická mez rozlišení v mm \times oblouková minuta.

vnímání, je-li průměr okulárového kroužku roven největšímu průměru pupily.

Obrazy 5, 6, 7, 8 představují křivky $s\omega = f(\omega)$ pro stejné jasy jako v předcházejícím případě. Tyto křivky jsou při denním vidění charakterisovány velmi zřetelným minimem, odpovídajícím pro všechny kontrasty stejnému otvoru pupily. Při nočním vidění mají podobný tvar, ale vnímání přestává pro tím větší otvory pupily, čím slabší je kontrast, takže minimum se ztrácí. Uvažujeme-li přístroj daného otvoru, existuje

pro daný jas optimální průměr okulárového kroužku, odpovídající minimu funkce ω , pro který je vnímání nejlepší a který určuje, jaké zvětšení je třeba dát přístroji. Na příklad pro denní jasy je mez rozlišení zřejmě konstantní pro otvory pupily mezi 0,6 a 0,8 mm, takže pro daleko-

hled se zvětšením $G = \frac{\Omega}{\omega}$ platí

$$\frac{\Omega}{0,8} < G < \frac{\Omega}{0,6}$$

nebo

$$1,25\Omega < G < 1,70\Omega.$$

Zvětšení, umožňující nejmenší mez rozlišení, je mezi násobky 1,25 a 1,70 otvoru objektivu, vyjádřeného v mm. Vlastnosti oka nám dovo-lují odvodit empirické pravidlo, používané odedávna astronomy. Stejně je možno položit optimální zvětšení dokonalého mikroskopu mezi 600 a 800násobek numerické apertury. Podobně se řeší problémy, týkající se přístrojů pro noc.

Následující tabulka udává některé výsledky, z nichž jsou zřejmě řady veličin:

Přístroj denní. Přístroj, poskytující mez rozlišení $5''$:

$$\begin{aligned} \gamma = 1, \quad \Omega = 17 \text{ mm}, \quad G = 21, \\ \gamma = 0,02, \quad \Omega = 92 \text{ mm}, \quad G = 112. \end{aligned}$$

Přístroj noční. Kontrast $\gamma = 1$. $S = 1'$ (jako oko při denním vi-dění):

B	ω (mm)	Ω (mm)	zvětšení
$0,5 \times 10^{-8}$ st (noční nebo velmi tmavé)	3	258	86
$1,3 \times 10^{-10}$ (okolí prahu)	8	okolo 2000	okolo 250.

Je patrné, že k pozorování v noci je třeba velmi velkých přístrojů.

Má-li se používat některého přístroje současně při vidění denním i nočním pro jakékoli jasy, sestavíme jeho charakteristiky pro slabé jasy; abychom ho mohli výhodně použít ze všech jasů, musíme jej opatřit něko-lika zvětšeními: