

Távcsőoptikai alapokról csillagászati szakkörösöknek

- gyakorlatias megközelítés csillagászati szakkörösök számára, belső használatra -

2025-ben a pécsi csillagászati szakkörben előadás sorozatot tartottam a távcsövek optikai alapjairól. Arra törekedtem, hogy az elmúlt évtizedek tapasztalatai alapján olyan anyagot állítsak össze, ami átfogó, de mégis mélyebb ismeretet ad, mint az Amatőrcsillagászok kézikönyve. Az elhangzott előadások anyagát aztán kiegészítettem, részletesebb magyarázatokkal, számítási példákkal láttam el és összeraktam egy PPT-be az egészet, majd átkonvertáltam PDF-be. (A PDF formába konvertált verzióban az animált ábrák sajnos nem működnek.)

Most zárt körben, a pécs-baranyai amatőrcsillagászok körében közreadom ezt az anyagot, hiszen az előadásokat többnyire Ti is hallottátok. Azonban a szó elszáll, ezért a meglehetősen sűrű ismeretanyagról nem árt egy írott emlékeztető. Talán hasznos lehet ez a tananyag, amikor távcsöveink működését próbáljuk megérteni mélyebben és megtervezni bizonyos objektumok megfigyelését.

Természetesen ez egy kompiláció, azaz különböző szakirodalmi forrásokból származó anyagok összerendezése, gyűjteménye, azaz alapvetően nem saját kutatási eredményeket mutatok be (bár tettem bele saját képeket, szövegeket és számítási példákat is). A lényegesebb felhasznált irodalmak és honlapok jegyzéke az egyes témakörök végén olvashatók, melyek tanulmányozásával mélyebb ismeretekhez is juthatunk egy-egy témakörben. Különösen ajánlom Vladimir Sacek (<https://www.telescope-optics.net/>) és Bruce MacEvoy (<https://www.handprint.com/ASTRO/>) honlapjait.

Fontos kérés:

Kérlek, ezt az oktatási anyagot ne rakjad fel nyilvános honlapra, vagy a közösségi hálóra! Egyrészt mert még nem tekintem teljesen véglegesnek, másrészt pedig rengeteg különböző forrásból összegyűjtött ábrát és szövegrész tartalmaz, ami szerzői jogi problémákat vet fel. Ha egyszer lesz rá időm, akkor ezeket a problémákat majd megoldom, de addig is...

...jó nézegetést, olvasást és felhasználást kívánok: Péter

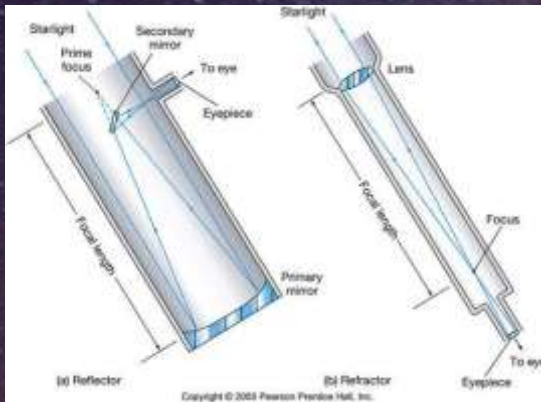
Tartalom:

I. Az amatőr csillagászati távcsövek optikai alapfogalmai	4
I.1. Optikai gyorstalpaló	5
I.2. A legelterjedtebb amatőr csillagászati távcsőtípusok	9
I.3. Binokulár, monokulár, spektív	15
I.4. A távcsőben látott kép néhány alapvető jellemzője	20
I.5. Az optikai elemek leképezési hibái	29
Kis kitérő: Kóma mentes terület mérete a fókusz síkban	31
I.6. Antireflexió bevonatok a lencsék felszínén	42
I.7. Néhány gondolat a tükrök felületéről	44
I.8. Lyukkamera	47
II. Kisebb, de lényeges optikai elemek: okulár, fókusznyújtó és reduktor, zenittükör, szűrő	49
II. 1. Szemlencse, okulár	50
II.2. Néhány okulártípus	51
II.3. Az okulárok jellemzői	55
Kis kitérő: Rich Field Telescope (RFT), azaz (csillagokban) gazdag látómezejű távcső	60
II.5. Az okulárok optikai hibái	61
Kis kitérő: Az okulár (a távcső) fókuszálásának kérdése („mélysége”)	64
II.7. Barlow(Smyth)-lencse	65
II.8. Zenitprizma, zenittükör	67
II.9. Szűrők	68
III. A távcsövek képének „részletessége” és „élessége”, azaz a felbontás és kontraszt kérdése	72
III.1. Diffrakció (fényelhajlás) és a pontszórási függvény	74
III.2. A távcső központi kitakarásának hatásai a csillagok leképezésére	81
III.3. A távcső elméleti és gyakorlati felbontása	84
III.4. A távcsőben látható kép kontrasztja és a kontrasztátviteli függvény	91
III.5. Fényes kiterjedt objektumok (pl. Hold, bolygók) felszíni részletei (élszórás függvény)	97
III.6. Kiterjedt halvány (mély-ég) objektumok részleteinek megjelenési határa a kontrasztátviteli függvényen, különböző minőségű távcsövekben	103

IV. A távcsövek optikai minőségének ellenőrzése és jellemzése	106
IV.1. A felületi hiba (aberráció) fő típusai és okai	110
IV.2. A távcsövek optikai minőségének jellemzésére leggyakrabban használt mutatók	116
IV.2.1. P-V, csúcs-völgy (peak-to-valley, PV, PtV) érték	116
IV.2.2. Az RMS (Root Mean Square, négyzetes középhiba) érték	117
IV.2.3. A Strehl-érték	118
IV.3. Profi mérési módszer: optikai interferométer	120
IV.4. Milyen módszerekkel tudjuk otthon, házilag megállapítani, hogy milyen minőségű a távcsövünk optikája?	123
IV.4.1. A Foucault fénypróba	124
IV.4.2. Rácspróba	130
IV.4.3. Csillagteszt – kép fókuszon belül, fókuszon kívül	135
 V. A tükrös távcsövek optikai elemeinek beállítása, zavaró reflexiók csökkentése, vignettáció	 141
V.1. A jusztírozás és kollimálás fogalma	142
V.2. A kollimáció hibái	144
Kis kitérő: A fényerős Newton-távcsövek segédtükrének eltolása	146
V.3. A kollimálás, jusztírozás folyamata, módszerei	149
V.3.1. Jusztírozás pusztán szemmel	149
V.3.2. Newton-távcső jusztírozása vagy kollimálása lézerrel	155
V.3.3. Newton-távcsövek jusztírozása kollimációs (Cheshire) okulár segítségével	156
V.3.4. Newton-távcső jusztírozása defókuszált csillaggal	161
V.3.5. Schmidt- és Makszutov-Cassegrain-távcsövek jusztírozása	162
V.4. A megfigyelő szemének „jusztírozása”	164
V.5. A távcsövekben jelentkező reflexiók (fényvisszaverődések) és azok csökkentése	166
V.6. A vignettáció, illetve a teljes megvilágítású terület és segédtükör mérete	171

I. Az amatőr csillagászati távcsövek optikai alapfogalmai

- gyakorlatias megközelítés csillagászati szakkörösök számára, belső használatra -
- A felhasznált és ajánlott szakirodalmak a témakör végén olvashatók! -



I.1. Optikai gyorstalpaló

**A csillagászati távcsöves megfigyelés
voltaképpen távérzékelés!**

Információközvetítő: a fény

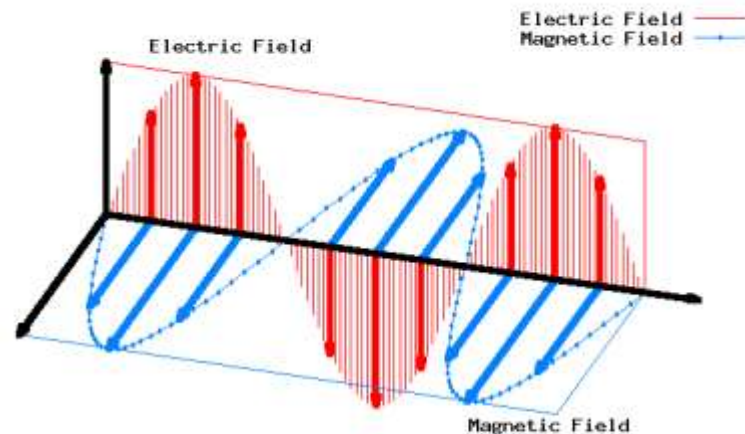
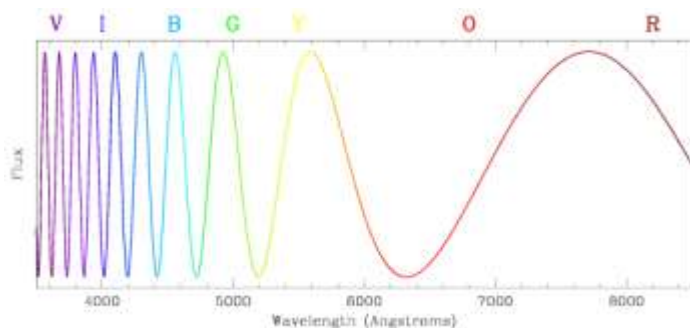
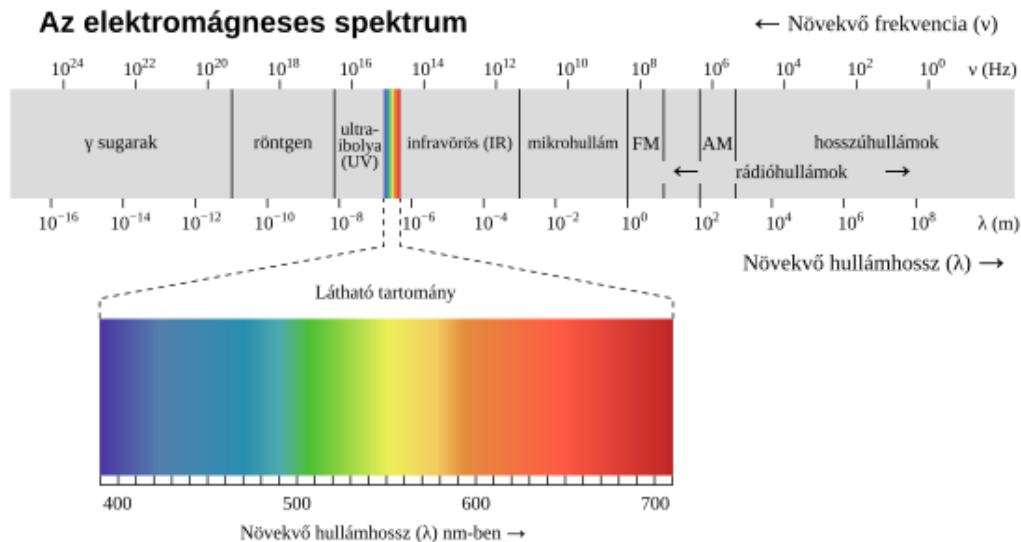
A fény emberi szemmel érzékelhető
elektromágneses sugárzás.

A hullám-részecske kettősség alapján a fény
hullám- és részecsketulajdonságokkal is
jellemezhető. **Most főleg a
hullámtermészetéről lesz szó.**

A hullámoptika körében azokat a fényjelenséget vizsgáljuk, amelyek a fény hullámtermészetével
értelmezhetők.

Ennek megfelelően **a fényt hullámnak, általában periodikus hullámnak fogjuk fel, melyben az
elektromos- és a mágneses térerősség időben és térben periodikusan változik.**

Az optika szó a görög „optikos” (látás), majd az előzőn alapuló a
latin „optica” (látástan, fénytan) szóból ered.

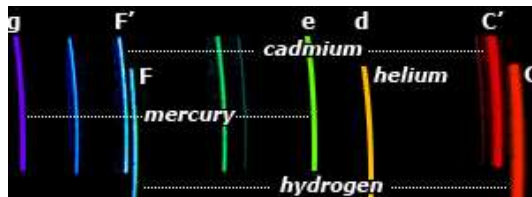


A fénysebesség értéke vákuumban: 299 792,458 km/s.
Számításokban gyakran a felkerekített 300 000 km/s-ra.

Anyag	Sebesség km/s	Anyag	Sebesség km/s
hidrogén	299 959	glicerín	204 152
oxigén	299 918	koronaüveg	197 980
levegő	299 914	kanada balzsam	194 553
nitrogén	299 912	flintüveg	186 013
víz	225 059	nehézflint	170 374
etil-alkohol	220 312	gyémánt	124 105

A fény terjedési sebessége különböző anyagokban

Az üveg jele	n_F'	n_e	$n_{C'}$
BK7	1.52283	1.51872	1.51472
K5	1.52910	1.52458	1.52024
ZK N 7	1.51470	1.51045	1.50633
BaK 4	1.57648	1.57125	1.56625
SK 15	1.63108	1.62555	1.62025
SK 16	1.62814	1.62286	1.61777
F 2	1.63310	1.62408	1.61582
SF 2	1.66238	1.65222	1.64297
SF 6	1.82970	1.81265	1.79750
SF 10	1.74805	1.73430	1.72200



A törésmutató (lencsék esetén fontos)

A fény vákuumban és minden „átlátszó” anyagban terjed. A fénysebesség vákuumbanéhoz képesti csökkenését egy viszonyzámmal, a **törésmutatóval** fejezzük ki.

$$n = \frac{c}{v}$$

n = törésmutató

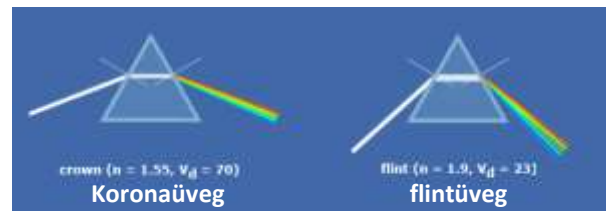
c = a fény terjedési sebessége vákuumban

v = fény lassabb terjedése anyagi közegekben

Tehát a törésmutató ugyanakkora, mint a két közegben mérhető terjedési sebességek hányadosa.

- A levegő törésmutatója 20 °C-on és 1013 mbar nyomáson $n = 1,0003$, így a továbbiakban $n = 1$ -nek vesszük.
- A víz törésmutatója: $n = 1,33$
- A leggyakoribb, tradicionális optikai anyag az üveg, amelynek átlagos törésmutatója: $n = 1,5$, míg a különféle üvegek törésmutatója: $1,45 < n < 1,95$ között változik.

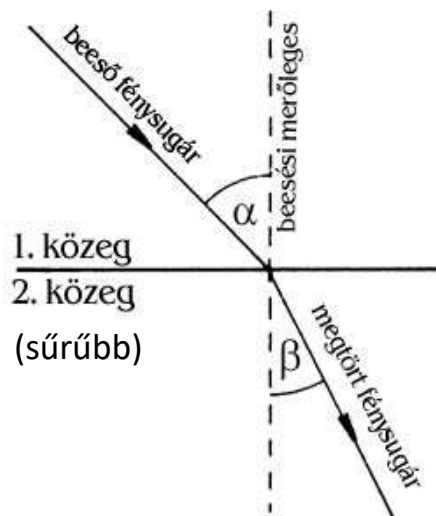
A törésmutató is színfüggő, vagyis egy adott anyagnak nem egyetlen törésmutatója van, hanem minden színre más és más.



Törésmutató jellemzéséhez használt színek:

- hidrogén emissziós vonalai: **C** = 656 nm-nél ($H\alpha$) és **F** = 486 nm ($H\beta$), továbbá **d** sárga esetén,
- kadmium emissziós vonalai **C'** = 644 nm-nél és **F'** = 480 nm **e** zöldre
- higany emissziós vonala **g** = 436 nm-nél

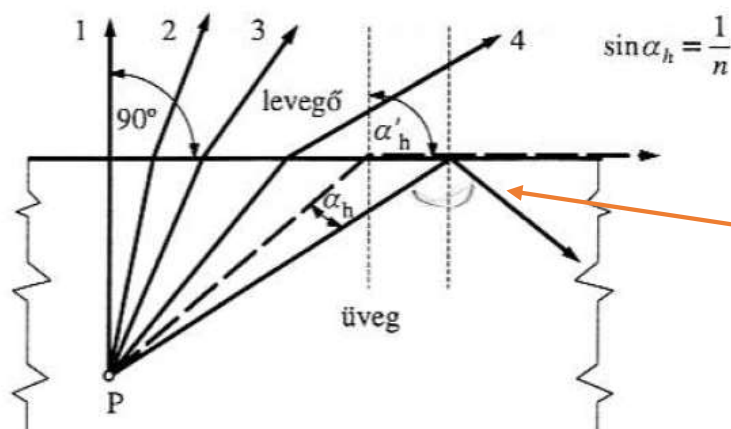
A fénytörés (refrakció)



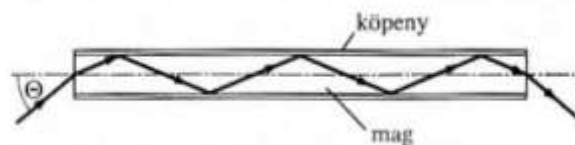
Ha a fény optikailag ritkább anyagból sűrűbb anyagba lép, akkor a **beesési merőlegeshez törik** ($\beta < \alpha$).

Ha a fény optikailag sűrűbb anyagból ritkább anyagba lép, akkor a **beesési merőlegestől törik** ($\beta > \alpha$).

Ugyanolyan körülmények között az eltérő színű (=hullámhosszúságú) fénysugarak kissé különböző szögben törnek meg (**diszperzió**).



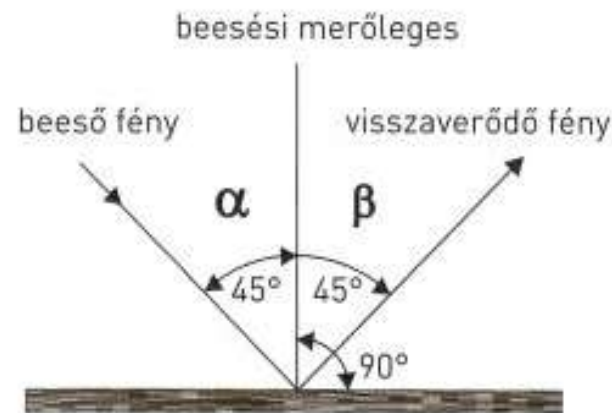
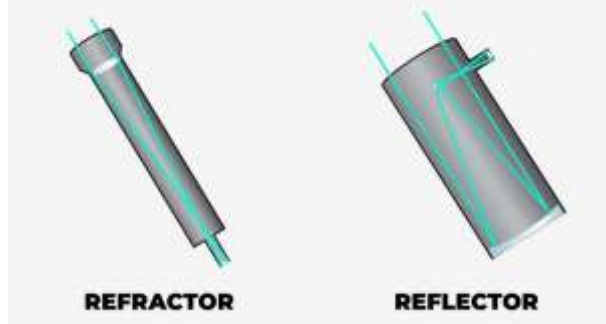
Sűrűbb közegből ritkább közegbe haladó fénysugár felvehet egy olyan beesési szöget, amelynél törési szöggént 90° adódik. Ekkor a fénysugár nem lép ki a sűrűbb közegből, hanem **totálreflexiót** szenved.



Az optikai szál működési elve

Megjegyzés: A gyakorlatban egyik sem zajlik le tökéletesen. Egymással párhuzamosan is létrejöhet a két jelenség (Ld. később szűrők és antireflexiós bevonat, 42. oldaltól).

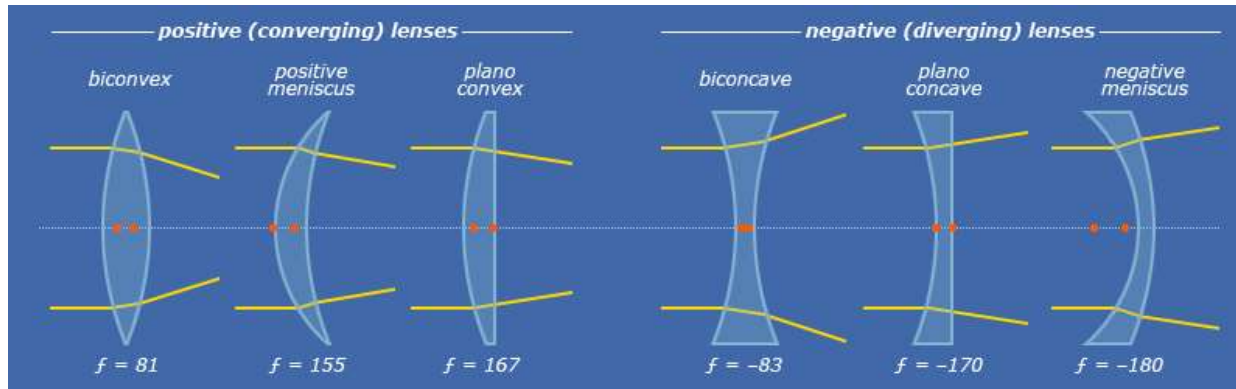
Fényvisszaverődés (reflexió)



A visszaverődési szög egyenlő a beesési szöggel.

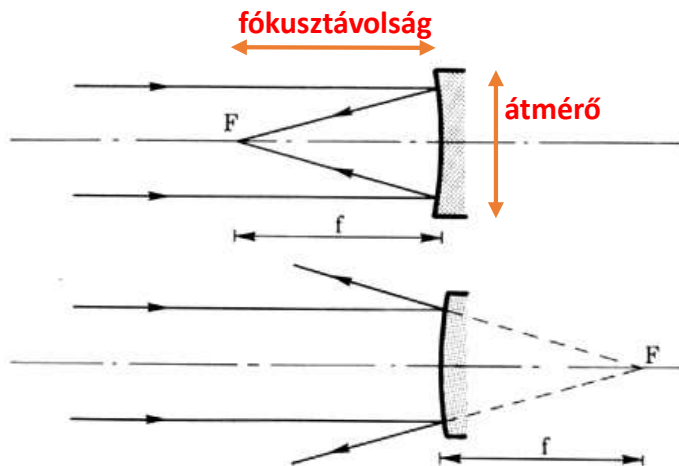
A lencsék és tükrök alaptípusai

A lencsék készítéséhez felhasználható gömb- és síkfelületek lehetséges kombinációi hat általános típusú pozitív vagy negatív lencse csoportba sorolható.



A bikonvex, pozitív meniszkusz és síkkonvex minták olyan **pozitív lencsék**, amelyek párhuzamos fénysugarakat egyetlen fókuszba koncentrálnak (amely a lencse mögött található), tehát **csökkentik az optikai rendszer gyújtótávolságát. Valódi, de fordított állású képet adnak.**

A bikonkáv, sík homorú és negatív meniszkusz minták **negatív lencsék**, amelyek párhuzamos fénysugarak defókuszálására szolgálnak a negatív fókuszponttól kiindulva, tehát a **gyújtótávolság meghosszabbítására** szolgálnak. **Virtuális, egyenesállású képet adnak.**



Balra:

Konkáv tükör (homorú, gyűjtő – valódi, fordított állású kép)

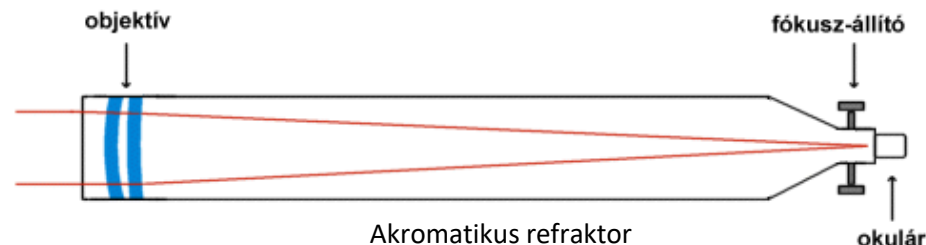
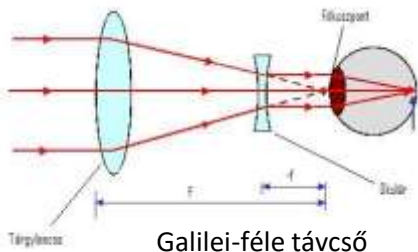
Konvex tükör (domború, szóró – virtuális, egyenesállású kép)

Az optikai elemek alapvető fizikai tulajdonságai az **átmérő és fókusz távolság**, melyek meghatározzák pl. a fénygyűjtésre és felbontásra vonatkozó alaptulajdonságokat. **DE ezeket nagyon befolyásolják az optikai elemek hibái és más minőségi tulajdonságai (ld. később, 29. old., 131. old.).**

I.2. A legelterjedtebb amatőr csillagászati távcső típusok

A távcsövekben az objektív által a fókusz síkban előállított képet nagyítjuk az okulár segítségével (ld. később, 50. old.).

Lencsés távcsövek (refraktorok)



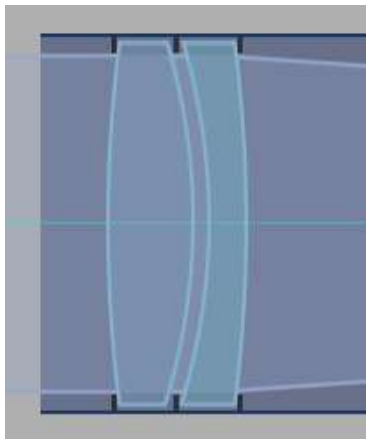
A refraktor a legrégebbi távcső típus, amely Hans Lipperhey (1608) által feltalált távcsőtervekből származik és Galileo Galilei (1609) használta először csillagászati kutatásokhoz. Az objektív eleinte egyetlen pozitív lencséből állt, majd kifejlesztették az **akromatikus és apokromatikus objektíveket** az optikai hibák csökkentésére (ld. később, 10. és 37. old.).

A refraktorok előnyei:

- megbízhatóak egyszerű felépítésüknek köszönhetően
- minimális karbantartást igényelnek
- nagyobb átmérőik kitűnőek a Hold, bolygók és kettőscsillagok megfigyelése során
- kitűnő képkontraszt érhető el a kitakarás nélküli fényútnak köszönhetően
- kis méretben földi célpontokra is előnyösek

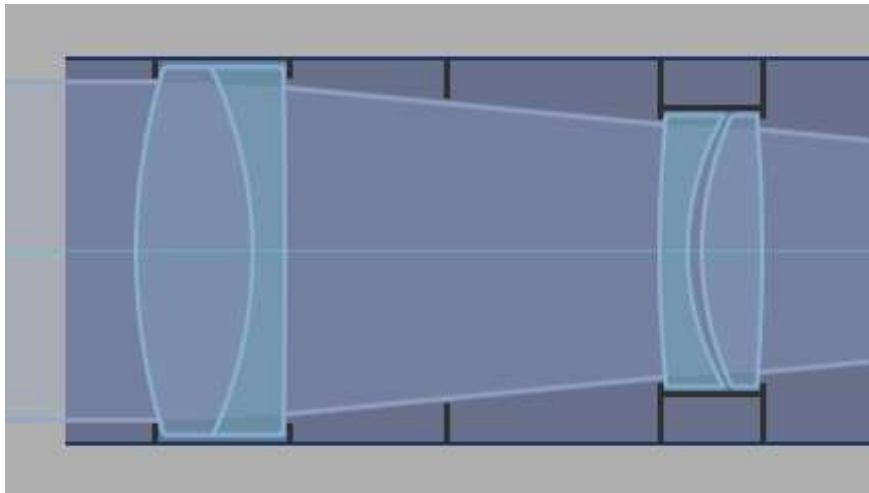
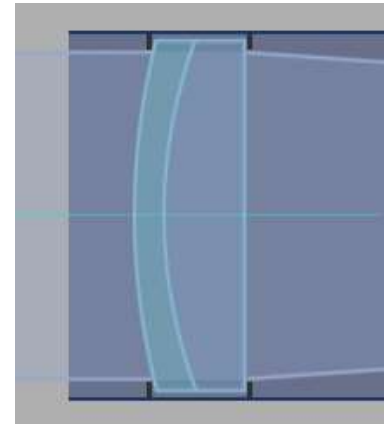
A refraktorok hátrányai:

- azonos átmérő mellett az akromatikus – de különösen az apokromatikus lencsék – jóval drágábbak a többi rendszernél
- az átmérő és a fókusz növekedésével hatványozottabban nehezebbek, hosszabbak, körülményesebben szállíthatók, mint az azonos átmérőjű Newton vagy Cassegrain-távcső
- a költségek és a technológia kis és közepes méretek előállítását teszi lehetővé
- a kis átmérő miatt kevésbé alkalmasak halvány mély-ég objektumok megfigyelésére
- az akromatikus lencsék színi hibával terhelték



Fraunhofer-féle akromatikus objektív. A legkorábbi akromátok viszonylag kicsi, dupla objektívlencsék voltak, amelyeket John Dollond és Jesse Ramsden 1760 körül kezdett gyártani, de mai formáját 1824-ben érte el. A Fraunhofer dublett egy pozitív (bikonvex) elülső koronalencséből és egy negatív (meniszkusz) hátsó flintüveg lencséből áll, amelyeket egy kis (2-5 mm) légrés választ el egymástól. A két lencsének négy egyenlőtlen görbületű felülete van, lehetővé téve a hosszirányú kromatikus aberráció, a gömbi aberráció és a kóma minimalizálását adott gyújtótávolság mellett. A mező görbületét és az asztigmatizmust minimálisra csökkenti a legalább $f/10$ fókuszarányra való tervezés.

Steinheil-féle akromatikus objektív (1840). A Steinheil-féle akromátban a flintüveg elem elöl, a koronaüveg elem pedig hátul helyezkedik el és jellemzően szűkebb a légrése, mint a Fraunhofernek. A lencse görbületei jellemzően erősebbek, mint a Fraunhoferben és jobb korrekciót biztosítanak. Ennek ellenére ritkán használják, mert a front flintüveg lencse a légköri nedvesség hatására foltossá vagy átlátszatlanná válhat.

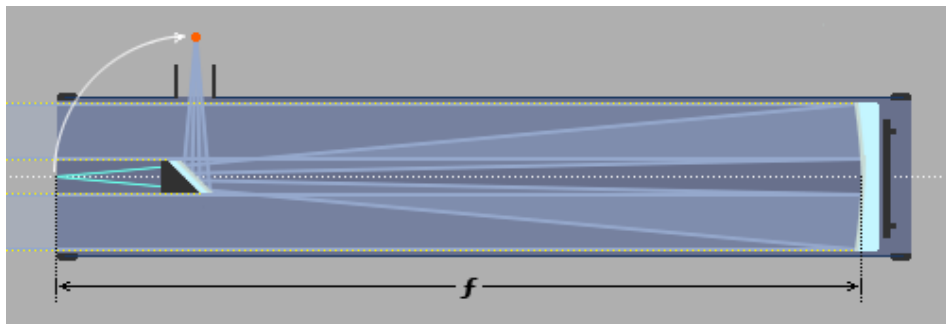


Az apokromatikus objektívek még az akromátoknál is jobban korrigáltak.

Az első apokromát objektív: A Petzval József magyar optikus által 1840-ben kifejlesztett Petzval-objektív két nagy távolságra elhelyezkedő dupla akromátból áll, az első ragasztott, a hátsó légréses. Eredetileg nagy fényerejű ($< f/4$) portréobjektívnek tervezték.

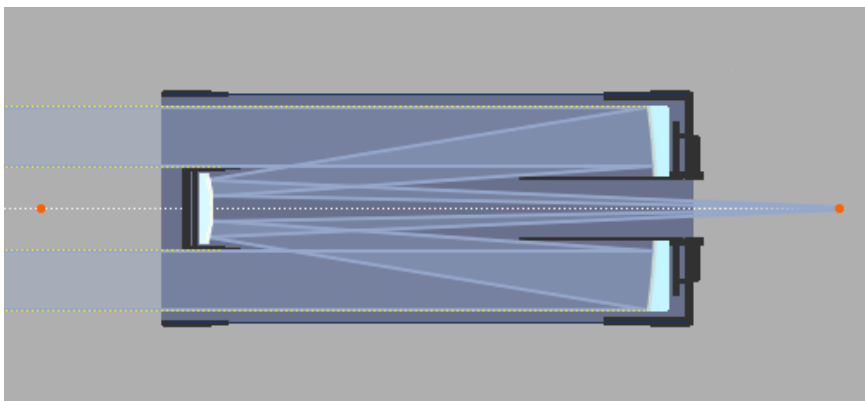
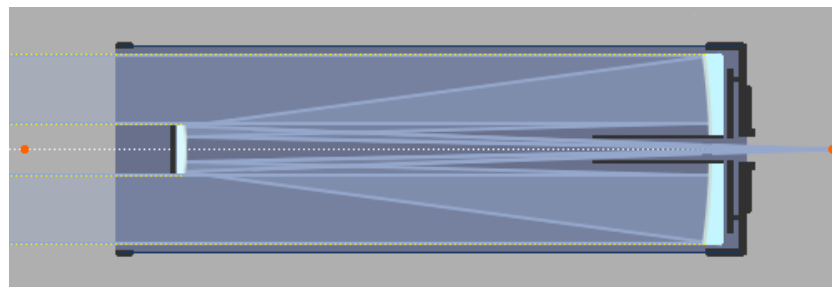
Tükrös távcsövek (reflektorok) amatőr csillagászok számára fontos típusai

A tükrös távcső szintén 17. századi koncepció, amely három különböző forrásból származik: Mersenne (1636), Newton (1668) és Cassegrain (1672) terveiből. Ezekben egy homorú főtükrő szolgál a fény összegyűjtésére és fókuszálására, továbbá egy segédtükörből, amely a konvergáló fénykúpot olyan megfigyelési helyre irányítja, ahol a keletkezett képet fel lehet nagyítani az okulárral (ld. 50. old.).



A **Newton-távcső** főtükrre által fókuszált fénynyalábát egy 45 fokos szögben megdöntött, sík felületű segédtükör a távcsőtubus falán lévő nyíláson át az okulárhoz irányítja. Fényereje legtöbbször $f/4$ és $f/8$ közötti. A látómező szélén jelentős hibával terheltek, különösen nagy fényerő esetén.

Cassegrain-távcső: Ezt az optikai elrendezést rendszert először Mersenne javasolta 1636-ban, majd Cassegrain 1680-ban. Hosszú gyújtótávolságot biztosít egy rövid optikai csőben a domború segédtükör fókusznyújtó hatása miatt. A használható látómező kicsi és a tengelyen kívüli aberrációk korlátozzák azt. Kis fényereje különösen alkalmassá teszi Hold-, bolygó- és kettőscsillag-megfigyelésre. Ehhez hasonló a **Gregory-távcső** is, aminek homorú segédtükre van.



Ritchey-Chretien-távcső. Ezt a rendszert Henri Chretien javasolta, követve Karl Schwarzschild 1905-ben kidolgozott koncepcióit. Chretien hiperboloid felületeket használó aplanatikus optikai elemeit a modern teleszkópokban általában úgy módosítják, hogy a segédtükör kisebb, a felületek alakja pedig közelít a paraboloidhoz. Az RC tökéletesen kerek csillag alakot biztosít és így a fényképezéshez optimális. Azonban a széleken jelentős asztigmatizmussal és erős fókuszfelület görbülettel rendelkezik, amely a képmező széle közelében felfújja a csillagok méretét.

A legnépszerűbb amatőr csillagászati távcső, a Newton-féle rendszer, előnyei és hátrányai:

Előnyök:

- adott átmérő mellett a legolcsóbb rendszerek, hiszen a tükrök előállításuk viszonylag egyszerű és olcsó
- 1000 mm-es fókusztávolságig viszonylag kompakt és hordozható rendszerek
- kitűnőek a halvány, nagy kiterjedésű mély-ég objektumok megfigyelésére, mivel nagy átmérő és látómező jellemzi
- a lencsés távcsövektől eltérően színezésmentes a leképezésük

Hátrányok:

- némi fény- és kontrasztvesztés figyelhető meg a központi kitakarásnak köszönhetően
- a maximális teljesítmény érdekében az optikai elemeiket időnként be kell állítani (juszírozás vagy kollimáció)
- földi célpontokra nem igazán alkalmasak, mivel fordított állású képet adnak
- korlátozott fókusztávolságuk miatt mind fotózás, mind vizuális megfigyelés során bizonyos kiegészítők nem használhatóak
- a látómező szélén jelentős hibával terheltek, különösen nagy fényerő esetén
- használatuk kényelmetlen lehet amiatt, hogy az okulárkihúzat időnként a tubus „alá”, időnként „fölé” kerül

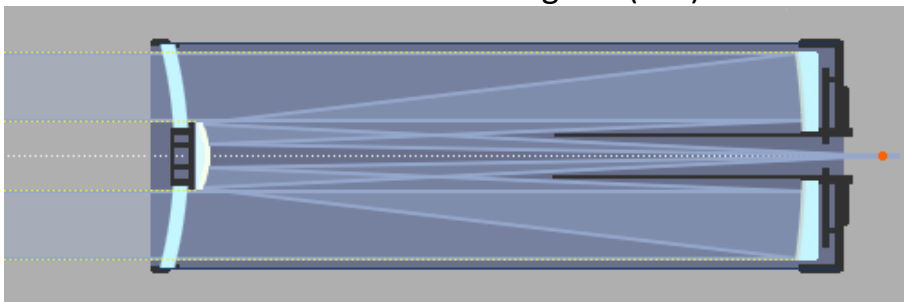


A napjainkban népszerű, nagyobb méretben is könnyebben szállítható **Dobson távcsövek** legtöbbször Newton rendszerűek, csak speciális (azimutális) állványuk van. **John Lowry Dobson** (1915–2014) találta ki ezt az olcsón megvalósítható mozgató mechanizmust 1965-ben, hogy minél olcsóbban tudjon nagy, mélyező távcsövet készíteni.

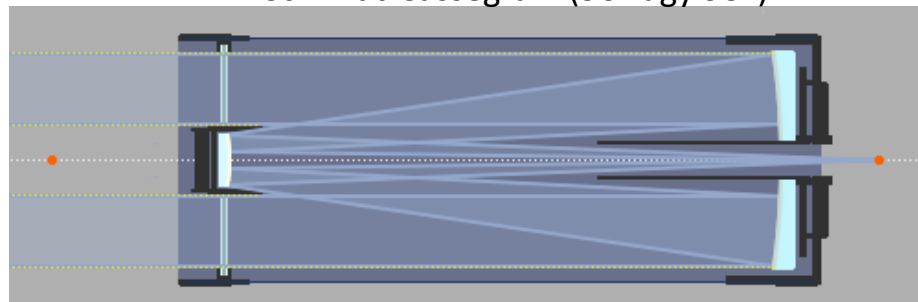
Katadioptrikus rendszerek - refraktor és reflektor hibridek

A katadioptrikus rendszereket 1930 körül kezdték kialakítani széles látószögű asztrofotózáshoz. Newton vagy Cassegrain reflektorba helyeztek el **egy vagy több korrekciós lencsét az elsődleges (primer) fókusz előtt**. A **korrektorok célja minden esetben a tengelyen kívüli képminőség javítása** volt, különös tekintettel a kómára és a fókuszsíkgörbületre, ami lehetővé tette a fényerő és a látómező szélességének növelését. A főtükör $f/2$ körüli fényerejű, aminek a képét a pozitív segéd-tükör nyújtja meg $f/10-15$ körülire.

Makszutov-Cassegrain (MC)



Schmidt-Cassegrain (SC vagy SCT)



SC és MC távcsövek előnyei:

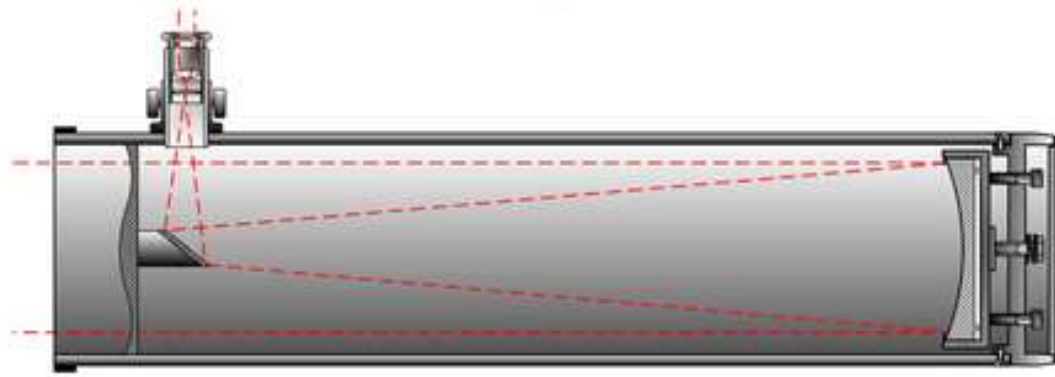
- legjobb általános célú távcsövek, igen kedvezőek ár / teljesítmény / minőség / hordozhatóság szempontjából
- kitűnően használhatóak mind mély-ég, mind bolygó felvételek elkészítésére
- rengeteg kiegészítő kapható hozzájuk
- kitűnően használhatóak földi célpontokra is
- legtöbbjük kompakt méretének köszönhetően könnyen szállítható
- használatuk kényelmes a rövid tubushossznak és a szinte mindig kézreálló okulárkihuzatnak köszönhetően
- a legjobb „közelfókusszal” rendelkeznek
- a rövid tubushossz miatt egy adott mechanikán stabilabban használható, mint a többi távcsőtípus
- a zárt tubus miatt a belseje tovább marad tiszta

SC és MC távcsövek hátrányai:

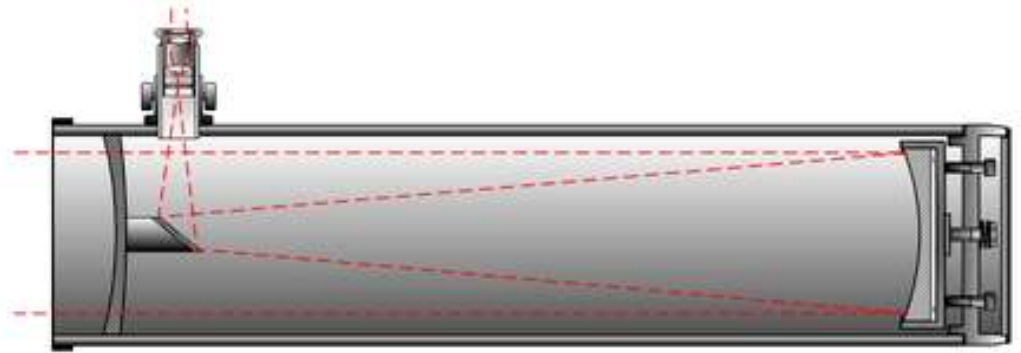
- a Newton-távcsöveknél drágábbak
- némi fény- és kontrasztveszteség figyelhető meg a központi kitakarásnak köszönhetően
- lassabban veszik át a környezet hőmérsékletét
- a viszonylag kis látómezejük miatt a legnagyobb kiterjedésű ködök, nyílthalmazok nem férnek be egyszerre
- a korrekciós lencse hajlamos a párásodásra
- a maximális teljesítmény érdekében az optikai elemeiket időnként be kell állítani (jusztirozás vagy kollimáció)
- egyes esetekben ún. image-shift tapasztalható (fókuszáláskori irányváltáskor az objektum 1-2'-et elmozdul)

Schmidt- és Makszutow-Newton rendszerek

A SN és MN rendszerek alapvetően Newton-távcsövek. Schmidt-Newton (SN) távcsövekben a tubus elején egy csekély görbületű, negyedrendű felületű korrekciós lencse található. A Makszutow-Newton (MN) rendszerek esetében egy erősen görbült felületű, domború-homorú korrekciós lencsét (meniszkusz) találunk. Ezek feladata a főtükrök optikai hibáinak minimális szintre csökkentése és a segédtükör megtartása. Ezek a távcsövek a hagyományos Newton-távcsöveknél jobb minőségű képet adnak.



Schmidt-Newton-távcső felépítése



Makszutow-Newton-távcső felépítése

1.3. Binokulár, monokulár, spektív (spotting scope)



A **binokulár** két egymás mellé szerelt, párhuzamosított, (döntően) „összehajtogatott” fényúttal bíró lencsés távcső, amely kompakt (általában kézben tartható, kisebb nagyítású) és lehetővé teszi a néző számára, hogy mindkét szemét használja távoli tárgyak megfigyelésekor. A binokuláris látás olyan látás, amely két szem együttes használatával történik (a latin bini 'dupla' és oculus 'szem' szavakból). Ez segíti a gyengén látható tárgyak észlelését és térlátást biztosít.



A **monokulár** kézben tartható egyszemes, „összehajtogatott” fényúttal bíró lencsés távcső, amely kompakt (általában kézben tartható, kisebb nagyítású) lencsés távcső, lényegében a binokulár fele.

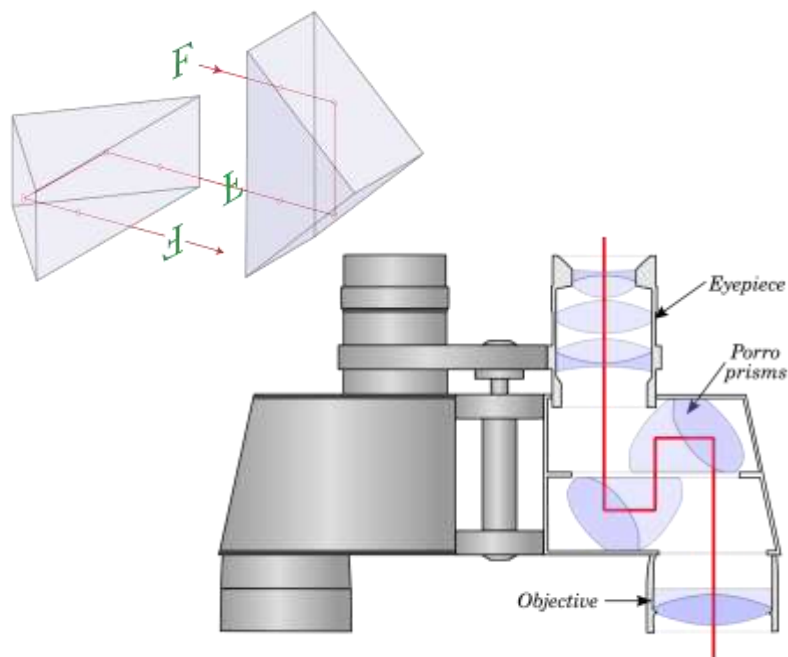


A **spektív** egy monokulárnál jellemzően nagyobb méretű és nagyítású (20×-60×) „összehajtogatott” fényúttal bíró lencsés vagy tükrös távcső, amelyet távoli objektumok részletes megfigyelésére optimalizáltak. Állványra szerelve használják különféle szabadtéri tevékenységekhez (pl. madármegfigyeléshez, céllövészethez, de akár csillagászatra is).

A binokulárok

A távcső feltalálása után, a 17-19. században, már készítettek „ikertávcsöveket”, azaz párhuzamosan szerelt Galilei vagy fordítólencsével kiegészített Kepler távcsöveket. Ezek általában hosszúak és nehezek voltak. Az 1890-es években kezdődött a prizmarendszerek beszerelése a kézi távcsövekbe, mely lehetővé tette a fényt „összehajogtatásával” a méret csökkentését, valamint a látott kép normál irányba fordítását.

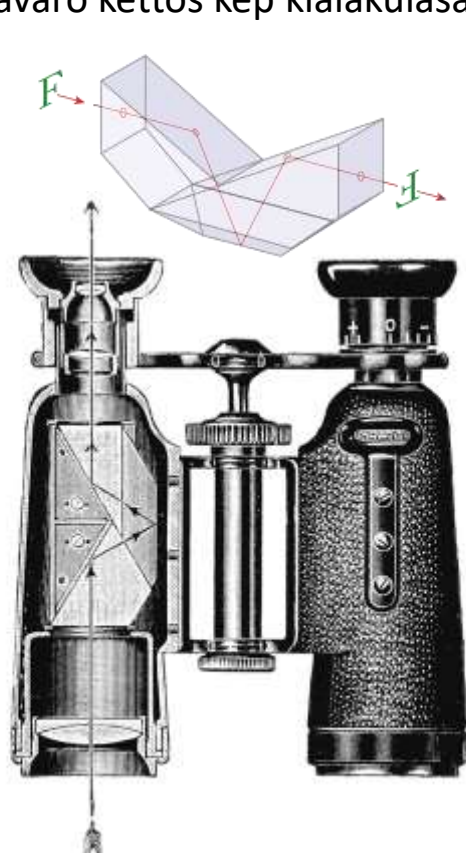
A Porro-prizmás binokulárok Ignazio Porro nevét viselik, aki 1854-ben szabadalmaztatta ezt a képfelállító rendszert. Ernst Abbe későbbi fejlesztései, valamint Otto Schott üvegyártó tudóssal, aki 1888-ban sikerült jobb minőségű koronás üveget előállítania, és Carl Zeiss műszergyártóval való együttműködése eredményeként 1894-ben a Carl Zeiss cég forgalomba hozta a továbbfejlesztett, „modern” Porro-prizmás távcsövet.



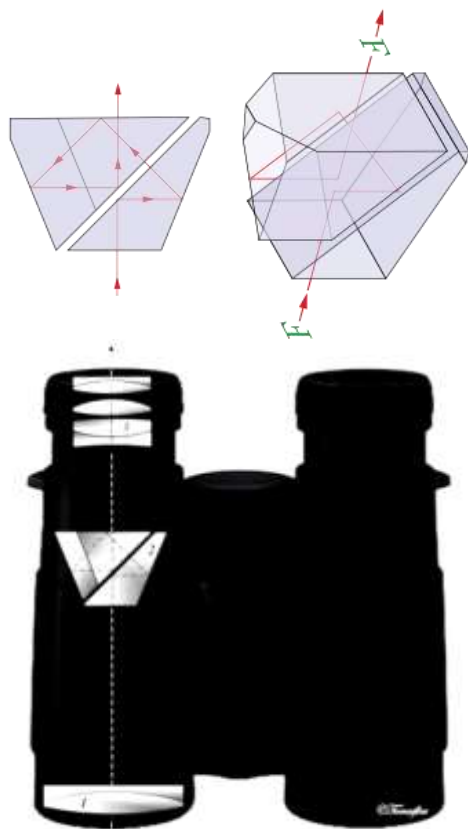
Az ilyen típusú távcsövek Z alakú konfigurációjú Porro-prizmákat használnak a kép felállításához. Ez széles távcsöveket eredményez, amelyek **objektív lencsái jól el vannak választva és eltolva az okulároktól, ami jobb mélységérzetet biztosít. A kialakítás 60mm-nél nagyobb átmérőjű objektív lencsék beépítését is lehetővé teszi**, ami más rendszerekben az adott emberi szemtávolság miatt nem lehetséges. A Porro-prizmák gyárilag általában 10 ívperc (1/6 fok) tűréshatárral rendelkeznek az optikai elemek beállításakor (kollimáció).

Az első **tetőélprizmás** távcsövek már az 1870-es években megjelenhettek, de a legtöbb ma is használt tetőélprizmás távcső vagy a Schmidt–Pechan prizmat (1899-től), vagy az Abbe–Koenig prizmat (1905-től) használja a képfordításhoz és az optikai út összehajtásához.

A tetőélprizmás kialakítás eredményeként az objektívlencsék majdnem vagy teljesen egy vonalban vannak a szemlencsékkel, így **ezek a távcsövek keskenyebbek, kompaktabbak, könnyebbek, mint a Porro-prizmásak, de a kialakítás miatt korlátozott az objektívek maximális átmérője**. Ma már a tetőprizmat használó távcsövek prizmai ún. fázisbevonatokkal rendelkeznek, amelyek kompenzálják a kezeletlen tetőprizmákban fellépő interferenciahatások okozta felbontás- és kontrasztvesztést. Ezen távcsöveknél az optikailag releváns prizmaszögeknek 2 ívmásodpercen belül helyesnek kell lenniük, hogy elkerüljük a zavaró kettős kép kialakulását.



Abbe–Koenig tetőélprizma



Schmidt–Pechan tetőélprizma

A prizmak anyaga:

A BAK4 (bárium-koronaüveg) és a BK7 (boroszilikát üveg) közötti fő különbség a fényáteresztő képességben és a képminőségben rejlik. **A BAK4 a jobb.**

A BAK4 magasabb törésmutatóval rendelkezik, ami lehetővé teszi a teljes belső visszaverődést szélesebb szögtartományban, így **kevesebb fény vész el a prizma szélein**. Kilépő pupilla formája: Ha eltartja a távcsövet a szemétől a fény felé, a **BAK4 prizmánál a kilépő pupilla tökéletesen kerek**, míg a BK7 esetében gyakran szögletes vagy gyémánt alakú árnyékolás látható a széleken.

Képminőség: A BAK4 világosabb, élesebb képet ad, különösen a látómező szélein és gyenge fényviszonyok között. A BK7-nél a kép szélei sötétebbek lehetnek (vignettálás), bár nappali fényben ez kevésbé észrevehető.

A binokulárok számszerű jellemzői



A binokulár házán legtöbbször fel van tüntetve a **nagyítás és az objektív átmérője**. Pl. 10×50-es felirat 10-szeres nagyítást és 50mm-es objektívet jelez. A 10× alatti nagyítású távcsövek általában zavaró kézmozgásoktól mentesen tarthatók kézben hosszabb ideig. A 20× nagyítás felettiekhez állvány javasolt. Minél nagyobb az objektív átmérője, annál több fényt gyűjt a távcső (ez főleg szürkületben és éjszaka jelent előnyt).

A **binokulár látómezejének nagysága** megadható fokokban (jellemzően 4-9° között), vagy a belátott terepi terület alapján (lineáris látómező). Az utóbbi általában azt adja meg, hogy 1000 méter távolságban hány méter szélességű területet látunk át.



A kettő közötti átváltás: 1 fokos látószög 1000 méteres távolságon kb. 17,5 méter szélességnek felel meg. Ha a távcsőre 122m/1000m van írva, akkor a látómezeje fokokban $122/17,5 = \text{kb. } 7^\circ$. Egy 8° látómezejű binokulár lineáris látómezeje $8 * 17,5 = \text{kb. } 140\text{m}$ (1000m-ről nézve).



Lehajtható gumi szemkagyló

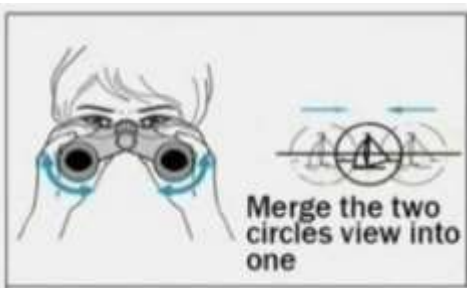


Kicsavarható szemkagyló

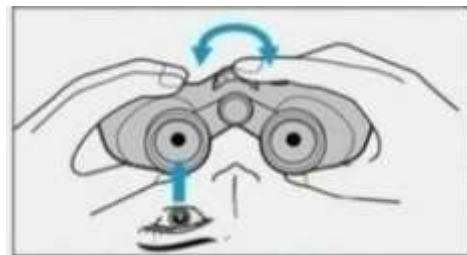
A **betekintési távolság (vagy szemtávolság)** az a távolság, amennyire a megfigyelőnek a szemét a szemlencse mögé kell helyeznie ahhoz, hogy vignettálás nélküli képet lásson. Minél nagyobb a szemlencse fókusztávolsága, annál nagyobb a lehetséges betekintési távolság. A távcsövek betekintési távolsága néhány millimétertől 25 mm-ig terjed. A betekintési távolság különösen fontos lehet a szemüveget viselők számára, akiknek legalább 16-17mm szemtávolságú binokulár ajánlott. **Akkor kell szemüveget használni, ha a szemlencse egyéb hibáit is korrigáló szemüveget visel a megfigyelő**, különben nem, mert a diptriát korrigálhatjuk a távcső élességállítása során is.

A megfelelő szemtávolságot **gumi szemkagyló** biztosíthatja.

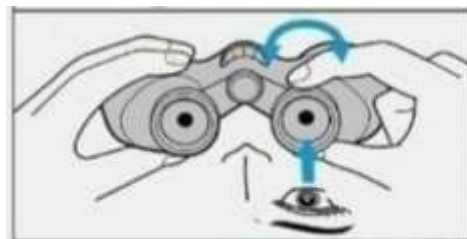
Élességállítás:



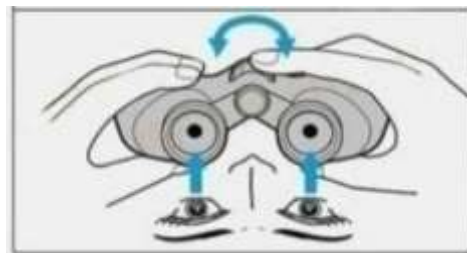
1. A szemtávolság beállítása



2. A bal okulár élességállítása a középső gomb forgatásával



2. A jobb okulár élességállítása az okulár forgatásával



5. Ettől kezdve a középső gombbal mind a kettő okulár élesíthető

A binokulárok két okulárja közötti ún. **szemtávolság** általában 50-75 mm között állítható. Egy átlagos felnőtt esetén a pupillaközepeink közötti távolság kb. 63 mm.

A **közelfókusz távolsága** a legközelebbi pont, amelyre a távcső még képes fókuszálni. Ez a távolság körülbelül 0,5 és 30 m között változik, a távcső kialakításától függően. Csillagászoknak nem fontos, de pl. madármegfigyelőknek igen.

A látott kép fénygazdagsága:

A Porro-prizmás és az Abbe–Koenig tetőélprizmás távcsövek eleve világosabb képet produkálnak, mint az azonos nagyítású, objektív méretű és optikai minőségű Schmidt–Pechan tetőélprizmás távcsövek, mivel a Schmidt–Pechan tetőélprizmás kialakítás tükröbevonatú felületeket alkalmaz, amelyek csökkentik a fényátesztést. A 21. századi technológiák azonban ezt a különbséget csökkentették.

Szűrületi érték:

Ezt a ma már **elavultnak számító mutatót** úgy számítjuk ki, hogy megszorozzuk a nagyítást az objektívlencse átmérőjével, majd vesszük az eredmény négyzetgyökét. Például a 7×50-es távcsövek szűrületi tényezője: $7 \cdot 50 = 350$, aminek négyzetgyöke = 18,71. Minél magasabb a szűrületi tényező, matematikailag annál jobb a távcső felbontása gyenge fényviszonyok melletti megfigyeléskor.

Csillagászati megfigyelések esetén inkább olyan binokulárt érdemes venni, aminek az okulár kilépő pupilla mérete nem haladja meg a sötéthez adaptálódott szemünk pupillájának méretét (4-7mm). A kilépő pupilla mérete megkapható az objektívátmérő és a nagyítás hányadosaként, pl. egy 7×50-es távcsőnél ez 7,1 mm, ami általában túl nagy, fényt veszítünk el vele.

I.4. A távcsőben látott kép néhány alapvető jellemzője

Az objektívatmérő és fókusztávolság ismeretében megadható mutatók:

A távcső alapadatai a katalógusokban: objektív átmérő (mm) / objektív fókusztávolság (mm) (pl. 150/750). A Newton-távcsövekben ez egyetlen tüköröt jellemez, de az összetett rendszerekben a teljes optikai rendszer együttes tulajdonságait.

A fényerő a távcsőobjektív átmérőjének és fókuszának a hányadosa:

Egy 150mm átmérőjű és 750mm fókuszu **(150/750-es) Newton-távcső fényereje $750/150=f5$** . Minél fényerősebb egy távcső (pl. f3-f5), annál nagyobb látómező érhető el vele, fotózásnál annál rövidebb expozíciós időt kell használnunk, ugyanakkor annál jelentősebbek lesznek a (fizikai törvényekből eredő) leképzési hibái az optikai tengelytől távolodva.

Az objektív látómeze (Field of View, FOV) fényképezés esetén:

FOV (fokban) = $((57,3 / FL) * FS)$, ahol FL a fókusztávolság (mm-ben), FS a szenzorméret (mm-ben).

Példa: Mekkora a látómezeje egy 750 mm fókuszu távcsőre szerelt Canon 550D-nek (szenzora 22,3 x 14,9 mm)?

$FOV = ((57,3 / 750) * 22,3) = 1,7$ fok (a nagyobb szenzoroldal mentén)

Objektum primer fókuszbán keletkezett képméretének kiszámítása mm-ben:

$S = (OS * FL) / 206265$, ahol S az objektum képmérete a fókuszbán (mm), OS az objektum szögmérete az égen (ívmásodperc), FL az objektív fókusztávolsága (mm-ben).

Példa: Mekkora képet kapunk a Holdról (0,5 fok = 1800 ívmásodperc) egy 750 mm fókusztávolságú távcső fókuszában?

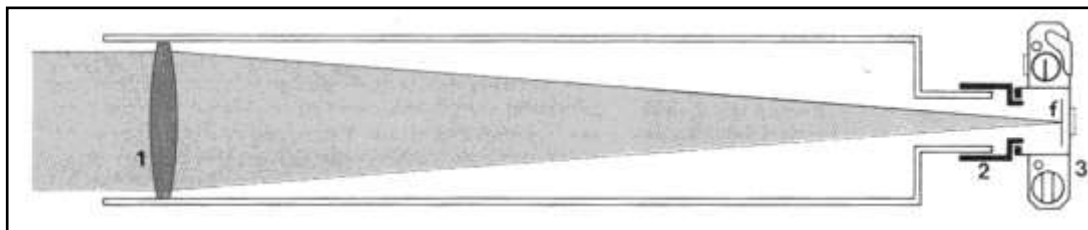
$S = (1800 * 750) / 206265 = 6,54$ mm

A távcső primer fókuszába szerelt kamera egy pixelének mérete ívmásodpercben:

$IS = (PS / FL) * 206,265$, ahol IS a pixelméret ívmásodpercben, PS a pixel mérete mikronban, FL a fókusztávolság mm-ben.

Példa: Hány ívmásodpercnek felel meg egy 750 mm fókuszu távcsőre szerelt Canon 550D (4,3 mikronos chip) által készített kép egy pixele?

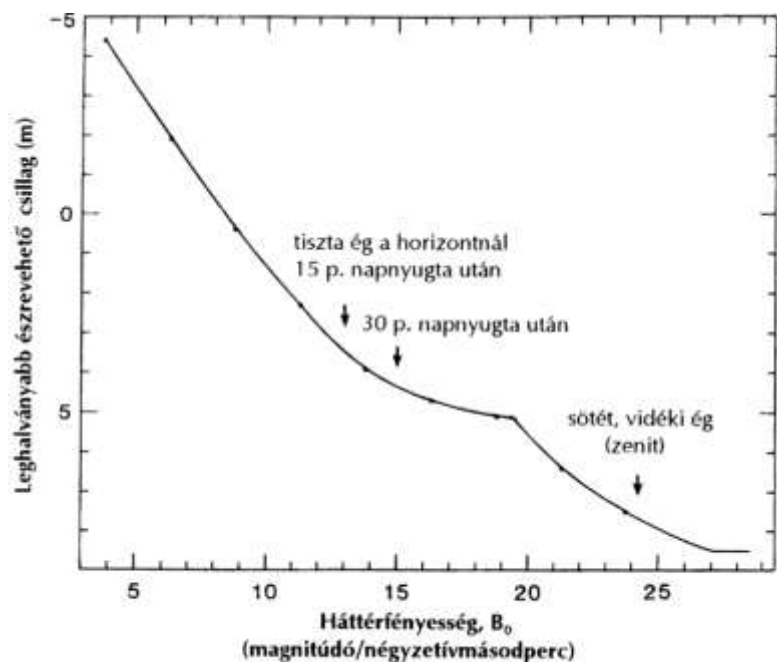
$IS = (4,3 / 750) * 206,265 = 1,18$ ívmásodperc



Milyen halvány csillagokat látok a távcsövemmel? Különböző átmérőjű távcsövek határmagnitúdója tapasztalat alapján

Átmérő(cm)	vizuális hmg	Átmérő(cm)	vizuális hmg
2,5	10,7	30,5	16,1
5	12,2	35,6	16,5
7,5	13,1	40,6	16,7
10,1	13,7	45,8	17,0
12,7	14,2	50,8	17,2
15,2	14,6	55,9	17,4
17,8	14,9	61,0	17,6
20,3	15,2	76,2	18,1
25,4	15,7	91,5	18,5

Természetesen ez függ az égi háttér sötétségétől is!



A leghalványabb megpillantható csillag fényessége az égi háttérfény függvényében

Miért látok a távcsőben halványabb csillagokat, mint szabad szemmel?

Az emberi pupilla sötétben maximum 7 mm átmérőjűre tágul. Egy 100 mm objektívátmérőjű távcső jóval nagyobb felületen gyűjti a csillagok fényét. **A fénygyűjtő képesség a felülettel ($r^2 \cdot \pi$) arányos.** A pupilla max. felülete 38 mm² a 10 cm-es távcső felülete 7854 mm². Tehát a 10 cm-es távcső 7854/38=207-szer több fényt gyűjt össze, mint az emberi szem. A fényt a távcső egyetlen pontba (a fókuszpontba) sűríti, így azokat a csillagokat is látjuk, amelyek fénye túl halványak a szemünknek.

A csillagok fényrendje, látszólagos fényessége (magnitúdó)

A fényesség (nagyságrend) rendszert Norman Pogson javasolta 1856-ban, aki észrevette, hogy az ókor óta használt, szabad szemmel látható nagyságrend-rangsorok rendszerében (amelyet Hipparkhosznak tulajdonítottak és Ptolemaiosz is átvett) az öt magnitúdónyi különbség majdnem 100-szoros fényességszámkülönbséget jelent. Ezért **a magnitúdórendszer alapértékét $100^{1/5} = 2,51189$ -nek választották** (illetve $2,512^5 = 100,023$).

A 0 magnitúdós Vega csillaghoz képest egy 6,5 magnitúdós, azaz szabad szemmel még éppen látható határmagnitúdójú csillag csak $1/2,512^{6,5} = 1/398$ -ad, azaz a Vega fényének 0,25%-át bocsátja ki felénk.

A határmagnitúdó a nagyítástól is függ!

(Továbbá az objektív átmérőjétől és minőségétől, a légköri átlátszóságtól, a megfigyelő szemétől stb.)

(Az okulárokról és a nagyítás kiszámításáról később lesz szó.)

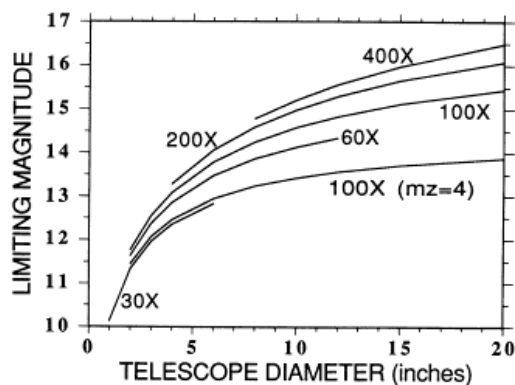
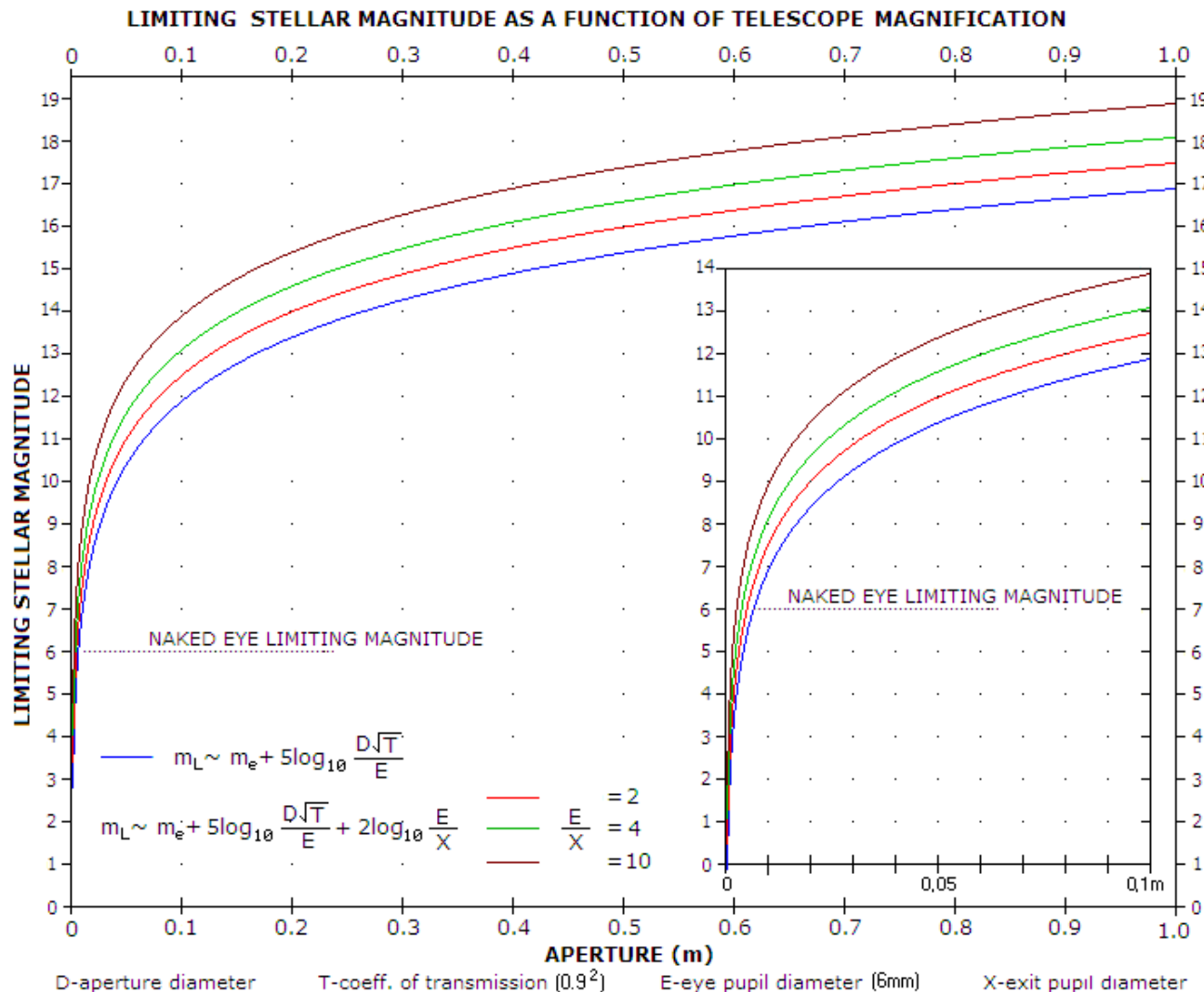


FIG. 1—Theoretical telescopic limiting magnitude. This graph plots the theoretical limiting magnitude as derived in Section 2 as a function of the telescope aperture and magnification. In general, as either the telescope aperture or the magnification is increased, a visual observer will see fainter stars. The plotted curves are for $m_z = 6$, $A = 30$, a telescope throughput of 80%, and an atmospheric throughput of 70%. Also plotted is a curve for 100 power with an $m_z = 4$.



A leghalványabb megfigyelhető csillag a távcső nagyításának függvényében, a szem pupillaátmérőjének (E) és a távcső kilépő pupilla méretének (X) arányában kifejezve . **$E/X=1$ (kék vonal) esetén az égi háttér fényessége a távcsőben megegyezik a szabad szemmel láthatóval. A nagyítás növekedésével az égbolt háttér sötétebbé válik,** ami lehetővé teszi a halványabb csillagok észlelését (többi színes vonal). 6 mm-es szem pupilla átmérő és 0,6 mm-es okulár kilépő pupillával számolunk, akkor az arány 1/10, amit a **barna vonal jelez, akár 2 magnitúdóval halványabb csillagok is észrevehetők azonos távcsővel, azonos légköri viszonyok mellett.**

Miért nem kiterjedés nélküli pontok a csillagok a távcsőben?

Diffракció (fényelhajlás) és a távcső felbontása

A **diffракció vagy elhajlás** a fizikában egy olyan hullámtani jelenség, mely a hullám terjedése közben következik be, ha a **hullámhosszával összemérhető méretű akadállyal találkozik**.

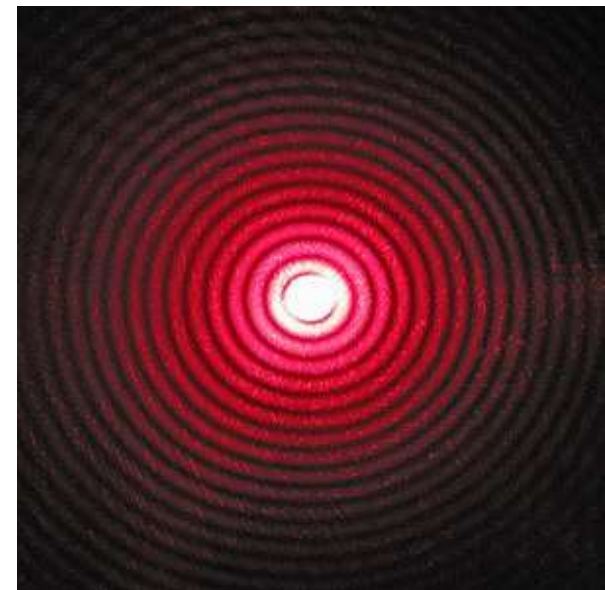
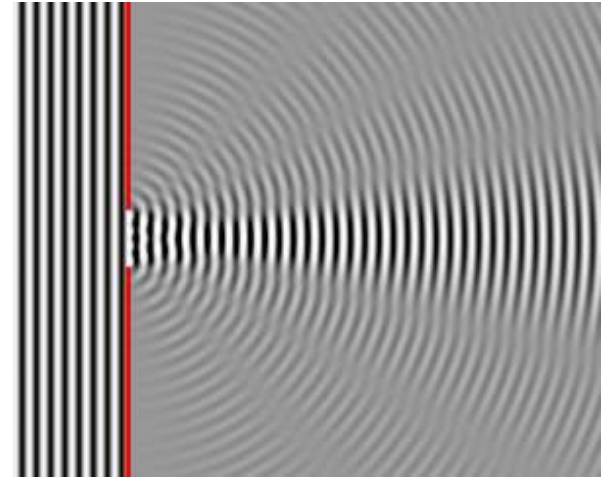
A fény elhajlása résen

Ha egy elegendően keskeny rést rá merőleges beesésű, monokromatikus fénnel megvilágítunk, akkor a rés mögött elhelyezett ernyőn az egyetlen világos csík helyett világos és sötét csíkokat, azaz egy interferenciaképet kapunk.

Az ernyő különböző pontjaira a különböző utakat megtevő elemi hullámok különböző fázisban érkeznek. **Azon pontokban, ahol a beérkező elemi hullámok éppen kioltják egymást, sötét foltot, ahol erősítik egymást, ott világos csíkot figyelhetünk meg.**

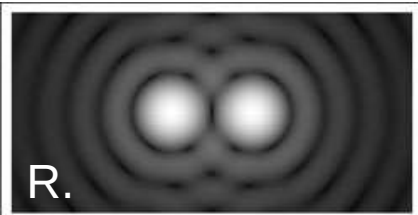
Fény elhajlása köralakú nyíláson (távcső!)

A fény hullámhosszával összemérhető sugarú kör alakú nyíláson áthaladó monokromatikus fény elhajlási képe **világos és sötét koncentrikus gyűrűkből (diffракciós gyűrűkből) áll, középen világos koronggal (Airy-korong)**. A fény hullámhosszával összemérhető méretű részleteket tartalmazó mintán áthaladva tehát egy pont képe nem egy pont, hanem egy korong.



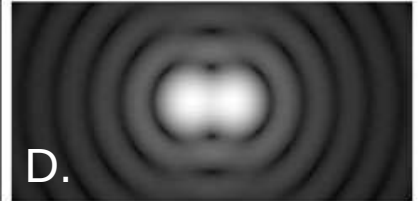
Mennyire kicsi részleteket látunk? A távcső felbontása

(Másik fejezetben erről még részletesebben lesz szó!)



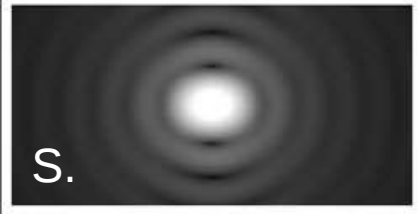
138/D = Rayleigh-határ

Eszerint egy 1"-es kettőscsillag egy D=138mm átmérőjű távcsővel még réssel bontható.



116/D = Dawes-határ

Eszerint egy 1"-es kettőscsillag egy D=116mm átmérőjű távcsővel „piskóta alakú” Airy korongokat mutat.



107/D = Sparrow-határ

Eszerint egy 1"-es kettőscsillag Airy-korongja egy D=107mm átmérőjű távcsővel éppen megnyúlnak látszik.

Dawes-határ
(objektív átmérő):

60 mm — 2,2"

80 mm — 1,5"

100 mm — 1,2"

150 mm — 0,8"

200 mm — 0,6"

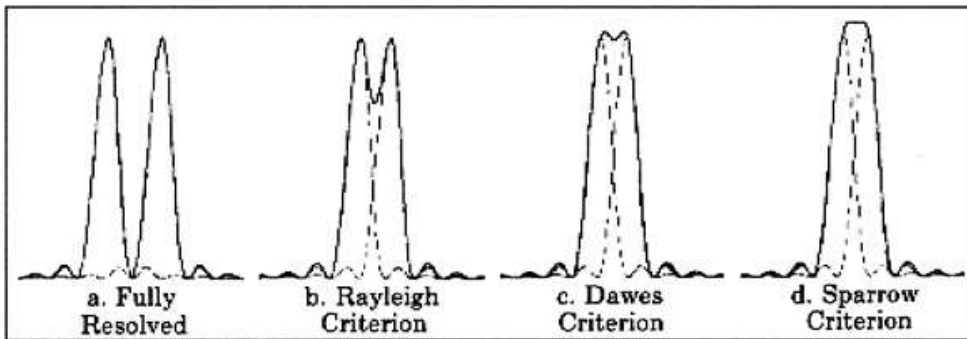
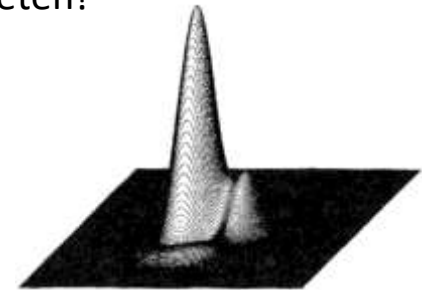
250 mm — 0,5"

320 mm — 0,4"

400 mm — 0,3"

A megadott felbontási képletek 4-6 magnitúdós, egyenlő fényességű kettőscsillagokra értendő!

A felbontás romlik halványabb, vagy nagy fénykülönbségű csillagok esetén!



Schuster-kritérium

Ne feledkezzünk meg azonban a földi légkör (szelek), vagy közvetlen környezetünk (meleg beton, nyitott ablak), esetleg a nem kellőképpen lehűlt távcső által keltett **turbulenciákról**.

Optikai elemek minősége nagyon fontos!



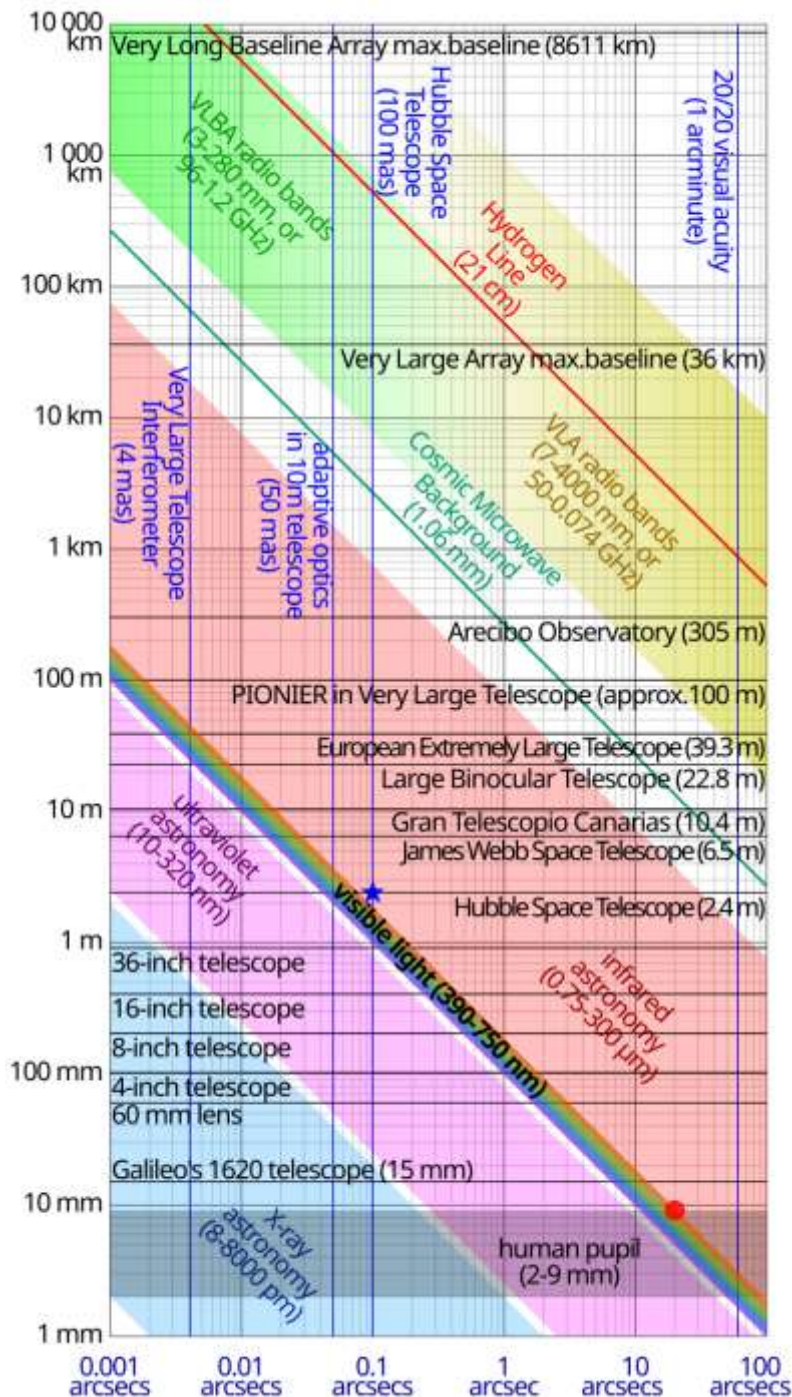
Mi az a diffrakcióhatárolt optika?

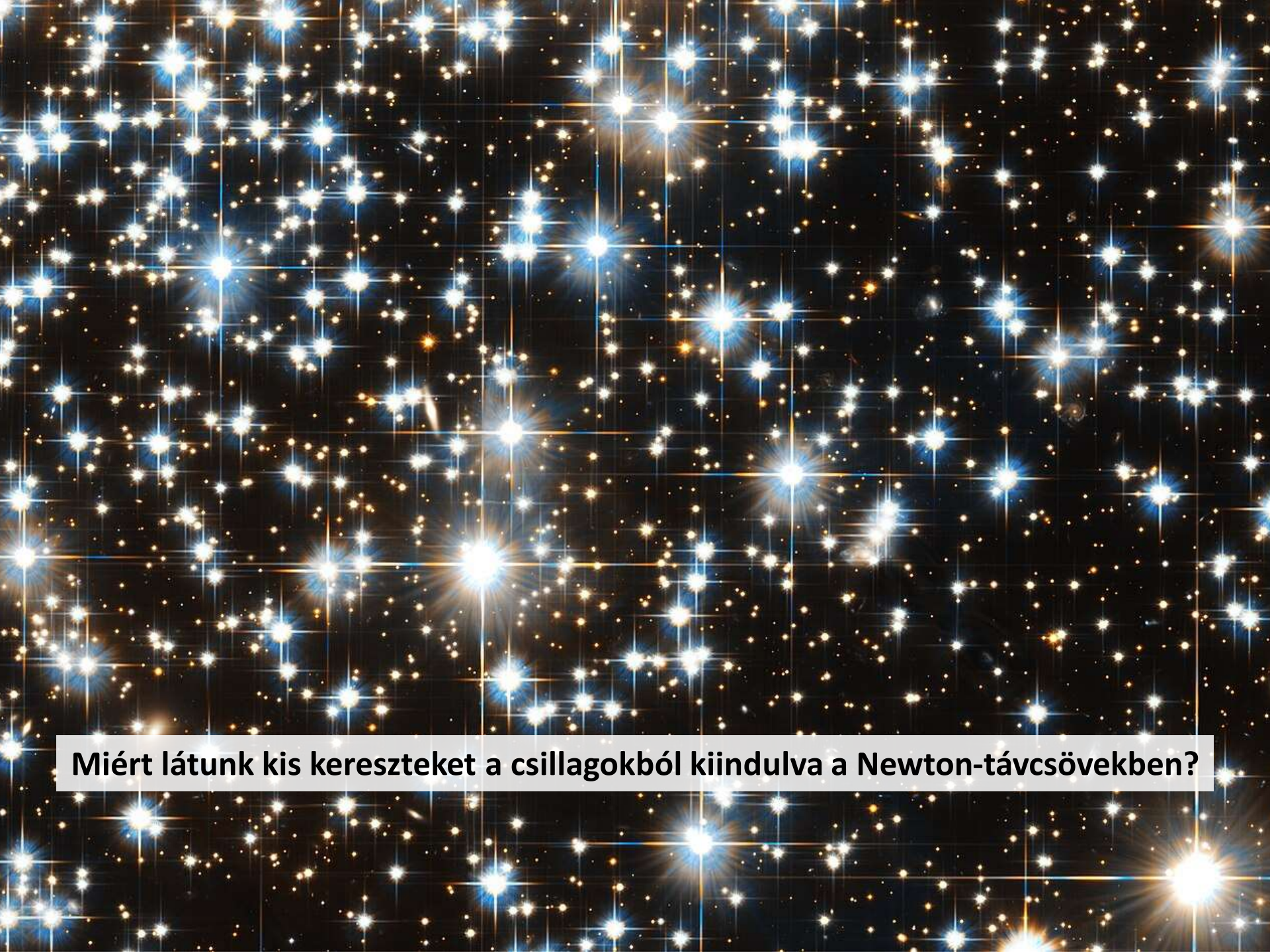
A diffrakció miatt minden optikai műszernek alapvetően korlátozott a felbontása. **Egy optikai műszerről akkor mondják, hogy diffrakcióhatárolt, ha elérte az elméleti felbontási teljesítménye határát.**

Azonban valós körülmények között más tényezők is befolyásolhatják az optikai rendszer teljesítményét, például a csillagászatban a légkör nyugtalansága, vagy az optikák gyártási vagy számítási hibák.

Balra:

A nyílás átmérőjének logaritmikus grafikonja a **szögfelbontás függvényében a diffrakciós határon, különböző fényhullámhosszak esetén**, a különböző csillagászati műszerekkel összehasonlítva. Például a kék csillag azt mutatja, hogy a Hubble Űrteleszkóp csaknem diffrakcióhatárolt a látható spektrumban 0,1 ívmásodpercnél, míg a piros kör azt mutatja, hogy az emberi szem felbontóképessége elméletileg 20 ívmásodperc (de a valóságban ez általában csak 60 ívmásodperc).



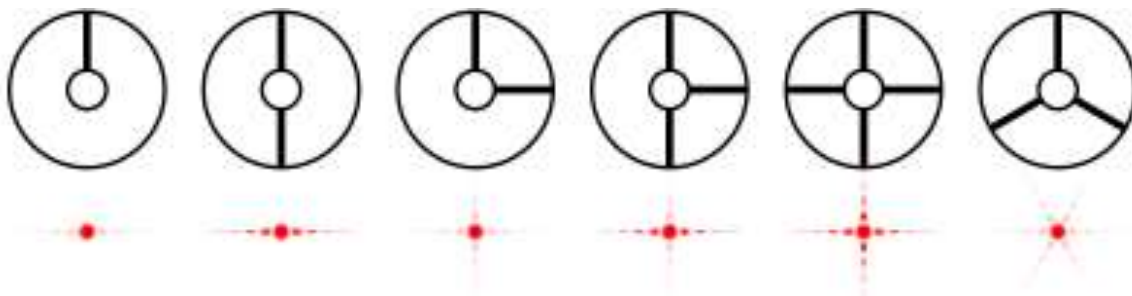
The image shows a vast field of stars against a black background. Each star is represented by a bright central point surrounded by a series of perpendicular, colored lines (spikes) in shades of blue, orange, and white. These spikes are a result of light diffraction through the telescope's optics. The stars vary in brightness and size, with some appearing as large, complex patterns of spikes and others as smaller, simpler points.

Miért látunk kis kereszteket a csillagokból kiindulva a Newton-távcsövekben?

**Él mentén kialakult
diffrakciós mintázat:**



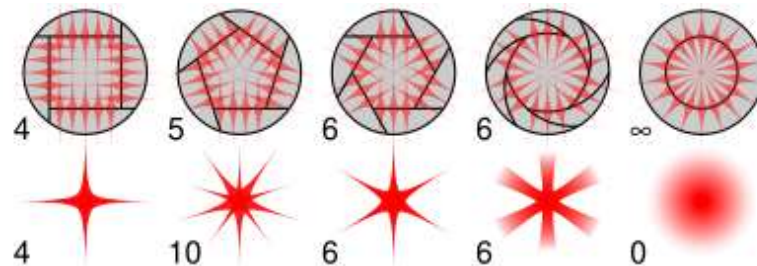
**Diffrakciós tüskék összehasonlítása különböző
segédtüskör lábak (póklábak) esetén:**



A szennyezett felületű optikai elemeknél is jelentkezik.

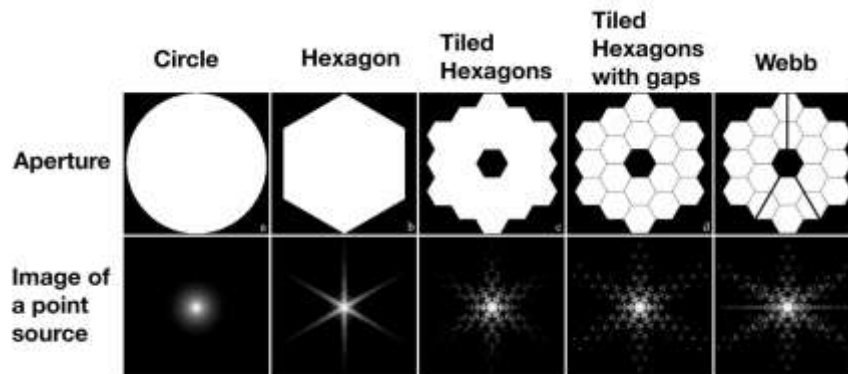
Az ujjlenyomatok párhuzamos vonalai a fényt a póklábakhoz hasonlóan diffraktálják.

**Nem kör alakú rekesznyílás (fényképezőgép
objektívek írisze) a diffrakció a nyíláson áthaladó
fényhullámokat a nagyjából egyenes élre merőlegesen
terjeszti szét úgy, hogy mindegyik él kettő, egymástól
180°-os távolságra lévő tüskét ad.**



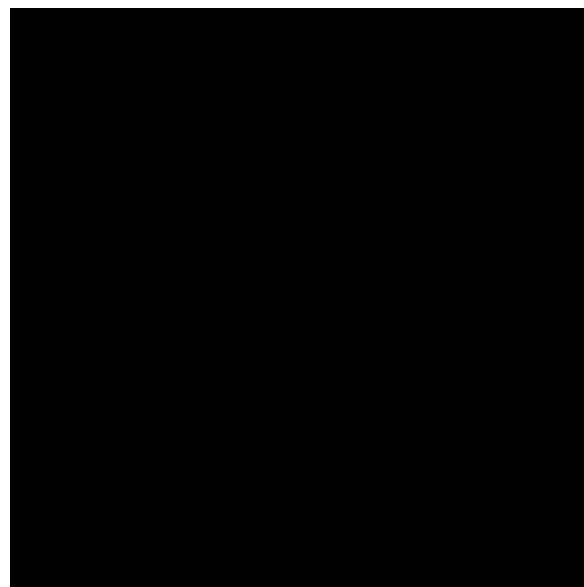
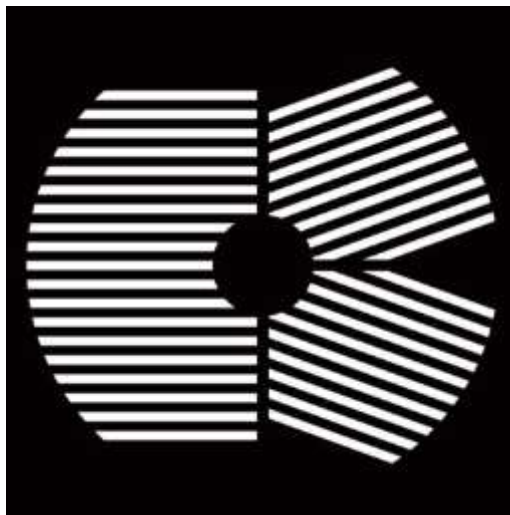
A fényképezőgép objektívjének blendéje
által létrehozott diffrakciós képek

**A szegmentált tükrös távcsövek képei szintén
diffrakciós tüskéket mutatnak a tükrök szélein
kialakult diffrakció miatt. Ezek merőlegesek a szélre
és mindkét irányba mutatnak (180°).**



A diffrakció felhasználása: a Bahtinov-maszk

A kis csillagászati távcsövek pontos fókuszálására szolgáló eszköz. Az asztrofotós távcsövek jellemzően igen fényerősek, ezért sokkal érzékenyebbek a pontos fókuszálásra.



I.5. Az optikai elemek leképezési hibái

Miért látszanak életlennek és színesek a csillagok a távcső látómezejének egy részén?

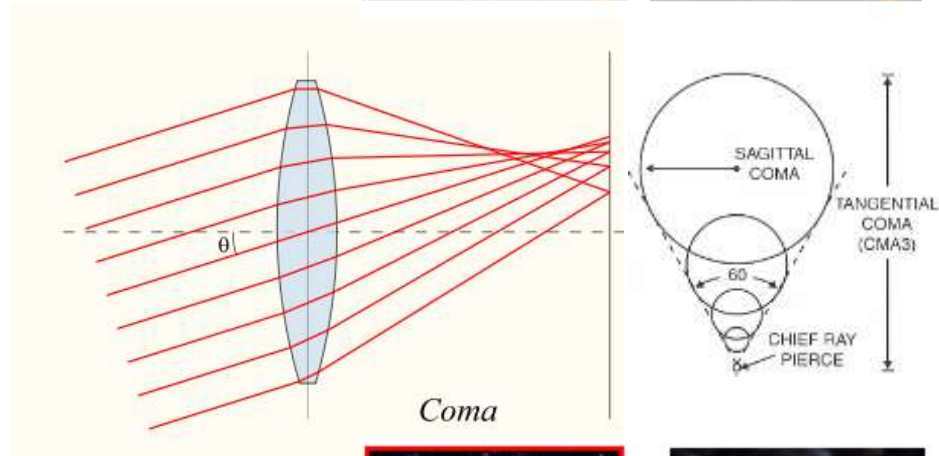
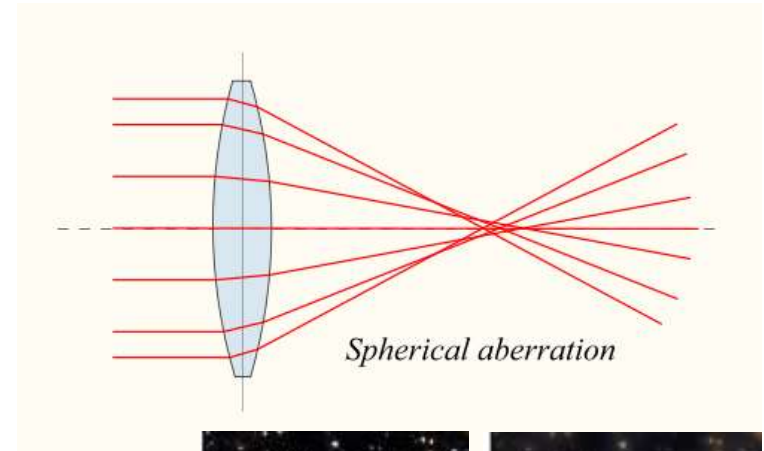
A.) Monokromatikus aberrációk

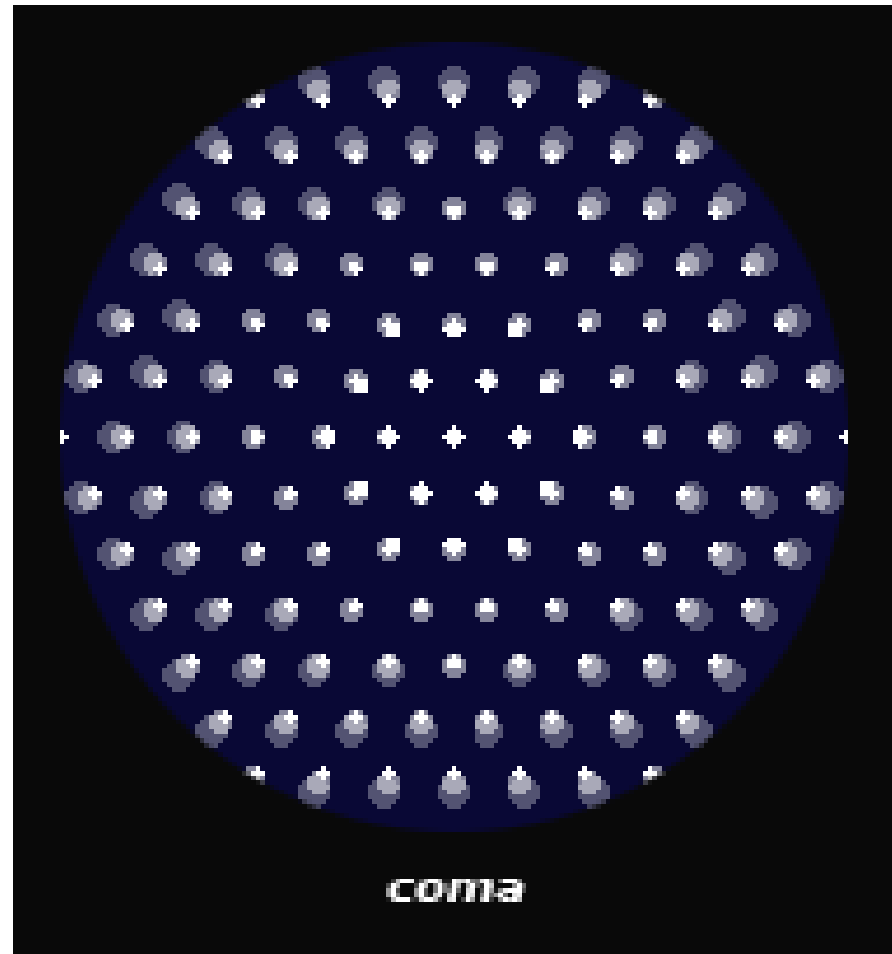
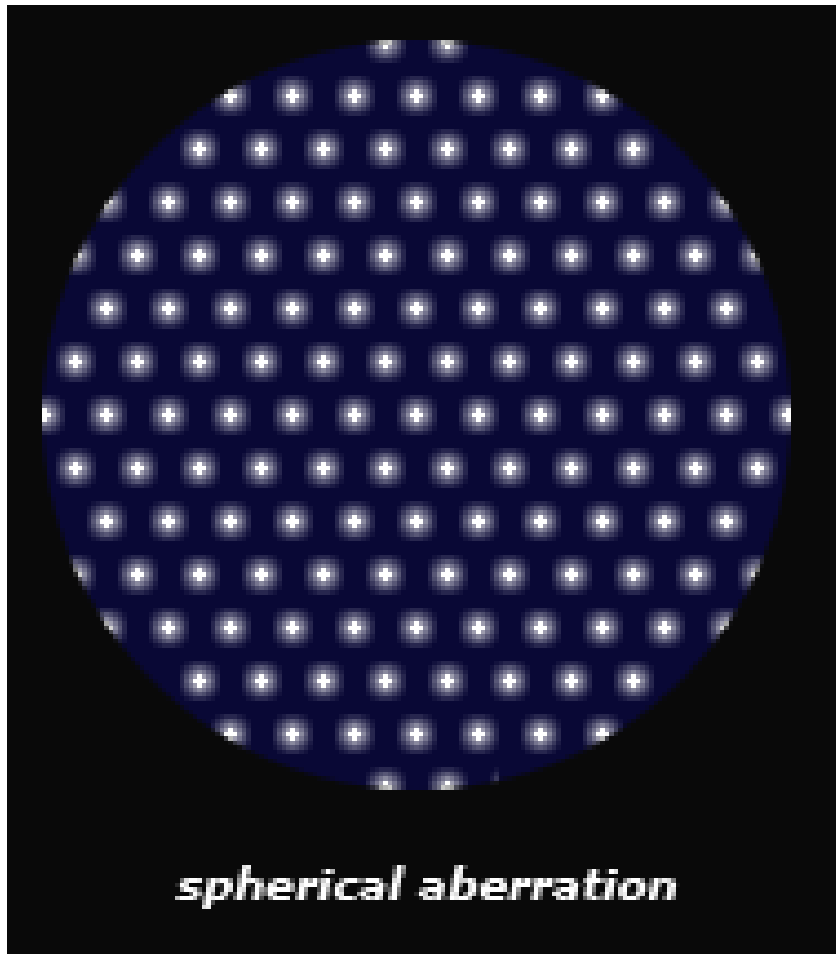
(A képeken lencsék láthatók, de a tükröknél is megjelenhet a hibák ezen csoportja.)

A.1.) Szferikus aberráció (vagy gömbi hiba) akkor lép fel, ha az optikai tengellyel párhuzamosan, de különböző magasságokban belépő nyalábok eltérő távolságokban fókuszálódnak (vagyis eltérő távolságokban metszik az optikai tengelyt).

E hiba jelenlétében nincs egzakt fókusz, a legkisebb szóródáshoz tartozó sík lehet a fókuszsík.

A.2.) Kómahiba akkor léphet fel, amikor az optikai tengellyel szöget bezáró sugarak lépnek be az apertúrán. Az objektív szélein belépő úgynevezett tengelyen kívüli (off-axis) sugarak más magasságban metszik a fókuszfelületet, mint az apertúra közepén belépők. Ennek eredményeként egy pontforrás képének az intenzitáseloszlása nem lesz szimmetrikus, hanem elnyúlt, üstökösszerű alakot ölt.





A **kómakorrektor** az optikai tengelyen kívüli torzítást szünteti meg, így a csillagok a teljes látómezőben (a széleken is) pontszerűek maradnak. A fényerős (F/3-5) távcsövek esetén nélkülözhetetlenek. (Vannak fókusznyújtó, fókuszredukáló és képsíkító funkcióval bíró változatok is.)



Kis kitérő:

Kómamentes terület mérete a fókuszsíokban

Az optikai tengely körüli fókuszsíokban van egy **kicsi terület** („sweet spot”), ahol a kómának elhanyagolható hatása van. Mérete kizárólag a főtükör fényerejétől függ.

Ha egy szenzor vagy okulár nagyobb területet lát a fókuszsíkból, mint a kómamentes terület, akkor a látómezejének szélén torzulni fognak a csillagok. Ezért kell speciálisan korrigált okulárokat használni a nagy fényerejű távcsövekhez és korrektorokat a fotózáshoz.

Közepes fényerejű távcsőben kis nagyításnál is megjelenhet a kóma a látómező szélén, nem megfelelően korrigált okulár esetén, de **nagy nagyításhoz már megfelelhet egy kevésbé korrigált okulár is**, amivel azzal a látómező teljes méretére „kinagyítjuk” a kómamentes területet.

Távcső fényereje:	Korrektíós tényező:			
	0,022	0,0178	0,0088	0,0036
	Kómamentes terület átmérője a fókuszsíokban (mm):			
2	0,18	0,14	0,07	0,03
3	0,59	0,48	0,24	0,10
4	1,41	1,14	0,56	0,23
5	2,75	2,23	1,10	0,45
6	4,75	3,84	1,90	0,78
7	7,55	6,11	3,02	1,23
8	11,26	9,11	4,51	1,84
9	16,04	12,98	6,42	2,62
10	22,00	17,80	8,80	3,60

Megjegyzés: A fókuszsíkok nem sík!

A távcső fókuszsíkjára voltaképpen egy gömbszelet, aminek a sugara nagyjából megegyezik a főtükör fókusz távolságával. Homorú a főtükör felől és domború a szemlencse felől nézve.

Eltorzulnak-e vállalhatatlanul a csillagok a kamera, vagy az okulár látómezejének szélén?

Egy távcső fókuszsíkjára kómamentes területének („sweet spot”) méretének számítására több képlet is használatban van. A „lazább” képlet vonatkozhat pl. egy viszonylag rosszabb felbontású digitális kamerára, a „szigorúbb” képlet pedig a vizuálisan látott képre.

Leggyakrabban emlegetett „laza” képlet: $0,022 \cdot f^3$
Ahol f a távcső fényereje, az eredmény mm-ben.
Szigorúbb képletekben a korrekciós szám lehet: 0,01778, vagy 0,0088 (Sidgwick), vagy 0,0036 (Sinnott).

Számítási eredmények a mellékelt táblázatban láthatók.

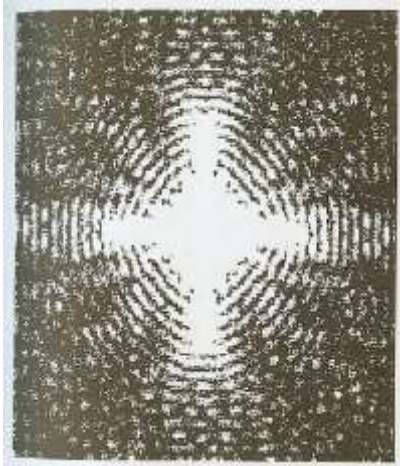
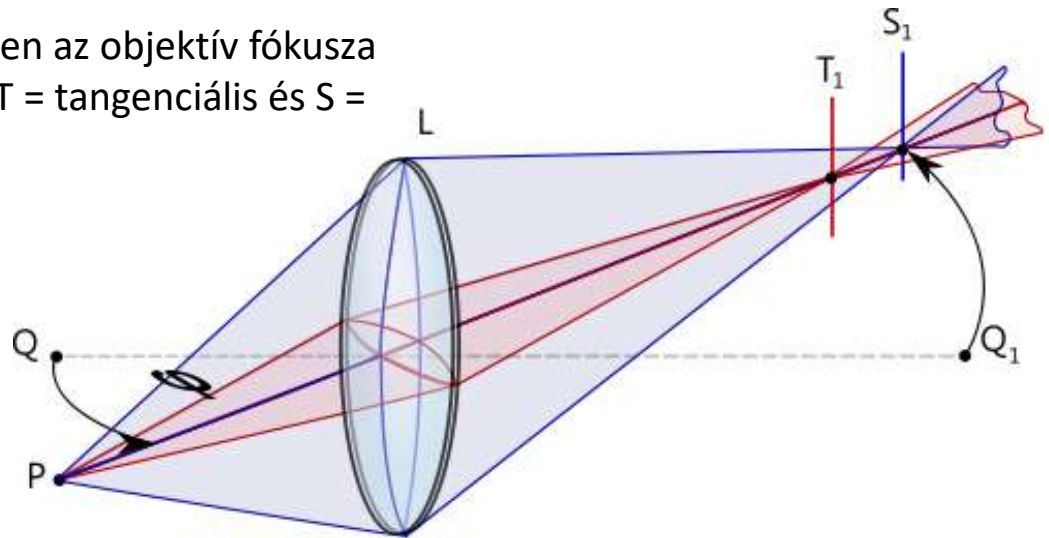
Egy kamera szenzormérete benne van az útmutatójában. Az okulár által belátott fókuszsíkok terület lényegében megegyezik az okulár fókuszában lévő diafragma blende által határolt kör átmérőjével (mm), de számítható is: $D = F \cdot \tan(\text{TFOV})$, ahol D az okulárban belátott fókuszsíkok átmérője (mm), F az objektív fókusz távolsága (mm), TFOV az okulár valódi látómezeje (ld. 59. oldal).

Példa: 150/600-as távcső és 4mm-es ortoszkópikus okulár esetében a belátott fókuszsíkok terület:

$$D = 600\text{mm} \cdot \tan(0,3) = 600 \cdot 0,00523 = 3,14 \text{ mm}$$

A példában szereplő okulárban a belátott fókuszsíkok terület átmérője nagyobb, mint az f/4-es távcső kómamentes fókuszsíkjának átmérője, ezért az okulár látómezejének külső felében torzulni fognak a csillagok.

A.3.) Asztigmia: Asztigmatizmus esetében az objektív fókuszja eltérő két egymásra merőleges síkban (T = tangenciális és S = szagittális fókusz).



Egy csillag képe asztigmatikus objektívű távcső fókuszban, nagy nagyítással (kereszt alakú, nem körszerű).

Un-aberrated Image

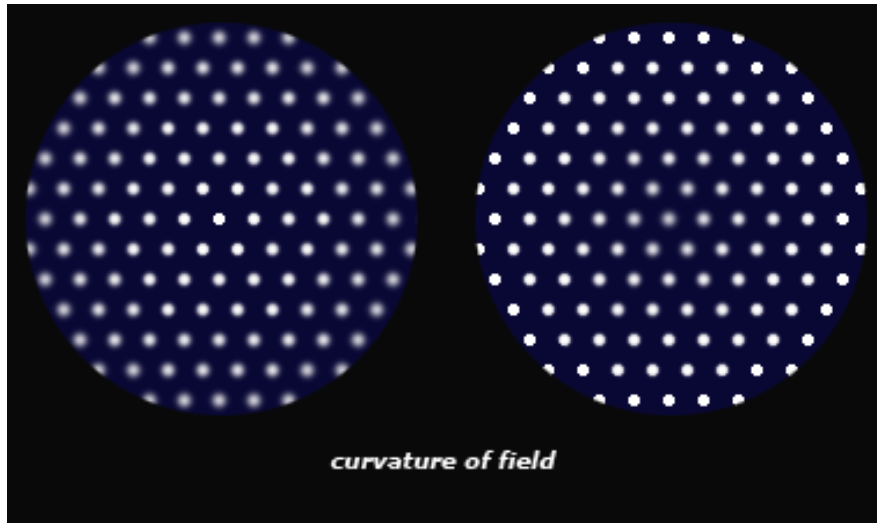
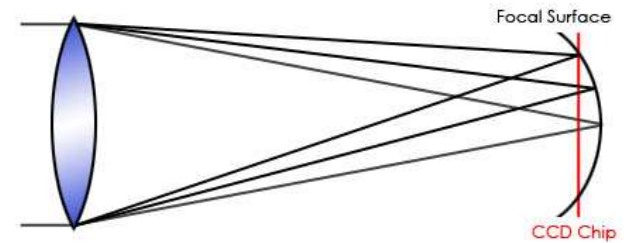
Tangential Focus

Medial Focus

Sagittal Focus



A.4.) A fókuszfelület görbülete: A fókuszfelület sok esetben nem sík, hanem görbült, vagyis az éles képet nem sík felületre, hanem egy forgási kúpmetszetre lehet kivetíteni. **Síkító lencsékkel, fókuszkorrektorokkal lehet javítani a problémán (pl. fényerős asztrofotós távcsövek esetén).**



Un-aberrated Image

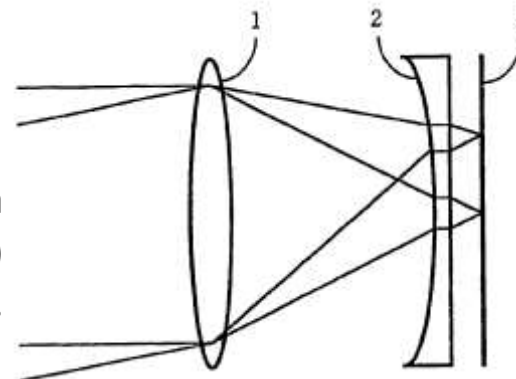


Petzval Field Curvature



Először **Petzval József** magyar matematikus, fizikus és feltaláló **használt mezősíktó lencsét (flattener)** a térgörbület csökkentésére portréobjektívben **1841-ben**.

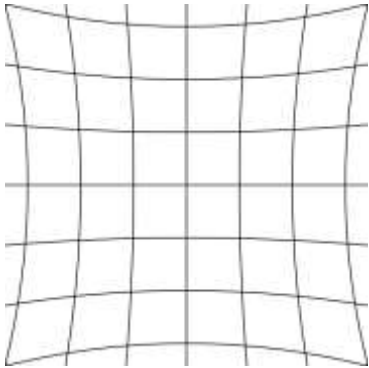
Egy egyszerű **mezősíktó (2)**, amely közel fekszik a fókuszsíkhöz (3), és korigálja az objektív (1) térgörbületét.



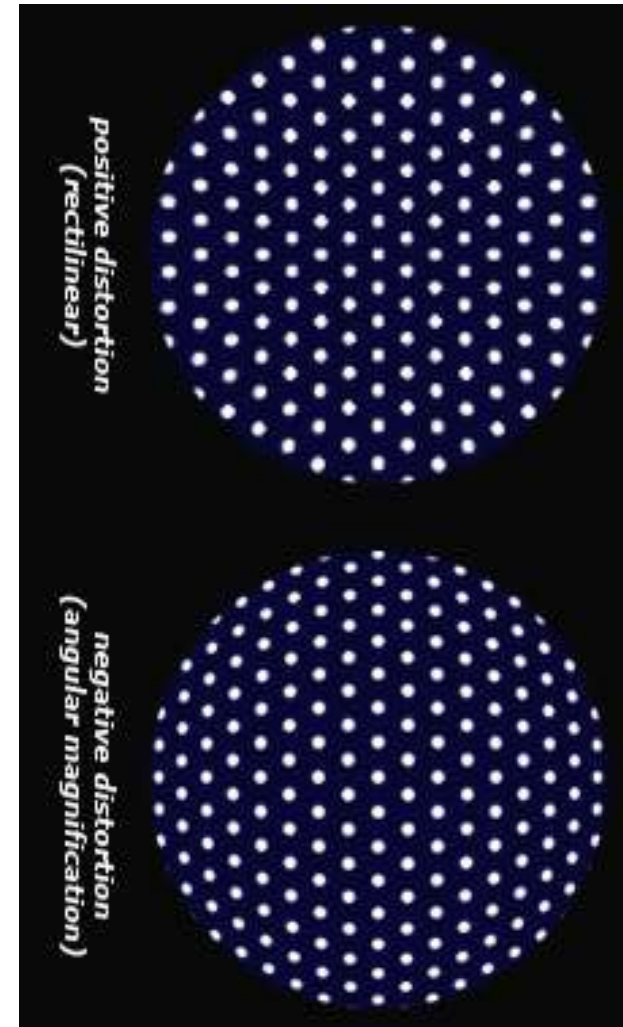
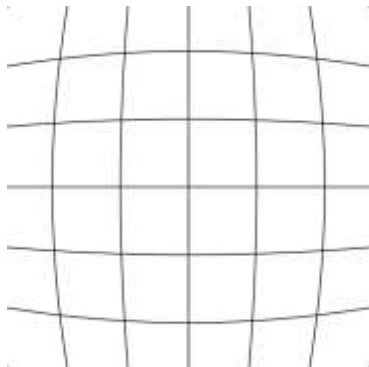
Modern mezősíktó lencse (flattener)

A.5.) A torzítás a kép méretére, a skálázásra van hatással. Amennyiben a képskála nő a tengelytől mért távolsággal, akkor **pozitív torzításról vagy párnahibáról (a)** beszélünk, ellenkező esetben **negatív, vagy hordó torzításról (b)**.

a



b



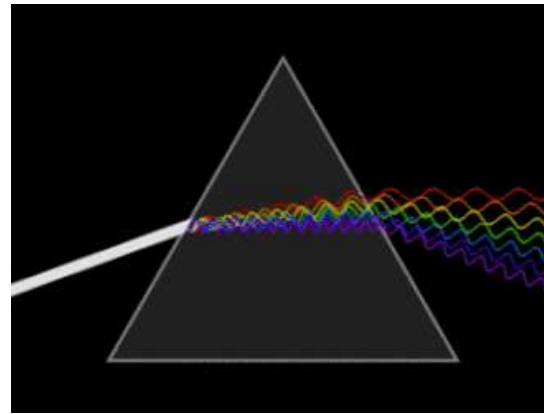
B. A kromatikus aberráció (üveganyagon áthaladó fény esetén jelentkezik)

Általában ezt tartják a leginkább kifogásolható (vizuálisan leginkább zavaró) aberrációnak az optikai rendszerekben.

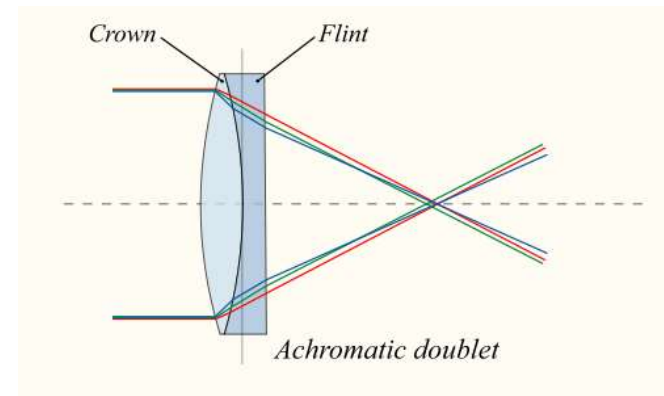
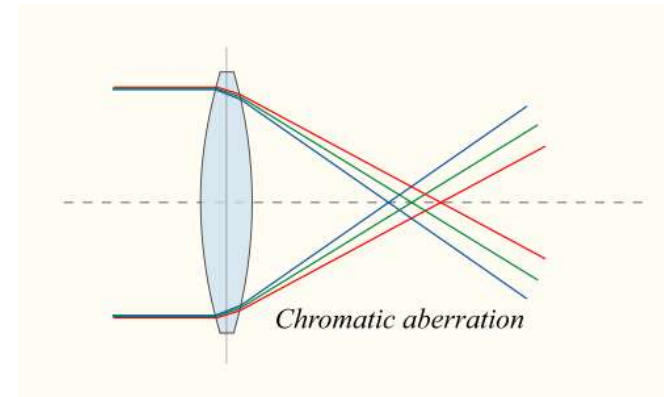
A törésmutató értéke függ a hullámhossztól, ez a **diszperzió**. Így a különböző hullámhosszú fénysugarakat a lencse másként téríti el, hiszen a hullámhossztól függ az üveg törésmutatója. (A prizma is ezért bontja fel a fényt.)

Legerősebben a kék, legkevésbé a vörös fény törik meg. A kék és a vörös sugarak fókuszja közötti különbséget másodlagos spektrumnak nevezik. Ez egy hagyományos Fraunhofer-dublett esetén 0,0005f, vagyis a fókusz 1/2000-ed része.

A kromatikus aberrációt vagy színi hibát a következő eljárással lehet csökkenteni: nem egytagú, hanem **összetett lencsék alkalmazásával**, melyek különböző törésmutatójú anyagból készülnek, az egyik gyűjtő, a másik szórólencse.



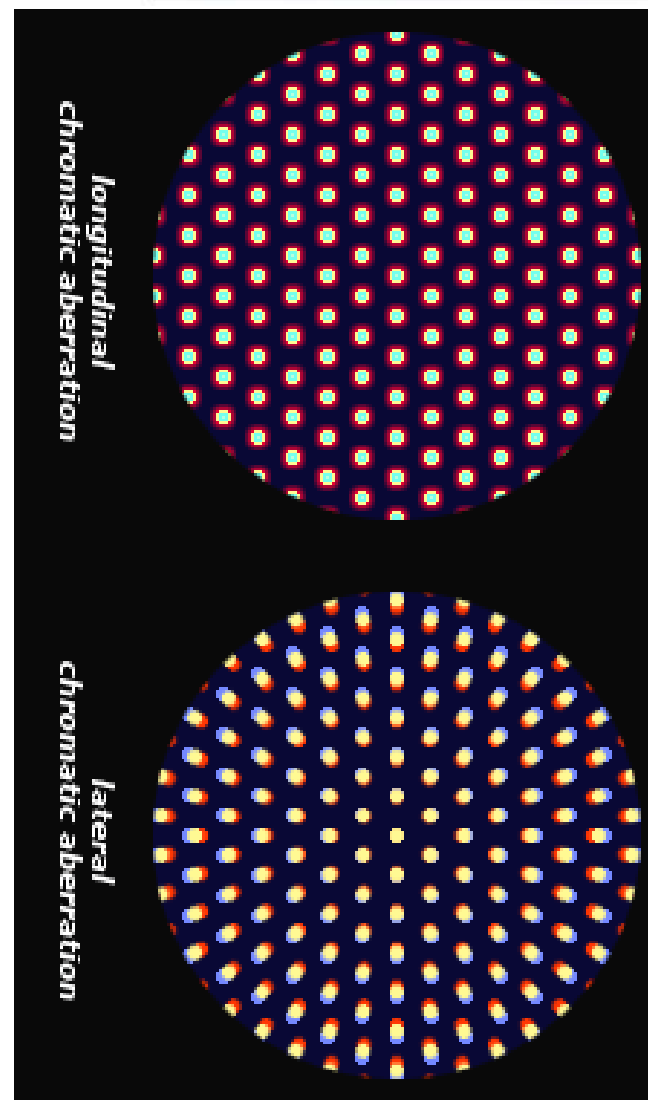
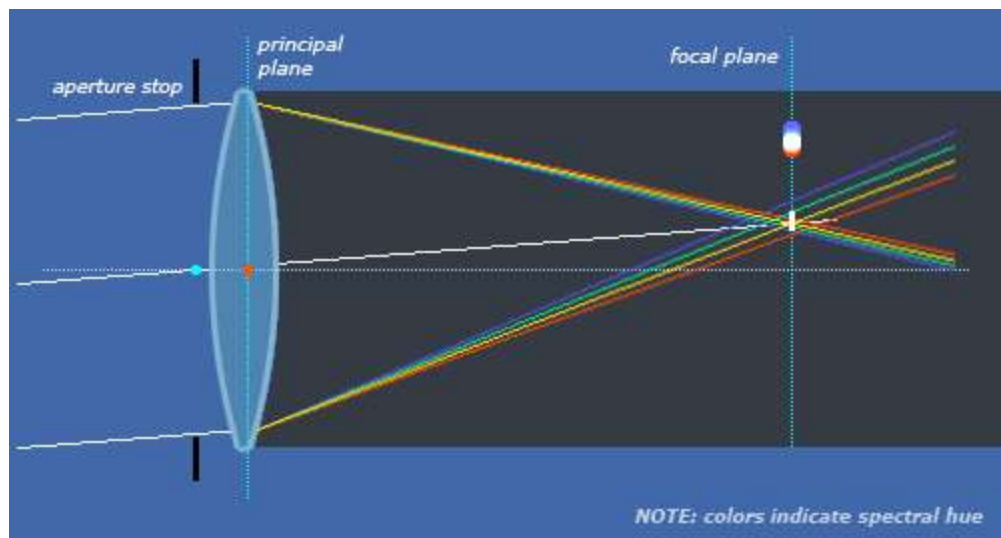
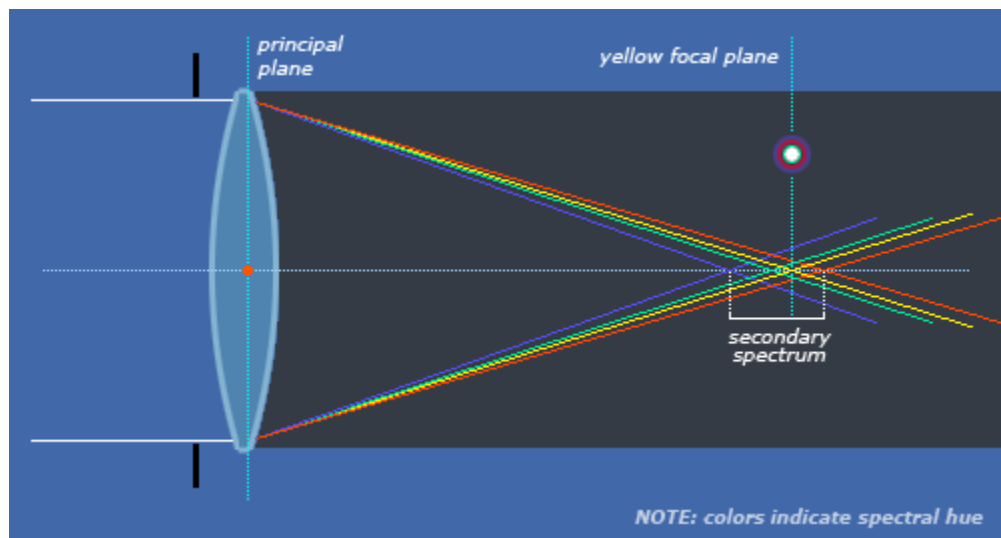
Miért kékes a Hold pereme a lencses távcsövekben?



A kromatikus aberráció (színi hiba) típusai:

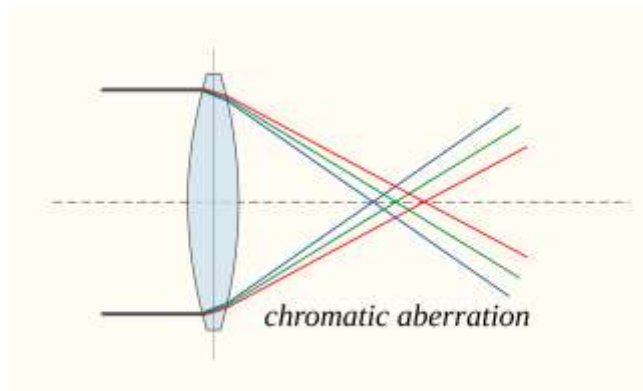
Hosszirányú (longitudinális) kromatikus aberráció az optikai tengely mentén jelenik meg.

Az oldalirányú (laterális) kromatikus aberráció az optikai tengelytől távolodva jelentkezik.

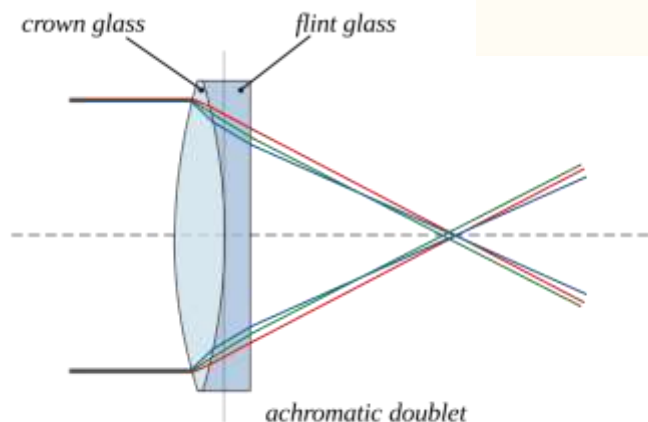


Akromatikus objektíveknek nevezzük azokat az objektíveket, amelyek korrigálják a színtorzulást. Két szín – legtöbbször a kék és a vörös – olvad össze. Bár némi szférikus korrekciót végrehajtanak, a kb. 30x-os nagyítás fölötti értékek esetén a szélek homályosodnak.

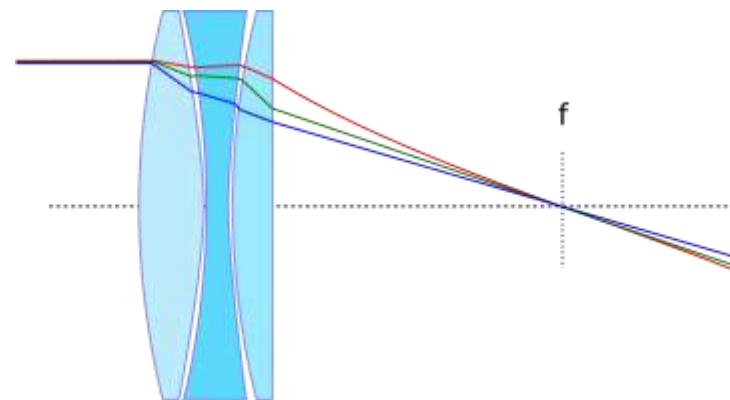
Az apokromatikus lencse (apo) olyan objektív, amely jobban korrigálja a kromatikus és szférikus aberrációt, mint a sokkal elterjedtebb akromatikus lencsék. Jellemzően a három fő színt egy helyre fókuszálja (ehhez általában három tagból álló objektívre van szükség, de vannak kivételek).



Egyetlen lencse kromatikus aberrációja a különböző hullámhosszú fények különböző fókusz távolságát okozza.



Az akromatikus dublett a vörös és a kék fényt ugyanarra a fókuszra hozza

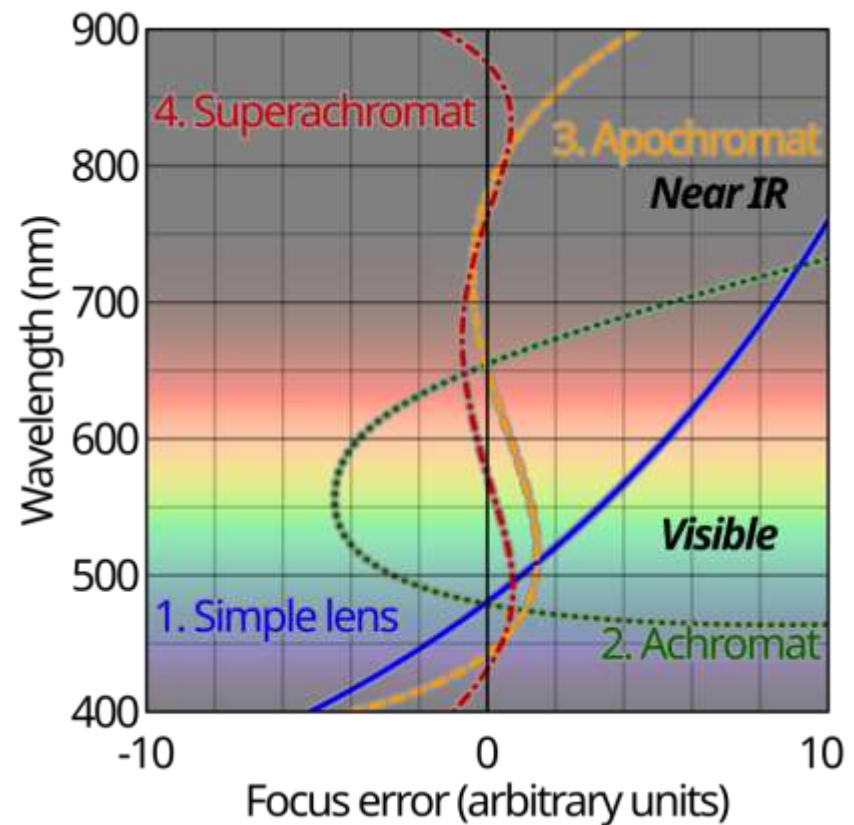
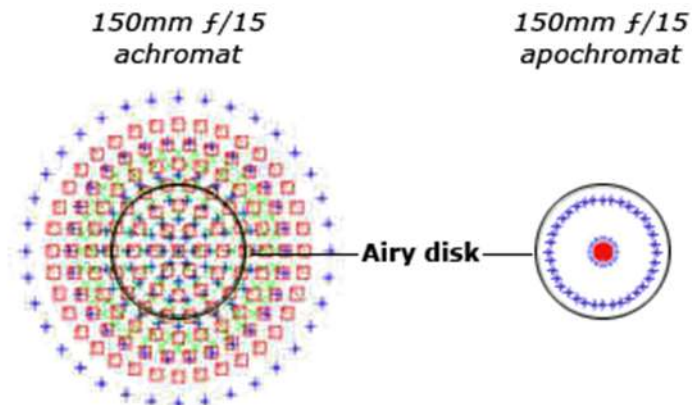


Az apokromatikus lencse általában három elemből áll, amelyek három különböző színű fényt hoznak egy közös fókuszba

Apokromátok újabb definíciója

Thomas Back a TMB Optical alapítója szerint:

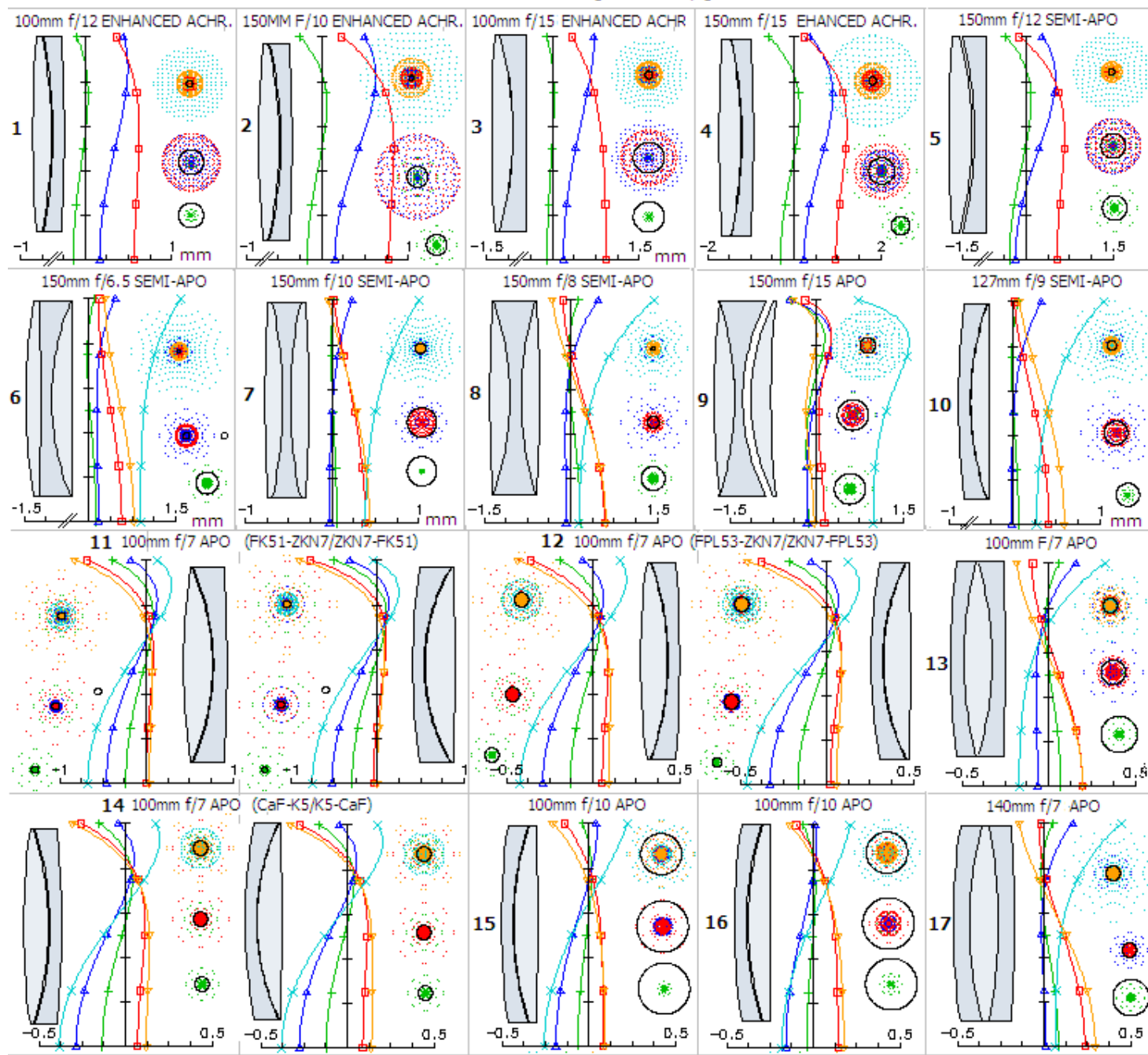
„Számos különböző apokromatikus lencse tervezése, tesztelése és értékesítése után kijelenthetem: A kereskedelmi forgalomban kapható apokromatikus lencsék világában nincs „határozott” vonal, ahol egy lencse „apokromatikussá” válik. De minden objektív, legyen az dublett, triplett, quad, légteres vagy Petzval, amelynek vizuális nulla csúcsa (~5550Å, sárgászöld) 0,95 vagy annál jobb Strehl-aránnyal rendelkezik, kóma korrigált és diffrakció határolt C-től (piros) F-ig (kék), az OPD (Optical Path Difference) gömb alaktól való eltérése max. 1/4 hullám vagy jobb, jól szabályozza az ibolya g hullámhosszt, legfeljebb 1/2 hullámú OPD P-V hibája van és olyan optikai feltételeket mutat, amelyek a maximális fotonmennyiséget a diffrakciós határon belül koncentrálnak megfelel az „apokromatizmus” modern definíciójának.”



Balra: Egy átlagos csillag képe f/15-ös akromatikus távcsőben nagy nagyítással (Airy-korong és környéke).

Jobbra: Az apo jobban koncentrálna a különböző színű (hullámhosszú) fénysugarakat az Airy-korongon belülre.

λ (nm): 707 (r) 656 (C) 546 (e) 486 (F) 436 (g) AXIAL RAY SPOT PLOT: TOP: r,C,e,F,g MID: C,e,F BOTTOM: e
 Lower density glass Higher density glass



Minél kisebb a lencse fényereje, annál kisebb a kromatikus aberráció (akromatikus objektívek):

Equivalent Chromatic Aberration of Achromatic Refractors

		F	O	C	A	L		R	A	T	I	O		
obj/mm	obj/in.	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	18	20
60mm	2.36	1.27	1.69	2.12	2.54	2.966	3.39	3.81	4.24	4.66	5.08	6.36	7.63	8.47
70mm	2.75	1.09	1.45	1.8	2.18	2.54	2.9	3.27	3.63	4	4.36	5.45	6.54	7.27
80mm	3.14	0.96	1.27	1.59	1.91	2.229	2.55	2.87	3.18	3.5	3.82	4.78	5.73	6.37
90mm	3.54	0.85	1.13	1.41	1.69	1.977	2.26	2.54	2.82	3.11	3.39	4.24	5.08	5.65
100mm	3.93	0.76	1.02	1.27	1.53	1.781	2.04	2.29	2.54	2.8	3.05	3.82	4.58	5.09
120mm	4.72	0.64	0.85	1.06	1.27	1.483	1.69	1.91	2.12	2.33	2.54	3.18	3.81	4.24
127mm	5	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	3	3.6	4
152mm	6	0.5	0.67	0.83	1	1.167	1.33	1.5	1.67	1.83	2	2.5	3	3.33

Conrady standard CA ratio > 5
Sidgwick standard CA ratio > 3
5" f/9 equivalent CA ratio > 1.78
6" f/8 equivalent CA ratio > 1.25

Visual levels of Chromatic Aberration

Minimal or no CA

Filterable levels of CA

Unacceptable levels of CA

f/ratio divided by objective diameter in inches = CA ratio



Nem mindig a távcsövek színeznek! Atmoszférikus diszperzió

Amikor a földi légkörben áthalad a fény, a légkör eltérő sűrűsége miatt prizmahatás lép fel, mely a különböző színeket felbontja és kicsit máshová képezi le. Ez a gyakorlatban úgy jelentkezik, hogy a **bolygó felső és alsó peremén pirosas, ill. kékés elszíneződés** jelenik meg. Ez nem a távcső hibája.

A korrekciós prizma (rayleigh prizma) Az légkör okozta prizmás színezést korrigálja vissza. A korrekció mértéke állítható, így a prizma az aktuális színezéshez pontosan hozzáigazítható, alkalmazkodva a légköri viszonyokhoz, objektum horizont feletti magasságához, távcső átmérőjéhez, stb.



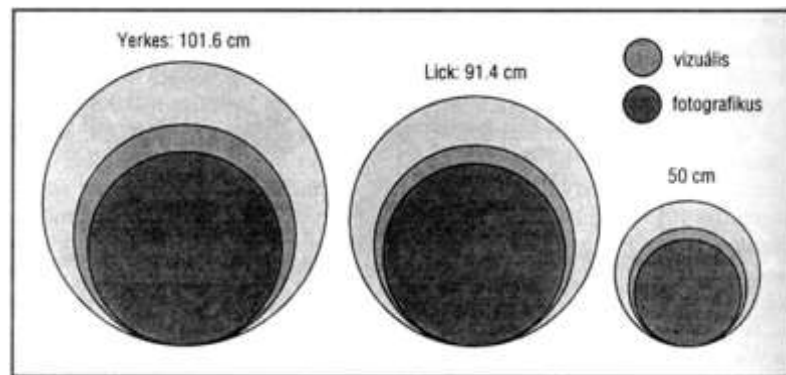
Miért nem készítenek lencsés óriástávcsöveket (5-6 m átmérőben)?

Az abszorpció (elnyelés, üveganyag belsejében):

Azt a jelenséget, amikor valamely sugárzás más spektrális eloszlású sugárzássá vagy más energiaformává alakul át, abszorpciónak (elnyelés) nevezzük. Az atom vagy molekula a beérkező fotont elnyeli, s hatására magasabb energiájú állapotba kerül.



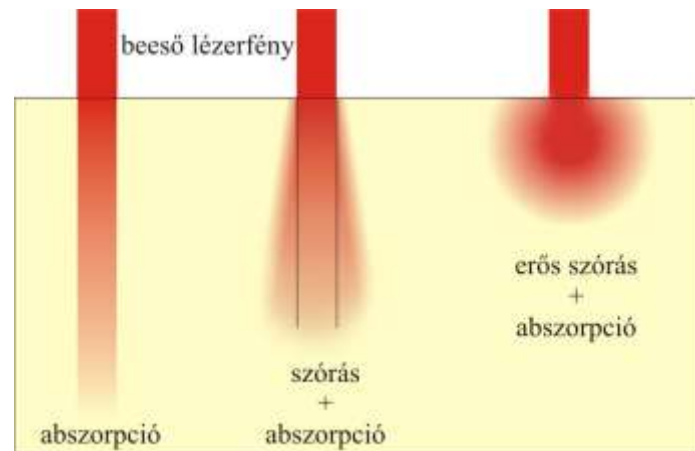
A valaha készített legnagyobb átmérőjű
lencsés távcső:
Párizsi világkiállítás (1900) naptávcsöve
1250mm/57000mm



1 méter átmérő fölött a lencserendszer (objektív)
olyan vastag lesz, hogy túl sok fényt nyel el

Szóródásnak (pl. üveganyag belsejében) nevezzük valamely
közegben a sugár eltérítését/eltérülését az eredeti sugárzási iránytól.

A jó minőségű optikában belül ez nem jellemző, de a víz
páralecsapódása, az optikai felületeken lévő szennyeződés vagy zsír,
illetve a légkörben lévő páratartalom, por vagy kipufogógáz-
szennyezés okozhat ilyet.



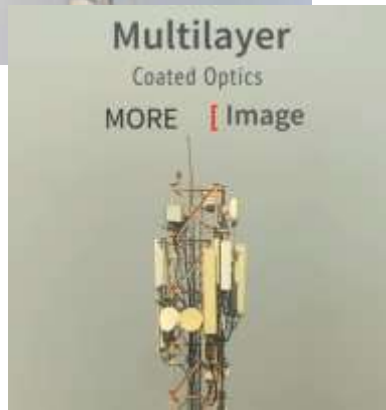
I.6. Antireflexiós bevonatok a lencsék felszínén

A tükröződésgátló bevonatok csökkentik a távcső optikai elemeiben „elveszett” fény mennyiségét. Az optikai elemről visszaverődő, a távcsőben szóródó, tehát nem megfelelően hasznosuló fény elhomályosítja, lágyabbá, fényszegényebbé teszi a távcső képét.

A tükröződés-csökkentő bevonatok működése viszonylag egyszerű: amennyiben **vastagsága optimális (a fény hullámhosszának negyede)** akkor a **bevonat aljáról és tetejéről visszaverődő fénysugár éppen ellentétes fázisban van, amikor találkoznak, ezáltal kioltják egymást vagyis nem látunk reflexiókat.**

Az 555 nm-es (zöld) hullámhossz körüli maximális fényáteresztés fontos az optimális nappali (fotopikus, csapok) látáshoz. A 498 nm-es (cián) hullámhossz körüli maximális fényáteresztés fontos az optimális éjszakai (szkotopikus, pálcikák) látáshoz.

A bevonattól függően a távcsőben normál nappali fényben látható kép jellege „melegebbnek” vagy „hidegebbnek” tűnhet, és magasabb vagy alacsonyabb kontraszttal jelenhet meg.



A bevonatok fajtái:

- coated vagy single-coated (egy réteggel bevont): mindössze egyetlen levegő-üveg felület van csak anti-reflexiós bevonattal (rendszerint magnézium-fluorid, MgF_2) bevontva, ott is csak egy rétegben (pl. Zeiss T réteg),
- fully coated (minden oldalon bevont): az összes levegő-üveg felületre egy réteg antireflexiós bevonat van gözölve,
- multicoated (több réteggel bevont): legalább egy üveg-levegő felület több réteg antireflexiós bevonattal van ellátva, a többi felület legfeljebb egy ilyen réteget tartalmaz,
- fully multi-coated (minden oldalon, több rétegben bevont): minden üveg-levegő felületen többszörös antireflexiós réteg található.
- dielectric coating (dielektromos bevonat): maximalizálja a látható fény minőségét, és tiszta, nagy kontrasztú képeket hoz létre, hasonlóan a szabad szemmel láthatókhoz.

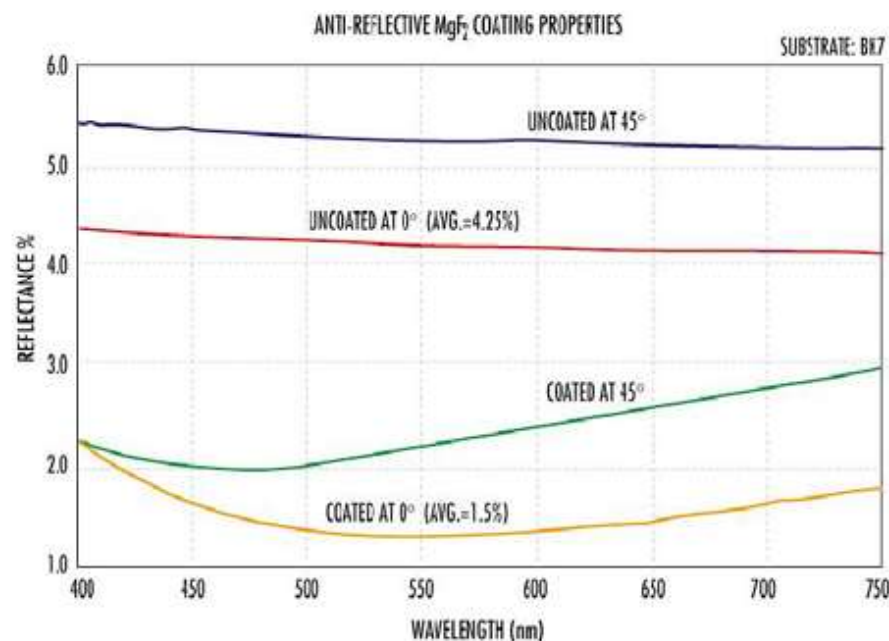
A bevonat nélküli üvegfelület a fény 4-5%-át visszaveri, de már egy réteg tükröződéscsökkentő bevonat felvitele is kevesebb mint felére (1,5%-2,5%) csökkenti ezt az értéket. További rétegek felvitelével akár 1% alá is szorítható a visszavert fény mértéke felületenként.

A bevonatok látható színe attól függ, hogy milyen hullámhosszú fényt vernek vissza legnagyobb százalékban.

Mivel a bevonat vastagsága fix, a kioltás nem lehet tökéletes a teljes látható spektrumon (400–700 nm). A legtöbb bevonat a spektrum szélein (a kék/ibolya és a vörös tartományban) kevésbé hatékony.

A teljesen ideális többrétegű bevonat teljesen átlátszó lenne, és az üveget nem is vennénk észre.

MgF₂ Characteristics

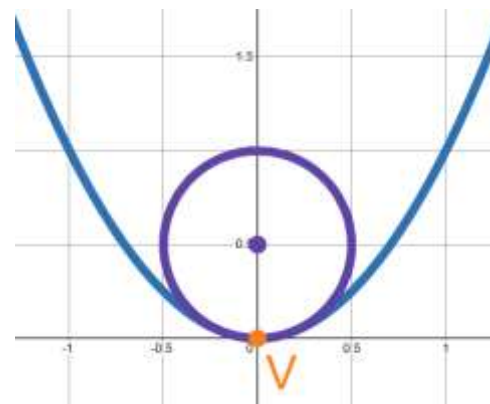
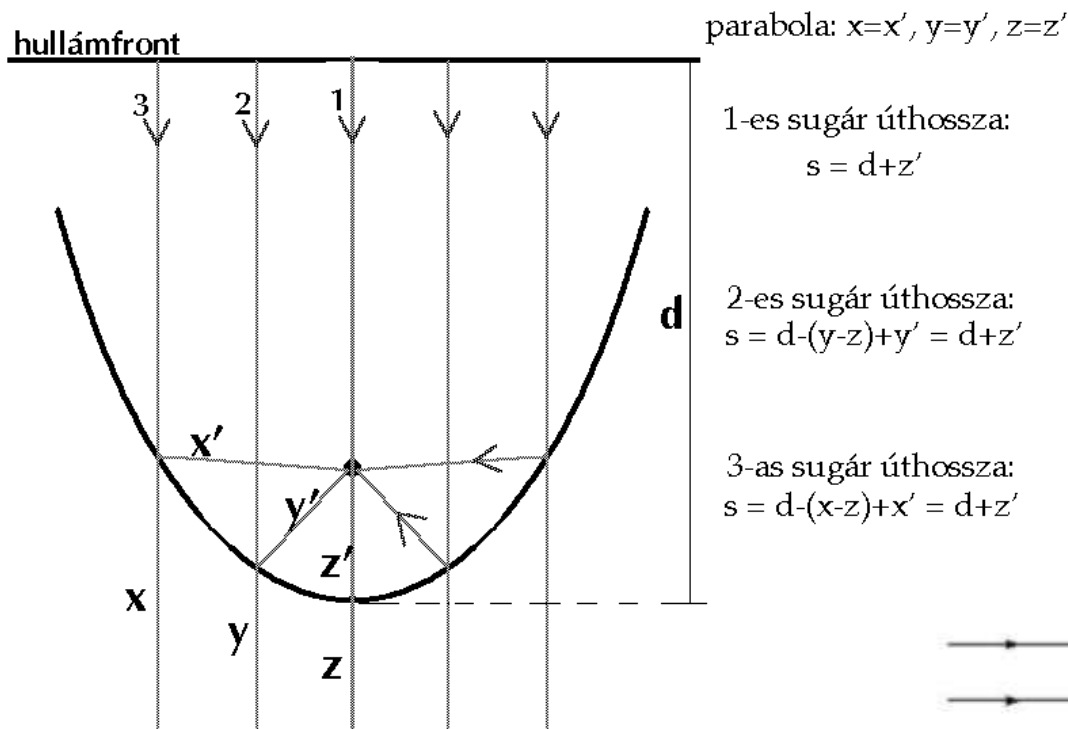


Az okulárok antireflexiós bevonatát tesztelhetjük úgy, hogy a kihuzat felől lezárjuk őket, majd a szemlencse felől megnézzük, hogy történik-e visszaverődés a belső tagokról. Másik lehetőség, hogy nappali fényben átnézzünk a lencserendszeren. Elméletileg a legvilágosabb és legkevésbé színező lesz a legjobb.

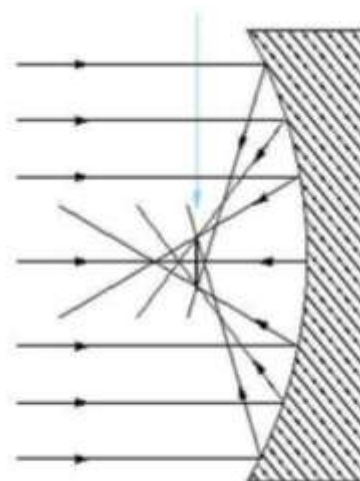
I.7. Néhány gondolat a tükrök felületéről

Miért paraboloid a főtükör felülete?

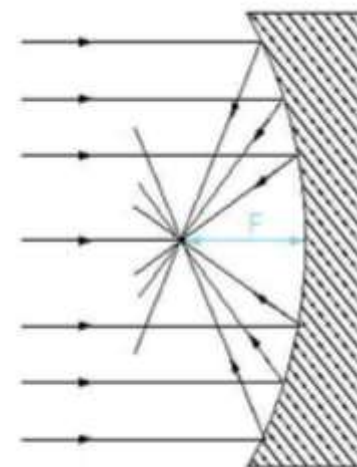
Egy sík hullámfrontot (a végtelenből érkező gömb hullámfront, vagyis pl. egy csillagról érkező fény) egy paraboloid segítségével tudunk egy pontba fókuszálni:



DE: kis fényerő esetén a gömb és paraboloid közötti különbség olyan kicsi, hogy gyakorlatilag a gömb is elegendő.



spherical



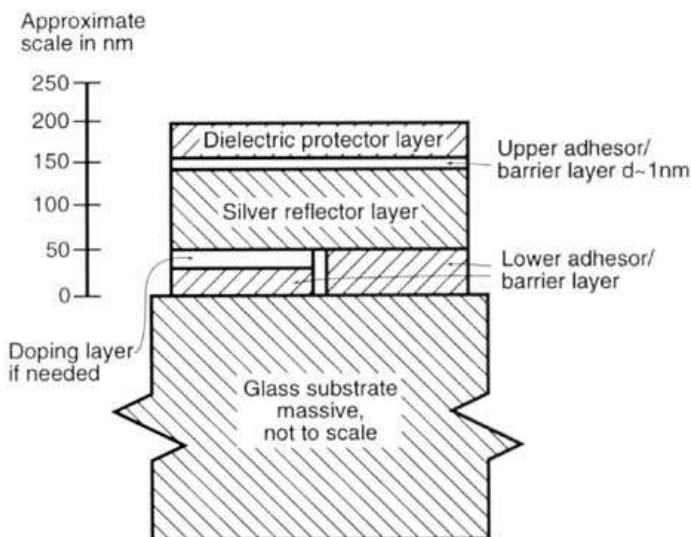
parabolic

Fényvisszaverő rétegek a tükrök felületén

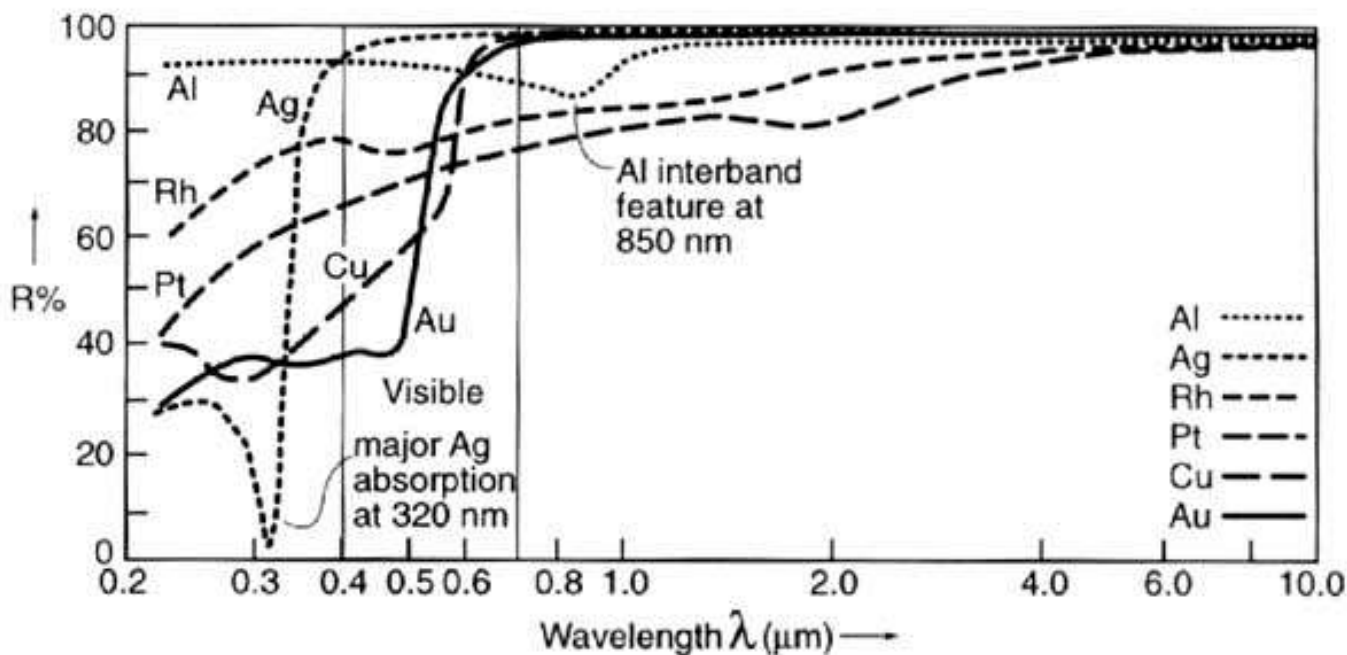
1660-1860 között pusztán kipolírozták a fémtükröket, amik így 60-66%-ban reflektáltak. Fényüket azonban hamar elveszítették és ilyenkor hosszas munkával újra kellett polírozni a felületet.

A kémiai ezüstözés bevezetése nem csak a reflexióképességet emelte 90%-ra, de elkerülhetővé tette az újrapolírozást.

Az 1930-as években megjelent alumínium-gőzölés a mai standard eljárás, bár alumínium mellett más fémek is párologtathatóak, pl. ezüst.



Az üvegre először egy kötőréteg kerül, aztán jön a fém reflexiós réteg, aztán ismét kötőréteg és a tetejére egy védőréteg (általában kvarc). A védőréteg csökkenti a karcok keletkezésének lehetőségét pl. a tisztítás során.



A különböző fémrétegek reflexiója különböző hullámhosszokon

Néhány elterjedt amatőr csillagász
mondás:

„Az a legjobb távcsöved, amit
legtöbbször használasz.”

„Minden távcső alkalmas minden fajta
objektum megfigyelésére, csak
különböző hatásokkal.”

„A méretnél legtöbbször fontosabb a
minőség.”

„Az olcsó és közepesen drága
termékeknél általában nem az
objektíven, hanem a többi alkatrészen
spórolnak a gyártók.”



1.8. Lyukkamera

(Nincsen benne lencse, mégis lehet vele fényképezni, mi az?)

A **camera obscura** (sötét kamra) vagy **lyukkamera lencsetag nélküli optikai eszköz, mely a környezet vizuális leképezésére szolgál. Egy minden oldalról fénytől védett doboz vagy szoba, melybe a fény egy apró lyukon keresztül hatol be. Ez a fény fordított állású képet rajzol ki a camera obscurán belül a lyukkal ellentétes oldalon.** Ibn al-Hajszam (Alhazen) arab tudós 997-ben Opticae Thesaurus című könyvében már írt a camera obscuráról. A fényképezés előtti időkben mint rajzolósi segédeszközt és mint fizikai, csillagászati eszközt tartották számon. **Digitális kamerákból is készíthetünk lyukkamerát!**



A Nap pályáívei december 22. és március 22. között (lyukkamerás szolarográf felvétel)

Lyukkamera számítása Canon 750D-re:

Adatok: A Canon 750D érzékelője egy APS-C méretű CMOS szenzor, ami 22,3 x 14,9 mm méretű (átló: 26,82 mm), 6000 * 4000 képpontot tartalmaz. Képpontméret (pixel pitch): 3,72 μm. A szenzor síkja 44 mm mélyen helyezkedik el a géptest elején lévő objektívbaionett peremétől mérve. Most képzeletben ide helyezzük a kilukasztott fóliát.

A 750D lyukkamera látószögének kiszámítása:

Ahol: d: a szenzor átlója (26,82 mm); f: a lyuk és a képérzékelő közötti távolság (44 mm)

MS Excelbe másolható képlet: $2 * \text{FOK}(\text{ARCTAN}(d / (2 * f))) = 2 * \text{FOK}(\text{ARCTAN}(26,82 / (2 * 44))) = 33,9^\circ$

Ideális lyukátmérő számítása:

Ha a kis részletek élessége a fontos, akkor a Raily-féle képletet érdemes használni. A Carlsson-féle érték a közepes és nagy térfrekvenciákon, tehát közepes és nagyméretű részletek élességénél ad jobb eredményt. (Canon 750 D-nél $f = 44$ mm)

Raily-képlet: $2 * \text{GYÖK}(f * \text{hullámhossz nanométerben}),$ azaz zöld fényben (550 nm): $2 * \text{GYÖK}(44 * 0,000550) = 0,31$ mm

Carlsson: $1,56 * \text{GYÖK}(f * \text{hullámhossz nanométerben}),$ azaz zöld fényben (550 nm): $1,56 * \text{GYÖK}(44 * 0,000550) = 0,24$ mm

Vignettáció számítása a szenzor sarkaira:

Az optikai tengely és a szenzor metszéspontjától bármely irányba eltávolodva az egy pixelre eső fénymennyiség csökken a cosinus 4. hatványával. A végeredmény azt adja meg, hogy az adott ponton (esetünkben a CMOS érzékelő sarkában) a fényerő hány százaléka a chip középpontjára eső fénynek. Ahol: r: a távolság a képérzékelő közepétől a kérdéses pontig (pl. sarok) (Canon 750 D esetén 13,41 mm); f: fókusz távolság (lyuk–érzékelő távolság) (Canon 750 D esetén 44 mm)

MS Excelbe másolható képlet: $\text{HATVÁNY}(\text{COS}(\text{ARCTAN}(r/f));4) = \text{HATVÁNY}(\text{COS}(\text{ARCTAN}(13,41/44));4) = 0,84$ (azaz 84%)

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Babcsán Gábor: Az amatőr távcsövek optikai teljesítményéről – Meteor Csill. Évkönyv 2004

MCSE: Amatőrcsillagászok kézikönyve (több kiadás)

https://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?bibcode=1990PASP..102..212S

http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/4_Muszerteknika/muszerteknika.htm

<https://www.csillagaszat.hu/tudastar/csillagaszati-eszkozok/osszetett-optikai-eszkozok-tavcsovek/01-a-lencses-tavcsovek/>

http://goliat.eik.bme.hu/~tothaf/Tananyagok/Letoltesek/hullamopt_2.pdf

<http://handprint.com/ASTRO/ae4.html>

<http://handprint.com/ASTRO/ae5.html>

https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/ch01.html#ch-I.1.1

<https://www.pinhole.cz/en/pinholedesigner/>

<http://www.quadibloc.com/science/opt04.htm>

<https://theskysearchers.com/viewtopic.php?t=27134>

<http://r2.astro-foren.com/index.php/de/9-beitraege/01-aeltere-berichte-auf-rohr-aiax-de-alles-ueber-apos/78-a005-c-thomas-back-apochromasie-grundlagen-4-11-06>

<https://shopping.rspb.org.uk/page/understanding-binoculars>

<https://srmastro.uvacreate.virginia.edu/ast511/lectures/optics2/optics2.html>

https://www.telescope-optics.net/semiapo_and_apo_examples.htm

<https://teleskop-austria.at/support/contents/kezdoknek.php#felbont>

http://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-02/mt-I-02.html

http://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-02/mt-I-02-3.html

http://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-03/mt-I-03.html

http://titan.physx.u-szeged.hu/~opthome/optics/oktatas/Hull_opt/ea_12.pdf

<https://tudastar.tavcso-mikroszkop.hu/a-csillagaszati-tavcsovek-tipusai.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Achromatic_lens

<https://en.wikipedia.org/wiki/Binoculars>

https://hu.wikipedia.org/wiki/Camera_obscura

<https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9ny>

<https://hu.wikipedia.org/wiki/Diffrakci%C3%B3>

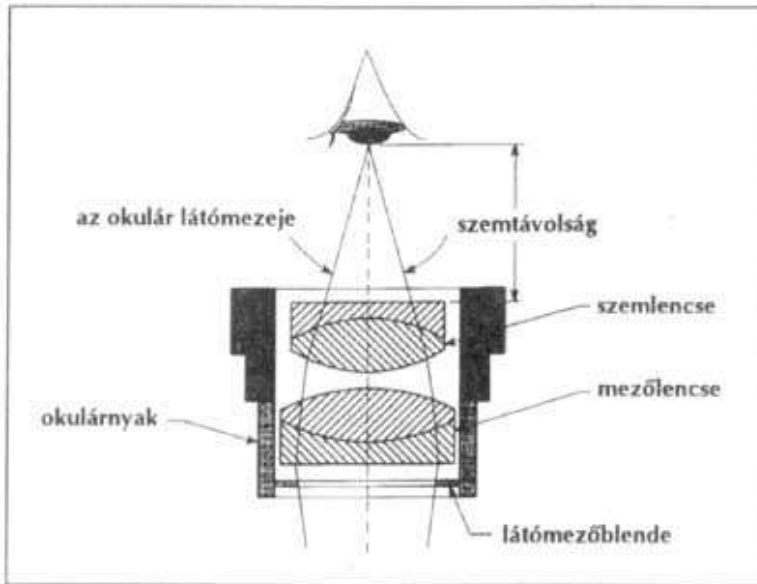
https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction-limited_system

II. Kisebb, de lényeges optikai elemek: okulár, fókusznyújtó és reduktor, zenittükör, szűrő

- gyakorlatias megközelítés csillagászati szakkörösök számára, belső használatra -
- A felhasznált és ajánlott szakirodalmak a témakör végén olvashatók! -



II. 1. Szemlencse, okulár (eyepiece) – „Az okulár a távcsöved fele.” (Al Nagler)



Az okulár (vagy szemlencse) a távcsövek optikai rendszerének az a része, amelyen keresztül közvetlenül megfigyeljük az objektív által létrehozott képet. Míg az objektív gyűjti össze a fényt, a kép végső felnagyítása, a látómező szélessége és a betekintési kényelem az okuláron múlik.

Az okulár lényegében egy összetett nagyító. Az objektív gyújtópontjában keletkező „valódi képet” az okulár egy olyan nagyított, virtuális képpé alakítja, amelyet az emberi szem képes élesen feldolgozni. Bonyolultabbak, mint az objektívek.

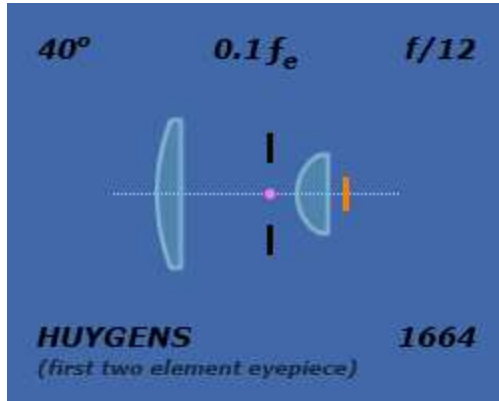
Míg az objektívek esetén maximum egy-két fokos szögben érkeznek be sugarak, addig az okulárok esetén akár 30-60 fokban érkező sugarakra is korrigálni kell a rendszert!

Figyelem!

Egy rossz minőségű okulár drasztikusan ronthatja egy kiváló távcső teljesítményét is, hiszen hiába rajzol éles képet a főtükör vagy objektív, ha az okulár optikai hibái (pl. színhiba vagy torzítás) lerontják azt.

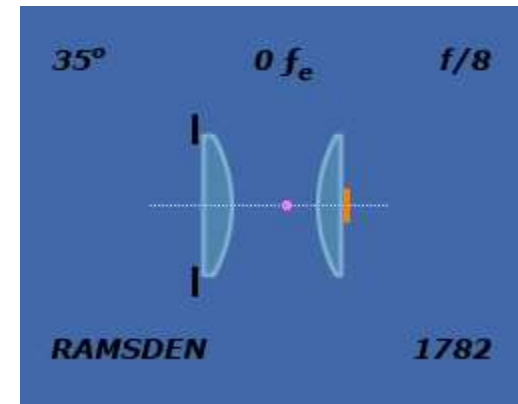


II.2. Néhány okulártípus

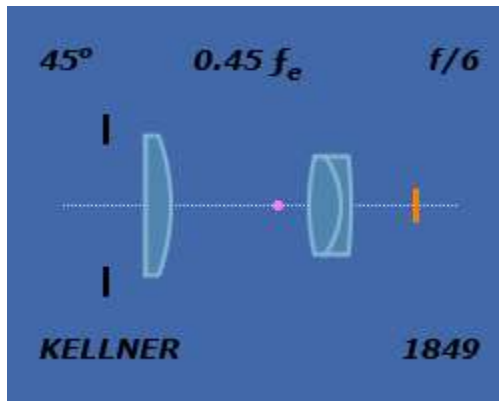


1662-ben Christiaan Huygens (1629-1695) kifejlesztette a nevét viselő szemlencsét: két síkkonvex koronaüveg lencséből áll, amelyek mindkét ívelt felülete az objektív felé néz. Ez egy negatív okulár, ami azt jelenti, hogy nem használható egyszerű nagyítóként. Minimálisra csökkenti a kromatikus aberrációt, de jelentős szférikus aberrációval, térgörbülettel és némi negatív (párna) torzítással és kómával, valamint enyhe negatív asztigmatizmussal is rendelkezik. Eredetileg 25° - 30° -os látszólagos látómezővel bírt, de Mittenzwey német optikus pozitív meniszkuszmezős lencse és plano konvex szemlencse segítségével 50° -ra szélesítette ezt. Ma is használják kis fényerejű távcsövekben.

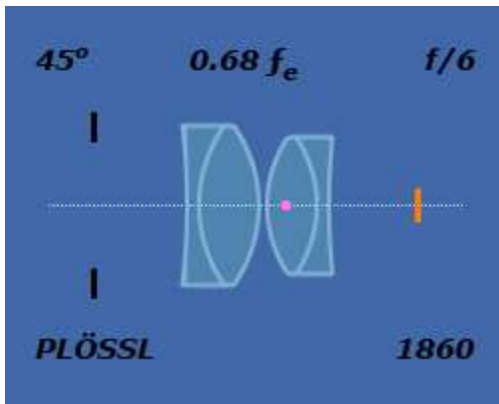
Jesse **Ramsden** (1735-1800) Dollond veje volt. Az okulár két, azonos gyújtótávolságú síkkonvex koronás lencséből áll, amelyeket gyújtótávolságuk összegének körülbelül $2/3$ -a választ el egymástól és a domború oldalaik néznek egymás felé. A Ramsden egy pozitív szemlencse, amely egyszerű nagyítóként is használható. Eredetileg 25° -os látszólagos látómezővel rendelkezett. Jobb optikai korrekcióval bír, mint a Huygens a gömbi és a tengelyen kívüli aberrációk tekintetében, bár némi oldalirányú kromatikus aberrációja van. Azonban a mezőlencse minden hibája (felületi karcolások és szennyeződések) megjelenik a fókuszban.



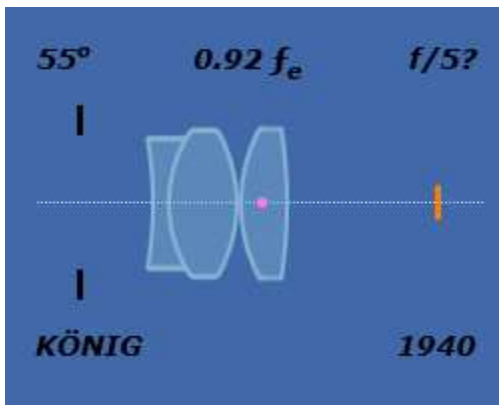
A Huygens és Ramsden okulárok nem tartalmazzak ragasztott lencsét, így kisebb távcsövekkel alkalmasak a Nap képének kivetítésére (pl. fehér papírra), azaz projekciós napészlelésre.



Carl **Kellner** (1829-1855) német matematikus és gépész által kifejlesztett okulár alapvetően egy Ramsden, amelyet úgy módosított, hogy a plano konvex szemlencsét akromatikus dublettre cserélte, ami hatékonyan kiküszöböli a kromatikus aberrációt. Valószínűleg ez a legrégebbi okulár-kialakítás, amelyet még mindig gyakran használnak amatőr csillagászok. Belőle fejlesztették ki a különböző aplanatikus okulárokat, amelyek mind a szférikus aberrációt, mind a kómát korrigálják. Az előzőekhez képest kisebb a hosszanti kromatikus aberrációja, alacsonyabb az asztigmatizmusa, a térgörbülete és a torzítása. Szellemképre hajlamos, de ez lencsebevonatokkal csökkenthető.

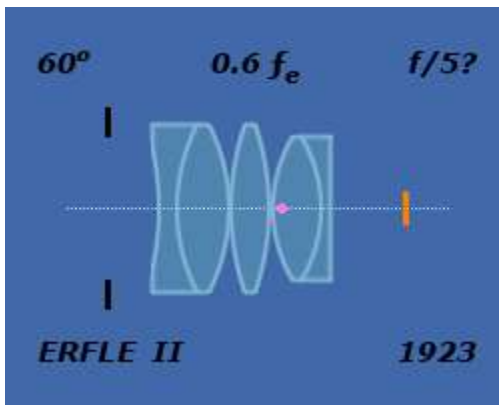
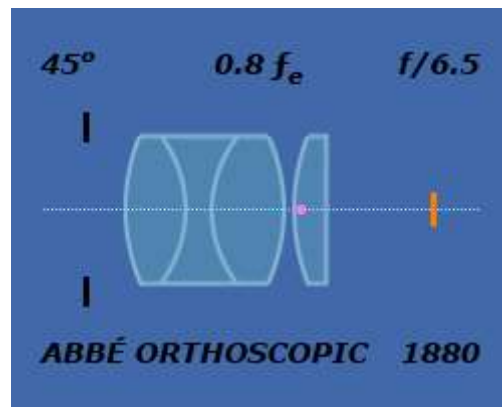


Georg Simon **Plössl** (1794-1868) osztrák tudományos műszerkészítő volt. Okulárja két egyforma akromatikus dublettből áll, amelyek úgy vannak elhelyezve, hogy a bikonvex koronaelemek egymás felé nézzenek és a gyújtótávolságuk nagyjából 20%-ára helyezkednek el. A szimmetrikus rendszer azonban hajlamos a szellemkép kialakulására, ezt a problémát úgy kezelik, hogy a ragasztott dubletteket szinte érintkezésbe hozzák. A Plösslben az oldalirányú színi hiba, a gömbi hiba és a kóma teljesen kijavított, a legnagyobb maradék aberráció a fókuszsík görbülete. Jellemzően 50° körüli látómezővel bírnak.

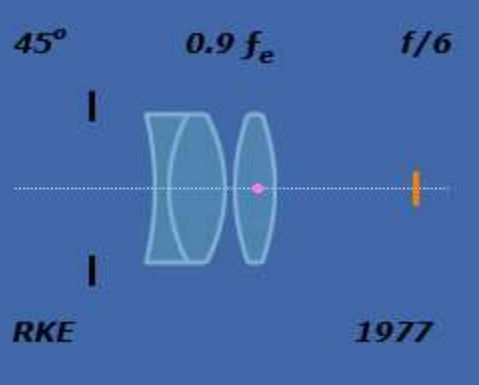


A Plössl rendszert Albert **König** 1939-ben továbbfejlesztette.

Orthoszkopikus okulár. Ernst Abbe (1840-1905) német matematikus és fizikus 1860-ban szabadalmaztatta az orthoszkopikus okulárt. Ez egy triplétt mezőlencséből áll, egyetlen bikonvex vagy plano konvex szemlencsével. Kómahibát nem, de kis gömbaberrációt és asztigmatizmust mutat. Ez volt az első okulár, amely szinte teljesen korrigált színkorrekciót és kiváló kontrasztot ad. Látómezeje 45° körüli.

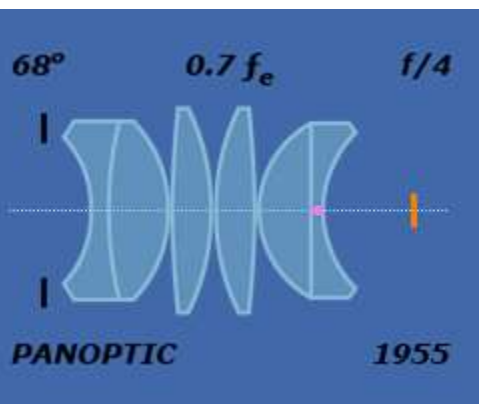


Heinrich **Erfle** (1884-1923) német fizikus, a Steinheil & Söhne és a Carl Zeiss cégek munkatársa volt. Ez az első igazán széles látószögű okulár (60°). Az 1923-ban szabadalmaztatott erfle okulár 5 elemből áll. Torzítás (hasonló látómezőszög esetén) hasonló az orthoszkopikus okulár torzításhoz.



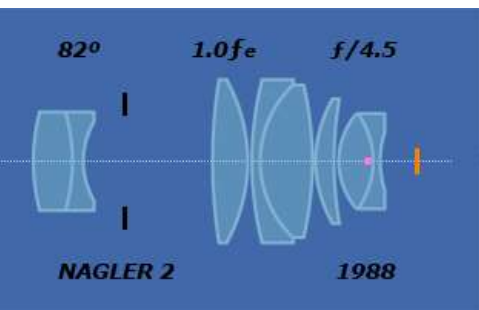
Rank Kaspereit Erfle (RKE) okulárt David Rank (1907-1981) fizikus tervezte 1979-ben az Edmund Scientific Company számára. Javítja a Kellner dizájnt azáltal, hogy szélesebb, élesebb mezőt, kiváló aberrációkorrekciót biztosít 45°-os látómező mellett.

Kaspereit okulár. David Rank módosította Erfle dizájnját és egy hatodik lencsével egészíti ki. Jelenleg az Edmund Optics kínálja, mint "RKE Wide Field okulár". A látómezőt 68°-ra növelték.



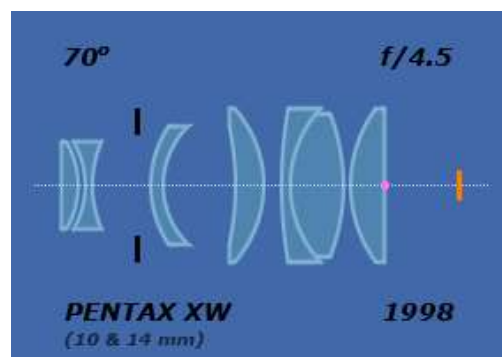
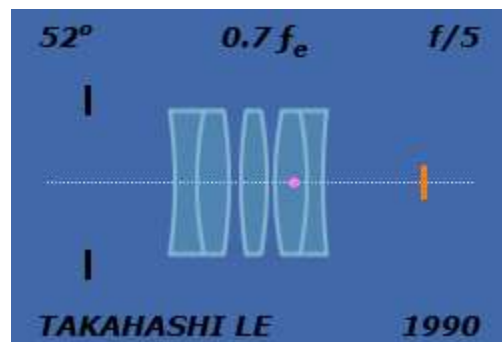
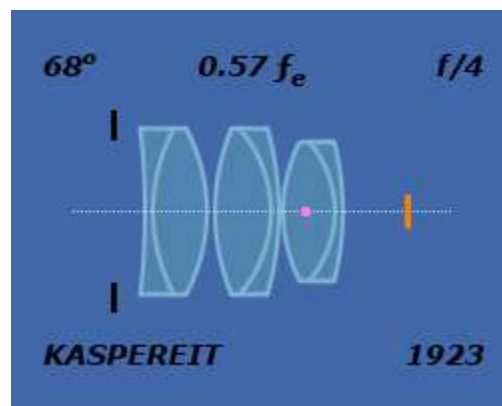
Köhler Panoptic. Ezt a kialakítást Horst Köhler fejlesztette ki a Zeiss számára 1955-ben. Az Erfle 2-1-2 kialakításból származik, de a központi pozitív lencsét két aszimmetrikus lencsére osztja. Ennek a kialakításnak a változatait Wright Scidmore és Hans Bertele is gyártotta, később pedig a Televue és a Takahashi is gyártotta Panoptic néven.

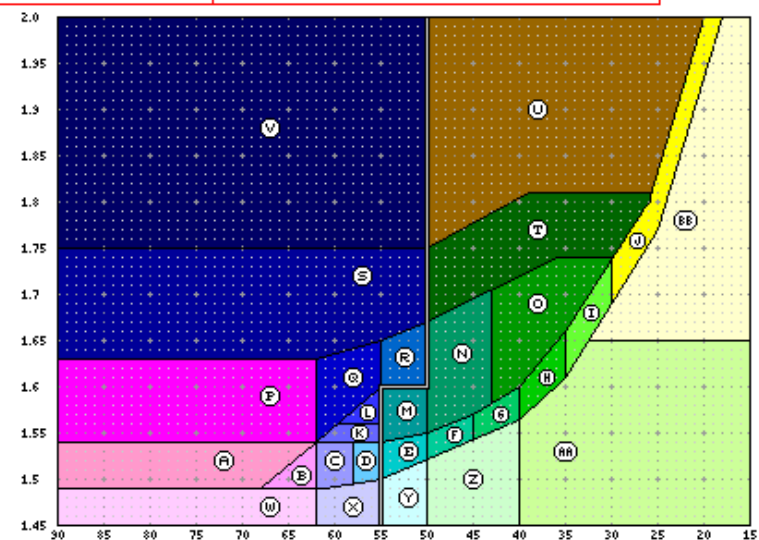
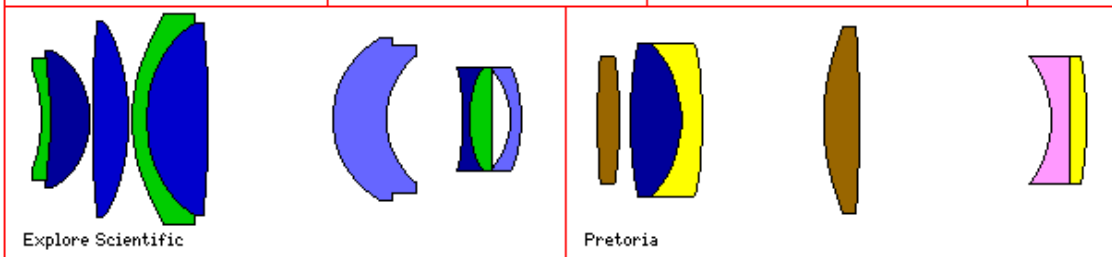
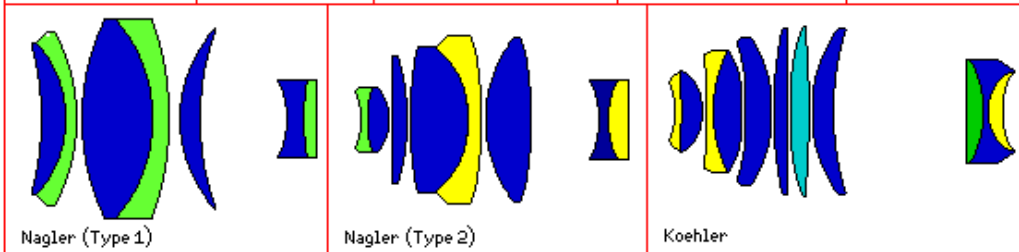
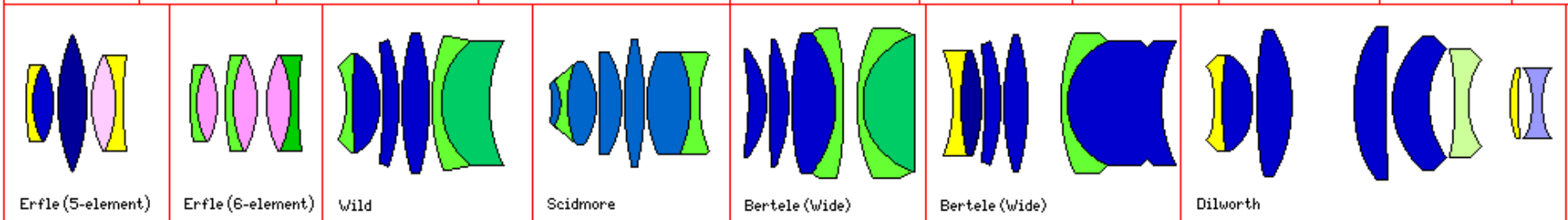
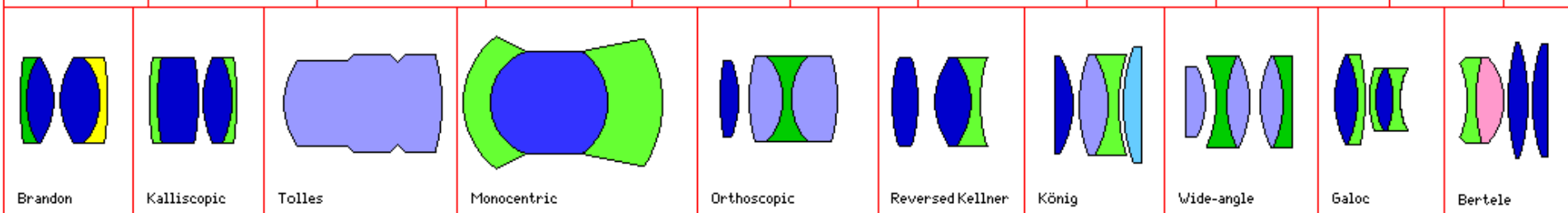
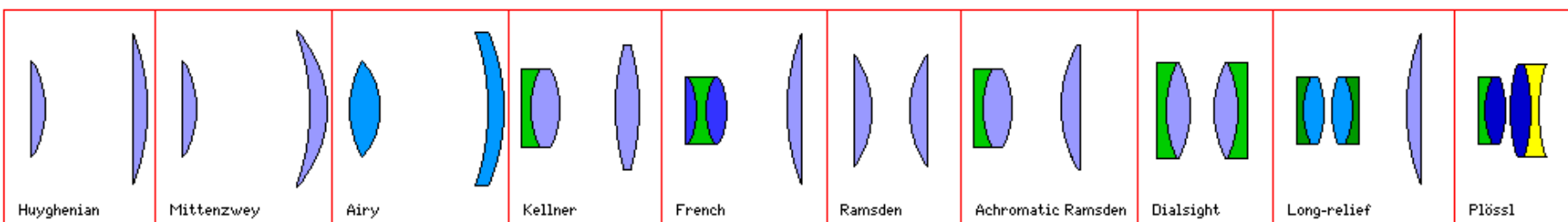
Takahashi LE. Az LE (nagy szemtávolságú) okulárok tervei a Takahashi tulajdonát képezik. Ennek a kialakításnak a látszólagos látómezeje 50° körüli.



Ai **Nagler** 1977-ben megalapította a Tele Vue-t. Az 1980-as években számos széles látószögű szemlencse-kialakítást szabadalmaztatott, amelyek különösen alkalmasak nagy fényerejű távcsövekhez. Ezek a drága okulárok mentesek a kóma és a szférikus aberrációtól. Látómezejük 82° körüli.

Pentax XW. A sorozat összes okulárja teljes mértékben korrigálja a kómát, a kromatikus és gömbi aberrációt, 70°-os látszólagos látómezt ad. A leghosszabb gyújtótávolságok enyhén pozitív térgörbülettel, míg a legrövidebb gyújtótávolságok negatív térgörbülettel rendelkeznek.







II.3. Az okulárok jellemzői

Gyújtótávolság (fókuszávolság, focal length): milliméterben adják meg.

Szemtávolság, pupillatávolság (eye relief): Az a távolság az okulár utolsó lencsétől, ahonnan még a teljes látómező látható. Általában az okulárok fókuszávolságával egyenesen arányos. Rövidebb fókuszú okulároknál jobban „bele kell nyomni” a szemünket az okulárba. Ez különösen a szemüvegeseknek fontos: nekik legalább 15-20 mm-es érték ajánlott a kényelmes betekintéshez.

Kihuzat (okulárnyak, barrel) mérete: A leggyakoribb szabványok a 1,25 hüvelyk (31,7 mm) és a 2 hüvelyk (50,8 mm). Utóbbit általában kis nagyítású, nagy látómezőjű mélyég-megfigyeléshez használják.

A távcső és az okulár adatai ismeretében számolhatók ki az alábbiak:

A távcső nagyítását az objektív és az okulár fókuszának a hányadosa adja.

Pl. egy 150/750-es reflektorba 10mm-es okulárt téve $750/10=75x$ nagyítást kapunk.

A kilépő pupilla mérete az okulárból a megfigyelő szemébe lépő fénysugár átmérője (mm). Számítása: a távcső objektívjének átmérőjét (D, mm) elosztjuk a nagyítással (N), azaz $K_p = D / N$.

Pl. egy 100 mm-es távcső 25-szörös nagyítással 4mm átmérőjű fénysugarat biztosít a szemünk irányába.

Legkisebb hasznos nagyítás:

Ha az okulárból kilépő fénysugár mérete nagyobb a szemünk aktuális pupillaátmérőjénél, akkor a fény egy része elveszik. Fiatalok pupillaátmérője max. 7-8 mm, 50 év felett max. 4-5mm éjszaka.

Legnagyobb hasznos nagyítás (általában): Az objektív mm-ben mért átmérőjének kétszerese.

A légköri nyugtalanság azonban ezt korlátozza. **A nagyítás növelésével a látott kép egyre fénysegyenletesebb lesz és az optikai hibák is felnagyítódnak!**

Hogyan tudjuk megmérni egy okulár fókusz távolságát?

Néha felbukkannak jó minőségű, bontott, egykori katonai okulárok.
De mennyi ezek pontos fókusz távolsága?

Mivel az okulárok soklencsés összetett optikai rendszerek (ellentétben egy egylencsés nagyítóval), ezért nem lehet egyszerűen a Nap fényét fókuszálva megmérni a valódi fókusz távolságukat. (Az egy tagból álló lencsét gyakran „vékony lencsének” a több tagból állókat „vastag lencséknek” is nevezik.)

Mérés menete:

Kiválasztunk egy kontrasztos objektumot, aminek a képét kivetítjük egy papírlapra, vagy egy vonalzóra. Lemérjük az objektum magasságát és távolságát az okulártól, valamint az okulár mögött keletkezett kép magasságát (mindent mm-ben).

A legjobb tárgy típus egy világos, egyenletes felület, jól meghatározott határokkal. Ilyen lehet egy jól megvilágított ablak, ami a sötétebb szobából nézve egyértelmű határokkal rendelkezik. Az objektum és az okulár közötti távolság legalább 50-100-szorosa legyen az okulár fókusz távolságának, mert így ideálisan kicsi lesz a kivetítéssel kapott kép (de nem mérhetetlenül kicsi). Erre az okulár széltorzítása miatt van szükség. Ha túl közel van az okulár a céltárgyhoz, akkor a keletkezett nagyméretű kép szélét „elhúzhatja” egy nem tökéletesen korrigált okulár és így a kapott érték hamis lesz.

Otthoni módszerekkel a közepes és hosszú fókuszú okulárok könnyebben mérhetők, a rövid fókuszúak által adott kép túl kicsi, nehezen mérhető pontosan (ott már minden tizedmilliméter nagyon számít).

Képlet:

$$F = d_{obj} / (1 + (h_{obj} / h_{image}))$$

ahol

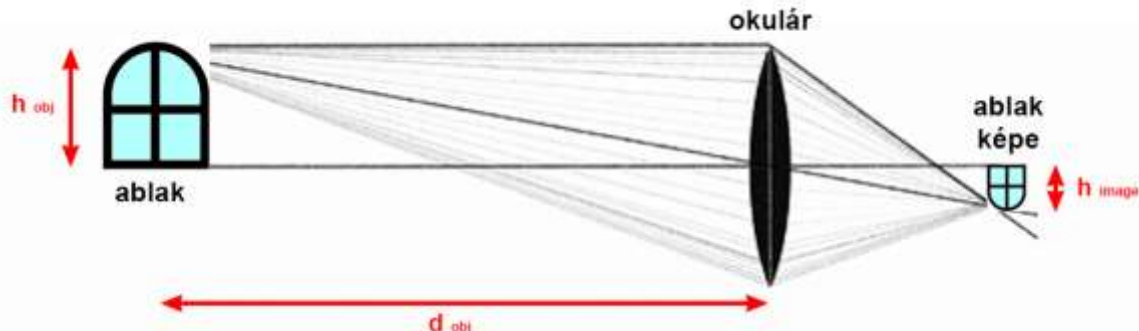
F az okulár fókusz távolsága (mm)

d_{obj} az okulár és a céltárgy távolsága (mm)

h_{obj} a céltárgy valódi magassága (mm)

h_{image} a céltárgy képének magassága (mm)

Példa: A ablak magassága 810 mm, az okulártól 2550 mm-re van és a kapott kép az okulár mögött 8 mm magas, akkor az okulár fókusz távolsága mintegy 25 mm (24,9mm). $F = 2550 / (1 + (810/8)) = 24,9$



A nagyítás változtatásával változik az objektumok felületi fényessége (és részletgazdagsága)

Egy felbontatlan fénypont – például **egy csillag** – képének fényessége **nem változik a nagyítás változtatásával**, legalábbis addig nem, amíg a nagyítás nem elég nagy ahhoz, hogy a csillag diffrakciós mintázata látható legyen.

Egy kiterjedt objektum felületi fényessége a nagyítás négyzetével **csökken** – a kétszeres nagyítás négyszeresére csökkenti a kép fényességét. A fényerő csökkentése végül nehezebbé teszi az objektumok és részleteik láthatóságát, de a **nagyítás növelése viszont nagyobbá teszi ezeket a részleteket**. A kettő közötti egyensúlyt kell megtalálni.

A legkisebb hasznos nagyítás alá csökkentve a nagyítást a kiterjedt objektumok felületi fényessége már nem fog növekedni. Ez változatlan marad, de a pontszerű források (például csillagok) képei halványabbak lesznek, ahogy a nagyítás tovább csökken.

Néha a fényerős távcsövekben érdemes extrém kicsi nagyítást használni az igen nagy kiterjedésű objektumok (pl. ködök) megfigyelésére, ami persze fénypazarlással fog járni, de esetenként a látvány megéri az árát.





Központi
árnyék:

A központi árnyék megjelenése az okulárban

(Ez egy központi kitakarással rendelkező távcsövekben
jelentkező kellemetlenség)

Ez az árnyék akkor lesz látható, ha a szem pupillájának mérete kisebbé válik, mint az okulárból kilépő fény nyaláb pupilla mérete (azaz elértük az aktuálisan legkisebb hasznos nagyítást).

Például nappal, amikor szűk a szem pupillája, a távcsőben pedig túl kicsi a nagyítás.

A központi árnyék mérete az okulár kilépő pupilla átmérőjének és a központi kitakarás (segédtükrök) százalékos arányának szorzatával számítható ki.

Példa:

Az okulár **kilépő pupilla mérete** az okulárból a megfigyelő szemébe lépő fénysugár átmérője (mm). Számítása: a távcső objektívjének átmérőjét (D , mm) elosztjuk a nagyítással (N), azaz $K_p = D / N$.

Pl. egy 100 mm-es távcső 25-szörös nagyítással 4mm átmérőjű fénysugarat biztosít a szemünk irányába

4 mm-es okulár kilépő pupilla és 25%-os központi kitakarás esetén az árnyék átmérője:

$$4 \text{ mm} \times 0,25 = 1 \text{ mm}.$$

Ebben az esetben az árnyék éjszaka nem fog megjelenni az okulárban, mert sötétben a pupillánk ennél nagyobb átmérőjűre tágul ki.

A látószög, látómező kiszámítása

Az okulár látószögét, azaz látszólagos látómezejét (Apparent Field of View, AFOV) akkor látjuk, ha csak az okulárba nézünk, távcső nélkül.

Az okulárok három kategóriába sorolhatók: (1) *szabványos szemlencsék* látszólagos látómezeje már 25°-tól körülbelül 1 radiánig (57°) terjed; (2) *a széles látószögű okulárok* látszólagos látómezeje 60°-tól 80°-ig terjed; és (3) *a szuperszéles látószögű okulárok* látszólagos mezője 80° felett van.

Számítása:

Okulár AFOV (fokokban) = $57,3 \cdot (\text{okulár diafragma blende átmérő mm-ben} / \text{okulár fókusztávolság mm-ben})$

Példa: Egy 27,2 mm-es blendével rendelkező 24 mm fókuszu okulár látszólagos látómezeje:

$$\text{AFOV} = 57,3 \cdot (27,2/24) = 64,9 \text{ fok}$$

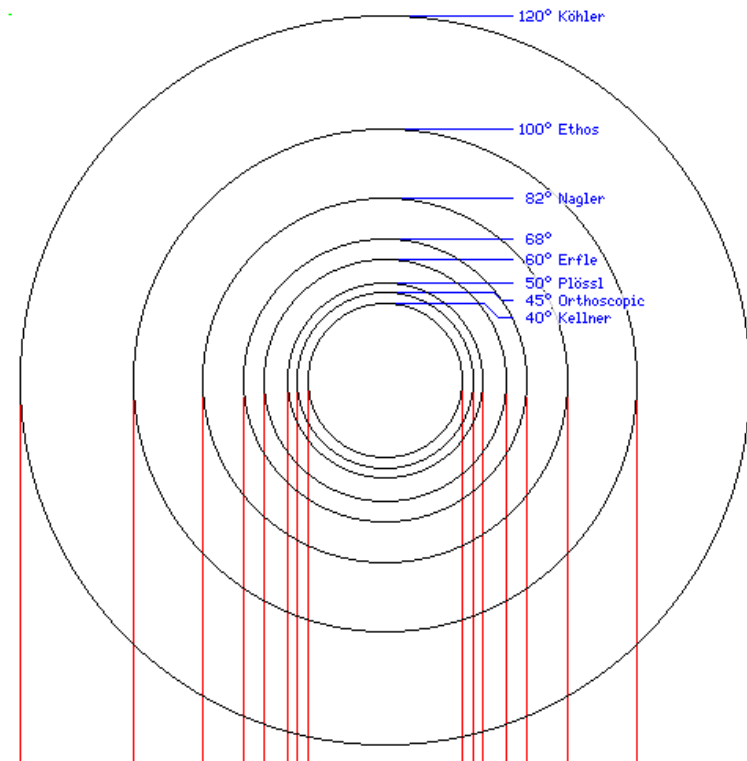
A valódi látómező (True Field of View, TFOV)

Ez a távcső és az okulár együttes látómezeje. Azt adja meg, hogy az okulárba tekintve az ég mekkora átmérőjű részét látjuk.

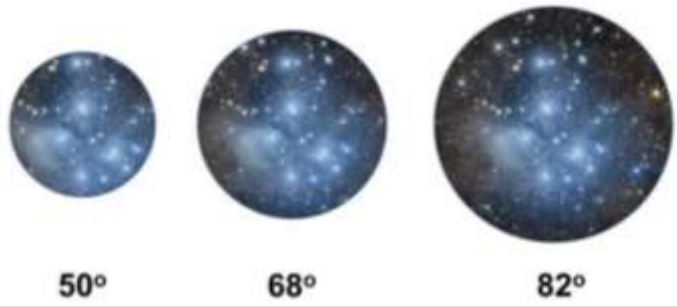
Számítása:

TFOV (fokokban) = okulár AFOV fokokban / nagyítás

Egy 50° látómezejű Plössl okulárral 100x nagyítás mellett $50/100=0,5$ fokot kapunk, tehát kb. egy teleholdnyi területet.



Különböző típusú okulárok
látószöge (AFOV)



A Fiastyúk látványa azonos nagyítás mellett
különböző látószögű (AFOV) okulárokban

Kis kitérő: Rich Field Telescope (RFT), azaz (csillagokban) gazdag látómezejű távcső

(NEM rövid fókuszú távcső)

Az RFT egy olyan távcső és okulár kombináció, ami a legtöbb csillagot mutatja meg egyszerre a látómezőben. Az RFT általában fényerős távcső és széles látómezejű okulárral. Különösen alkalmas a kiterjedt mélyég-objektumok és üstökösök megfigyelésére. Lehet lencsés vagy tükrös távcső, binokulár is.

Az egyszerre látott csillagok száma alig függ az átmérőtől! Való igaz, hogy egy nagyobb átmérőjű távcső halványabb csillagokat is megmutat, de általában hosszabb fókusztávolsággal és így kisebb látómezővel rendelkezik, ami korlátozza az egyszerre látható csillagok számát.

Tökéletes optikai minőséget feltételezve **akkor látjuk a legtöbb csillagot, amikor az okulár kilépő pupillája éppen megegyezik a sötéthez alkalmazkodott szem kilépő pupillájával.** Ennek számítása:
legkisebb hasznos nagyítás = $(1 / \text{szem pupilla max. átmérő}) * \text{távcső objektív átmérő (mm)}$ Ld. alábbi táblázatok!

A legkisebb hasznos nagyítással kapott valódi látómező (TFOV) függ az okulár látszólagos látómezejétől és az okulárkihuzat átmérőjétől!

Példa 6 mm-es (szem) pupillára:

Objektív átmérő (mm)	Sötéthez adaptálódott szem maximális pupillaátmérője (mm):				
	8	7	6	5	4
	A legkisebb, még hasznos nagyítás:				
50	6	7	8	10	13
60	8	9	10	12	15
70	9	10	12	14	18
80	10	11	13	16	20
90	11	13	15	18	23
100	13	14	17	20	25
120	15	17	20	24	30
150	19	21	25	30	38
200	25	29	33	40	50
250	31	36	42	50	63
300	38	43	50	60	75

Objektív átmérő (mm)	Min. hasznos nagyítás 6 mm-es pupillára:	Okulár látszólagos látómezeje (AFOV, fok):			
		50	60	82	100
		A távcső valódi látómezeje (TFOV, fok):			
50	8	6,0	7,2	9,8	12,0
60	10	5,0	6,0	8,2	10,0
70	12	4,3	5,1	7,0	8,6
80	13	3,8	4,5	6,2	7,5
90	15	3,3	4,0	5,5	6,7
100	17	3,0	3,6	4,9	6,0
120	20	2,5	3,0	4,1	5,0
150	25	2,0	2,4	3,3	4,0
200	33	1,5	1,8	2,5	3,0
250	42	1,2	1,4	2,0	2,4
300	50	1,0	1,2	1,6	2,0

A maximálisan elérhető vizuális valódi látómezőt pl. a fókuszírozó belső átmérője (blendezés) is befolyásolja! (Ld. 169-173. old.)

1,25"-os fókuszírozó/blende esetén:
~1547 / távcső fókusztávolsága (mm).

2"-os fókuszírozó/blende esetén:
~2636 / távcső fókusztávolsága (mm).

Példa: Egy 2"-os fókuszírozóval szerelt 600 mm fókuszú távcsővel elérhető maximális vizuális látómező:
~2636/600 ≈ 4,4 fok.

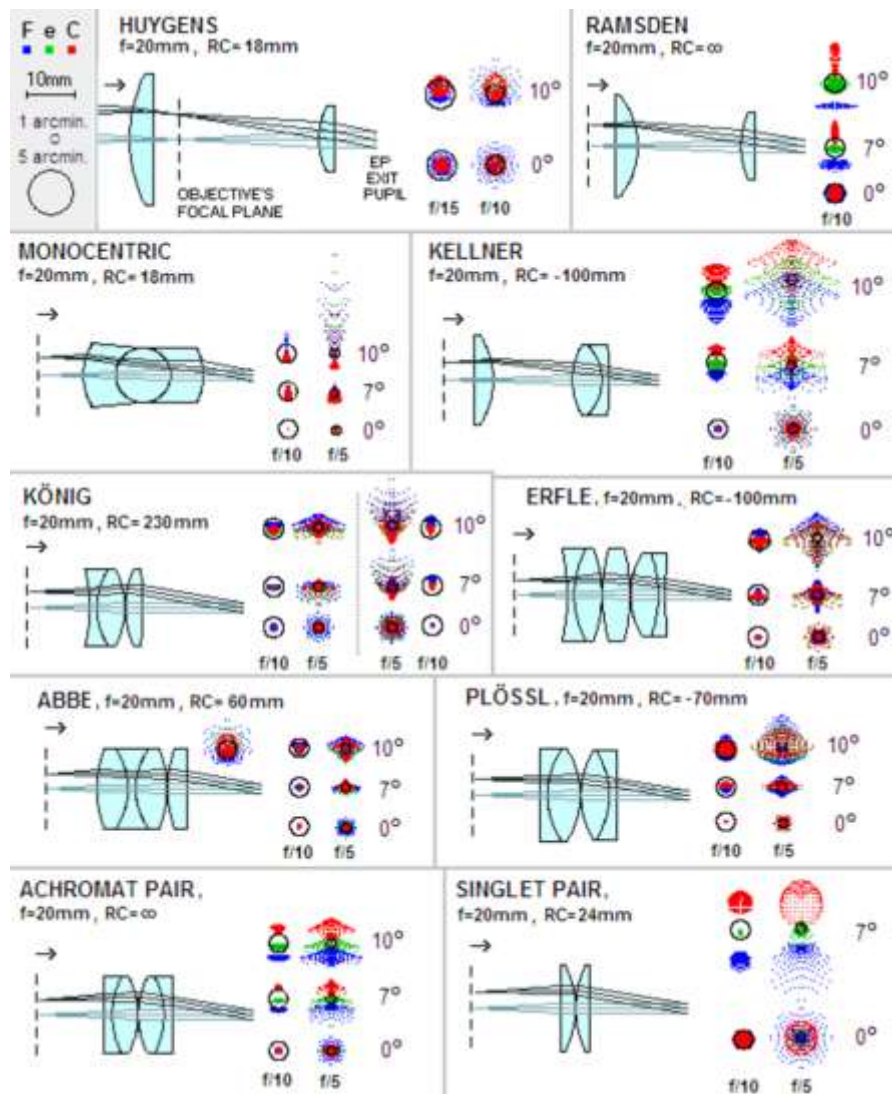
Type of Eyepiece	Color	Off-axis Image Angle (degrees)				
		0	10	20	25	30
Huygenian	G					
Ramsden	G					
Kellner	G					
Plössl	G					
Abbe	G					
König	G					
Erfle	G					

Type of Eyepiece	Color	Off-axis Image Angle (degrees)				
		0	10	20	30	40
Nagler	R					
f/5	G					
	B					
Nagler						

II.4. Az okulárok optikai hibái

Néhány klasszikus okulár **kóma**hibája (vízszintes tengelyen a látómező közepétől mért távolság látható fokban)

Az okulár kómahibája hullámhosszfüggő!



Az objektív és az okulár együtt is vizsgálható

Akár egymás hibáit javíthatják,
vagy fokozhatják!

Példa: Négy különféle távcső és egy 13 mm
fókuszú Nagler okulár kombinációja:

1 Arcmin. 5 Arcmin.		Off-axis Eyepiece Field Angle (degrees)				
		0	10	20	30	40
200 mm f/6 Newtonian + 13 mm Nagler	Objective	.				
	Eyepiece	.				
	Combination	.				
	Accommodation	0	0.13	0.35	0.60	0.35
200 mm f/6 Jones-Bird + 13 mm Nagler	Objective	.	.			
	Eyepiece	.				
	Combination	.				
	Accommodation	2.8	2.6	2.3	1.8	0
100 mm f/8 Fluorite Refractor + 13 mm Nagler	Objective	.	.	.	.	.
	Eyepiece	.	.			
	Combination	.	.			
	Accommodation	0.13	0	0.24	0.43	0
100 mm f/5.5 Four-Element Refractor + 13 mm Nagler	Objective	.	.	.	.	.
	Eyepiece	.				
	Combination	.				
	Accommodation	0	0.13	0.43	0.60	0.50

Az optikai tengelyben szinte minden
távcsővel jó képet ad bármely okulár.

Az optikai tengelyen kívüli képminőség a
kb. f /6 fényerejű távcsövekben néhány
szuperszéles látószögű okulárnál jobb
lehet, mint a mező közepén.

Kóma mérések és becslések a látómező közepén, köztes helyen és szélén f/4-es és f/10-es távcsövekben – néhány vitát kiváltó, de talán hasznos táblázat (ez itt csak néhány minta)

Nagyon sok okulárteszt: <https://astro--talks-ru.translate.goog/forum/viewtopic.php?f=32&t=1483&xtrsch=http&xtrsl=auto&xtrtl=en&xtrhl=en&xtrpto=wapp>

Comments :

1. in column F4 and F10 - sizes of evaluated/measured aberration spots in angular minutes; F4 - in condition of "fast" f/4 optics; F10 - in conditions of "slow" f/10 optics. My experience shows that if aberration spot is less then 10 angular minutes - quality of image could be evaluated as perfect.
2. in FOV center measurements are not reliable - it is mostly evaluation of light scattering on cornea and inside observer eyeball
3. "Diffr" means that diffraction pattern of star image easily represented by the eyepiece and not ruined. Sign (!) after the "Diffr" means noticeable distorted diffraction pattern, (!) - excellent. Any pattern
4. in column "Rest aberrations" main aberrations are listed in descending order: Ast. - astigmatism, FC - field curvature, CA - chromatic aberrations (mostly lateral), Coma - high order coma. For some eyepieces distortion was evaluated (in percents)
5. highlighting: **xxxxxxx** - excellent image quality, **xxxxxxx** - very bad image quality
6. in column "AFOV" - measured/evaluated actual field of view
7. Aberration spot marked like 10(15) means that whole aberration spot circle has diameter 15 angular minutes, while its main part (defining actual resolution) is 10 angular minutes

	FL	AFOV	F4	F4	F4	F10	F10	F10	Rest	
Eyepiece	mm	°/deg.	axis	zone	edge	axis	zone	edge	aberrations	Also known as
APM HDC, (KUO)	20	100	3	15	18		6	8	Ast., CA, FC	Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky; XWA
APM HDC, (KUO)	13	100	2-3	13	15	Diffr	Diffr	10	FC, CA +25%	Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky; XWA
APM HDC, (KUO)	9	100	2	10	18	4-5	8	12	Ast., CA, Coma +20%	Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky; XWA
APM HDC, (KUO)	7	100		12	6		7-8	7-8	FC, Ast., CA +23%	Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky; XWA
APM HDC, (KUO)	5	111	4	8	14	8	8	10	CA, Ast. +30%	Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky; XWA
APM HDC, (KUO)	3.5	110	5	18	30	Diffr	Diffr	16	Ast., CA +25%	Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics,

	FL	2Y	2w'	AFOV	F4	F4	F4	F10	F10	F10	Rest	
Eyepiece	mm	mm	°/deg.	°/deg.	axis	zone	edge	axis	zone	edge	aberrations	Also known
APM, HDC	20	34.7	99.4	100.2	3	15	18		6	8	Ast., CA, FC	XWA Lunt, TS-Optics , Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
TS-Optics, XWA	20(20.3)	34.2	98(96.5)	100.4		30(?)	30(?)				Ast., CA, FC	XWA Lunt, APM , Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
Sky Rover, XWA	20	35.2	100.8	99.6		7	11				Ast., Coma, CA	XWA Lunt, TS-Optics , APM, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
APM, HDC	13(13.1)	22	97(96.2)	100.5	2-3	13	15	diffr.	diffr.	10	FC, CA, 25%	XWA Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
Sky Rover, XWA	13	22.8	100.5	100.2		8	11				Ast., Coma, CA	XWA Lunt, TS-Optics, APM, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
APM, HDC	9(8.8)	15.9	101.2(103.5)	99.9	2	10	18	4-5	8	12	Ast., CA, Coma, 20%	XWA Lunt, TS-Optics, Sky rover , William Optics, Arsenal , Astro-tech, TecnoSky (
Sky Rover, XWA	9	15.8	100.6	98.4		5	10				Ast., CA	XWA Lunt, TS-Optics, APM, Sky Rover , William Optics, Arsenal , Astro-tech, TecnoSky (
APM, HDC	7	12	98.2	100.1		12	6		7-8	7-8	FC, Ast., CA, 23%	XWA Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
APM, HDC	5(4.9)	9	103.1(105.2)	111.2	4	8	14	8	8	10	CA, Ast., 30%	XWA Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal , Astro-tech, TecnoSky (
APM, HDC	3.5(3.4)	6.8	111.3(114.6)	110	5	18	30	diffr.	diffr.	16	Ast., CA, 25%	XWA Lunt, TS-Optics, Sky Rover, William Optics, Arsenal, Astro-tech, TecnoSky (
APM Hi-FW	12.5(13)	20	91.7(88.2)	78.7		14	25				FC, CA, -11%	Sky Rover HFW

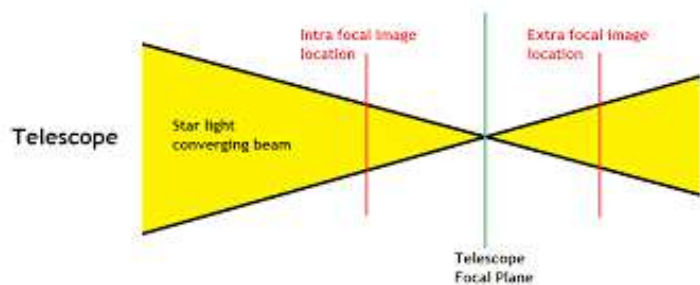
Separated zoom eyepieces into a separate table.

	FL	2Y	2w'	AFOV	F4	F4	F4	F10	F10	F10	Rest	
Eyepiece	mm	mm	°/deg.	°/deg.	axis	zone	edge	axis	zone	edge	aberrations	Also known
APM Super Zoom 7.7-15.4	15.4	19.2	71.4	65.7	diffr.	5	15	diffr.	diffr.	8	Ast., FC 0%	Sky Rover (
zoom..	14(14.2)	17.7	72.4(71.4)	65.4	diffr.	2.3	32	diffr.	diffr.	16	Ast., FC 0%	Sky Rover (
zoom..	13(13.2)	17	74.9(73.8)	66	diffr.	4	33	diffr.	diffr.	18	Ast., FC 0%	Sky Rover (
zoom..	12(12.2)	15.6	74.5(73.3)	66	diffr.	3	25	diffr.	diffr.	13	Ast., FC 0%	Sky Rover (

Kis kitérő: Az okulár (a távcső) fókuszálásának kérdése („mélysége”)

Mind a távcsőnek, mind a szemlencsének is van egy meghatározott fókuszfelülete. Az okulárkihuzattal (fókuszírozóval) történő élességállítás (fókuszálás) az **optikai tengely mentén történő távolságbeállítás, amely a kettő fókuszsíkot azonos pozícióba hozza.**

Az objektív fókuszfelületéhez képest elkülönítünk intra- és extrafokális képet:



Az objektív fókuszpontjának objektív oldalán található területet intrafokálisnak, vagyis „fókuszon belüli” területnek nevezzük. A szemlencse mozgatása ebben az irányban a kimenő sugarak konvergálását okozza, ami **növekvő pozitív dioptriabeállításnak felel meg, ami a távollátó szemek számára megfelelő.**

Az objektív fókuszpontjának a szemlencse oldalán található területet extrafokálisnak, vagyis „fókuszon kívüli” területnek nevezzük. A szemlencse mozgatása ebben az irányban a kimenő sugarak divergálását okozza, ami **növekvő negatív dioptriabeállításnak felel meg, ami a rövidlátó szemek számára megfelelő.**

A fókusz tűréshatára, azaz „mélysége”

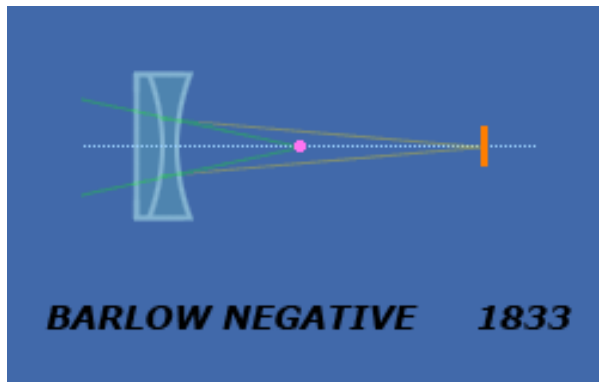
Ez az optimális fókuszpont előtti és mögötti távolság, amelyen belül a képminőség még elfogadhatóan éles. Az elfogadott szabvány szerint **a fény hullámhosszának 1/4-énél nagyobb eltérés okoz észrevehető hibát a képen (Rayleigh-kritérium).** Ez a fókuszponton belül és kívül is azonos távolságot jelent. **Képlet:**

$$\text{Fókusz mélység} = \pm 2 * \lambda * Fr^2$$

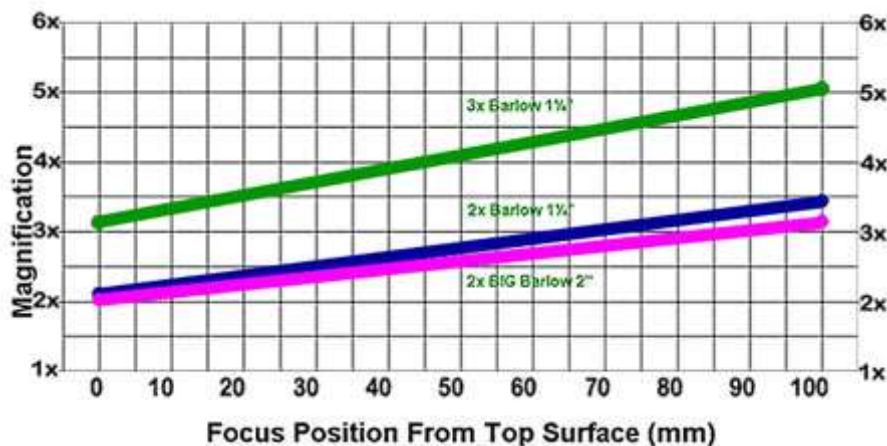
, amiben λ a fény hullámhossza, Fr a távcső fényereje.

Tehát a fókusz mélység arányos a relatív rekesznyílás négyzetével. Pl. zöld fényben ($\lambda = 550 \text{ nm}$) egy F/20-as távcső esetében ez $\pm 0,44 \text{ mm}$, míg egy F/4 távcsőben csak $\pm 0,018 \text{ mm}$.

II.5. Barlow(Smyth)-lencse



Peter Barlow (1776-1862), angol matematikus és mérnök a negatív akromatot George Dollonddal együtt fejlesztette ki, aki 1834-ben bemutatta a Királyi Társaságnak. **Charles Piazz Smythnek** (Skót királyi csillagász) használt először negatív akromatot fókuszsíkgörbület korrekciójára széles látómezejű objektív esetén. A Barlow(Smyth)-lencsét a 20. századi objektívtervek a széles látószög térgörbületének korrigálására alkalmazták (pl. Tronnier által 1943-ban kifejlesztett 110°-os katonai binokuláris szemlencse). **Az f/4-es parabola tükrök aberrációira korrigált „extrém széles látómezejű” (90°) okulárok is ezt használják** (pl. Al Nagler, Explore Scientific).



A nagyítás mértéke és három Barlow felülete és a képfelcsín (CCD chip) közötti távolság összefüggése

Barlow-lencsék segítségével távcsövünk fókuszát nyújthatjuk meg, vagyis nagyítását növelhetjük (1,5-5x).

A fókusznyújtás mértéke attól függ, milyen távol helyezzük az okulártól. Ha közelebb, akkor a kapott nyújtás kisebb lesz, ha távolabb, a nyújtás mértéke meghaladja a névleges értéket. (Ha egy 2x-es barlowot a zenittükör elé teszünk, akkor kb. 3x-os nagyítást ad.)

A Barlow-lencsék hátránya, hogy plusz optikai elemként jelentkeznek a fényútban, azaz kisebb-nagyobb mértékben rontják a képminőséget.

Speciális fókusznyújtó típusok:

Telecentrikus fókusznyújtók (Focal Extenders): Összetettebb, 4-lencsés felépítésűek (pozitív tagot is tartalmaznak). Míg a hagyományos Barlow-lencse egy egyszerű szórólencse, amely a fényút hosszától függően változtatja a nagyítást, a telecentrikus rendszerekben a nagyítás mértéke szinte független attól, hogy milyen messze van az okulár vagy a kamera a lencsétől. Nem okoznak peremsötétedést még nagy látószögű okulároknál sem. Használatuk során nem változik az okulár szemtávolsága.

Apokromatikus és ED Barlow-lencsék: Ezek a típusok a színhiba (kromatikus aberráció) minimalizálására fókuszálnak.

Kómakorrektoros Barlow-lencsék: Speciálisan fényerős (f/4-f/5) Newton-távcsövekhez fejlesztették ki őket. Egyszerre nyújtják a fókuszt (nagyobb nagyítást adva) és javítják a tükrös távcsövekre jellemző kómhíbat (a széleken elnyúlt csillagokat).

Változtatható nagyítású (Zoom) Barlow-lencsék

Rövid („Shorty”) Barlow-lencsék: Kifejezetten kompakt építésűek, hogy ne akadjanak el a zenittükörben vagy a távcső belsejében. Hátrányuk: A rövid fókusz miatt érzékenyebbek az optikai hibákra, és az okulár típusától függően ingadozóbb lehet a tényleges nagyításuk.

Fókuszreduktorok

A fókuszreduktorok pozitív (gyűjtő) lencsetagokat használnak a fény kúpjának összehúzására. **Kisebb nagyítást és szélesebb látómezőt eredményez.** Elsősorban hosszú fókuszú távcsövekhez (pl. Schmidt-Cassegrain vagy Makszutov-rendszerek) ajánlottak, hogy kiterjedtebb objektumokat is megfigyelhessünk felfotózhassunk. Sok reduktor egyben síkkorrektor (mezősíktó, flattener), vagy kómakorrektor is, ezért gyakran **egy-egy adott távcsőtípushoz tervezik őket**; nincs univerzális megoldás minden rendszerhez.



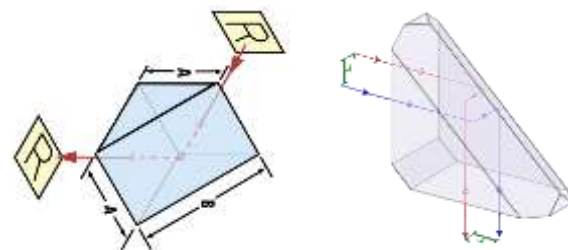
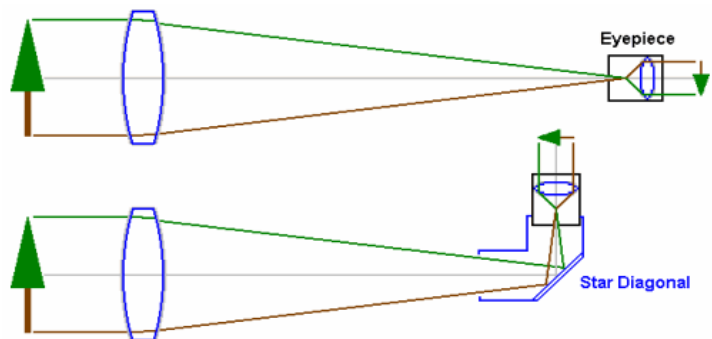
II.6. Zenitprizma, zenittükör (star diagonal)

A zenitprizmák és zenittükrök elsődleges feladata a fényút 90 fokos eltérítése, hogy lencsés, SC, vagy MC távcsővel kényelmesen megfigyelhessük az égbolt magasabban fekvő (zenit környéki) területeit is. **Mindkét eszköz oldalhelytelen**, azaz fent-lent irányban helyes, de jobb-bal irányban fordított képet ad.

Zenitprizma: A prizma egy tömör üvegtömb, amely a teljes belső visszaverődés elvén működik. **Fényerős (f/6 vagy gyorsabb) távcsövekben színhibát (kromatikus aberrációt) és szférikus aberrációt** vihetnek a képbe a vastag üveganyagon áthaladó, meredek szögű fénysugarak miatt. **Mivel nincs rajtuk oxidálódó fémréteg, rendkívül tartósak, nem öregednek el.**

A **zenittükör** egy házba foglalt precíziós síktükröt tartalmaz. Ennek bevonata általában alumínium. **A kommersz verziókban a fényvisszaverő képesség kb. 88-91%**; a modern, sokrétegű (dielektrikus) bevonat 99%-os fényvisszaverést tesz lehetővé. **Nem okoznak színhibát még a legfényerősebb távcsövekben sem**, ezért asztrofotózáshoz és fényerős apokromátokhoz ezeket ajánlják.

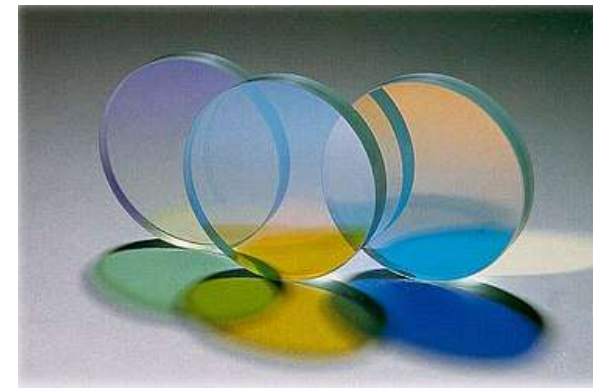
Földi megfigyeléshez ajánlott: Amici-prizmák egyenes állású képet adnak, nem fordítják meg a bal és jobb oldalt sem. **Csillagászati megfigyelésre kevésbé alkalmasak** (fényes csillagoknál egy **zavaró fénycsík** jelenhet meg bennük, ill. nagy nagyításoknál általában gyengébb kontrasztot és élességet adnak).



II.7. Szűrők

A csillagászati szűrőket az amatőr csillagászok használják az égi objektumok részletei kiemelésére és kontrasztjának javítására, akár vizuális, akár fotografikus megfigyelés során.

A legtöbb csillagászati szűrő úgy működik, hogy **blokkolja a látható fényt egy meghatározott sáv szélesség felett és alatt, ezzel jelentősen növelve a célzott hullámhosszok jel-zaj arányát**, és így az objektum részletesebbé és kontrasztosabbá válik.

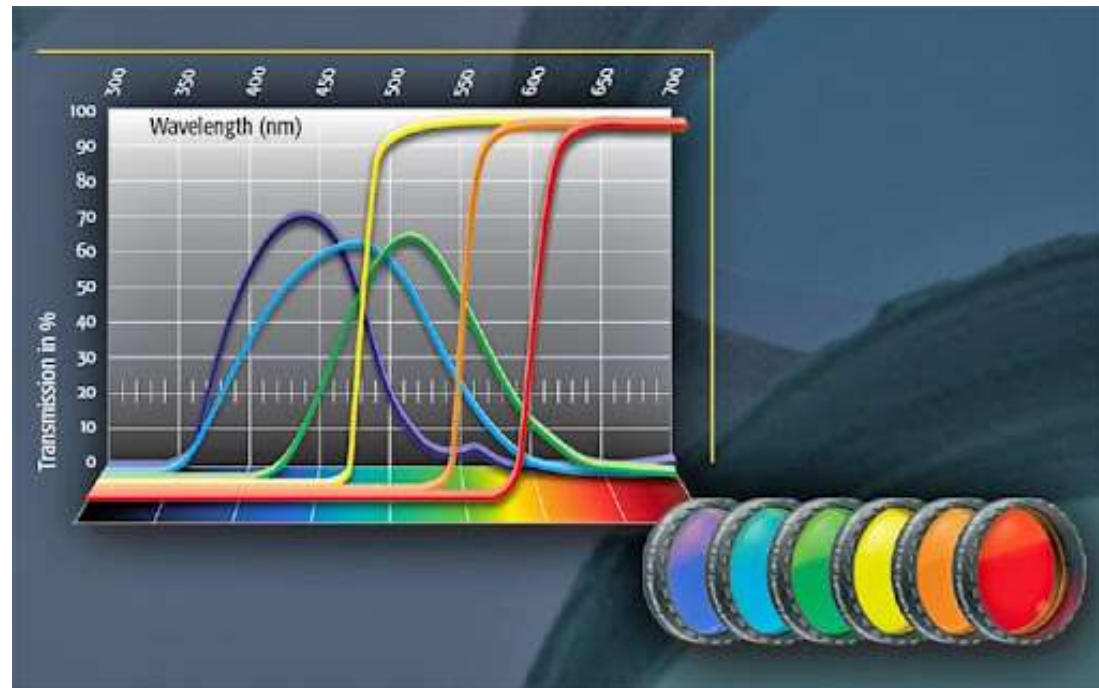


Neutrál (szürke) szűrő

Ezek minden hullámhosszt egyenletesen szűrnék (pl. holdszűrő, bizonyos napszűrők).

Szinszűrők

A szűrők segítségével növelhető a kontraszt, és javítható a Hold és a bolygók részletei. A látható spektrumú színek mindegyike rendelkezik szűrővel.



Színi hiba szűrők (jellemzően f/15-nél fényerősebb akromátokhoz)

A lencsés távcsövek kromatikus aberrációja által okozott lilás fényudvar csökkentésére használják.

Különböző színszűrők használhatósága a bolygók egyes jelenségeinek megfigyelésénél.

(szürke = nem használható,
sárga = jó,
zöld = nagyon jó,
narancs = legjobb)

Not Useful	Good		Excellent		Probably the Best	
Wratten Number and Color	Moon	Mercury	Venus	Mars	Jupiter	Saturn
#8 Light Yellow	With small telescopes			Maria, Dust clouds	Belts	
#11 Yellow-Green				Maria	Belts	Cassini Division
#12 Yellow			Improves contrast	Maria, Atmospheric clouds	Belts, Poles	
#15 Dark Yellow / Amber	Useful	Daylight	Low contrast clouds	Maria, Dust clouds, Polar regions	Belts, Poles, Festoons	
#21 Orange	Very useful	Daylight surface		Surface edge detail	Belts, Red spot, Festoons	Bands, poles
#23A Light Red		Daylight, Twilight		Maria and surface, Dust clouds, Polar caps	Blue clouds	Blue clouds
#25 Red		Daylight, Twilight	Upper clouds	Maria, Polar caps	Improves contrast	
#29 Dark Red			Terminator	Maria, Polar caps	Moon transits	Clouds
#38A Dark Blue			Upper clouds	Dust storms, Polar caps, Violet clearing	Belts, Red spot	Bands, rings
#47 Violet	Useful		Upper clouds	Clouds and haze above poles		Ring detail
#56 Light Green	Useful		Improves contrast	Dust storms, Polar caps	Red Spot	Bands, Poles
#58 Green	Useful		Improves contrast	Dust storms, Polar caps	Belts	White bands, Poles
#80A Blue	Very useful	Twilight surface	Upper clouds	High clouds, Ice caps	Rills, Festoons, Red Spot	Bands, Poles
#82A Light Blue	Useful	Twilight surface	Upper clouds	Polar caps, Surface	Belt transition	Band transition

Mély-ég szűrők típusai:

Szélessávú „fényszennyezés-csökkentő” szűrők (pl. CLS) (ábrán felül)

A szélessávú fényszennyezés-csökkentő szűrők arra hivatottak, hogy általánosságban kiszűrjék a városi fényszennyezés legzavaróbb hullámhosszait. Mivel az égi háttér ezáltal sötétebbnek tűnik, az objektum kontrasztosabbá, könnyebben észlelhetővé válik. Ezekkel legjobb eredményt emissziós ködök esetén érhetünk el.

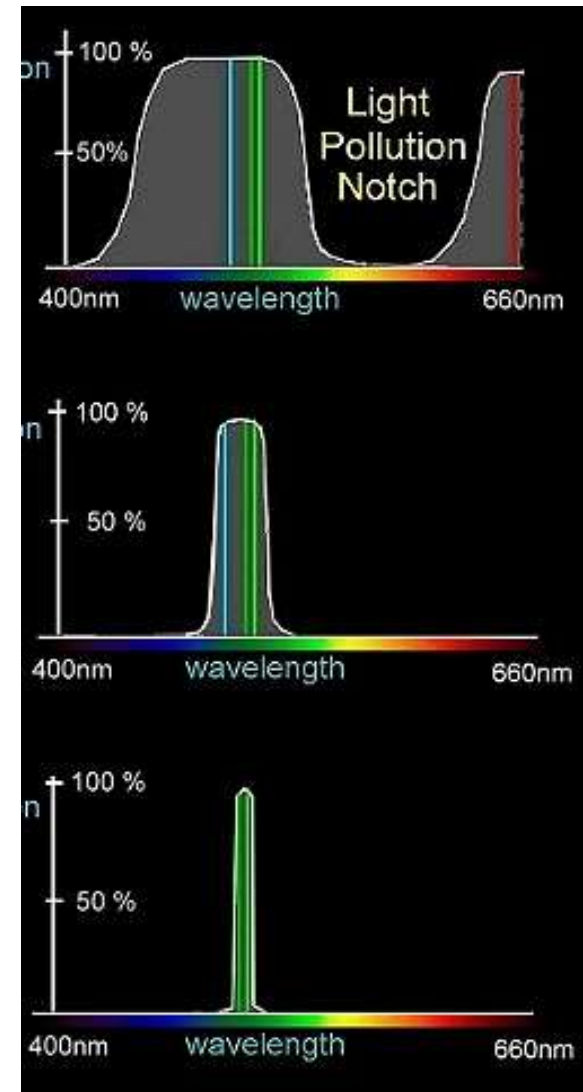
Keskenysávú „köd” szűrők (pl. UHC, OIII) (ábrán középen)

A keskenysávú szűrők csak az oxigén III és a hidrogén béta hullámhosszakot, illetve a köztük levő spektrumot engedik át. A széles sávú szűrőkhöz képest sokkal jobban javítják az emissziós ködök megjelenését.

Vonalszűrők (pl. H-Béta) (ábrán alul)

A vonalszűrők csak nagyon kis szélességben engedik át a bejövő fényt, jórészt csak egy-két szűk és specifikus hullámhossz-tartományban. Nagyon speciális célra használhatók.

A mély-ég szűrők sem „csoda” eszközök, nem tudják a városi fényszennyezést teljesen kiiktatni, sötét égen tudják a legnagyobb teljesítmény-növelést produkálni. Noha a különböző mély-ég objektumok másként „reagálnak” a mély-ég szűrőkre, általánosságban kijelenthető, hogy a galaxisok esetében CLS szűrők hatékonyak valamennyire, a különböző diffúz ködök esetében pedig az UHC és az OIII.



Felhasznált és ajánlott irodalom:

Babcsán Gábor: Az amatőr távcsövek optikai teljesítményéről – Meteor Csill. Évkönyv 2004

MCSE: Amatőrcsillagászok kézikönyve (több kiadás)

https://astro--talks-ru.translate.goog/forum/viewtopic.php?f=32&t=1483&_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=wapp

<https://agenaastro.com/articles/guides/choosing-a-color-planetary-filter.html>

<http://handprint.com/ASTRO/ae2.html>

<http://handprint.com/ASTRO/ae4.html>

<http://handprint.com/ASTRO/ae5.html>

<https://www.mira.org/ascc/pages/lectures/eyepiece.htm>

<http://www.quadibloc.com/science/opt04.htm>

<https://www.telescope-optics.net/eyepiece1.htm>

<https://theskysearchers.com/viewtopic.php?t=27134>

http://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-02/mt-I-02.html

http://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-02/mt-I-02-3.html

http://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-04/mt-I-04-4.html#antireflex

<https://tudastar.tavcso-mikroszkop.hu/antireflexios-bevonatok-a-gyakorlatban.html>

<https://tudastar.tavcso-mikroszkop.hu/tavcsoves-alapismeretek-a-barlow-lencse.html>

<https://tudastar.tavcso-mikroszkop.hu/mit-kell-tudni-a-mely-eg-szurokrol.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical_filter

III. A távcsövek képének „részletessége” és „élessége”, azaz a felbontás és kontraszt kérdése

- gyakorlatias megközelítés csillagászati szakkörösök számára, belső használatra -



TSP upper field photo courtesy of Ron Ronhaar and Todd Hargis, 2009

Célkitűzés:

Foglalkozunk:

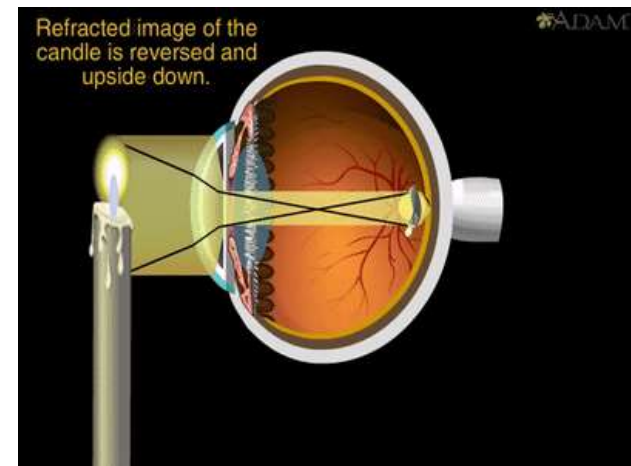
- a csillagok diffrakciós képével, azok megjelenésével a távcsőben, vagy a kamerában, valamint annak ábrázolásával (point spread function),
- a központi kitakarás (segédtükör) hatásával egy adott csillag képére,
- a távcsőben jelentkező kép kontrasztjával és annak ábrázolási módszereivel (Modulation Transfer Function és Edge Spread Function),
- a távcső felbontóképességével pontnak tekinthető kettőscsillagok esetén és annak elméleti, gyakorlati határaival,
- A fényes és halvány kiterjedt objektumok (pl. bolygók, mély-ég objektumok) részleteinek felbontási határával.

Most nem foglalkozunk (pedig a gyakorlatban nagyon fontos):

- a légköri áramlások, turbulenciák kialakulásával, méretével stb.,
- a szemünkkel (a látás problémakörével) és más (elektronikus) detektorok leképezési problémáival.



Az alábbiakkal most nem foglalkozunk részletesen :



III.1. Diffrakció (fényelhajlás) és a pontszórási függvény

Miért nem kiterjedés nélküli pontok a csillagok a távcsőben?

Ismétlés:

A diffrakció vagy elhajlás a fizikában egy olyan hullámtani jelenség, mely a hullám terjedése közben következik be, ha a **hullámhosszával összemérhető méretű akadállyal találkozik**.

A fény elhajlása résen

Ha egy elegendően keskeny rést rá merőleges beesésű, monokromatikus fénnel megvilágítunk, akkor a rés mögött elhelyezett ernyőn az egyetlen világos csík helyett világos és sötét csíkokat, azaz egy **interferenciaképet** kapunk.

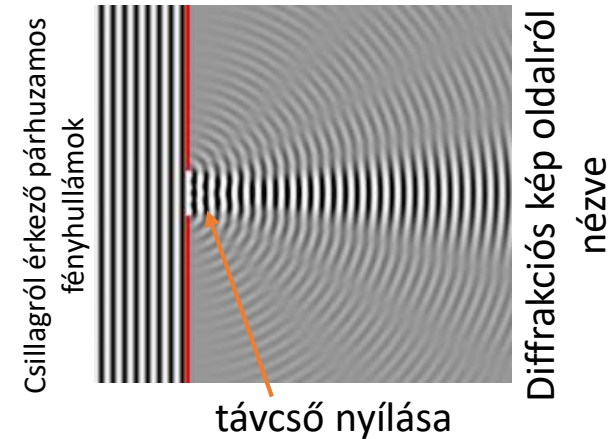
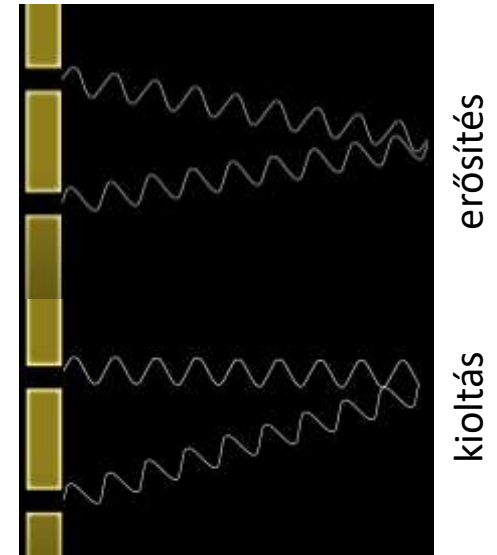
Az ernyő különböző pontjaira a különböző utakat megtevő elemi hullámok különböző fázisban érkeznek. **Azon pontokban, ahol a beérkező elemi hullámok éppen kioltják egymást, sötét foltot, ahol erősítik egymást, ott világos csíkot figyelhetünk meg.**

Fény elhajlása köralakú nyíláson (távcső!)

A fény hullámhosszával összemérhető sugarú kör alakú nyíláson áthaladó monokromatikus fény elhajlási képe **világos és sötét koncentrikus gyűrűkből (diffrakciós gyűrűkből) áll, középen világos koronggal (Airy-korong)**. A fény hullámhosszával összemérhető méretű részleteket tartalmazó mintán áthaladva tehát egy pont képe nem egy pont, hanem egy korong.

Airy-korongot **George Biddell Airy** cambridge-i professzorról nevezték el, aki **1834-ben írta le matematikailag a jelenséget**.

Interferencia:



A pontszórás függvény (point spread function, PSF)

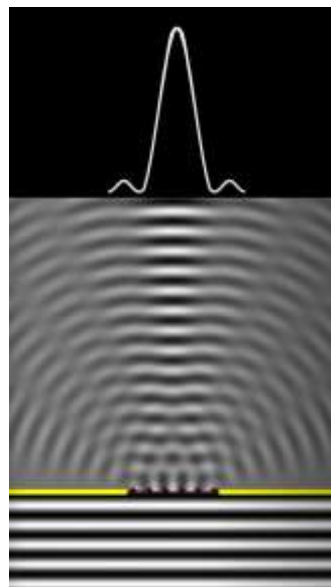
A PSF egy pontforrás aberrációmentes (optikai) rendszeren való áthaladás után kapott diffrakciós képének matematikai leírása, amely a kapott kép intenzitáseloszlását írja le. Megjeleníthetjük 1D-ben (vonallal), 2D-ben (sík) és 3D-ben (tér) is.

Az intenzitást (fényességet) mutathatja normalizálva, vagy logaritmikus skálán.

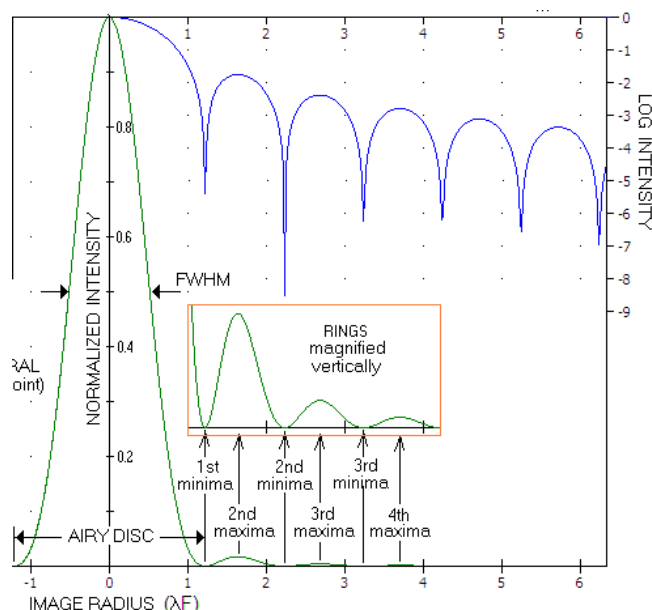
A diffrakciós kép részeinek méretét megadhatja szögértékkel (pl. ívmásodperc, radián), vagy abszolút mértékben (pl. mikrométerben a kamera érzékelő chipjén).



Megjelenítése 1D-ben
(piros metszetsvonal a
fókusz síkban)



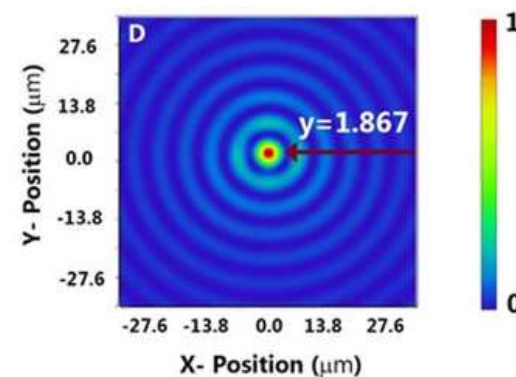
Intenzitás (függőleges tengely)
megjelenítése normalizált (zöld) és
logaritmikus (kék) skálán:



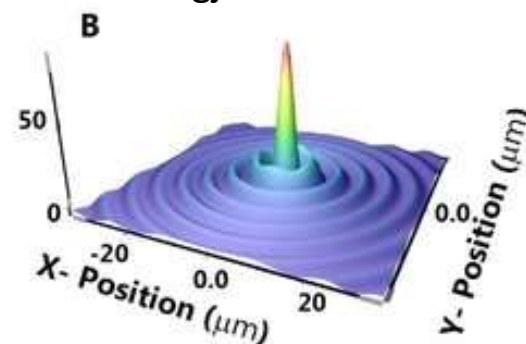
Megjegyzés:

Egyetlen vonal fényeloszlás függvényét **vonalszórás függvénynek**, egyetlen élét pedig **élszórás függvénynek** nevezzük. A rendszerben kapott képen az eredetileg nagyon éles sötét-világos területek határa átmenetszerűen jön létre. Annál rosszabb felbontású, életlenebb egy kép, minél szélesebbek ezek az átmenetek.

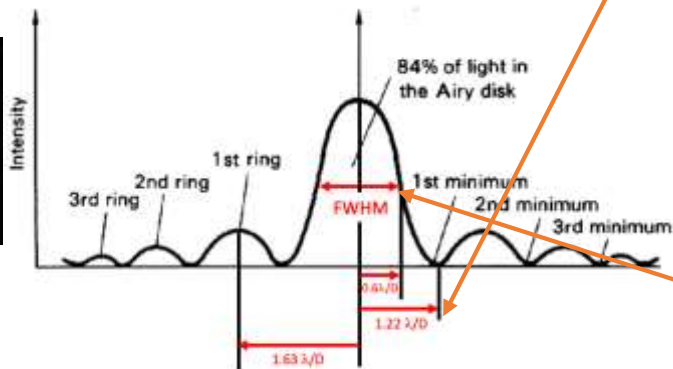
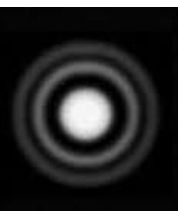
Megjelenítése 2D-ben (optikai tengelyre
merőleges metszet a fókuszpontban):



Megjelenítése 3D-ben:



Milyen méretű egy kitakarás nélküli, tökéletes távcsőben egy átlagos fényességű csillag diffrakciós képe?



Az Airy-korong átmérője (az első sötét minimum gyűrű közepéig tart)

Átmérője ívmásodpercben:

$$\Theta = (2,44 * \lambda / D) * 206265$$

ahol

Θ (theta) korongátmérő ívmásodpercben

λ (lambda) a fény hullámhossza mm-ben

D az objektív átmérője mm-ben

Minél nagyobb a távcső átmérője, annál kisebb az Airy-korong, ill. nagyobb a távcső elméleti szögfelbontása. (A 2,44-es korrekciós szám értelmezését ld. 85. oldalon.)

Példa:

Mekkora az Airy-korong teljes átmérője egy 279,4 mm (11 inch) átmérőjű távcsőben 550 nm-es (0,00055 mm), zöld hullámhosszon?

$$\Theta = (2,44 * 0,00055 \text{ mm} / 279,4) * 206265 = 0,99 \text{ ívmásodperc}$$

Az Airy-korong félérték-szélessége (Full width at half maximum, FWHM)

Átmérője ívmásodpercben:

$$\text{FWHM} = (1,02 * \lambda / D) * 206,265$$

ahol

FWHM ívmásodpercben

λ (lambda) a fény hullámhossza mm-ben

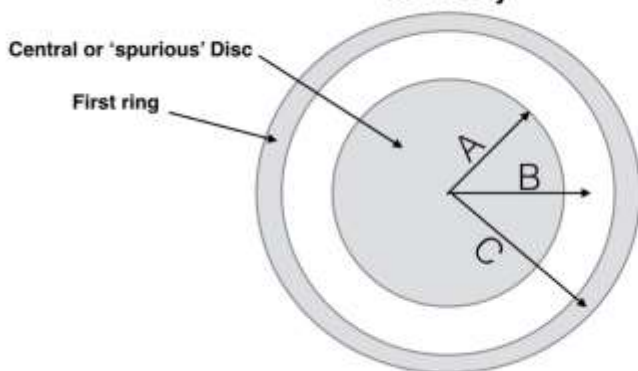
D az objektív átmérője mm-ben

Példa:

Mekkora az Airy-korong félérték-szélessége egy 279,4 mm (11 inch) átmérőjű távcsőben 550 nm-es (0,00055 mm), zöld hullámhosszon?

$$\text{FWHM} = (1,02 * 0,00055 \text{ mm} / 279,4) * 206265 = 0,414 \text{ ívmásodperc}$$

The Diffraction Pattern in Theory



Radius A depends on the magnitude.

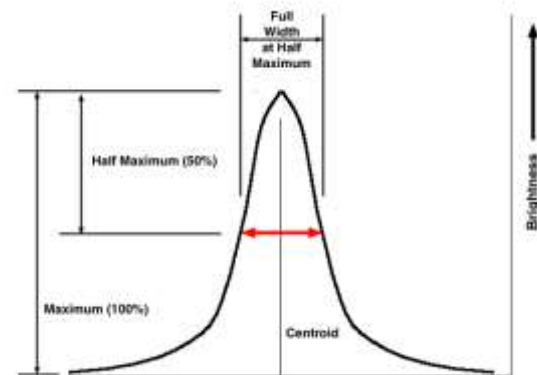
Radius B, to the first minimum is given by 138/Dmm (green light) Rayleigh Limit

100mm	— 1.38"
150mm	— 0.92"
200mm	— 0.69"
250mm	— 0.55"
300mm	— 0.46"

Radius C, to the first maximum is given by 163/Dmm (green light) Thickness determined by magnitude...

100mm	— 1.63"
150mm	— 1.12"
200mm	— 0.82"
250mm	— 0.65"
300mm	— 0.54"

Mi az a félérték-szélesség (FWHM)? Képzeltben elvágjuk az Airy-korong „oldalnézeti intenzitás-hegyét” félmagasságban és megmérjük, hogy ott milyen széles (piros nyíl).

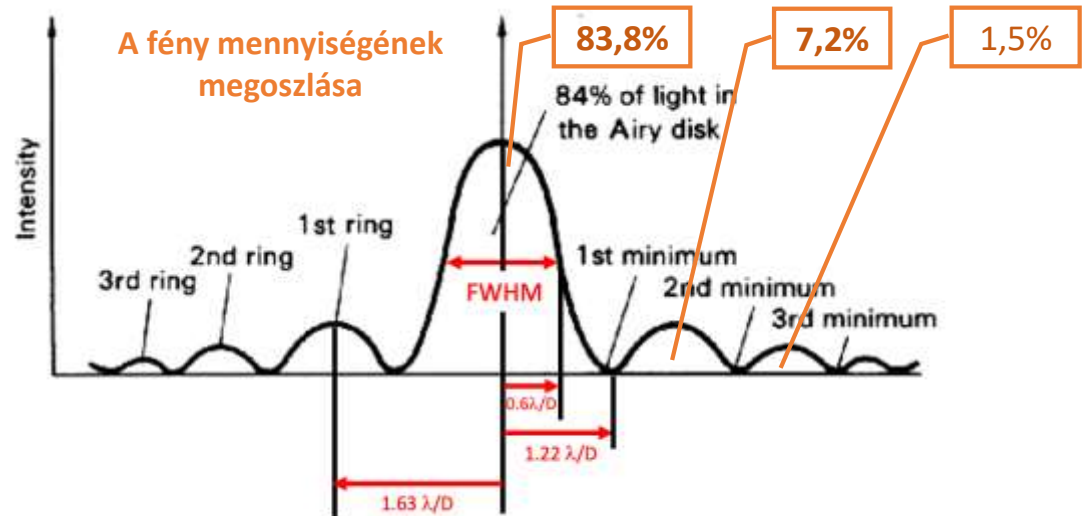
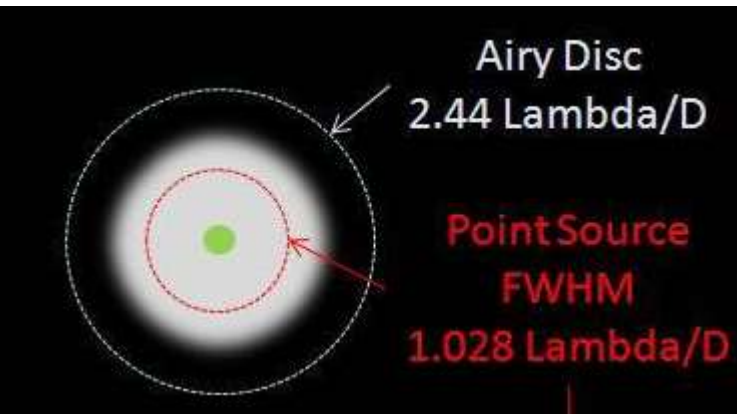
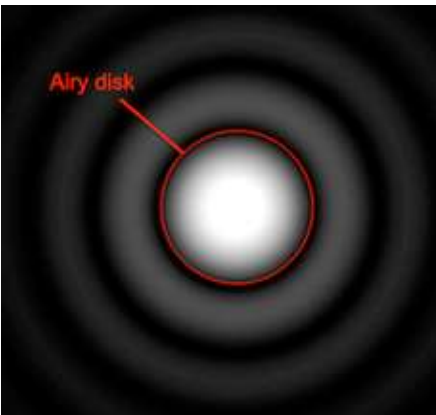


Egy kitakarásmentes, tökéletes objektív diffrakciós kép elemeinek adatai (laboratóriumi körülmények között)

A diffrakciós kép összetevő eleme	k korrekciós tényező λ/D radiánban (ld. 85. oldalon)		Fényesség a maximumhoz képest	A befoglalt fénymennyiség az egész százalékában
	Az összetevő elem sugara	Az összetevő elem átmérője		
középpont	0	0	100%	0
Airy-korong FWHM	0,514	1,028	50%	50,0%
első sötét gyűrű közepe	1,220	2,440	0%	83,8%
első fényes gyűrű közepe	1,635	3,270	1,75%	
második sötét gyűrű közepe	2,233	4,466	0%	91,0%
második fényes gyűrű közepe	2,679	5,358	0,42%	
harmadik sötét gyűrű közepe	3,238	6,476	0%	93,8%
harmadik fényes gyűrű közepe	3,699	7,398	0,16%	
negyedik sötét gyűrű közepe	4,241	8,482	0%	95,3%

Houston-határ (kb. Dawes-határ is) →

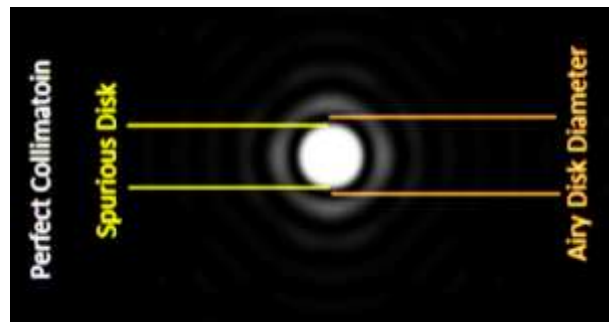
Airy-korong = Rayleigh-határ →



Vizuális megfigyelők figyelmébe:

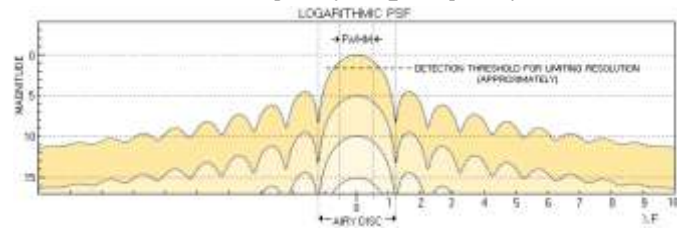
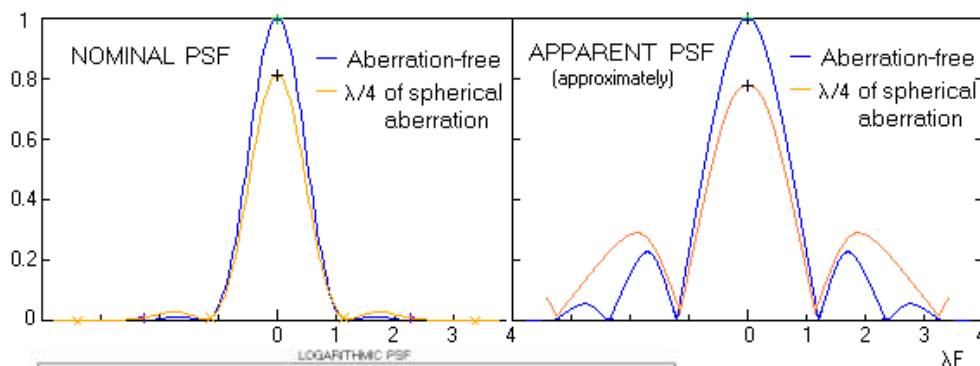
1. Mekkora nagyítás szükséges ahhoz, hogy a távcsövünkkel elérjük az elméleti felbontást?

A szükséges nagyítás kb. megegyezik a rekesznyílás milliméterben megadott átmérőjével, azaz pl. egy 305 mm átmérőjű távcső kb. 305-szörös nagyításnál éri el ezt a határt. (Feltételezve, hogy mind a szemünk, mind a távcsövünk, mind a légkör állapota tökéletes!) (A maximális nagyítás ennek kb. kétszerese.)



2. A szemünk általában nem a teljes Airy-korongot érzékeli (ami az első sötét gyűrű közepéig tart), hanem csak annak fényesebb középső részét, amit „hamis korongnak” (spurious disk-nek) hívnak. Ennek átmérője csupán az Airy-korong 45-60%-a a gyakorlati megfigyelések alapján. Ez hatással van a felbontásra is.

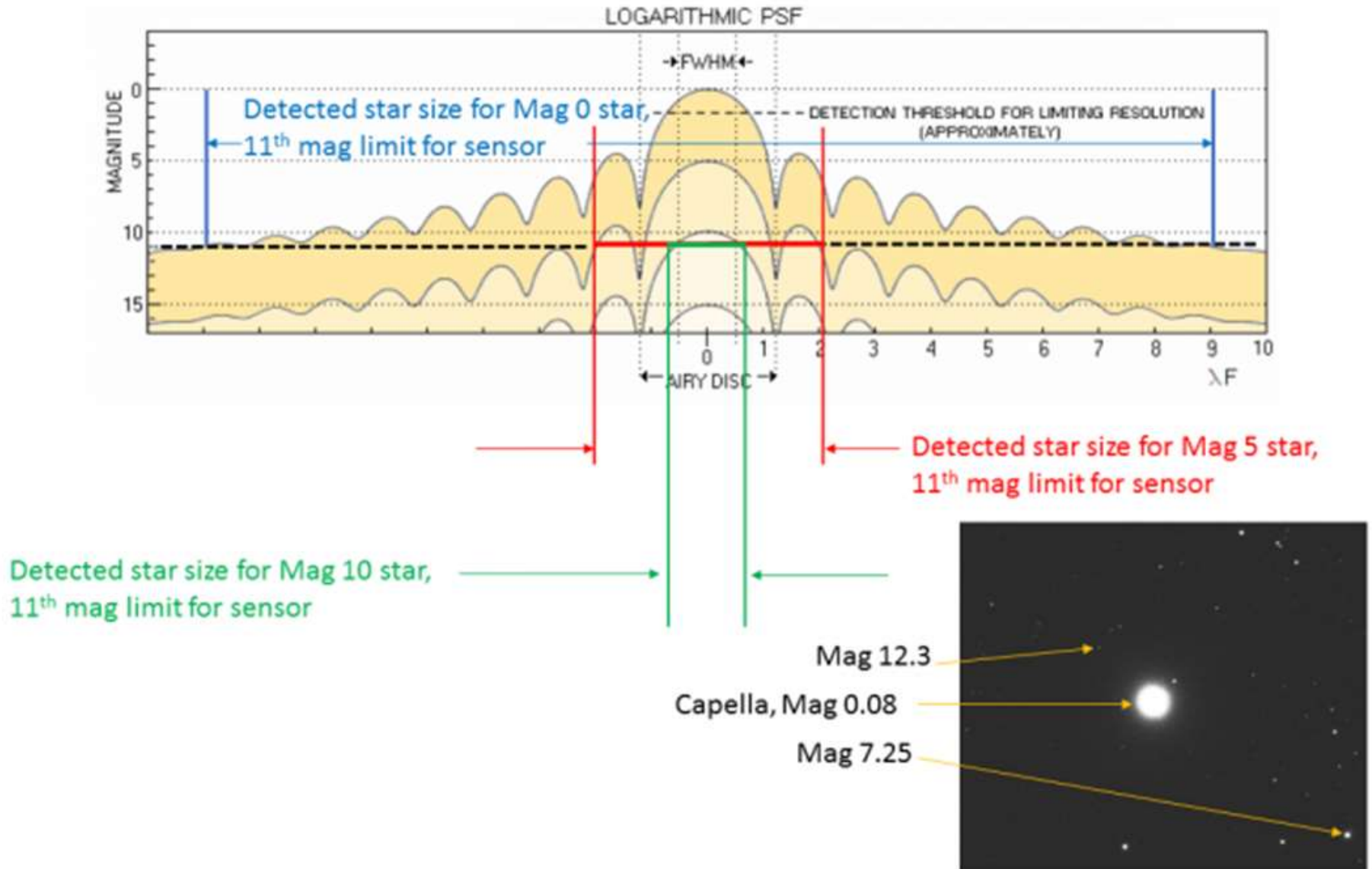
3. Minél nagyobb a távcsövünk átmérője, annál jobban zavarja a leképezést a légkör nyugtalansága. Jó esetben a szemünk képes kiválogatni a tizedmásodpercnyi nyugodt pillanatokban összeálló diffrakciós képet a zajból és pl. el tudjuk dönteni, hogy egy kettőscsillag fel van-e bontva vagy nem.



Logaritmusos
PSF ábrázolás

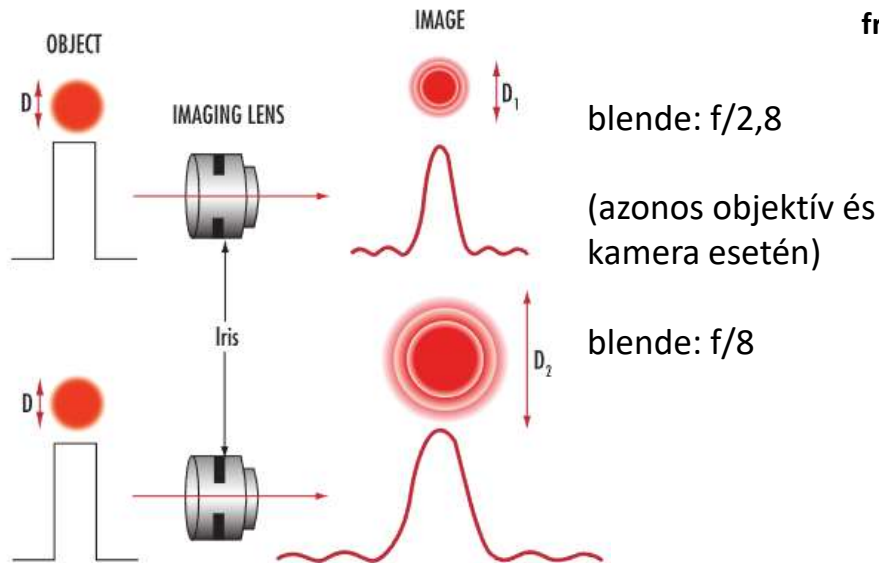
4. A digitális kamerák (ábrán balra) és a szemünk (jobbra) máshogyan érzékelik a fény megoszlását a diffrakciós gyűrűkben. A szemünk logaritmikus érzékelése miatt a diffrakciós gyűrűket fényesebbnek érzékeljük, mint a kamerák. A valóságban a középső csúcs és az első gyűrű maximuma közötti intenzitáskülönbség 57:1, azonban a szem a csúcsot csak kevesebb, mint kétszer fényesebbnek látja az első gyűrűnél!

Minden csillag körül keletkezik több diffrakciós gyűrű is, csak a halványabb csillagoknál a külső gyűrűk felületi fényessége túl alacsony és ezért nem érzékeli azokat a szemünk vagy a kameránk (logaritmikus skála).



A diffrakció és így a diffrakciós kép mérete növekszik a fényerő csökkenésével!

(Asztrofotósok figyelmébe ajánlom!)



Az Airy-korong átmérője mikronban (pl. CCD-n):

$$d = 2,44 * \lambda * fr$$

ahol

d korongátmérő mikronban

λ a fény hullámhossza mm-ben

fr a távcső fényereje

Az Airy-korong félérték-szélességének átmérője mikronban (pl. CCD-n):

$$FWHM D = 1,02 * \lambda * fr$$

ahol

$FWHM D$ a korongátmérő mikronban

λ a fény hullámhossza mm-ben

fr a távcső fényereje

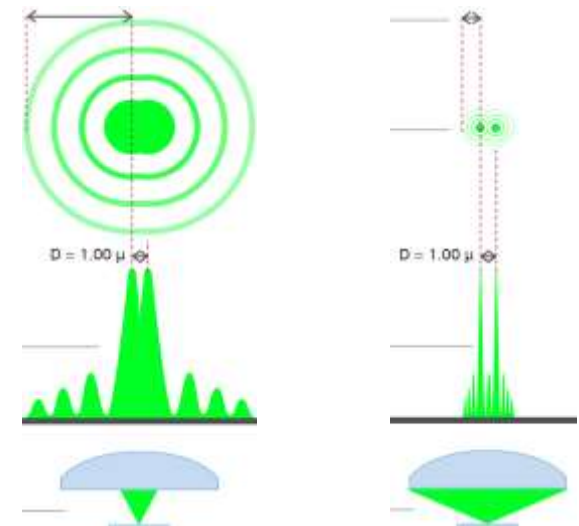
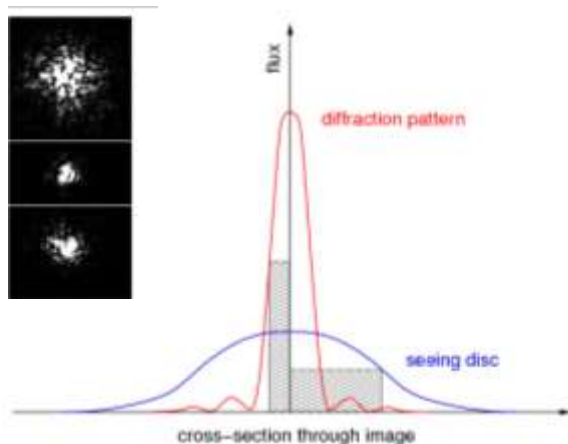
Megjegyzés: Ne feledjük, hogy a fényerő növelésével a különböző optikai hibák (pl. kóma, képsík görbület) fokozottan rontják a leképezést (főleg a képmező szélén), ezért a valóságban az itt bemutatott jelenség nem, vagy csak nagyon korlátozottan érvényesül!
Fényerős objektíveknel a leképezési hibák dominálnak, amelyek megnövelik a pontszerű objektum képének méretét, elmosódott koronggá alakítva azt.

További probléma: A légköri nyugtalanság hatása az asztrofotókra.

A kamera hosszabb időn át gyűjti a csillagról érkező fotonokat, de azokat a légköri turbulencia elmossa, szétteríti a képsíkbán.

Piros vonal: metszet egy csillag elméleti diffrakciós képéről.

Kék vonal: metszet a csillag képéről hosszú expozíciós idejű fényképen.



Blendézés hatása mikroszkópban

III.2. A távcső központi kitakarásának hatásai a csillagok leképezésére

Egy optikai rendszer kitakarásán a főtükör és a beeső fény útjába helyezett segédtükör (vagy kamera) egymáshoz viszonyított átmérő arányát értjük.

Egyes cégek távcsöveik kitakarását nem a főtükör átmérőjéhez, hanem felületéhez viszonyítják.
(Példa: Egy 200 mm-es főtükör mellett a 40 mm-es segédtükör az első esetben 20%-os, a második esetben alig 4% értéket ad.)

1. A központi kitakarás hatása a diffrakciós képre

A központi kitakarás fényt „tol ki” a gyűrűkbe az Airy-korongból, emellett kismértékben csökkenti ennek méretét.

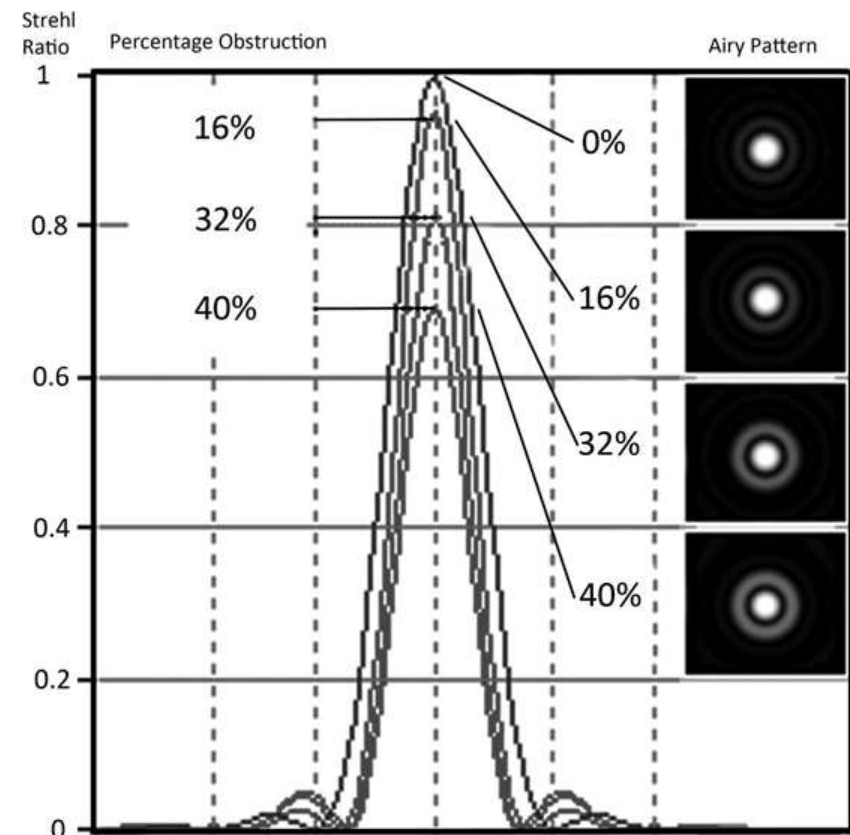
kitakarás (%)	0	25	50
Airy korong	84 %	73 %	48 %
első gyűrű	7 %	18 %	35 %
többi gyűrű	9 %	9 %	17 %

Jobbra: 0%, 16%, 32% és 40%-os kitakarással rendelkező távcső által alkotott diffrakciós képeket láthatunk. →

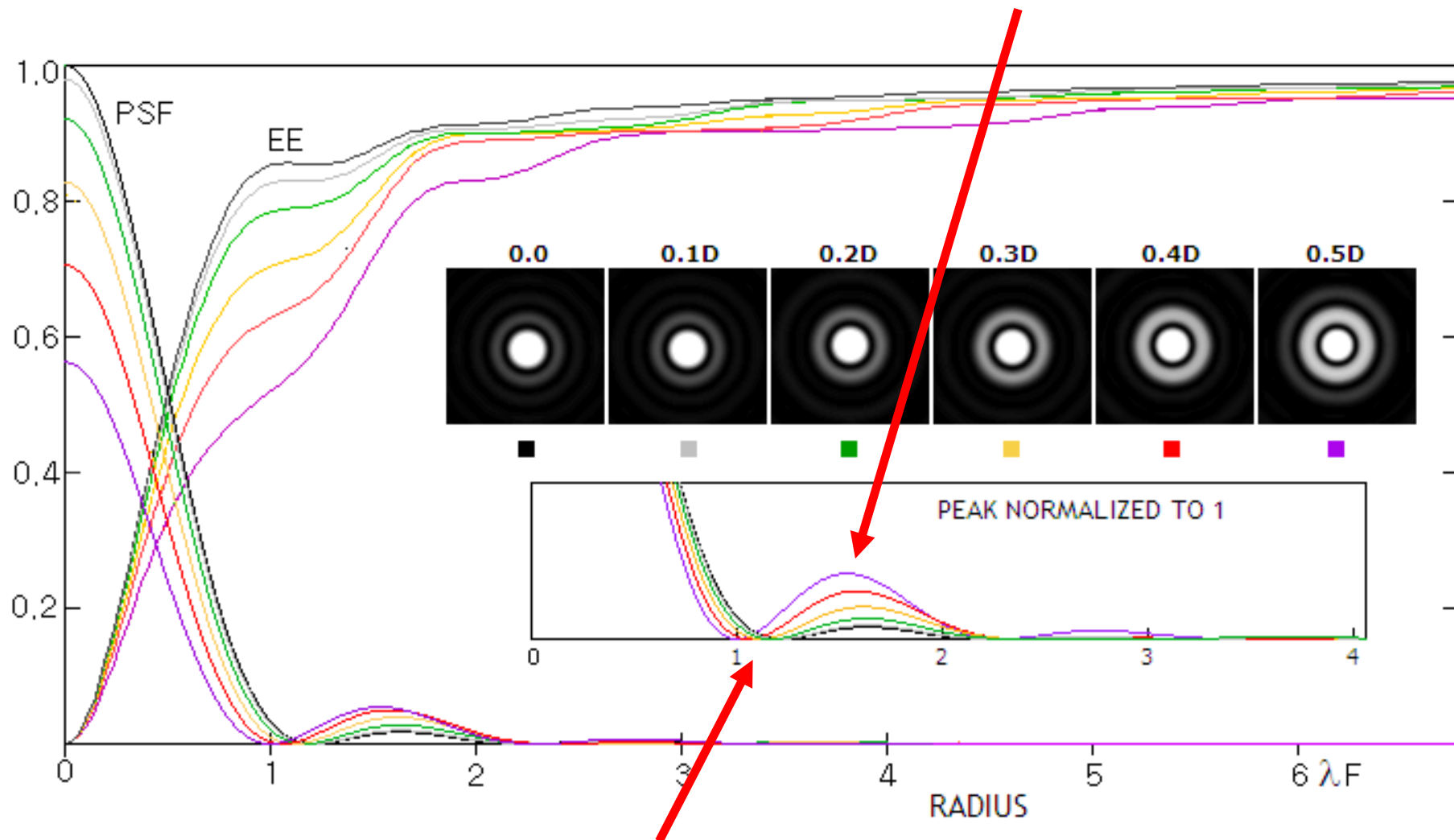
2. A központi kitakarás hatása a bejövő fény mennyiségére

A beeső fény mennyiségének csökkenése a felületi kitakarással arányos. Egy 20%-os kitakarású segédtükör mindössze 4%-kal csökkenti a bejövő fény mennyiségét, ám még egy 33%-os kitakarás esetén is mindösszesen 11%-os fényvesztéssel kell számolnunk.

3. A központi kitakarás növelése többnyire negatív hatással van a kapott kép kontraszt viszonyaira, de ez nem igaz minden mérettartományban és objektumtípus esetén. Ld. 95-104. old.



A nagyobb központi kitakarás több fényt „tol ki” a gyűrűkbe az Airy-korongból. Ezért a gyűrűk egyre **fényesebbnek** látszanak. (Ld. a fekete és lila vonal függőleges irányú különbségét.)



A nagyobb központi kitakarás **csökkenti az Airy-korong méretét**, azaz az első sötét gyűrű minimum értéke közelebb kerül az Airy-korong közepéhez. (Ld. a fekete és lila vonal minimumának vízszintes irányú eltolódását.)

Hogyan tudjuk csökkenteni a segédtükörtartó lábának „diffrakciós tűske” hatását?

1. Vegyünk olyan távcsövet, amiben nincsen központi kitakarás. ☺
2. Minimalizáljuk a lábak vastagságát.
3. Használjunk megfelelő íven meghajlított lábakat.



Él mentén kialakult diffrakciós mintázat

Legalsó képsor: Íves pókláb kialakítások (pl. bolygózásra kialakított newtonokban ajánlott) és azok hatása a csillag diffrakciós képének megjelenésére.

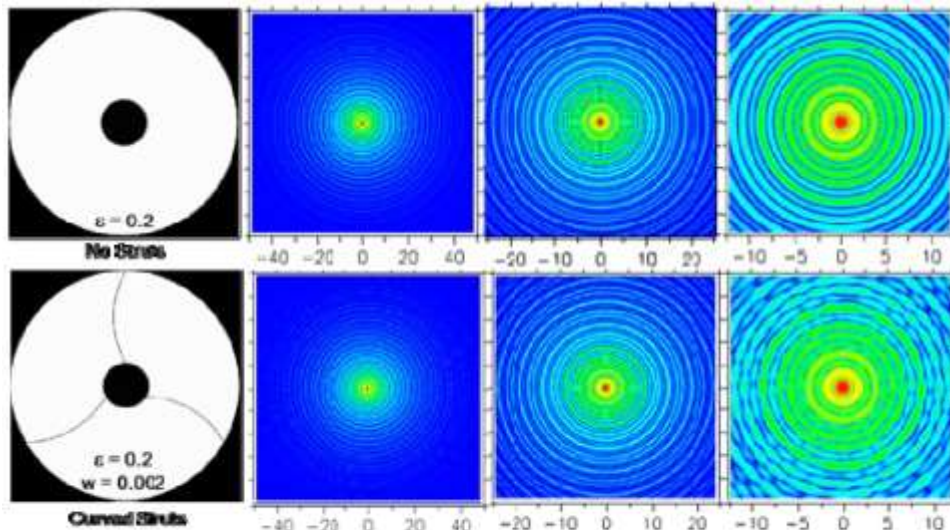
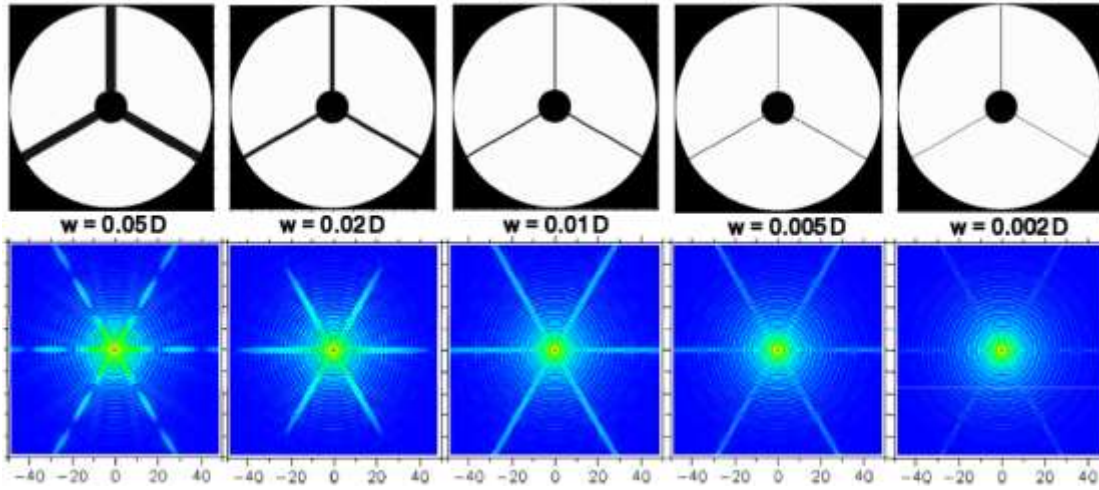
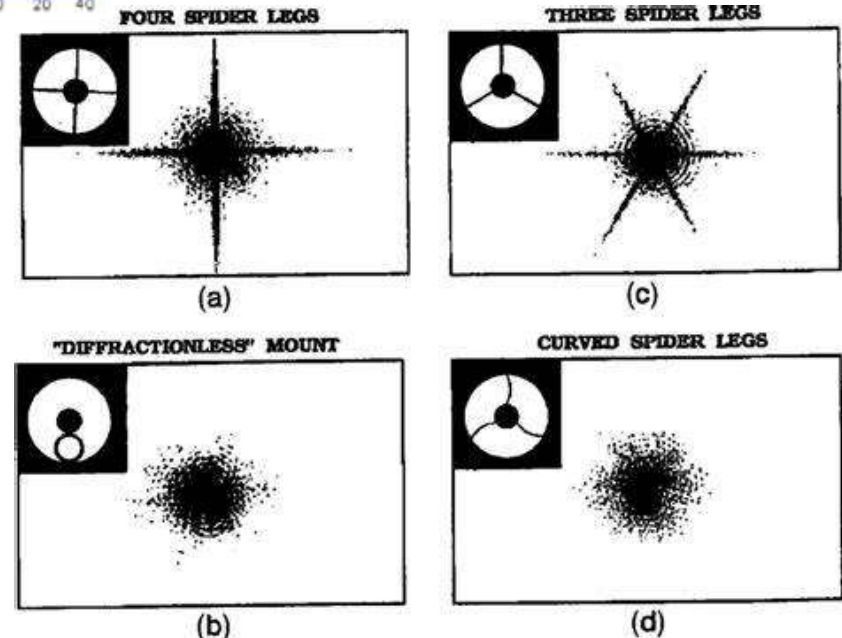


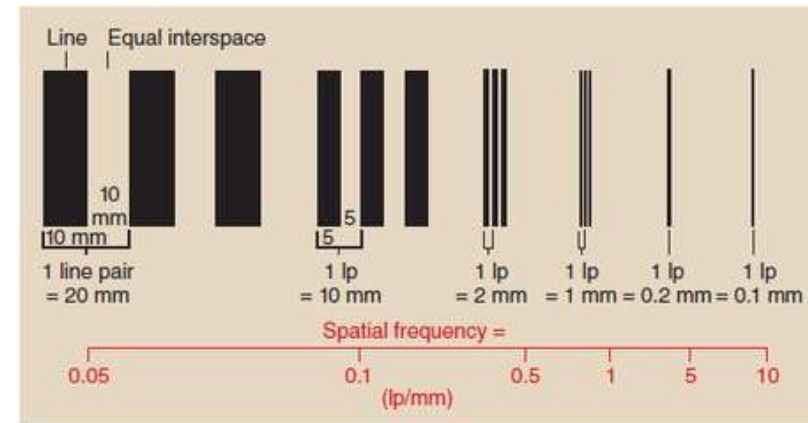
Figure 19. Simulated diffraction effects for an annular aperture ($\epsilon = 0.16$) and three curved spiders (30° arc of circle) of relative width $w = 0.002D$.



III.3. A távcső elméleti és gyakorlati felbontása

A felbontás egy képalkotó rendszer azon képessége, hogy megkülönbözteti az objektumok részleteit, amit azzal jellemezhetünk, hogy mekkora a még éppen szétválasztható legkisebb részlet.

Ezt megadhatjuk szögmértékegységben (pl. ívmásodperc), vagy térfrekvencia formában (pl. **vonalpár/mm**). A fényképészetben, mikroszkópiában a felbontást általában az elkülöníthető milliméterenkénti vonalpárok számával adják meg, ami a fókusz síkban (filmen vagy CCD felületén) mérendő.



A **térfrekvencia** a sötét és világos sávok hosszegységre eső száma.

Ezt **ciklus/mm** vagy **vonalpár/mm**-ben (lp/mm) adják meg.

Egy pár szélessége = világos + sötét vonal együttes szélessége.

Vágási frekvencia:

A **térbeli vágási frekvencia** (spatial cutoff frequency) megadja az adott optikai rendszerrel **még éppen szétválasztható vonalak számát adott hosszegységen (mm)**. Az ennél sűrűbb vonalrendszer már nem bontható az adott optikával.

Képlete: $f_o = \frac{1}{\lambda F_{\#}}$ cycles/millimeter amiben λ a fény hullámhossza (mm-ben), az $F_{\#}$ pedig az objektív fényereje.

Példa: Egy F/6-os távcső, vagy fotóobjektív vágási frekvenciája zöld fényben:

$$f_0 = 1/(0,000555 * 6) = 303 \text{ vonalpár/mm, vagy ciklus/mm}$$

Egy távcső elméleti maximális szögfelbontásának kiszámítása kettőscsillagokra

Az elméleti maximális felbontással **Joseph von Fraunhofer** foglalkozott távcsövek esetén 1823-ban, majd **Ernst Abbe** német fizikus és optikai tervező számította ki 1873-ban mikroszkópokra (ún. **Abbe-határ**). **Megállapítás:** a legkisebb elvileg felbontható részlet mérete a fény hullámhosszától függ (**mikroszkópoknál kb. a használt hullámhossz felének vehető**). **Távcsövek esetén az Abbe-határ radiánban** $= \lambda / D$, ahol λ a fény hullámhossza (mm-ben), D az objektív átmérője (mm-ben). (Megjegyzés: 1 radián az a szög, amely alatt a sugárral megegyező nagyságú ívhossz a középpontból látszik. 1 radián = 57,2958 fok, ami egyenlő 206265 ívmásodperccel.)



A k (korrekciós) tényező megadja, hogy az elméleti maximumhoz (Abbe-határ) hogyan viszonyul mások felbontási definíciója:

Az elméleti felbontás kiszámítása:

$$R_0 = k * \lambda / D * 206265$$

ahol

R_0 a felbontás (ívmásodpercben)

k a korrekciós tényező (pl. Abbe-határ = 1,00)

λ a fény hullámhossza (mm-ben)

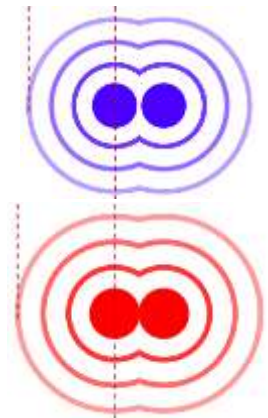
D az objektív átmérője (mm-ben)

Példa: Egy 200mm átmérőjű tökéletes távcső elméleti maximális felbontóképessége Abbe-határra kiszámolva, 550 nm-es (0,00055 mm), zöld hullámhosszon: $R = 1,00 * 0,00055 / 200 * 206265 = 0,57$ ívmásodperc.

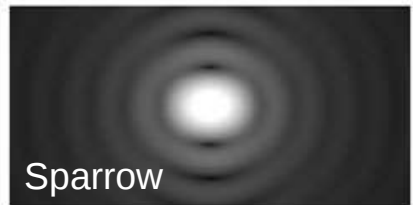
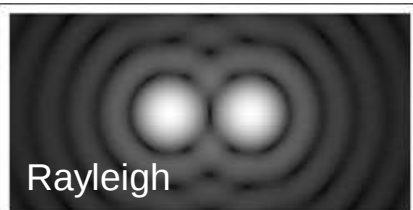
Levonható következtetések:

- Ha **nagyobb átmérőjű távcsővel nézelődünk, akkor annak elméletileg nagyobb a felbontása**. Pl. szorosabb kettőt bont fel, vagy részletesebb képet ad pl. a Jupiterről.
- Egy adott eszköz (mikroszkóp, távcső, rádióantenna stb.) felbontási határa az általa vizsgálatra használt elektromágneses hullám hullámhosszától függ. **Rövidebb hullámhosszon jobb, hosszabb hullámhosszon rosszabb az elérhető maximális felbontás**. Pl. egy látható fényben működő távcsőben kék színben jobb a felbontás, mint vörösben (ld. Jobb oldali ábrán).

k	Név (év)	Számítása (ívmásodperc)
k = 1,22	Rayleigh-határ (1879)	$R_R = 1,220 \cdot \lambda / D * 206265$
k = 1,02	Dawes-határ (1832)	$R_D = 1,021 \cdot \lambda / D * 206265$
k = 1,00	Abbe-határ (1873)	$R_o = 1.000 \cdot \lambda / D * 206265$
k = 0,95	Sparrow-határ (1916)	$R_s = 0,950 \cdot \lambda / D * 206265$



A távcső szögfelbontása kettőscsillagok esetén (amatőrcsillagászoknak szóló könyvekben gyakran szerepelnek)



(Schuster-határ, a Rayleigh-határ kétszerese, ld. később.)

$138/D = \text{Rayleigh-határ}$

Eszerint egy 1"-es kettőscsillag egy $D=138\text{mm}$ átmérőjű távcsővel még réssel bontható.

$116/D = \text{Dawes-határ}$

Eszerint egy 1"-es kettőscsillag egy $D=116\text{mm}$ átmérőjű távcsővel „piskóta alakú” Airy korongokat mutat.

(A kettő között van az Abbe-határ, $113/D$, ld. később.)

$107/D = \text{Sparrow-határ}$

Eszerint egy 1"-es kettőscsillag Airy-korongja egy $D=107\text{mm}$ átmérőjű távcsővel éppen megnyúlnak látszik.

Dawes-határ
(objektív átmérő):

60 mm — 2,2"

80 mm — 1,5"

100 mm — 1,2"

150 mm — 0,8"

200 mm — 0,6"

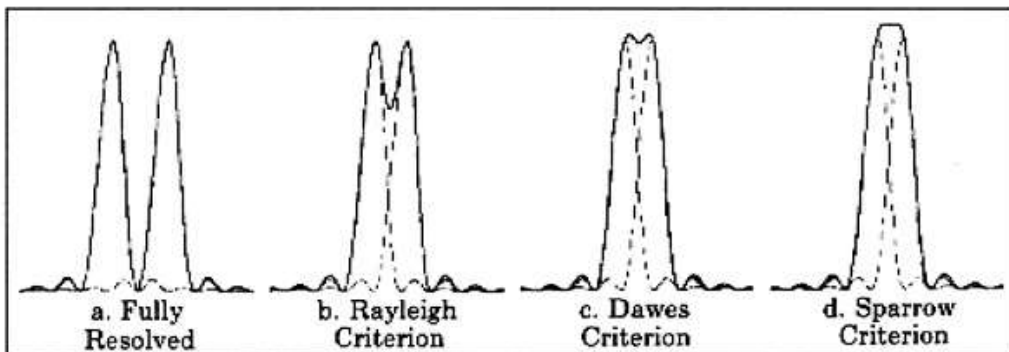
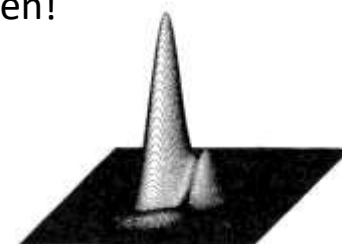
250 mm — 0,5"

320 mm — 0,4"

400 mm — 0,3"

A megadott felbontási képletek 4-6 magnitúdós, egyenlő fényességű kettőscsillagokra értendő!

A felbontás romlik halványabb, vagy nagy fénykülönbségű csillagok esetén!



Schuster-határ

Ne feledkezzünk meg azonban a földi légkör (szelek), vagy közvetlen környezetünk (meleg beton, nyitott ablak), esetleg a nem kellőképpen lehűlt távcső által keltett **turbulenciákról**.

Optikai elemek minősége nagyon fontos!



Ki, miért és hogyan találta ki ezeket a szögfelbontási határokat? (kronológiai sorrend)

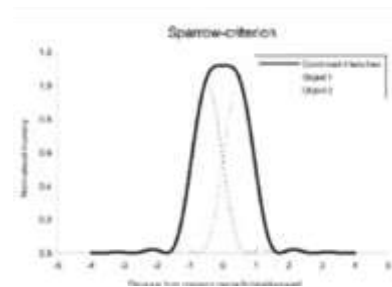


Dawes-határ: William Dawes angol csillagász 1832 körül alakította ki kritériumát, miután számos különböző távcsővel számos különböző kettőscsillagot figyelt meg. Kiszámította, hogy egy 1 hüvelyk (25,4 mm) átmérőjű objektív akkor választ el egymástól kettő 6 magnitúdós csillagot, ha azok legalább 4,56 ívmásodpercre vannak egymástól. Ezt az arányt extrapolálta nagyobb távcsövekre. ($k = 1,02$)

Rayleigh-határ: Lord Rayleigh (John William Strutt) a spektroszkóp téglalap alakú rése által létrehozott képet tanulmányozta és 1879-ben megállapította, hogy kettő [spektrális] vonalat akkor lehet egyértelműen felbontani, ha a vonalak legalább a fény hullámtávolságával megegyező távolságra vannak egymástól. Azt javasolta, hogy a minimum felbontáshoz az egyik spektrális vonal képének központi vonala essen egybe a másik képének első sötét minimum sávjának közepével. Ez a $k = 1,22$.

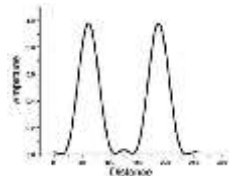


Normál távcsőben az egyik Airy-korong központi csúcsintenzitását a másik korongot övező első sötét gyűrűjének minimuma fölé helyezi, így a két csillag egyesített minimális fényereje nagyjából az egyes Airy korongok csúcsfényességének 70-73%-ára tehető. Rayleigh később (1880) kísérleti tesztekkel megállapította, hogy a felbontás körkörös nyílásokkal $k = 1,09$ mellett is kivitelezhető.



Sparrow-határ: C. M. Sparrow (1916) szerint, ha a csillagok együttes intenzitásfüggvénye (az átfedő diffrakciós képek fénysűrűsége) még éppen a két intenzitáscsúcsot összekötő egyenes alá esik ($k = 0,95$), akkor azokat még felbontottnak kell tekinteni. Tehát a pontforráspár két csúcsa közötti intenzitásfüggvény nem tökéletesen lapos, hanem nagyon enyhén homorú. A két kép között azonban már nem észlelhető sötétebb szünet, ezért egyesek szerint nem minősül valódi felbontásnak. A többenél realisabb felbontási korlátnak tekinthető mind a fényképészeti optika, mind az emberi látásélesség szempontjából.

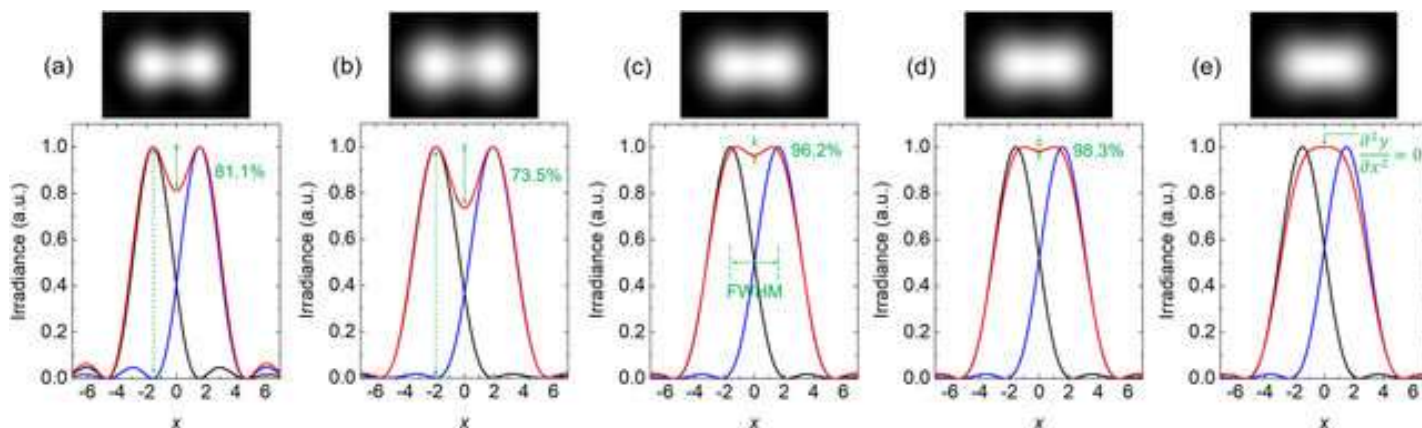
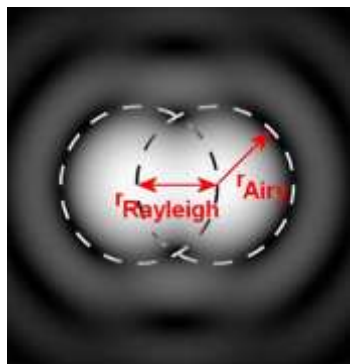
Houston-határ: William V. Houston 1926-os javaslata szerint a spektroszkópiában két vonal szétválasztása akkor lehetséges biztosan, ha azok távolsága megegyezik a félérték-szélesség (FWHM) átmérőjével. ($k = 1,028$)



Schuster-határ: A digitális képrögzítés fejlődésével, az ezredfordulón, új kritériumok születtek. Pl. Guido M. Schuster felbontás definíciója szerint az Airy-korongokat teljesen szét kell választani, hogy valamit bontottnak nevezzünk, amely határ így kétszerese a Rayleigh-határnak. ($k = 2,44$)



A felbontási határok ábrázolása, adatai



	Rayleigh-határ (négyzet rekesznyílásnál)	Rayleigh-határ (kör rekesznyílásnál)	Houston-határ (FWHM) (kör rekesznyílásnál)	Abbe-határ (kör rekesznyílásnál)	Sparrow-határ (kör rekesznyílásnál)
Távolság kettő Airy-korong középpontja között (Airy-korong sugarában megadva)		1 (=1,22/1,22)	0,843 (=1,028/1,22) (Dawes: 0,836)	0,82 (=1/1,22)	0,78 (=0,95/1,22)
A nyereg-csúcs arány az összetett profilban (piros görbe)	81,1%	73,5%	96,2%	98,3%	100%
Kontraszt	10%	15%	1,9%	0,9%	0%

Észlelési tapasztalatok:

Az éles szemű és tapasztalt megfigyelők **képesek észlelni az összeolvadt Airy-korongok „ellipszis” megnyúlását**, ha két csillag egymástól mindössze **0,37-0,50 (k)** távolságra van (azaz akár $0,37/1,22 = 0,3$ Airy-korong sugarára!).

A felbontási kritériumokat 4-6 magnitúdó közötti, egyenlő fényességű csillagpárra kell érteni. **Eltérő fényességű, vagy halványabb csillagok esetén ez rosszabb.**

Emberi szem és agy (logaritmikus)

Kamera képe (lineáris)

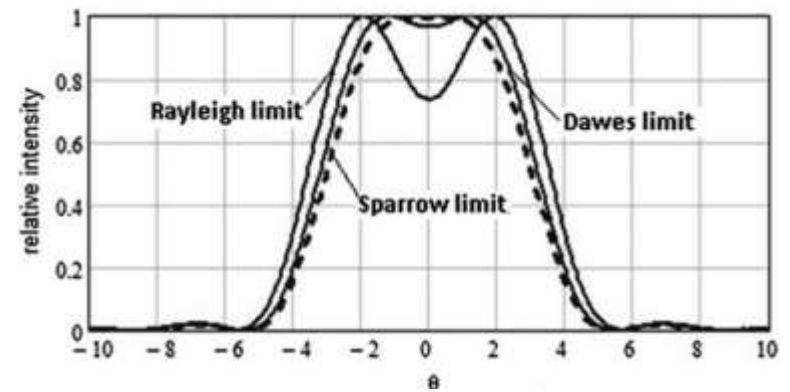
Logarithmic grayscale

Linear grayscale

Rayleigh: $D = 1 \times r_{\text{Airy}}$

Dawes: $D = 0.85 \times r_{\text{Airy}}$

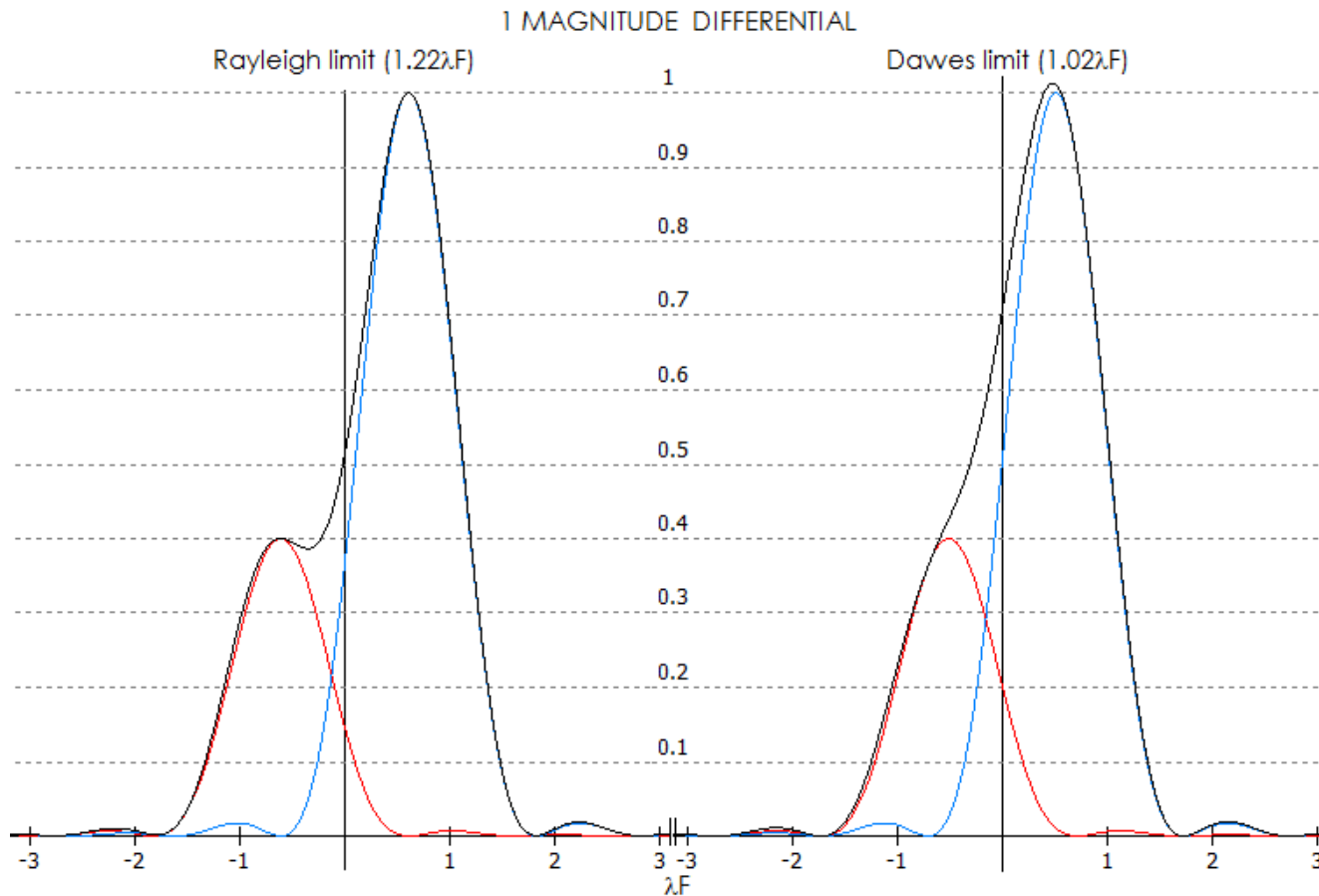
Sparrow: $D = 0.77 \times r_{\text{Airy}}$



Felbontás egyenlőtlen kettőscsillagok esetén

A szétválás a felbontási határon növekszik az egyenlőtlen fényességű csillagokkal, minél egyenlőtlenebbek, annál inkább.

Az alábbiakban két eltérő szélességű kettőscsillag PSF görbéje látható, 1 magnitúdós fényerőkülönbséggel, tökéletes leképezésű távcsőben. (Dawes-határon már nincsen „nyereg” az összesített, fekete görbén.)



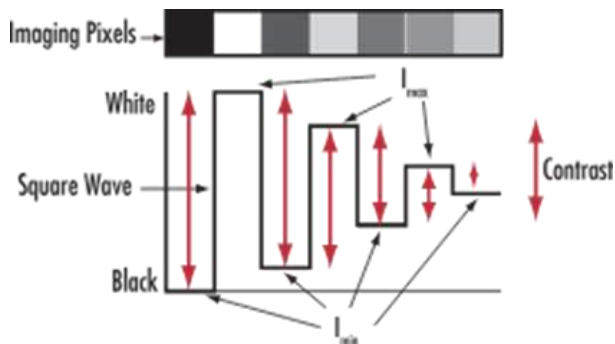
III.4. A távcsőben látható kép kontrasztja és a kontrasztátviteli függvény

Kontraszt: a világos és a sötét részek közötti különbség. A távcsövekben leképezett objektumról (pl. bolygóról) kapott kép hasonló lesz az eredetihez, csak hogy a kép kontrasztja csökken! Ez befolyással van a felbontásra is, pl. a bolygóészlelések esetén.

Ez függ az objektumon lévő részletek közötti eredeti kontrasztviszonyoktól és a részletek méretétől.

Minél kisebbek a részletek, annál nagyobb a kontrasztveszteség!

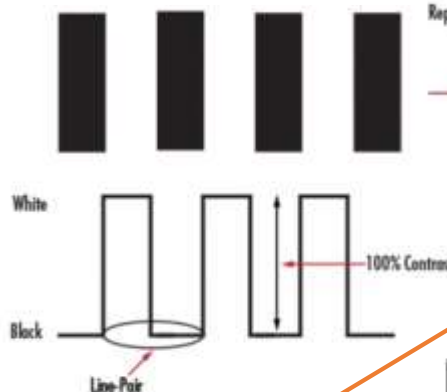
Csökkenő kontraszt balról jobbra:



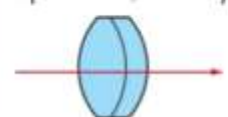
A kontrasztátviteli koeficiens azt mutatja meg, hogy az objektum két részlete közötti kontraszt a képen mekkora különbséggel jelenik meg:

$$C_T = \frac{C_{KÉP}}{C_{OBJEKTUM}}$$

Eredeti objektum és kontrasztviszonyai:



Representative Lens/Lens Assembly

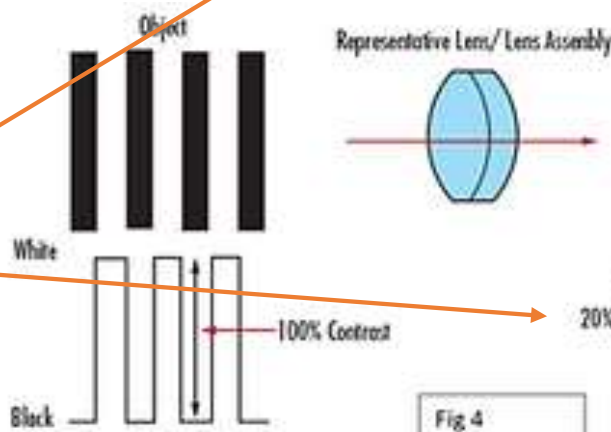


A kapott kép és kontrasztviszonyai:



Fig 3

Picture credit: Edmund Optics



Representative Lens/Lens Assembly

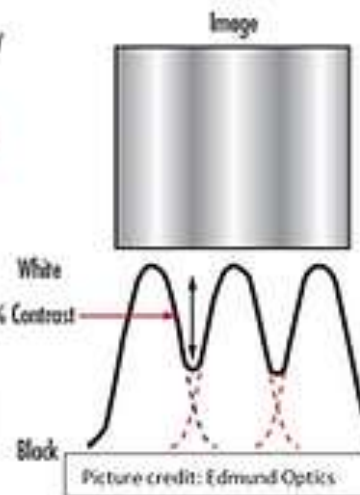
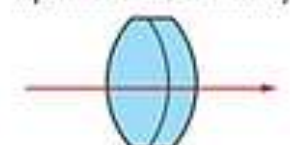
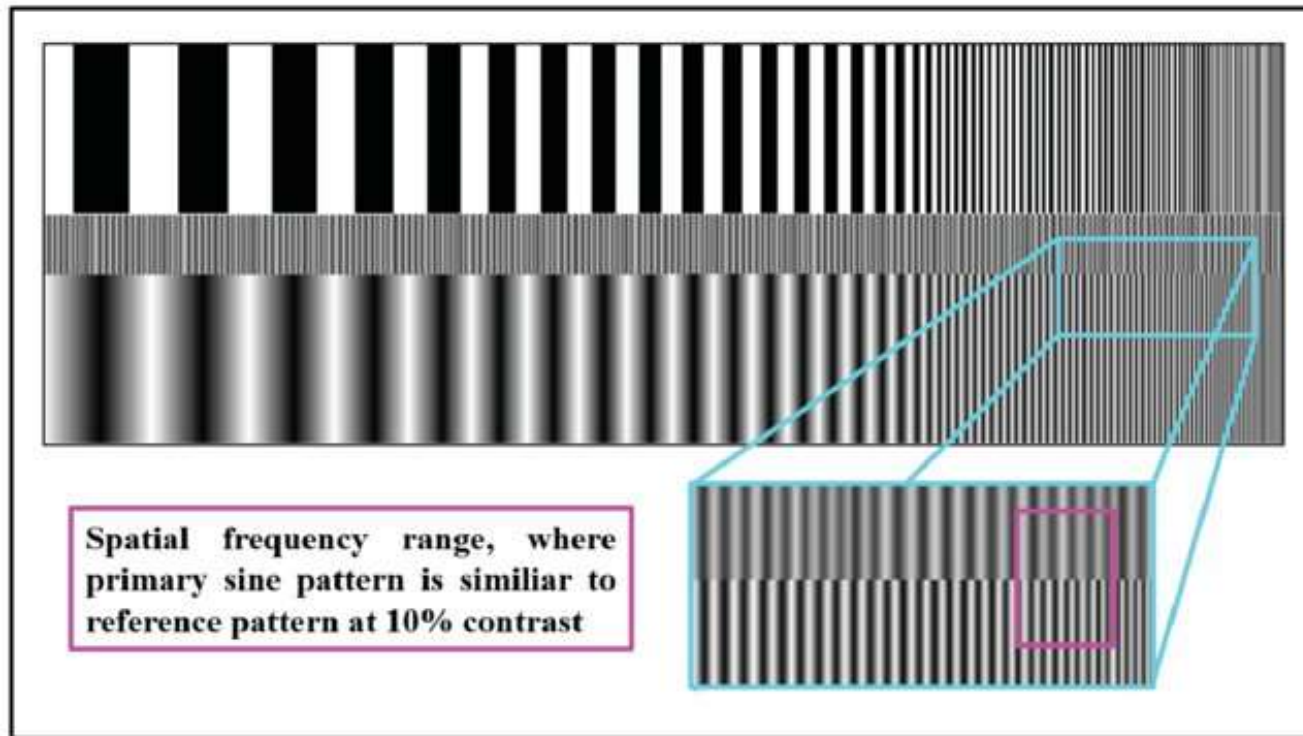
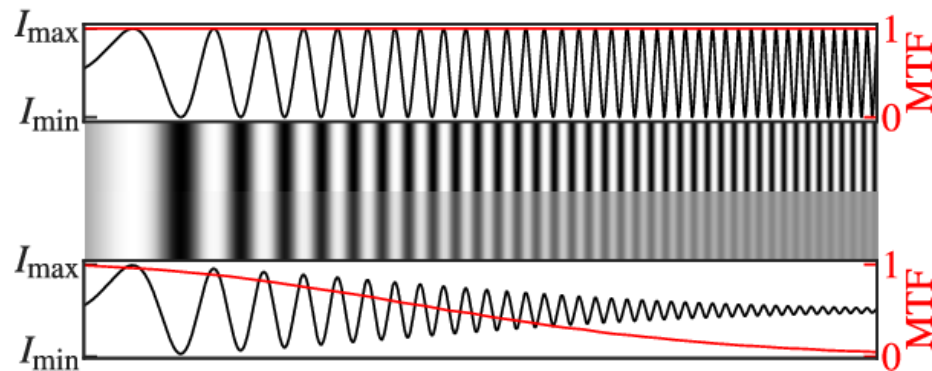


Fig 4

Picture credit: Edmund Optics



Ha a kontraszt 10% alá csökken, akkor a két vonal (vagy két kicsi alakzat egy bolygón) általában nem lesz elkülöníthető.

A kontrasztátviteli függvény (Modulation Transfer Function, MTF)

Az MTF-grafikon az átvitt kontraszt százalékos arányát ábrázolja a térfrekvencia függvényében (tökéletes optika esetén).

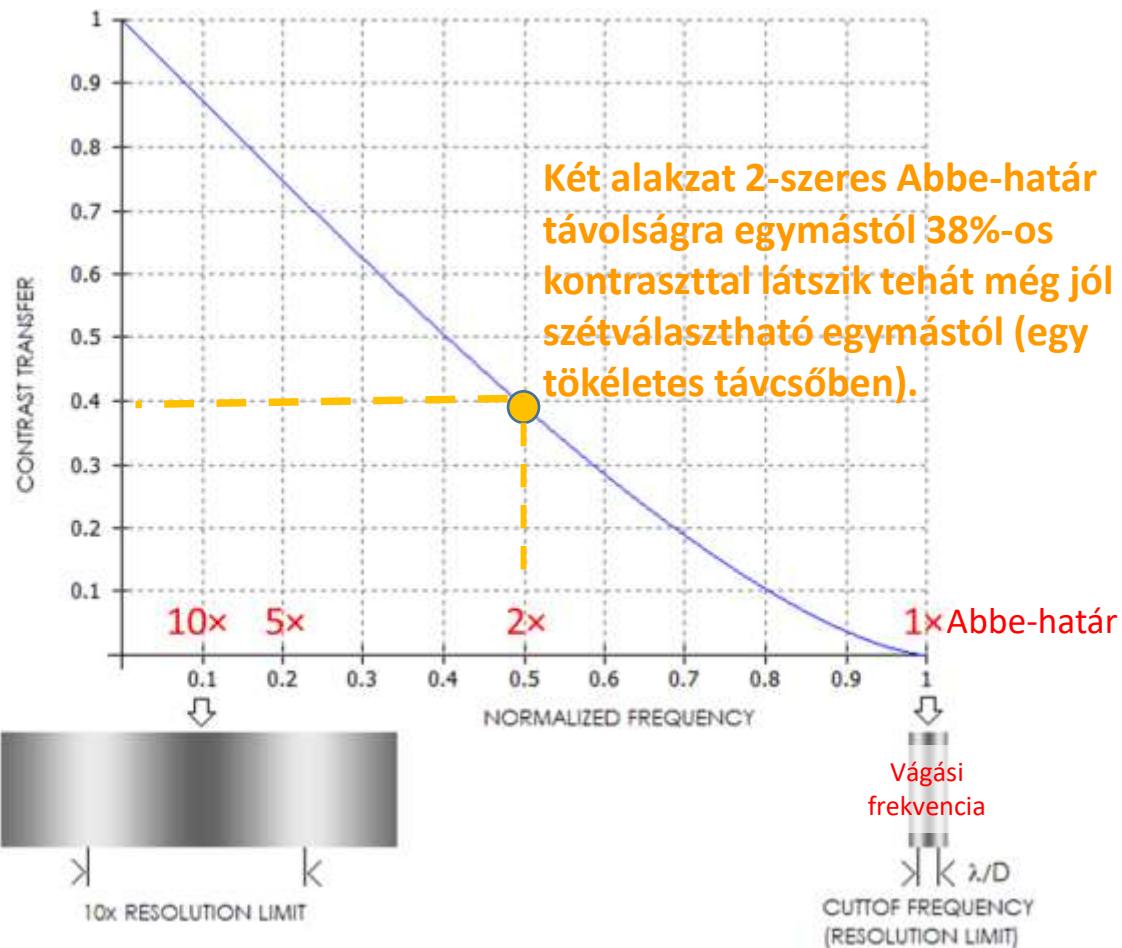
A függőleges tengelyen a kontraszt olvasható le.

A vízszintes tengelyen a megfigyelt részletek mérete az elméleti maximális felbontás (Abbe-határ), vagy vonalpár/mm mértékegységben.

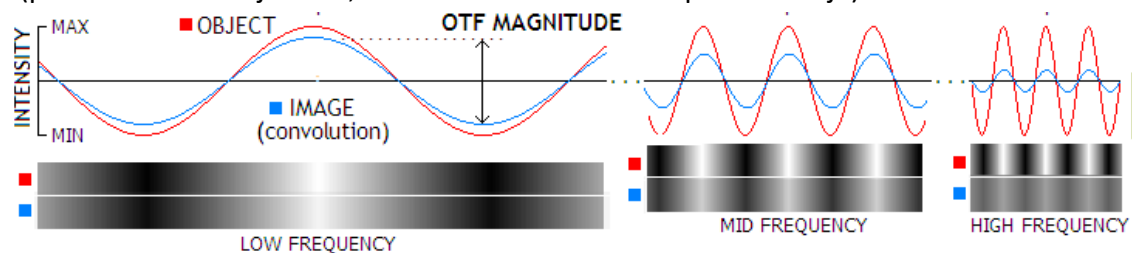
Az ábrán a vízszintes tengely értékei nem lineárisak!

A piros számok az Abbe-határ többszörözött értékeit jelzik.

Ha egy objektum **egyre finomabb részleteit akarjuk feloldani** (a vízszintes tengelyen jobbra haladunk), úgy **egyre inkább csökken a kép kontrasztja** (függőleges tengely).



Minél kisebbek a részletek, annál nagyobb a kontrasztvesztés (piros = eredeti objektum, kék = távcsőben látott kép kontrasztja):

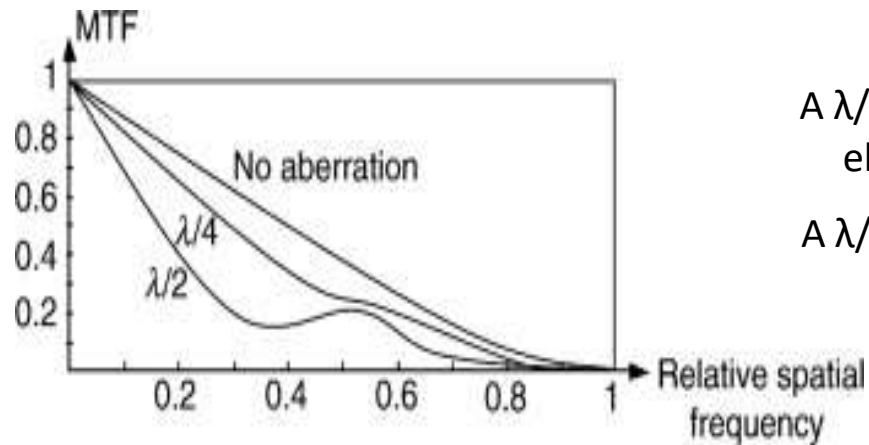


Az MTF és az objektív felületének minősége

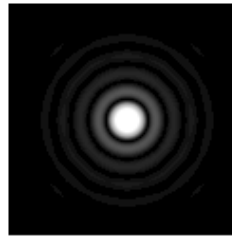
A $\lambda/4$ (negyed hullámhossz) nagyságú szférikus P-V hiba a még elfogadható („éppen jó”) minőségű távcsövekre jellemző.

A $\lambda/2$ (fél hullámhossz) nagyságú P-V szférikus hiba a minőségi határ alatti, „rossz” távcsövekre jellemző.

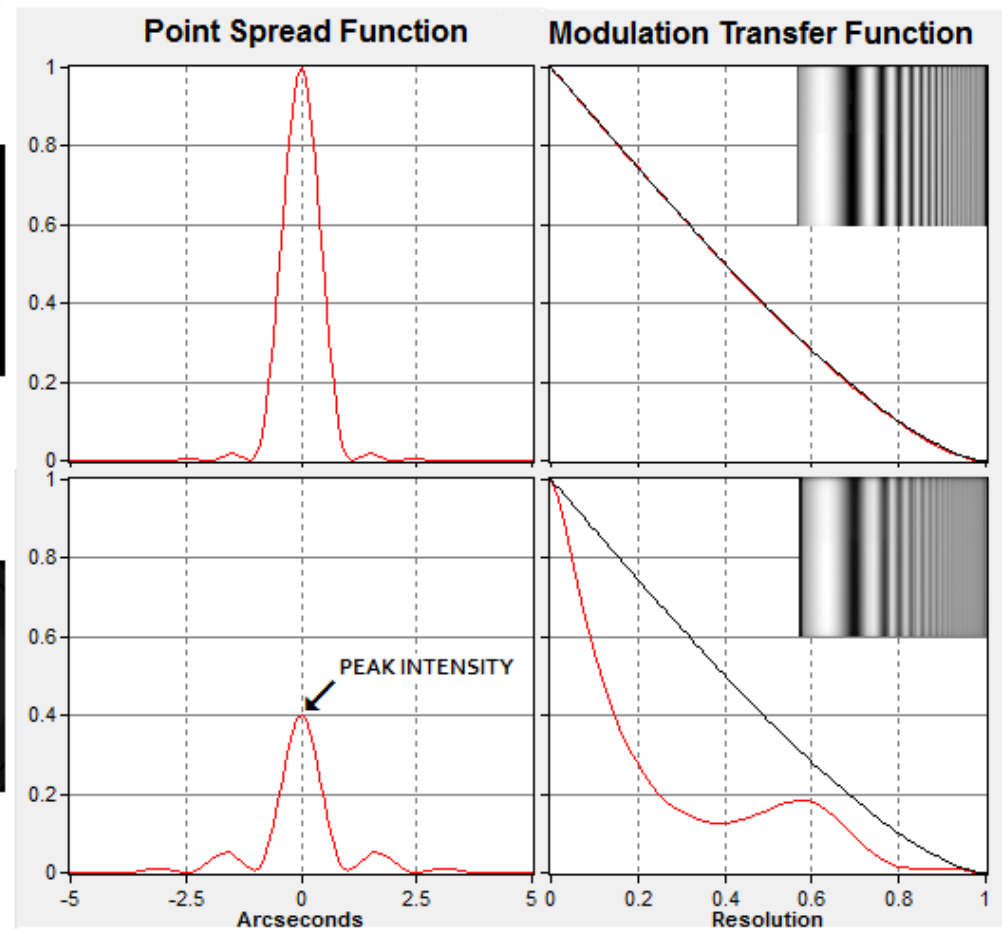
(P-V hiba jelentése a 116. oldalon olvasható)

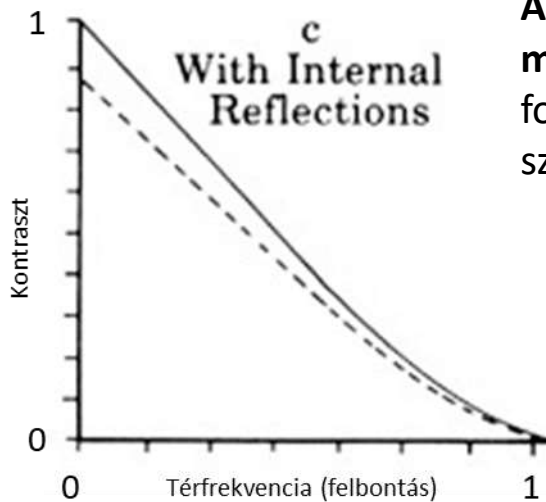


ABERRATION-FREE



$\lambda/2$
PRIMARY SPHERICAL
ABERRATION

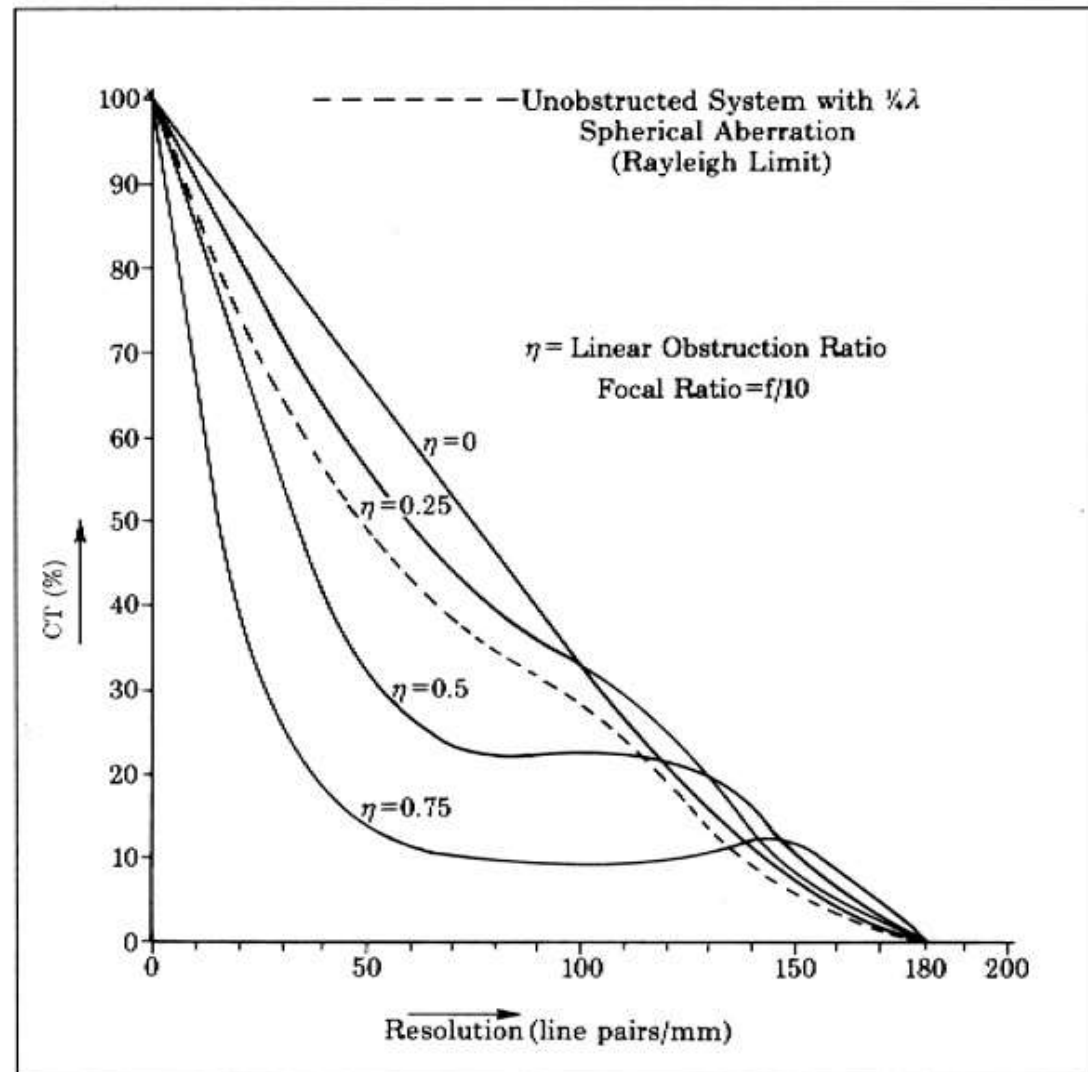




A távcsőben jelentkező belső reflexió minden mérettartományban csökkenti a képkontrasztot.

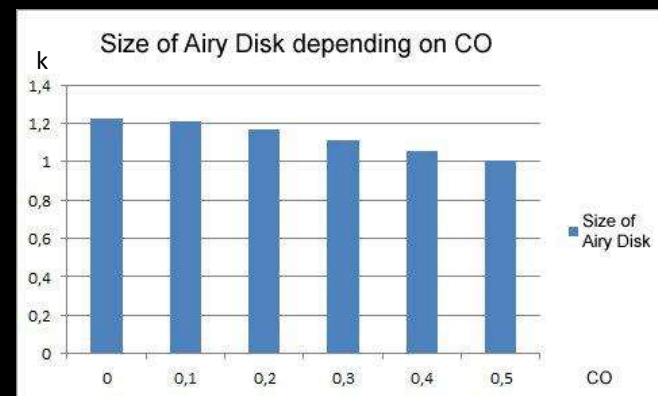
folytonos vonal – belső fényszóródástól mentes távcső esetén
szaggatott vonal – belső reflexióval terhelt távcsőben

A központi kitakarás (pl. segédtükr) méretének növelése legtöbb esetben egyre jobban csökkenti a képkontrasztot, de ennek hatása függ a térfrekvenciától (a bolygón, vagy a Holdon látott jelenség méretétől).



Érdekesség: Miért jobb egy 50%-os távcső kontrasztja és felbontása a 0% kitakarású távcsőnél a Rayleigh-határ közelében?

Mert az 50%-os kitakarás kiszorítja a fény jelentős részét az Airy-korongból a gyűrűkbe és a korong átmérője kismértékben csökken, viszont a gyűrűk fényessége jelentősen nő.



0% (kitakarásmentes)

50% központi kitakarás

Felbontás (")	Távcsőátmérő			
	100mm	150mm	200mm	250mm
1 * Rayleigh-határ	1,36	0,91	0,68	0,54
2 * Rayleigh-határ	2,72	1,81	1,36	1,09
3 * Rayleigh-határ	4,08	2,72	2,04	1,63
4 * Rayleigh-határ	5,44	3,63	2,72	2,18
5 * Rayleigh-határ	6,80	4,53	3,40	2,72

veszteség nyereség

III.5. Fényes kiterjedt objektumok (pl. Hold, bolygók) felszíni részletei (élszórás függvény)

Mit tekintünk a távcsőben kiterjedt objektumnak?

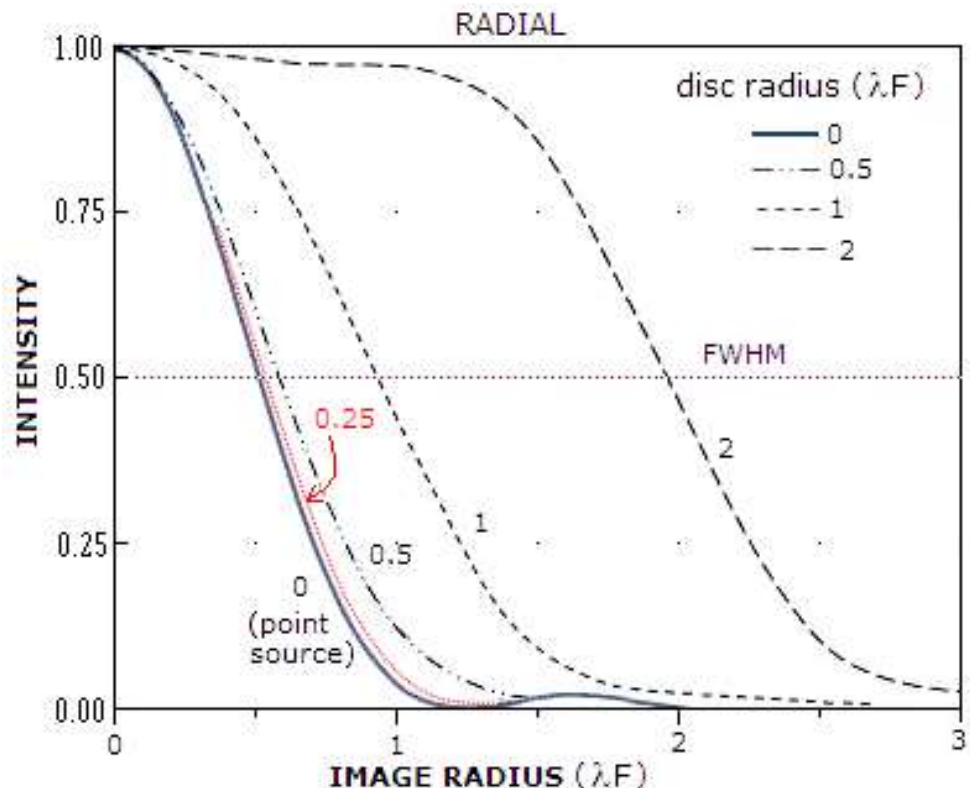
Ha a fényt kibocsátó objektum az Airy-korong kb. 1/4-énél kisebb átmérőjű korongként képződik le a fókuszban, akkor nem hoz létre észrevehetően más diffrakciós mintát (PSF-et), mint egy tökéletes pontforrás (pl. csillag).

Következésképpen egy kiterjesztett felület diffrakciós képe az Airy-korong átmérőjének 1/4-ét meg nem haladó felületi pontok összességéként értelmezhető.

Ha egy objektumnak a távcső fókuszsíkjaiban keletkező képének szögmérete meghaladja az Airy-korong átmérőjének 1/4-ét, akkor a **központi diffrakciós csúcs maximum környéki része kiszélesedik és egy kiterjedéssel bíró tárgy képévé alakul.**

Az ábrán pontszórási függvények sugara (fele) látható

Pontszerű objektum határa a 0,25-ös piros vonal. A 0,5 – 2 Airy-korong átmérőjű objektumok már kiterjedt felső csúccsal, „platóval” jelennek meg.



Fehér vonal: pontszerű objektum Airy-korongjának mérete

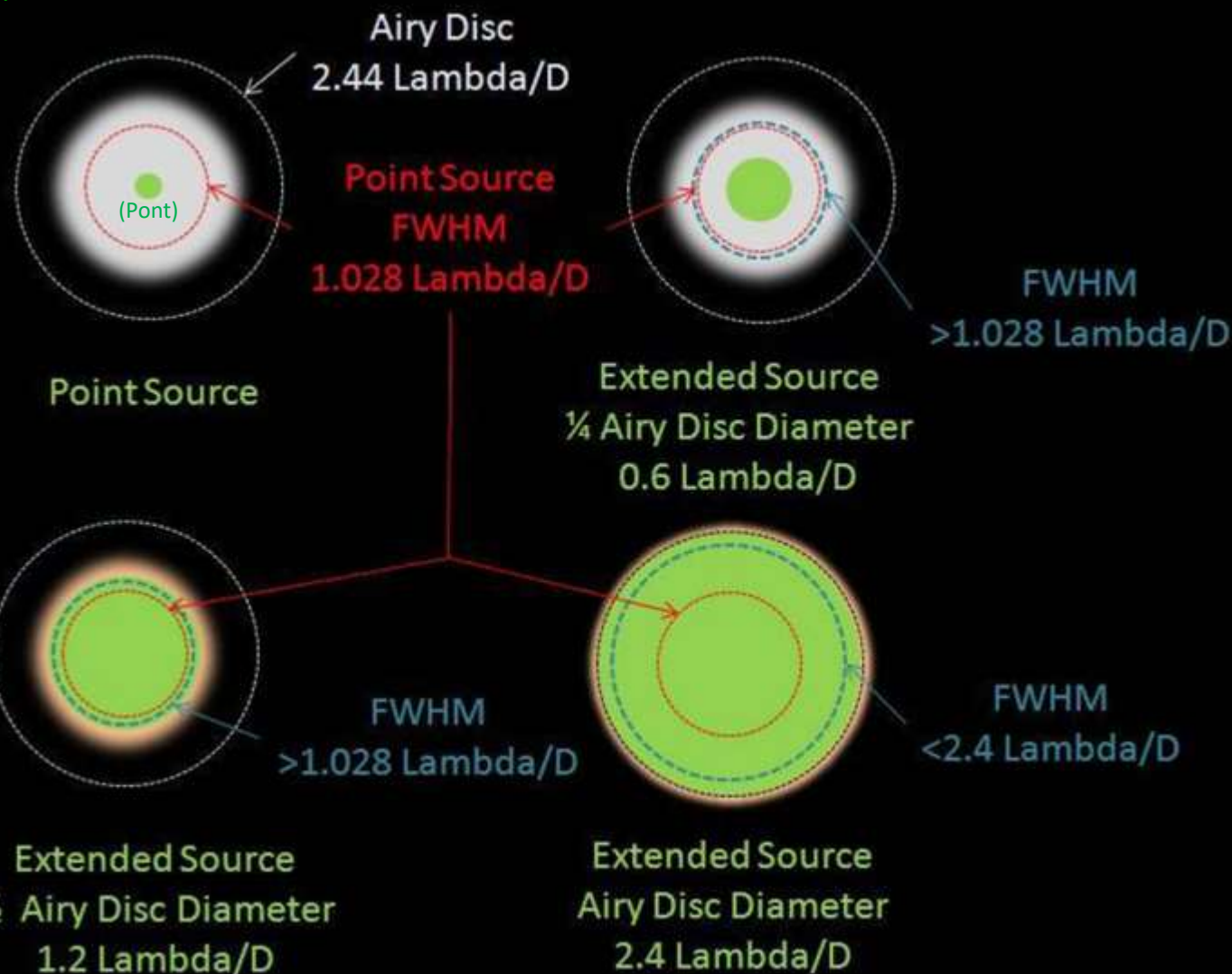
Fehér korong: pontszerű objektum hamis korongja

Piros kör: pontszerű objektum Airy-korongjának félérték-szélessége

Kék kör: kiterjedt objektum Airy-korongjának félérték-szélessége (ha meghaladja az előzőt, akkor az objektum kiterjedtnek látszik a távcsőben)

Zöld korong: az objektum képe a távcsőben

Csillagszerű megjelenés
(max. $\frac{1}{4}$ Airy-korong
átmérőjű objektum):



Apró részletek megfigyelése a Napon, a Holdon, a bolygókon és azok holdjain

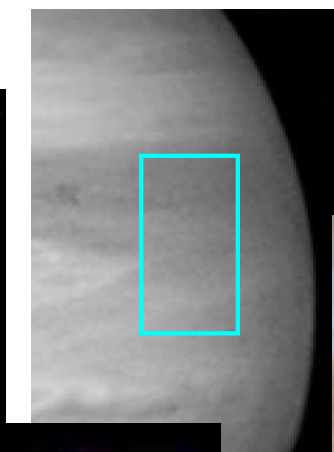
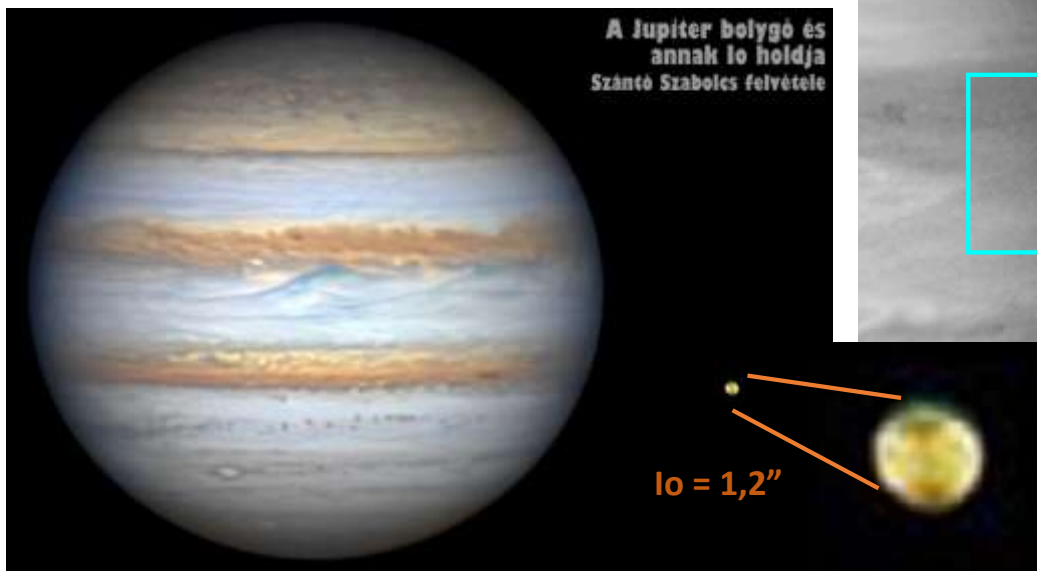
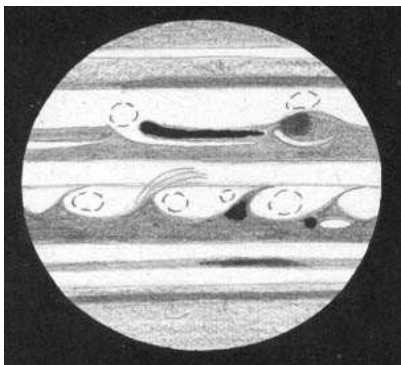
Pickering és Steavenson empirikus eszközökkel megállapította, hogy a **Dawes-határnál 2,3 - 3-szor kisebb fekete pontokat látnak fehér alapon.**

Tapasztalt bolygómegfigyelők arra a következtetésre jutottak, hogy a kettőscsillagoknál használatos **Dawes-határnál 5-14-szer kisebb szögátmérővel bíró bolygórészleteket is meg tudnak figyelni.**

Egyes megfigyelők azt állították, hogy **közepesen erős fényviszonyok mellett is képesek észlelni rendkívül vékony fekete vonalakat világos háttér előtt.**

Tehát a **megfelelő hosszúságú vonalszerű részletek észrevétele akkor is lehetséges, ha a vonal vastagsága messze a távcső felbontóképessége alatti.**

Az, hogy egy felületi részlet látható lesz-e az adott távcsőben, több tényezőtől függ: a méretétől, a fényességétől, a kontrasztjától, valamint, ha vannak színek, akkor a színétől és annak telítettségétől. Két azonos fényességű részlet nem választható szét szürkeárnyalatos képen, de ha észrevehetően más a színük, akkor viszont igen.



Szürkeárnyalatos képen összeolvad a két azonos intenzitású terület.



A csillagokhoz képest fordított helyzet: világos alapon sötét objektum

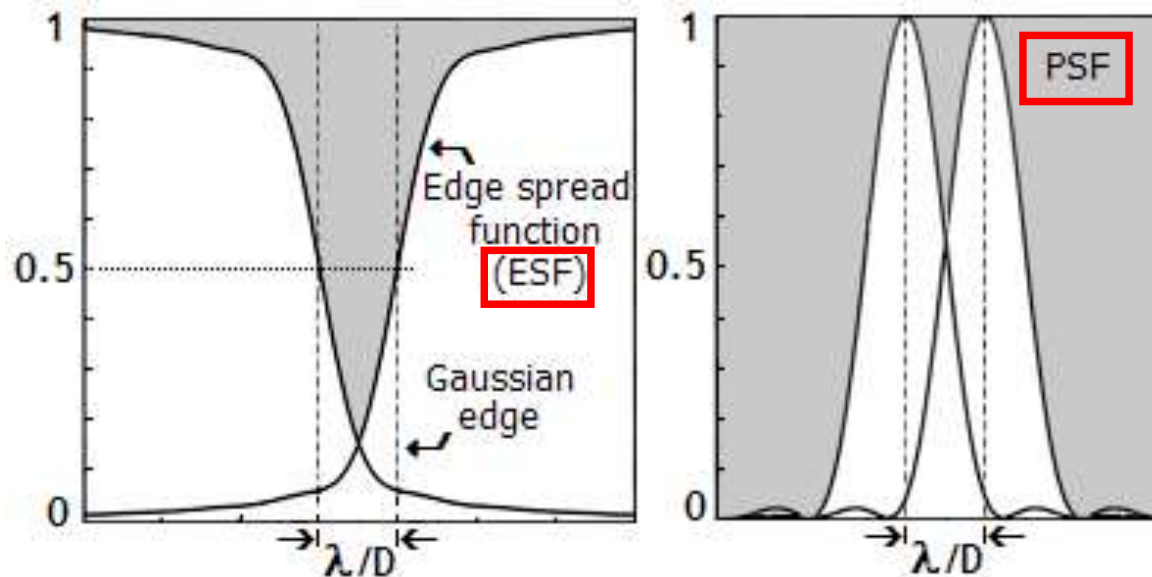
Élszórás függvény (Edge Spread Function, ESF)

A világos háttéren lévő tökéletesen fekete vonal képét voltaképpen az őt határoló kettő világos él diffrakciós képének egymáshoz való viszonya határozza meg, hiszen az abszolút fekete vonal nem bocsát ki fényt, csak a körülötte lévő területek teszik ezt. Az utóbbiak fénye a fekete-fehér határon diffrakciót okoz (esetleg beszóródik a sötét területre). Ezt a helyzetet az **élszórás függvény (Edge Spread Function, ESF)** írja le.

Amint a lenti ábra mutatja, a két intenzitásprofil (jobb és bal fehér terület határoló görbéje) közötti rés (szürke „tölcsér” forma) λ/D elválasztásnál sokkal nagyobb az ESF esetében (balra), mint a PSF esetében (középen).

Ez tehát lényegesen jobb felbontási korlátot jelent a világos alapon sötét objektumok esetén, mint a csillagpárok esetén használt λ/D Abbe-határ. Ezt mi is tapasztalhatjuk távcsöves megfigyeléseink során (pl. Cassini-rés a Szaturnusz gyűrűben, holdi repedésvölgyek stb.).

Az intenzitásgörbe tetején látható lassú, kismérvű intenzitáscsökkenés azt eredményezheti, hogy a sötét objektumok peremén igen finom intenzitás különbségek vannak, melyek „finoman érzékeltetik, vagy utalnak” az objektum jelenlétére még akkor is, ha maga az éles megjelenés, elválasztás nem jön létre.



A diffrakció és az aberrációk életlenítő hatása kiterjedt objektumok képe

Úgy értelmezendő, mintha a felületet felbontanánk pontokra és a leképezés során sok kis diffrakciós minta kerülne egymással átfedésbe a képsíkban. **Sorok: 1. tökéletes (elméleti) kép; 2. diffrakció hatása; 3. $\lambda/3$ P-V szférikus aberráció hatása**

JUPITER

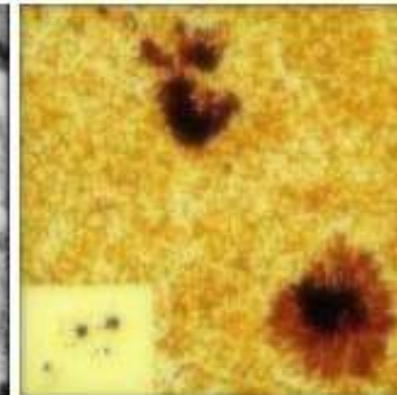
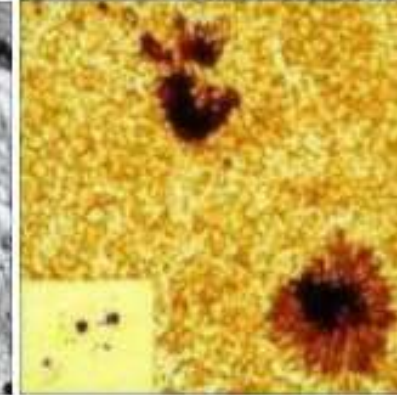
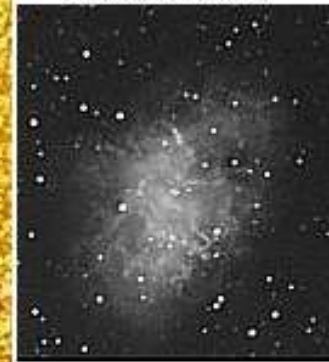
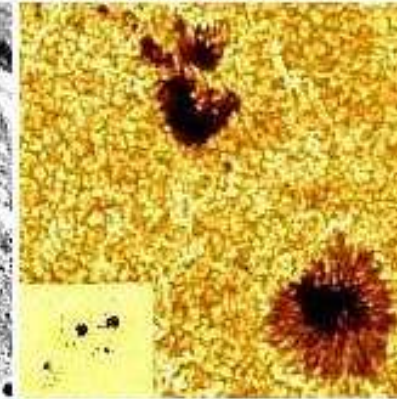
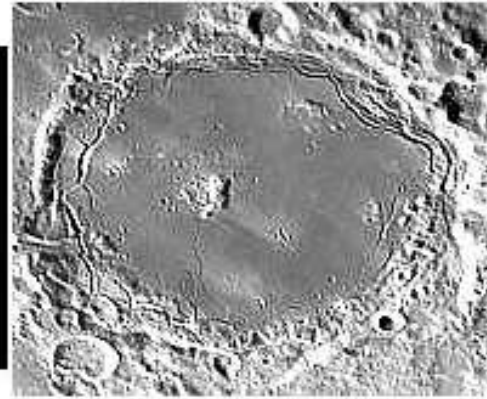
MARS

SATURN

PITATUS (MOON)

SUN SPOTS

CRAB NEBULA



Az alábbi táblázatban összefoglaljuk, hogy egy 33%-os kitakarású optika milyen refraktornak felel meg többféle szempont szerint.

Reflektor 33% kitakarással	Azonos kontraszt általánosságban	Azonos felbontás bolygók esetében	Azonos felbontás Hold esetében	Azonos fénygyűjtő képesség
300 mm	200 mm	200-300 mm (1)	300 mm	280 mm
250 mm	170 mm	170-250 mm (1)	250 mm	235 mm
225 mm	150 mm	150-225 mm (1)	225 mm	210 mm
200 mm	130 mm	130-200 mm (1)	200 mm	190 mm
150 mm	100 mm	100-150 mm (1)	150 mm	140 mm

III.6. Kiterjedt halvány (mély-ég) objektumok részleteinek megjelenési határa a kontrasztátviteli függvényen, különböző minőségű távcsövekben

LCD: Halvány és alacsony kontrasztú részletek (Low-Contrast-Dim)

Csak nagyobb méretben (térfrekvencián) és kb. 60% kontraszt felett látszanak.

A távcső aberrációi jól észrevehetően csökkentik a megfigyelés esélyét.

LCB: Alacsony kontrasztú, de fényes részletek (Low-Contrast-Bright)

Nagy és közepes méretben (térfrekvencián) III. kb. 10% kontraszt felett látszanak.

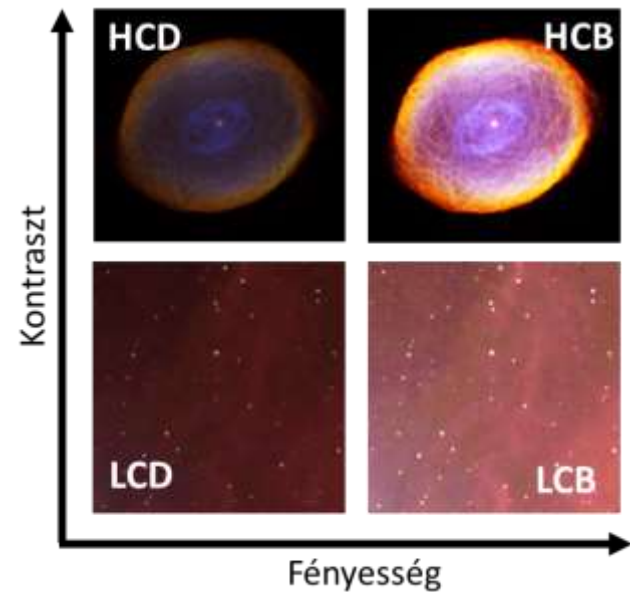
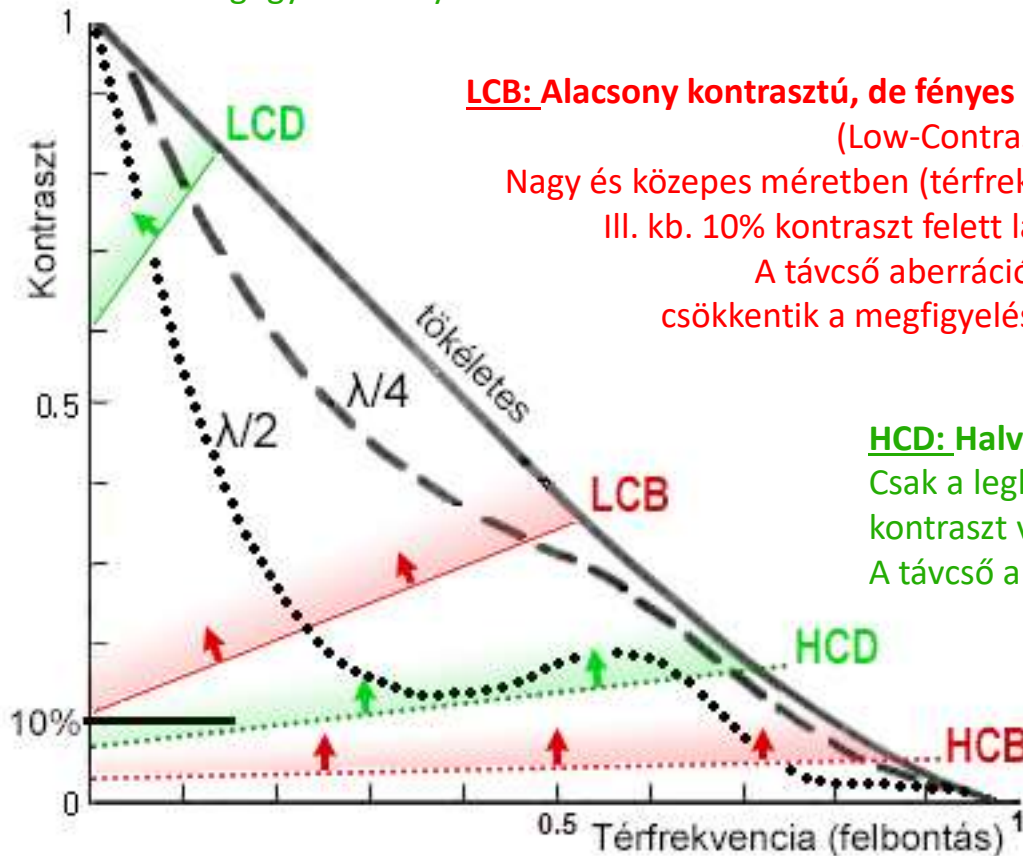
A távcső aberrációi nagyon csökkentik a megfigyelés esélyét.

HCD: Halvány, de magas kontrasztú részletek (High-Contrast-Dim)

Csak a legkisebb méretben (térfrekvencián) és legalacsonyabb kontraszt viszonyok között nem látszanak.

A távcső aberrációi kissé csökkentik a megfigyelés esélyét.

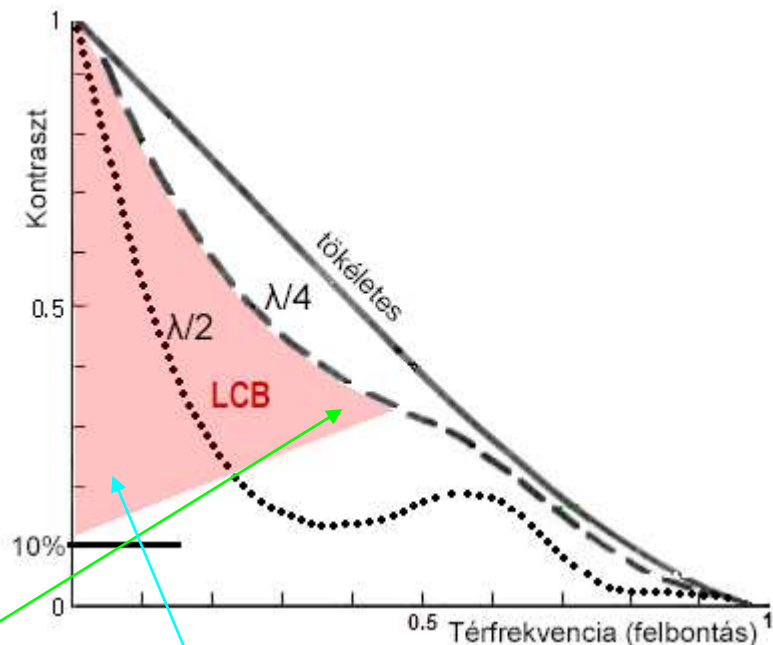
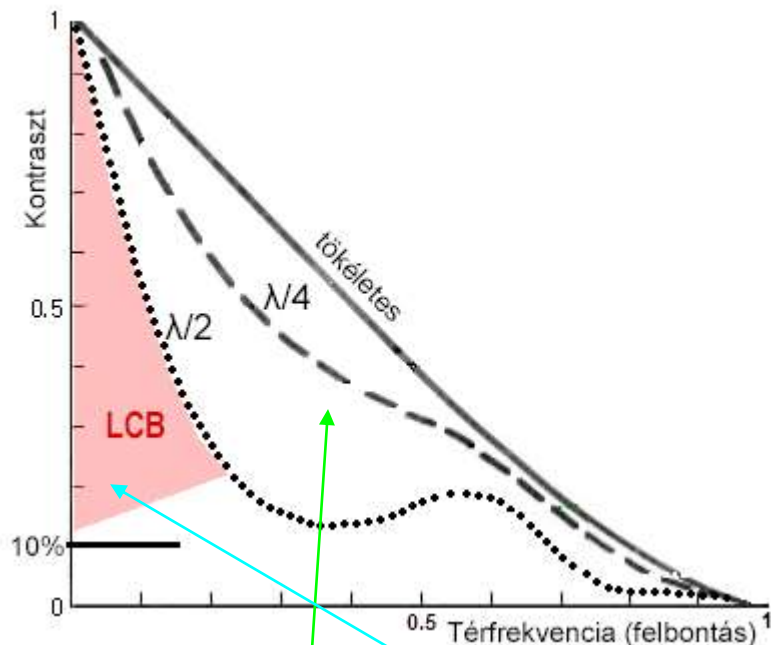
HCB: Magas kontrasztú és fényes részletek (Low-Contrast-Bright) Minden méretben (térfrekvencián) és kontrasztviszony mellett látszanak. A távcső aberrációi kicsit csökkentik a megfigyelés esélyét.



Példa: az optikai minőség hatása egy nagy kiterjedésű objektum felületi részleteinek megjelenítésére.

A „ $\lambda/2$ ” a rossz minőségű, nagy szférikus aberrációjú objektívet, a „ $\lambda/4$ ” a már éppen jónak tekinthető objektívet jelöl.

A piros területek az adott minőségű optika által megjeleníthető **alacsony kontrasztú, de fényes részleteket (LCB)** jelöli.



A $\lambda/2$ -es, rossz minőségű távcsőben ezek a kisebb részletek nem látszanak

A nagyobb léptékű, de alacsonyabb kontrasztú részek mind a kettő távcsőben elkülöníthetők.

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Babcsán Gábor: Az amatőr távcsövek optikai teljesítményéről – Meteor Csill. Évkönyv 2004

MCSE: Amatőrcsillagászok kézikönyve (több kiadás)

<http://aberrator.astronomy.net/scopetest/>

<https://andor.oxinst.com/learning/view/article/telescope-fundamentals-how-optical-form-follows-function>

<https://www.astropix.com/html/astrophotography/astrophotography-formulae.html>

<https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-modulation-transfer-function/?srsltid=AfmBOordZXAOoHadpy5hzJhb5ASU1gMJBa8krWktncyGvVGPZdwoe2sY>

<https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/contrast/>

<https://evidentscientific.com/en/microscope-resource/tutorials/mtf/airydisksize>

<http://handprint.com/ASTRO/ae2.html>

<http://handprint.com/ASTRO/ae3.html>

<https://www.handprint.com/ASTRO/ae4.html>

https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/math-ch01.html

<https://www.quickguide.org/post/modulation-transfer-function-mtf>

<https://www.quickguide.org/post/points-spread-function>

<https://srmastro.uvacreate.virginia.edu/astr511/lectures/optics2/optics2.html>

https://www.telescope-optics.net/general_effects_of_aberrations.htm

https://www.telescope-optics.net/aberrations_point.htm

https://www.telescope-optics.net/aberrations_extended.htm

<https://www.telescope-optics.net/mtf.htm>

https://www.telescope-optics.net/telescope_resolution.htm

https://www.telescope-optics.net/diffraction_image.htm

https://www.telescope-optics.net/diffraction_pattern_and_aberrations.htm

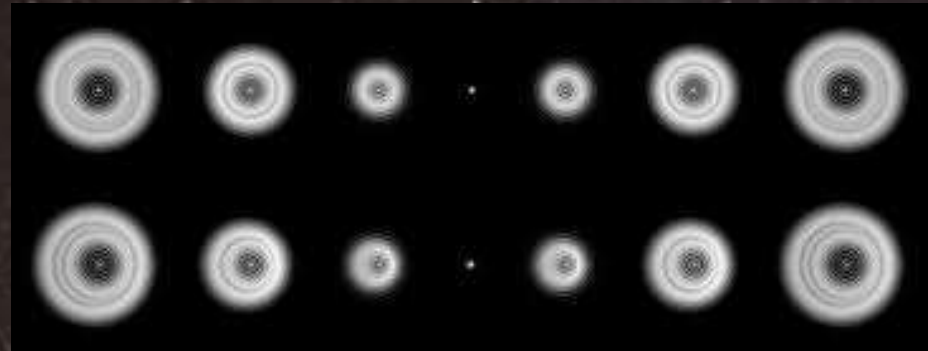
<https://tudastar.tavcso-mikroszkop.hu/a-tavcso-kozponti-kitakarasanak-hatasai.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction_spike

<https://www.zeiss.com/microscopy/en/resources/insights-hub/foundational-knowledge/fundamental-aspects-of-airy-disk-patterns.html>

IV. A távcsövek optikai minőségének ellenőrzése és jellemzése

- gyakorlatias megközelítés csillagászati szakkörösök számára, belső használatra –
- A felhasznált és ajánlott szakirodalmak a témakör végén olvashatók! –



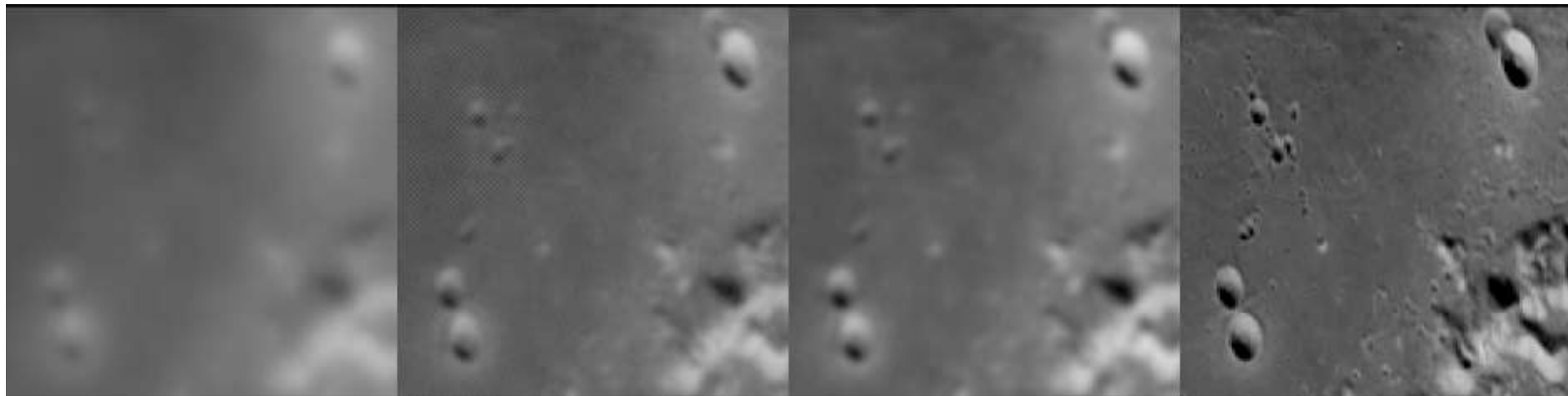
Célkitűzés:

Ezekkel foglalkozunk:

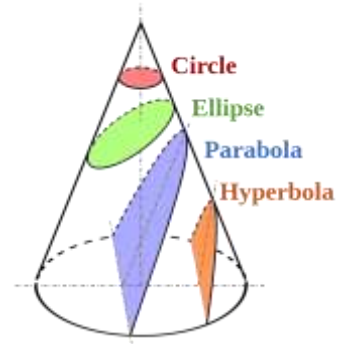
- A felületi hiba (aberráció) fő típusai és okai
- Milyen mérőszámokat használnak a távcsőobjektívek minőségének jellemzésére? (Pl. mi az a Strehl-érték?)
- Hogyan tudjuk otthon tesztelni a távcsövünk minőségét? („Miért látok élesebb, részletesebb képet a barátom 15 centis távcsövében, mint az én 15 centis távcsövemben?”)

Ezekkel nem foglalkozunk (pedig a gyakorlatban nagyon fontosak):

- a távcsövük konstrukciós hibái által okozott alaktorzulásokkal (pl. túl hosszú és gyenge a cső és lehajlik),
- a távcsövek juszttírozásával (másnéven kollimációjával), ld. következő fejezet (141. old.),
- a légköri áramlások, turbulenciák kialakulásával, méretével stb.,
- a szemünkkel (a látás problémakörével) és más (elektronikus) detektorok leképezési problémáival.

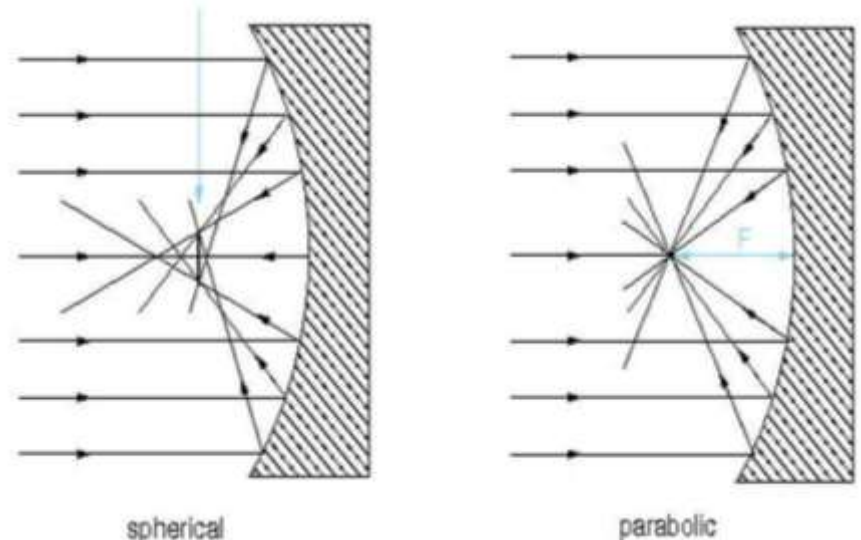
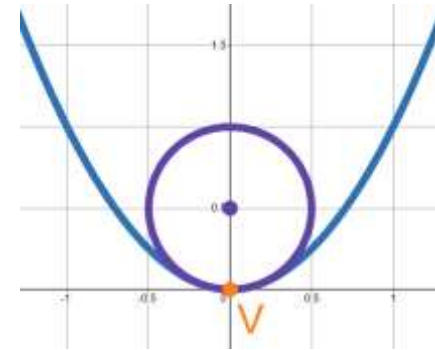
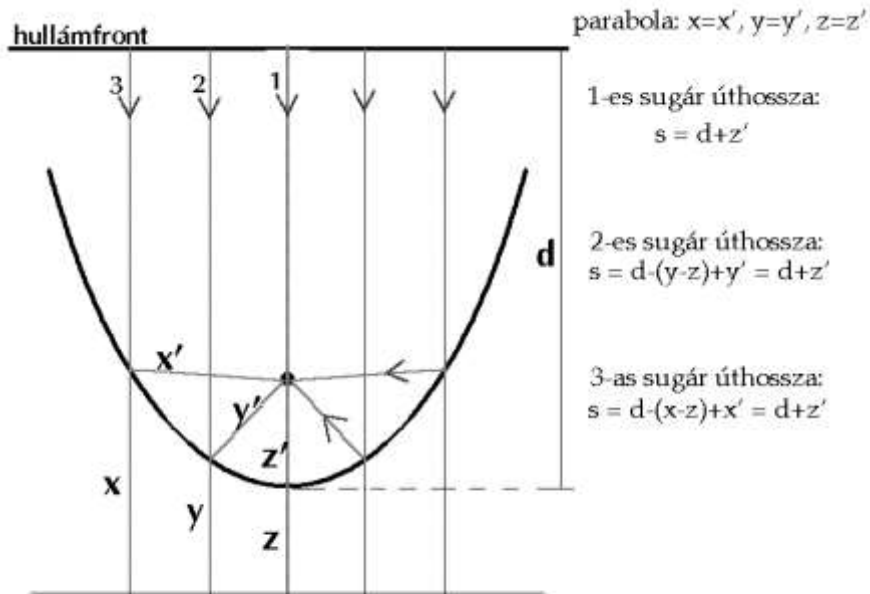


Ismétlés: Az objektívek (tükrök és lencsék) felületi alakját egy kúpszeletből létrehozott forgásszimmetrikus felületeként kell elképzelni (kör-gömb, ellipszis-ellipszoid, parabola-paraboloid, hiperbola-hiperboloid).



Miért paraboloid a távcsövek főtükrének felülete?

Egy sík hullámfrontot (a végtelenből érkező gömbi hullámfront, vagyis pl. egy csillagról érkező fény) egy paraboloid segítségével tudunk egy pontba fókuszálni:



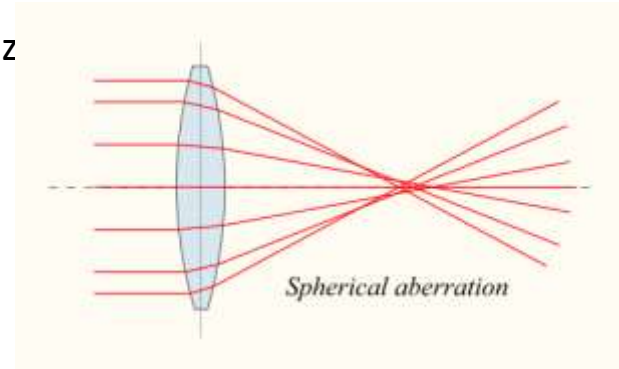
DE: kis fényerő esetén a gömb és paraboloid közötti különbség olyan kicsi, hogy gyakorlatilag a gömb is elegendő.

Az előadásban az objektívek, illetve a teljes távcsövek optikai felületeinek együttes pontosságával, valamint a segítségükkel kapott kép minőségével foglalkozunk.

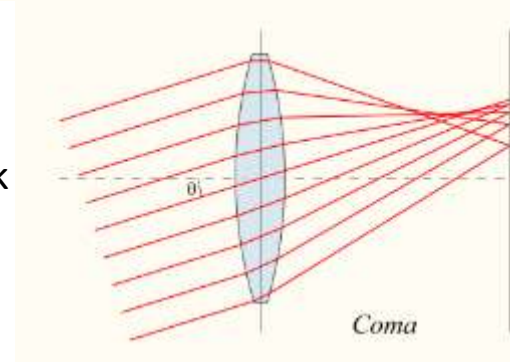
Ismétlés: Fontosabb monokromatikus aberrációk

Szferikus aberráció (vagy gömbi hiba) akkor lép fel, ha az optikai tengellyel párhuzamosan, de különböző magasságokban belépő nyalábok eltérő távolságokban fókuszálódnak (vagyis eltérő távolságokban metszik az optikai tengelyt).

E hiba jelenlétében nincs egzakt fókusz, a legkisebb szóródáshoz tartozó sík lehet a fókuszsík.

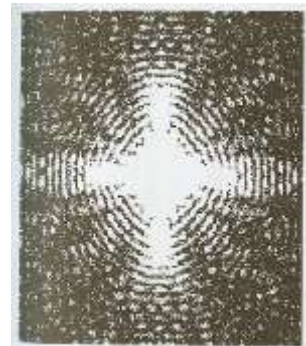
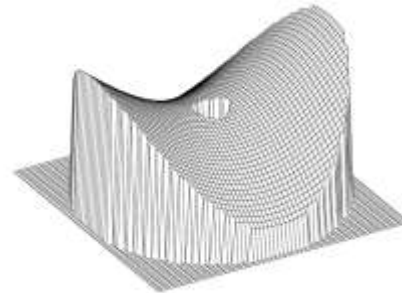


Kómahiba akkor léphet fel, amikor az optikai tengellyel szöget bezáró sugarak lépnek be az apertúrán. Az objektív szélein belépő úgynevezett tengelyen kívüli (off-axis) sugarak más magasságban metszik a fókuszfelületet, mint az apertúra közepén belépők. Ennek eredményeként egy pontforrás képének az intenzitáseloszlása nem lesz szimmetrikus, hanem elnyúlt, üstökösszerű alakot ölt.



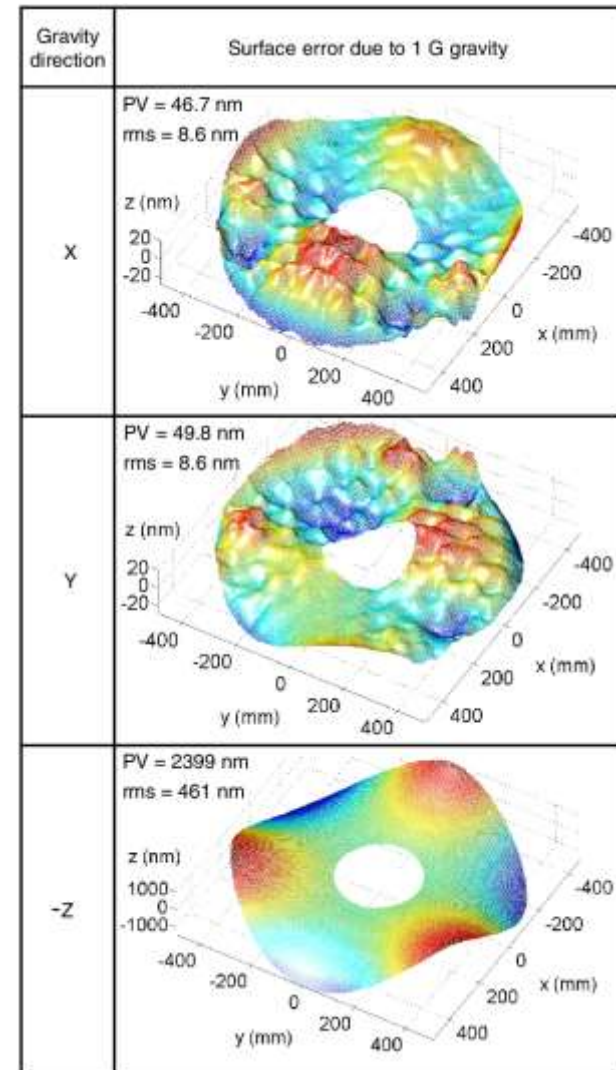
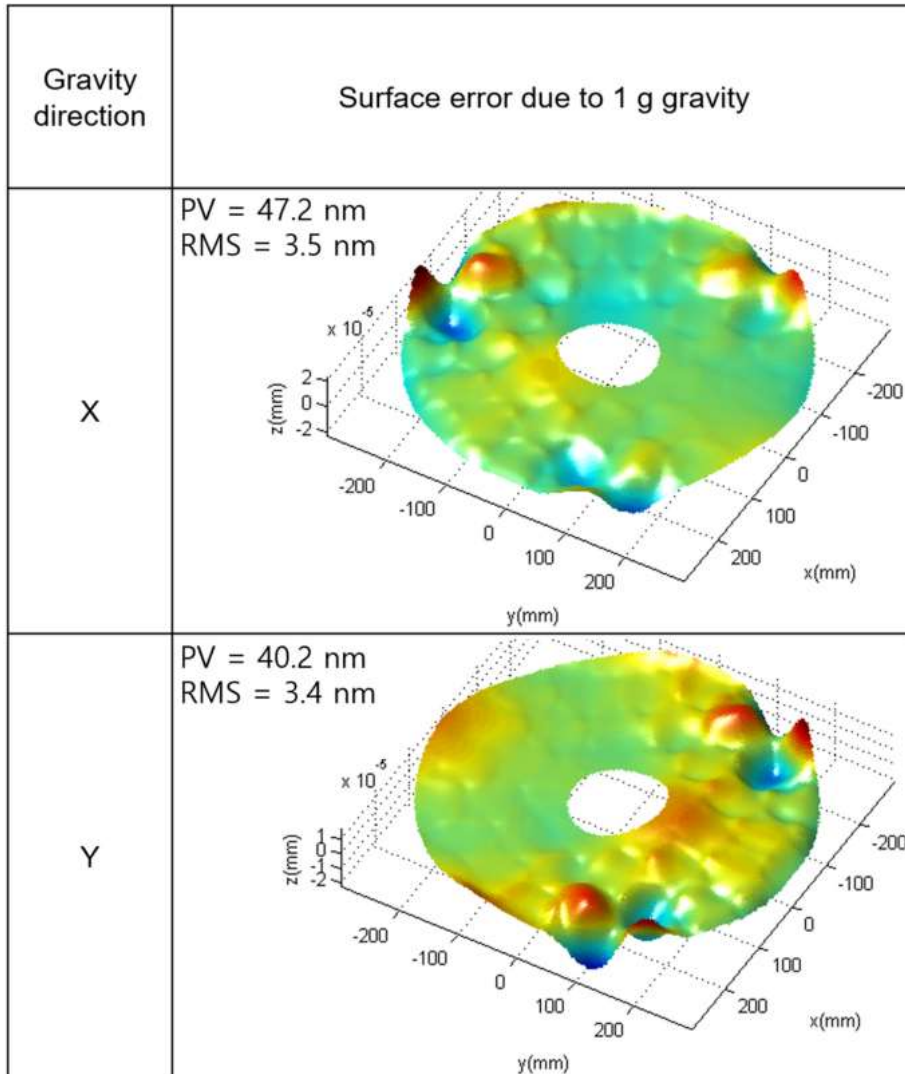
Asztigmia: Asztigmatizmus esetében az objektív fókusza eltérő két egymásra merőleges síkban. Az optikai felület erős túlzással „nyereg” alakúnak tekinthető.

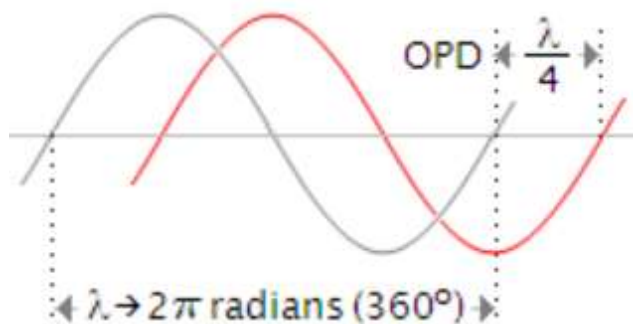
Egy csillag képe asztigmatikus objektívű távcső fókuszban, nagy nagyítással (kereszt alakú, nem körszerű).



IV.1. A felületi hiba (aberráció) fő típusai és okai

A távcsövekben nincsen „teljesen tökéletes” optikai elem, maximum csak olyan, aminek a felületi hibája, torzító hatása kisebb, mint amit észreveszünk (ami zavarja az észlelést).



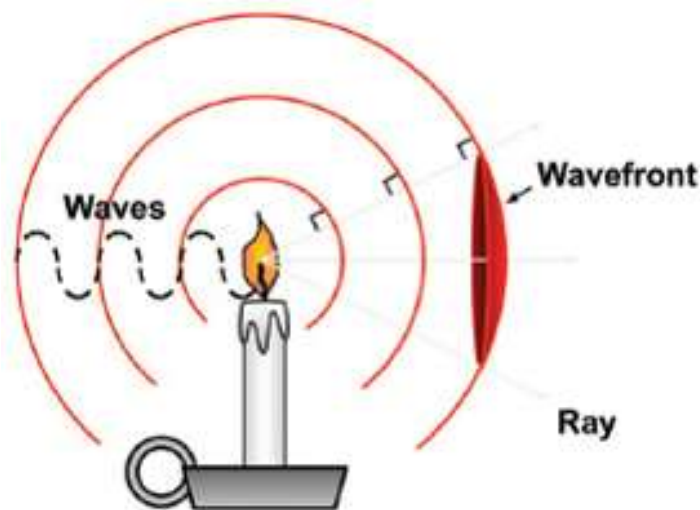


Alapfogalom: Rayleigh útkülönbség-kritériuma

Az aberrációk (itt most optikai felületi hibák) képminőségre gyakorolt hatásának értékelésére szolgáló kritériumok az optika elméleti hátterével együtt fejlődtek. Az első, és valószínűleg a legismertebb, **Lord Rayleigh (1878) 1/4 hullám optikai útkülönbség-kritériuma** a monokromatikus aberrációkra. Ennek az a lényege, hogy az optika által összegyűjtött elektromágneses hullámok (fény sugarak) között ne legyen negyed hullámhossznál nagyobb elcsúszás a távcső fókuszpontjában. Ezt az elméletet később számos másik követte.

Alapfogalom: hullámfront (wavefront)

Egy azonos fázisú hullámpontokat összekötő képzeletbeli felületet fázisfrontnak nevezünk. A fázisfront geometriai közelítését, amely **a forrástól mért azonos sugár optikai úthosszán (optical path length, OPL) alapul, optikai hullámfrontnak vagy egyszerűen hullámfrontnak (wavefront) nevezzük**. Optikai távcsövek esetében a fázisfront és a hullámfront minden gyakorlati célból azonos.



A felületi hiba (aberráció) mérésének két fő formája a következő:

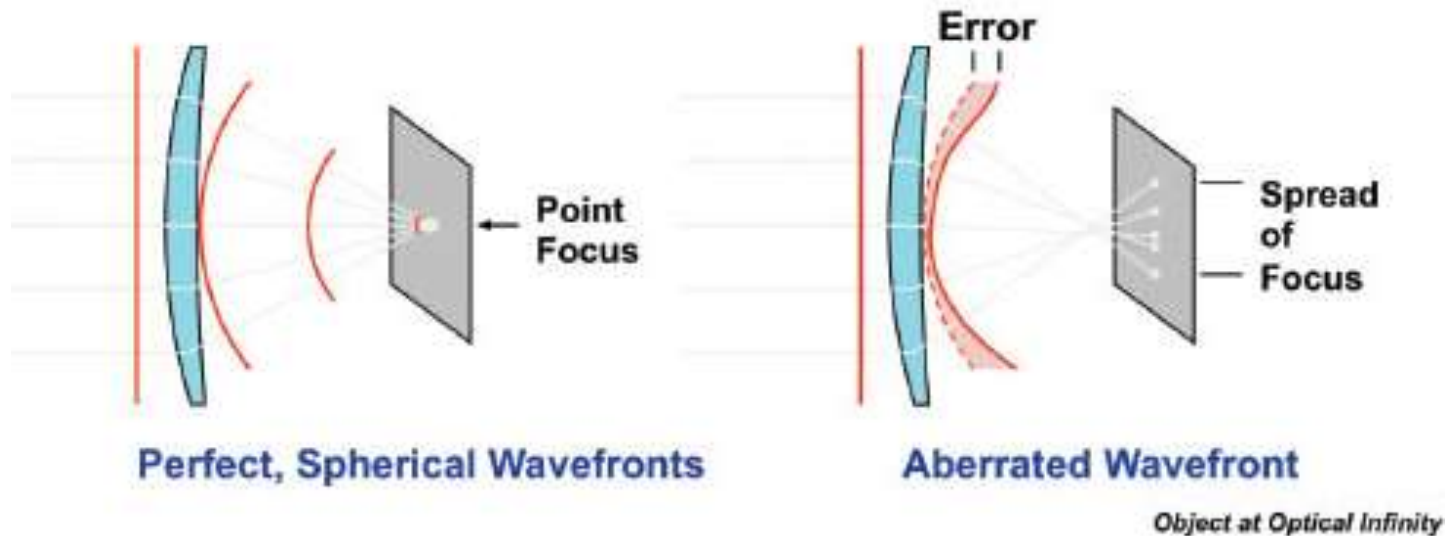
A. magán a hullámfronton mért eltérés a tökéletes referenciagömbtől, és

B. a fókuszpontban a hullámfrontról kivetített sugarak lineáris vagy szögeltérésének mérése.

A. Hullámfront mérése

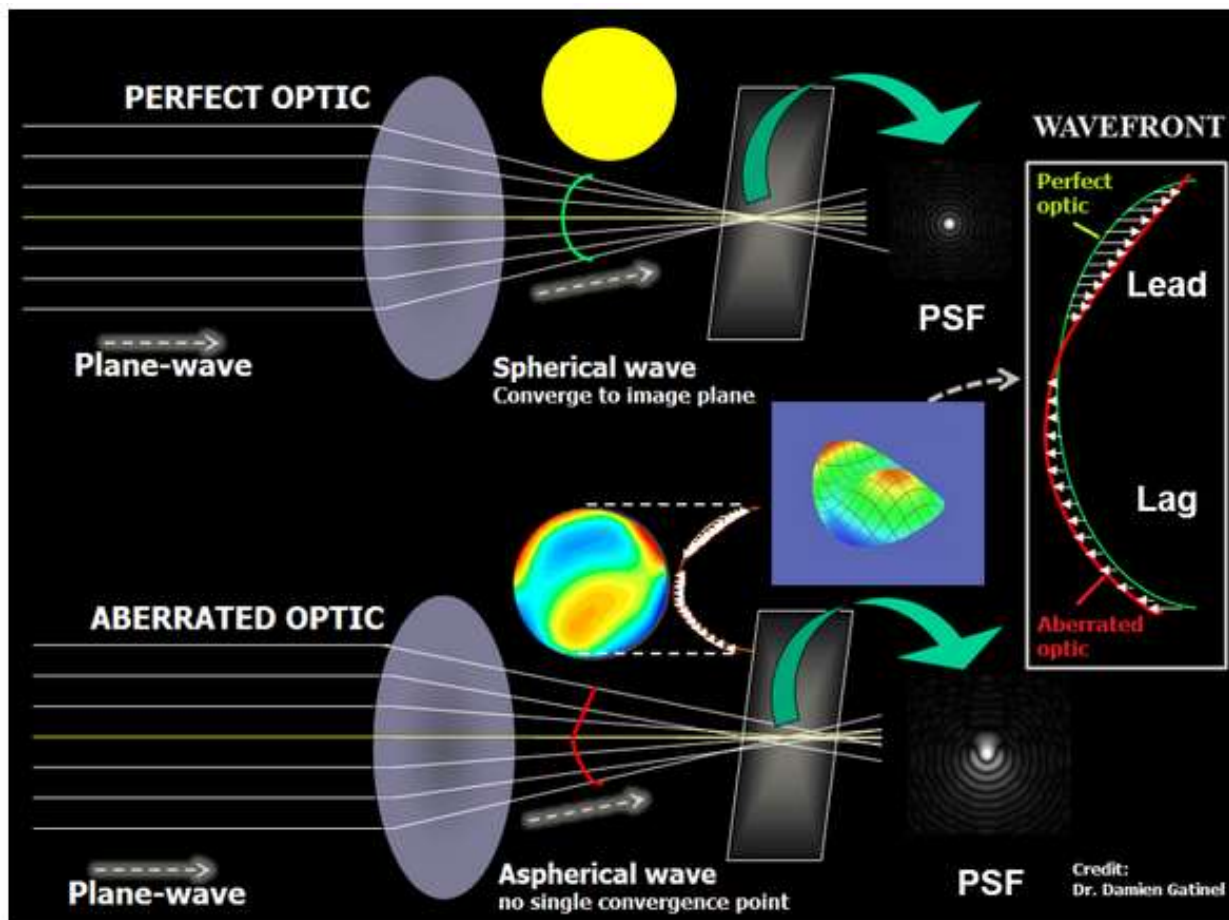
A távcső által létrehozott hullámfront bármilyen eltérése

- a tökéletesen gömbi alaktól (az objektív által létrehozott hullámfrontok esetében),
 - vagy a tökéletesen sík alaktól (az okulár által létrehozott hullámfrontok esetében)
- optikai aberrációt (hibát) eredményez.**



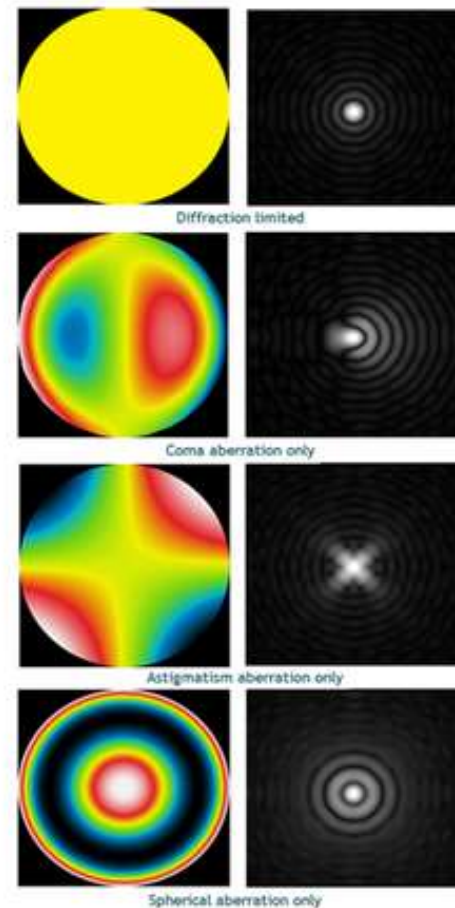
Az aberráció megzavarja az energia optimális konvergenciáját egy pontszerű képhez, ami a képminőség romlásához vezet.

Ez azt jelenti a gyakorlatban, hogy egy csillag esetén a beérkező fénynek ideálisnál nagyobb része szorul ki az Airy-korongból, így lecsökken a kép kontrasztja.



Peak

Valley

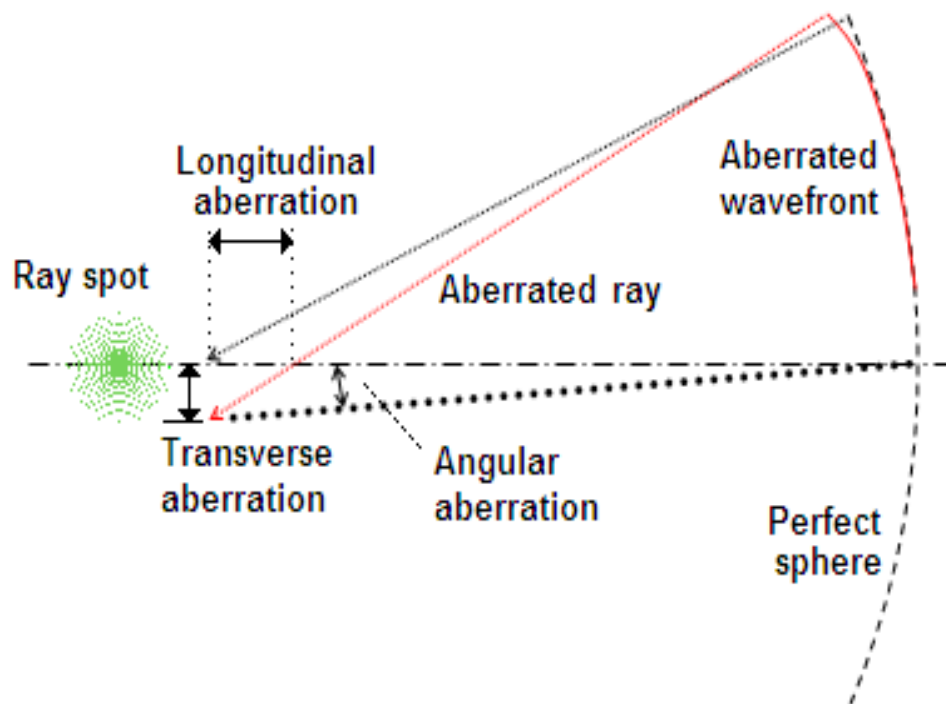


B. A hullámfrontról kivetített sugarak lineáris vagy szögeltérése

A hullámfront-deformációk elkerülhetetlenül együtt járnak a **hullámfront felületére merőleges sugarak (fénypályák) zavarásával**. A **hullámfronthibák által okozott sugarak zavara az aberrált sugár szögeltéréseként (angular aberration) nyilvánul meg, ami lineáris sugáreltérést okoz a képsíkban**.

Az **ábra tetején** a hibás tükörfelület (piros) által létrehozott hullámfront eltér a tökéletes referenciagömbtől (szaggatott), mivel erősebben görbült a széle felé.

Ennek eredményeként a **szélső sugarak kisebb távolságra fókuszálódnak, mint a centrális sugarak**.



Az aberrált sugár és a megfelelő fókusz közötti távolság alkotja a **longitudinális (hosszanti) aberrációt**.

Az aberrált sugár képsíkban mért radiális magassága pedig a **transzverzális (keresztirányú) aberrációt**.

Ezek értékeiknek nincs közvetlen kapcsolatuk az energia(újra)eloszlást meghatározó optikai útkülönbséggel (optical path difference, OPD), ami fáziskülönbséget hoz létre a fókuszban (képsíkban) interferáló hullámok között (Rayleigh-kritérium, ld. korábban, 111. old.).

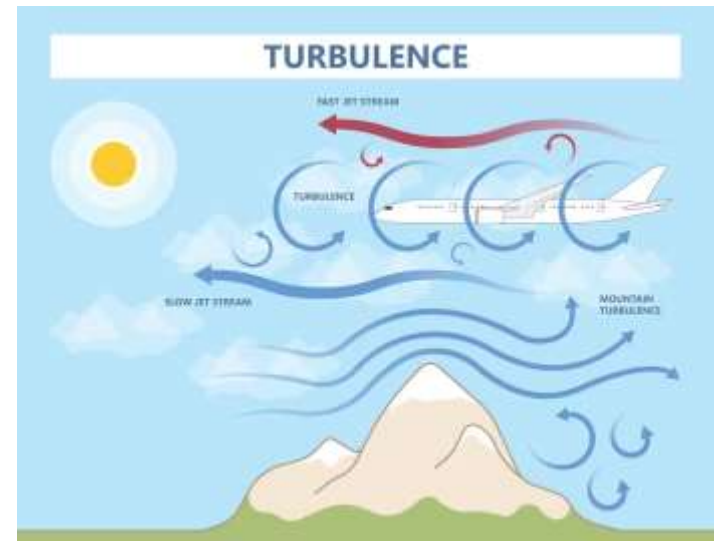
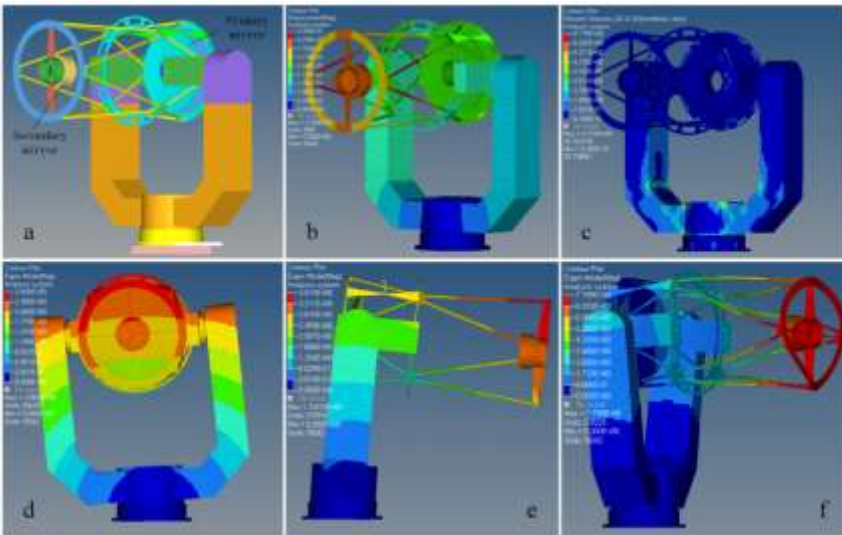
A hibák fő típusai:

Az aberrációk megjelenési formájától függetlenül hasznos különbséget tenni az optikai felületek **belső aberrációi** és a **külső tényezők** által okozott aberrációk között.

A távcső belső aberrációi a kúpszelet-felületek (kör-gömb, ellipszis-ellipszoid, parabola-paraboloid, hiperbola-hiperboloid) hibáiból, az üvegek belső problémáiból, valamint az optikai-mechanikai gyártási hibákból erednek.

A külsőleg indukált távcső-aberrációkat a következők okozzák:

- beállítási hibák (jusztirozás, másnéven kollimáció),
- a hőmérsékleti változások, a gravitáció és a nem megfelelő rögzítés okozta kényszerített felületi deformációk az optikai és mechanikai elemekben, valamint
- légáramlatok / légköri turbulencia.

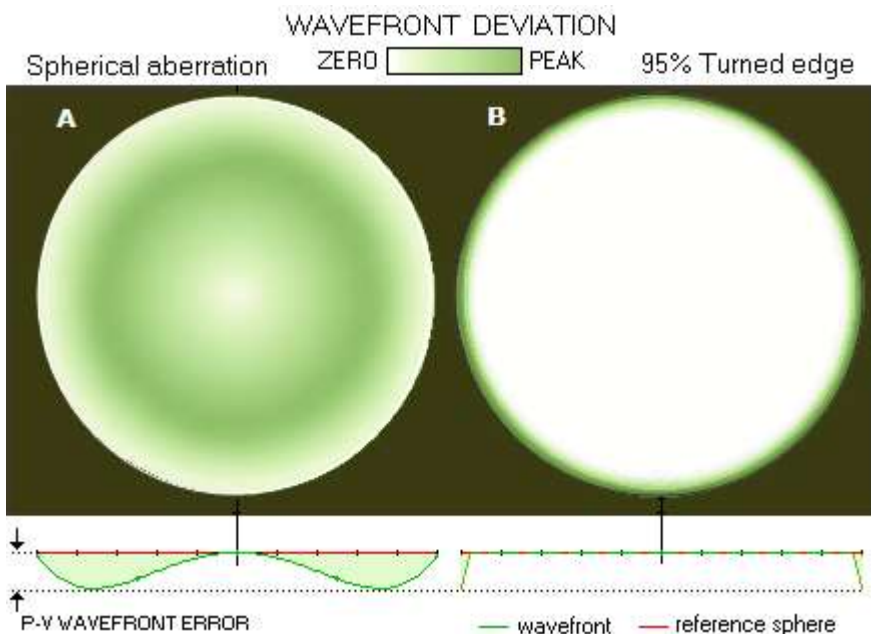
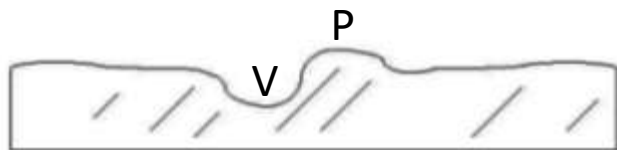


IV.2. A távcsövek optikai minőségének jellemzésére leggyakrabban használt mutatók (Mit olvashatunk a távcsőboltok honlapjain és ezek mit jelentenek?)

IV.2.1. P-V, csúcs-völgy (peak-to-valley, PV, PtV) érték

Az ideális hullámfront felülettől legjobban eltérő legnagyobb „hullámhegy” és „hullámvölgy” közötti eltérés (általában) a látható fény sárgászöld tartományában.

Jelölés: lambda (λ). Egy már elfogadható optika P-V értéke $\lambda/4$, azaz a fény hullámhosszának max. ¼-e az eltérés az ideálishoz képest. A $\lambda/6$ sokkal jobb, egy $\lambda/10$ optika amatőr csillagászati célra tökéletes. A P-V hiba önmagában kevés egy objektív, vagy optikai rendszer átfogó minőségi jellemzésére.



Példa a P-V érték módszertani problémájára

Két névlegesen azonos csúcs-völgy (P-V) hullámfronthiba, amelyek drámaian eltérő hatással vannak a képminőségre (zöld rész a rossz). Balra az **(A) tükörön látható nagy területű a szférikus aberráció, amely jóval erősebb képromlást okoz,** mint **(B) tükör** a névlegesen azonos P-V-hiba, amely csupán a sugár 95%-ánál kezdődő peremkopásból ered. **Ez utóbbi a hullámfrontterület kis részét érinti, így csekély hatással van a képminőségre.**

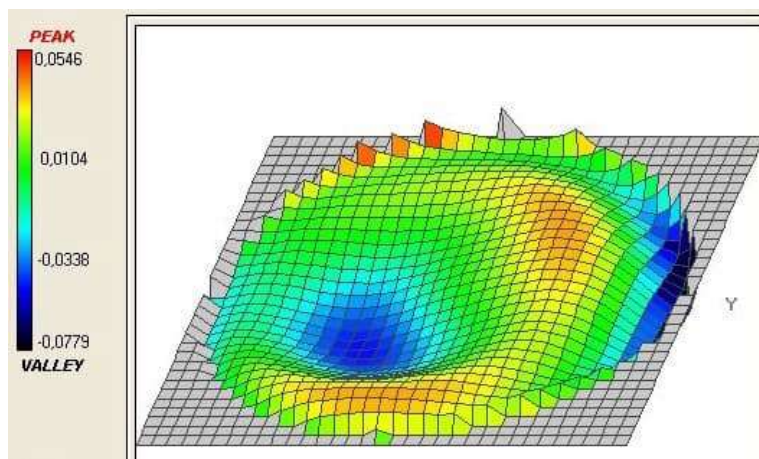
IV.2.2. Az RMS (Root Mean Square, négyzetes középhiba) érték – átlagos felületi deformáció

Ennek meghatározása során **a felület több pontján veszünk mintát**, majd ezek alapján határozzuk meg annak pontosságát.

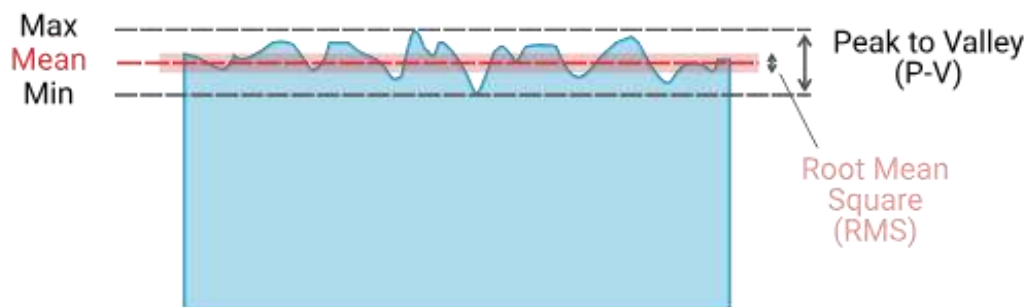
Az RMS érték **a teljes felületet jellemzi, csökkentve azon kis részek jelentőségét, melyek az „átlagos” minőségtől eltérnek** (pl. a kis területű „hegyek” és „völgyek”).

(Pontos definíció: Az RMS hullámfronthibát a négyzetes hullámfront-eltérések átlaga és az átlagos hullámfront-eltérés négyzete közötti különbség négyzetgyöke adja meg.)

Az RMS érték a tökéletes referencia gömbtől való statisztikai eltérést fejezi ki, a teljes hullámfront átlagolásával.



Root Mean Square and Peak to Valley

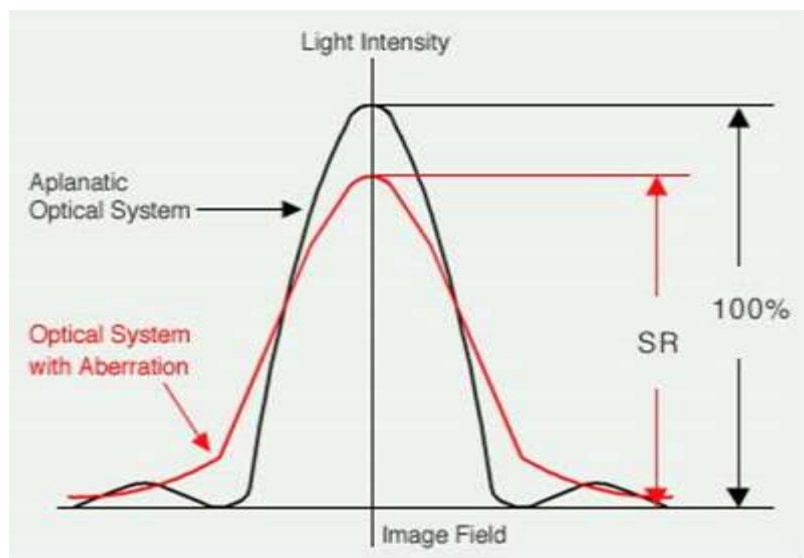


IV.2.3. A Strehl-érték

A Strehl az optika teljesítőképességét az elméletileg elérhetőhöz viszonyítja.

A bejövő fény hány százaléka kerül az Airy-korongba az ideális optikához képest?

Leggyakrabban **0 és 1 közé eső számmal**, ritkábban százalékban kifejezve adják meg. A tökéletes rendszer esetében ez az érték 1, **tehát a Strehl 0,95 azt jelenti, hogy az optikától ideális esetben elvárható értékhez képest a fény 95%-a kerül az Airy korongba, míg 5% az azt körbevevő gyűrűkbe** (azok közül is leginkább az elsőbe) csökkentve a kontrasztot. **1-nek az adott rendszer tökéletes optikával rendelkező „változata” tekintendő.**



Ne feledjük, hogy egy távcsőben sok felület van!
Newton: 2 tükör, lencsés távcső 4-6 felület!

De **nem közvetlenül az egyes optikai elemek felületének pontosságát kell elképzelni**, hanem az általuk fókuszált fénysugarak által alkotott „felületét”, azaz a hullámfrontot!

Befolyásoló tényező még: a légköri nyugtalanság, a kollimációs hibák és a fényútban levő egyéb optikai elemek és az optikai elemeken lévő karcok és kosz.

A P-V, az RMS és a Strehl mutatók összehasonlítása

P-V	Marechal RMS	Strehl érték	Megjegyzés
1/3	0.094	0.71	
1/4	0.071	0.82	Diffrakció-határolt
1/5	0.057	0.88	
1/6	0.047	0.92	Jó
1/7	0.041	0.94	Nagyon jó
1/8	0.036	0.95	Kitűnő
1/9	0.032	0.960	Kitűnő
1/10	0.028	0.969	Kitűnő
1/11	0.026	0.974	
1/12	0.024	0.978	

Sajnos a gyártók a legtöbbször csak P-V-hibában adják meg egy optika pontosságát. Ám ez csak szabályos hiba esetén követi pontosan az RMS és a Strehl értékét.

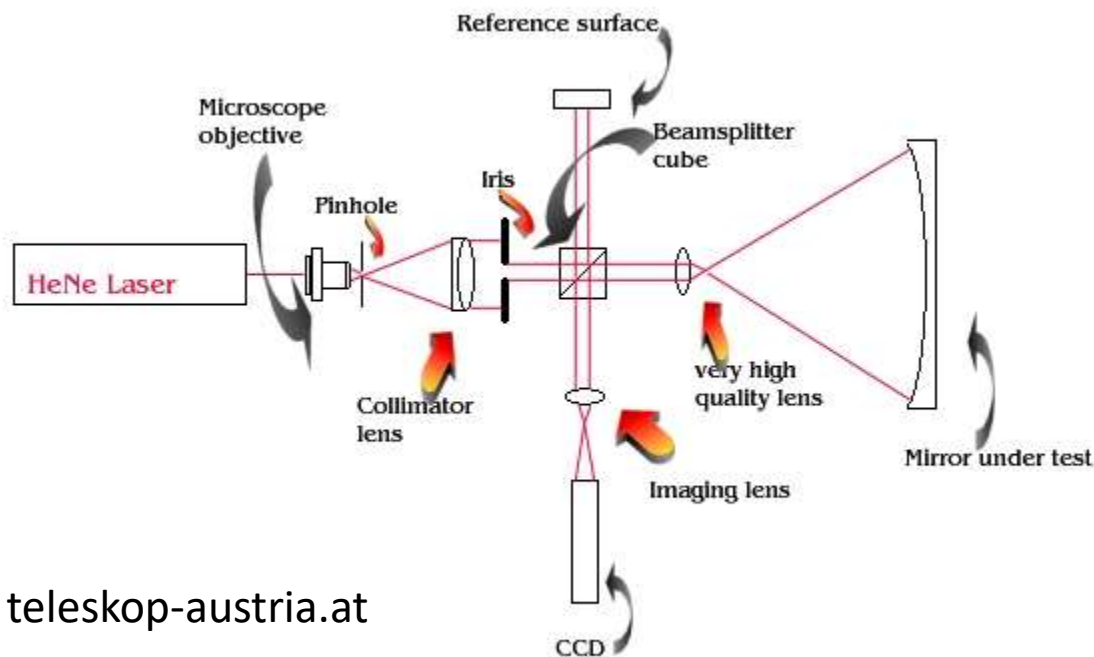
A valóságban csak az RMS érték korrelál szorosan a Strehl-értékkel.

Az RMS meghatározása pontosan csak interferométerrel lehetséges, de kisebb-nagyobb pontossággal megbecsülhető más optikai módszerrel, pl. rácsp próbával vagy csillagtesztel is.

IV.3. Profi mérési módszer: optikai interferométer

A fényforrás egy nagy teljesítményű lézer.

- A belőle kilépő lézernyaláb áthalad két objektíven és nagy átmérőjű párhuzamos nyalábbá alakul.
- Ezt a nyalábot egy íriszblende szűkíti megfelelő méretűre.
- Ezután a kisebb átmérőjű párhuzamos sugárnyaláb áthalad egy sugárosztó prizmán. A prizma a nyaláb egy részét a referencia felület (sík) felé irányítja, más részét a mérendő optika felé továbbengedi. A prizmából kilépve a párhuzamos nyaláb áthalad egy kitűnő minőségű lencsén vagy lencserendszeren, amely ezt a nyalábot egy $f/2.6$ fényerejű sugárkúppá alakítja.
- A mérendő tükörről visszaverődő sugárkúp a kitűnő minőségű lencsén keresztül haladva, visszaalakul párhuzamos nyalábbá és a referencia felületről visszaverődő nyalábbal interferál.
- A keletkező interferencia képet, a sugárosztó prizma negyedik oldalán elhelyezett CCD kamera fogja fel.
- A referencia felület dönthető, ezzel változtatható az interferencia sávok helyzete és sűrűsége.



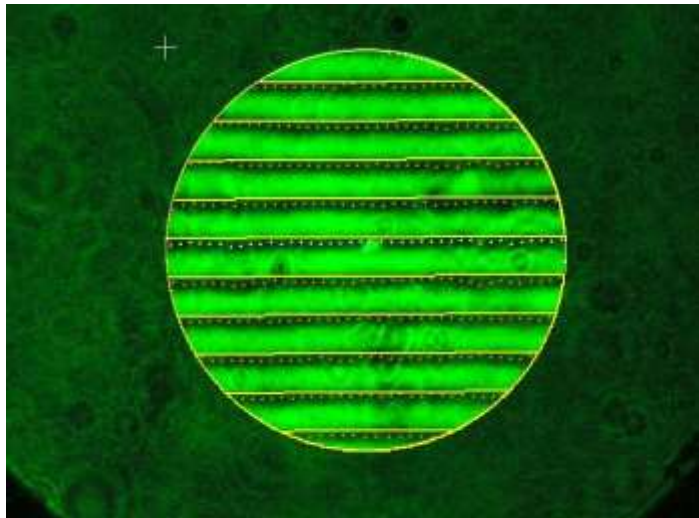
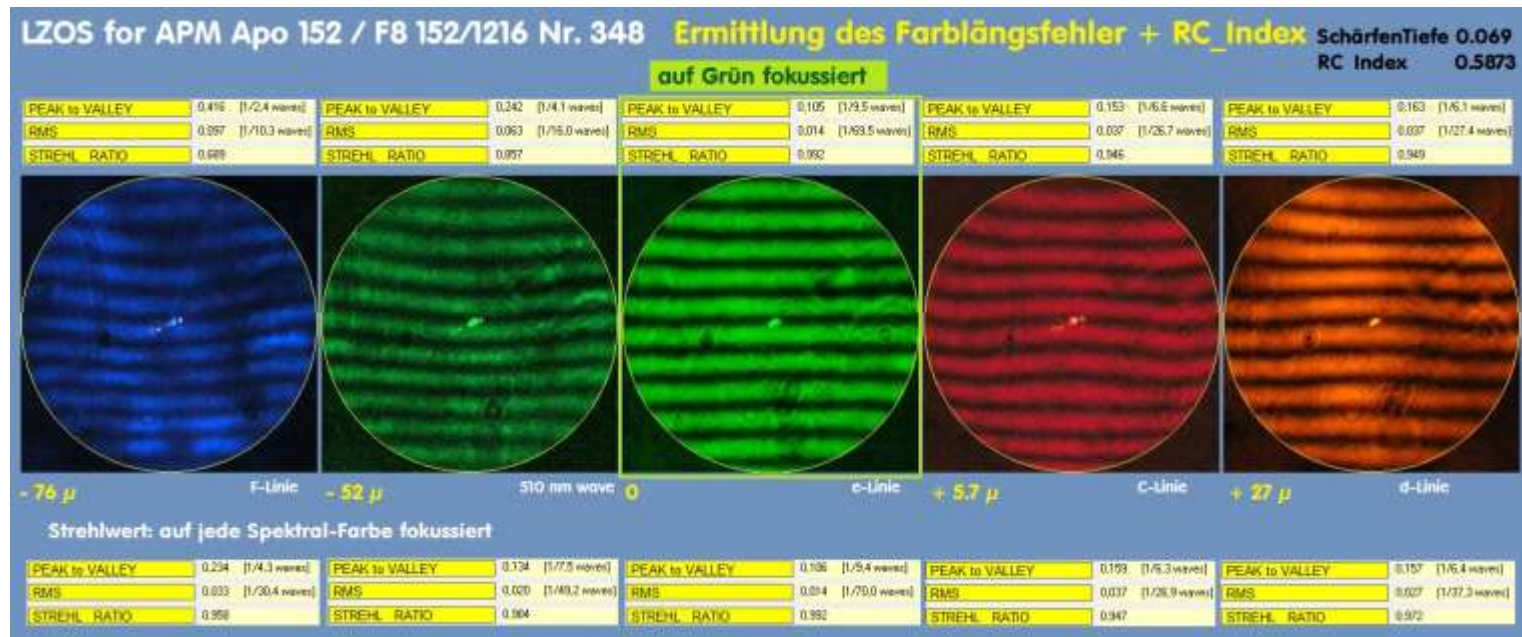
teleskop-austria.at

Egy interferométerrel akár 50000 ponton is mérhetik a felület eltéréseit, jóval belül a $\lambda/20$ P-V hibahatáron.

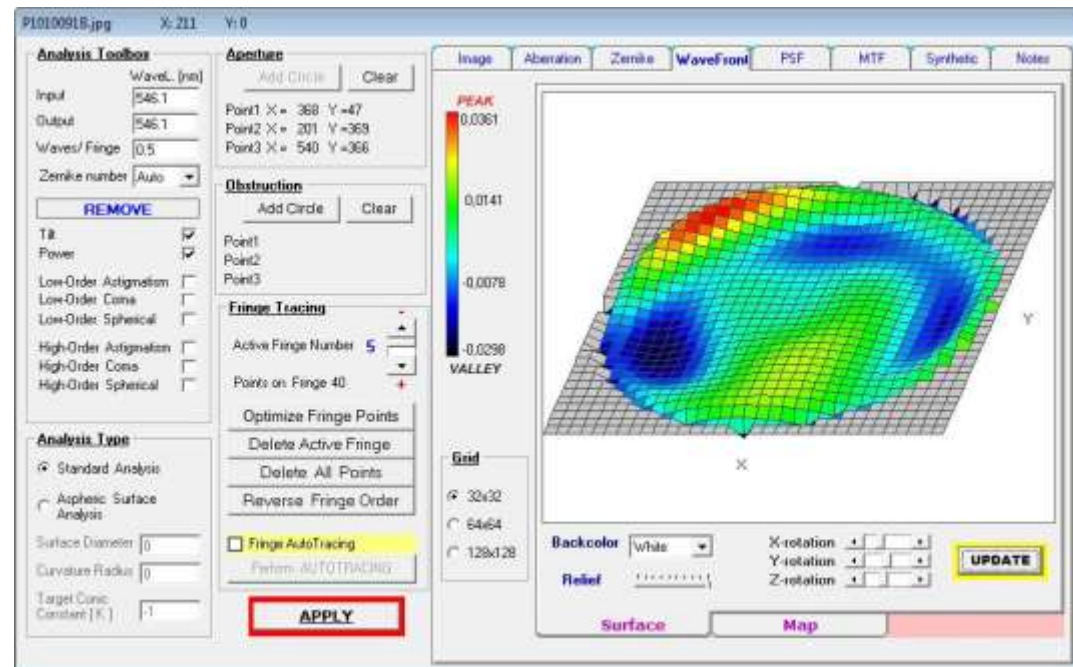
Ezt a mérést érthető okokból egy átlagos amatőr csillagász otthon nem tudja elvégezni.

A távcsőboltoknak általában van kapcsolata optikai laborokkal, ha valaki ilyen mérést szeretne csináltatni (fizetős).

Interferencia mérés eredményei (különböző hullámhosszokon)



A sárga vonalak az ideális esetet jelölik.

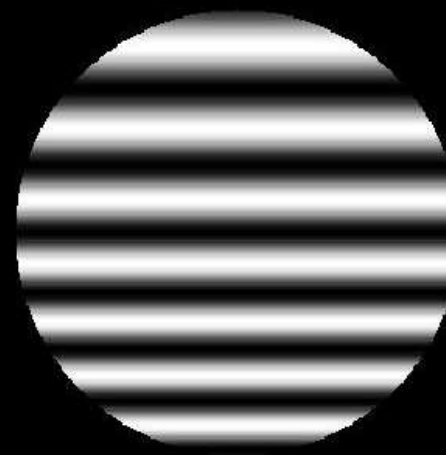
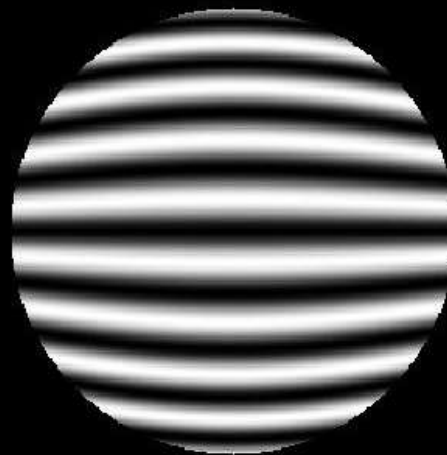
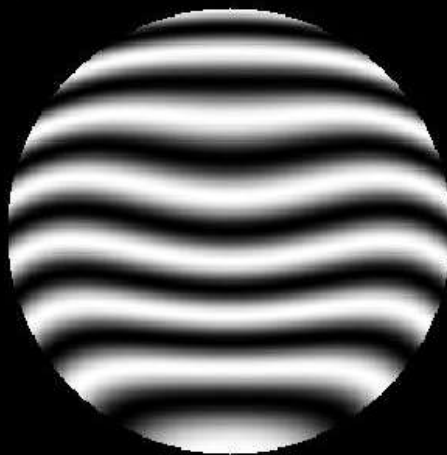
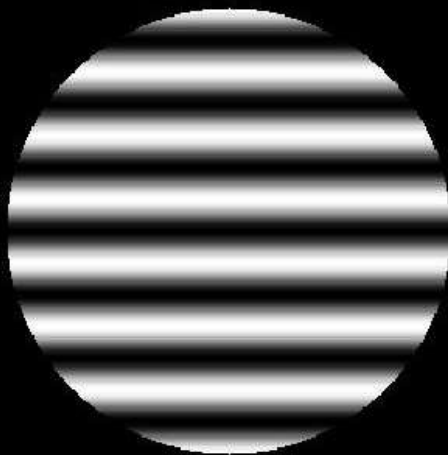


perfekt

Spherical Überkorr

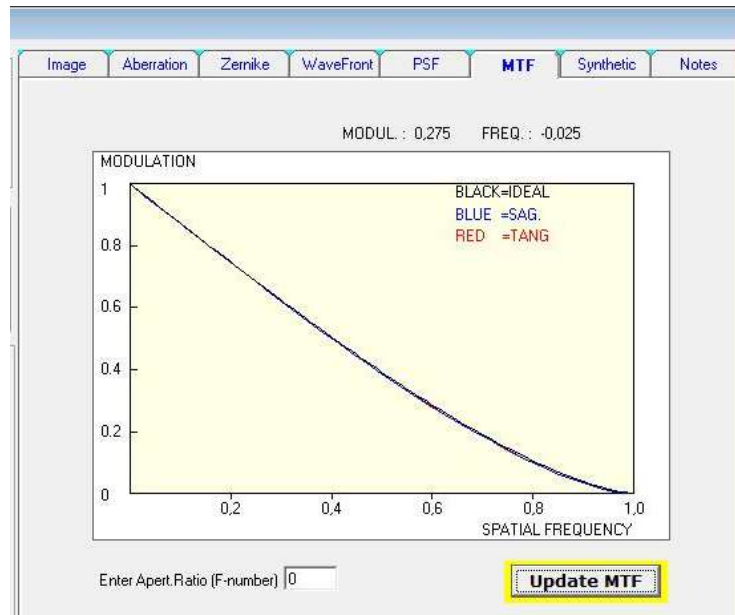
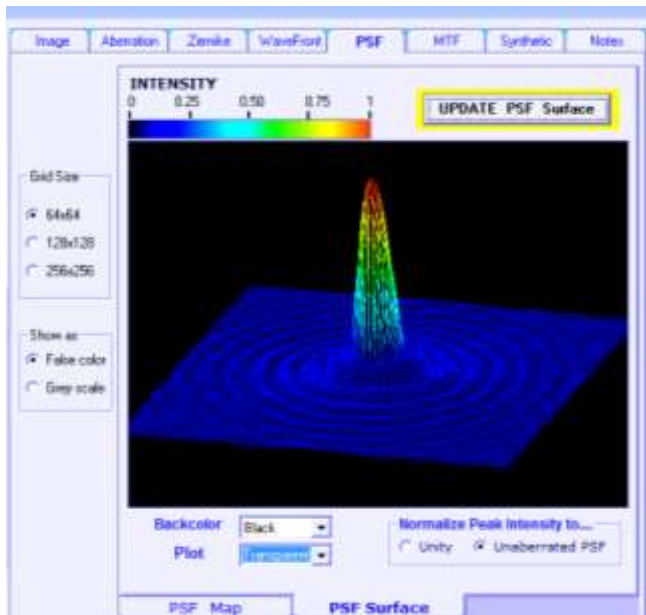
Koma senkrech

Astigmatismus



A mérésekből sok minden kiszámolható:

Pl. az előző előadásban volt szó a pontszórási függvényről (Point Spread Function) és a kontrasztátviteli függvényről (Modulation Transfer Function).



Aberrations		Waves
PEAK to VALLEY	0,056	[1/15,2 waves]
RMS	0,012	[1/85,2 waves]
STREHL_RATIO	0,996	
TILT	Removed	
DEFOCUS	Removed	
ASTIGMATISM (low-order)	0,032	50,74 (degree)
COMA (low-order)	0,039	-111,30 (degree)
SPHERICAL (low-order)	0,015	

IV.4. Milyen módszerekkel tudjuk otthon, házilag megállapítani, hogy milyen minőségű a távcsövünk optikája?

IV.4.1. Foucault-próba és a „késél” próba (ezt tükörctisztítók használják inkább, de most nem cél ezek tökéletes elsajátítása, csak általános ismertetése)

IV.4.2. Rácspróba vagy Ronchi-teszt – kis költségvetésű módszer

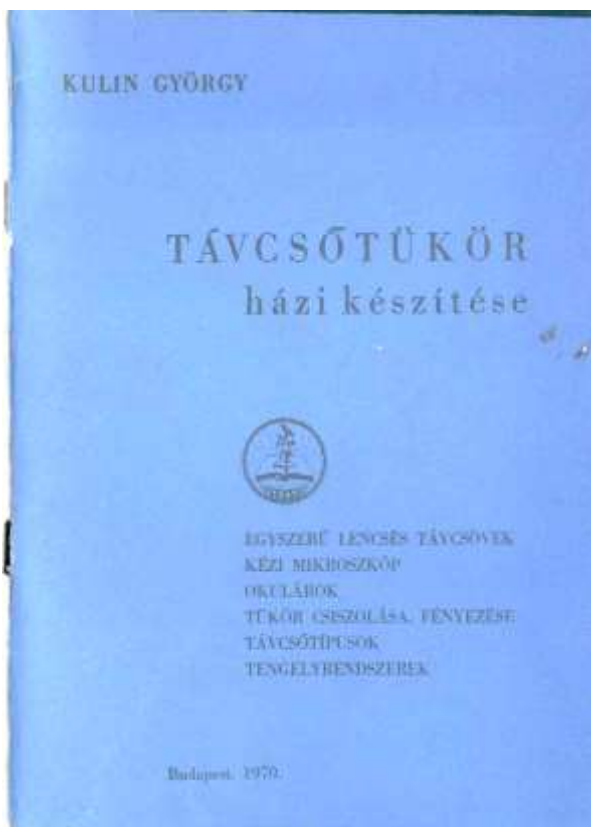
IV.4.3. Csillagteszt – ingyen van

Mindegyik módszer jó és hasznos, ha megfelelően elsajátítjuk.



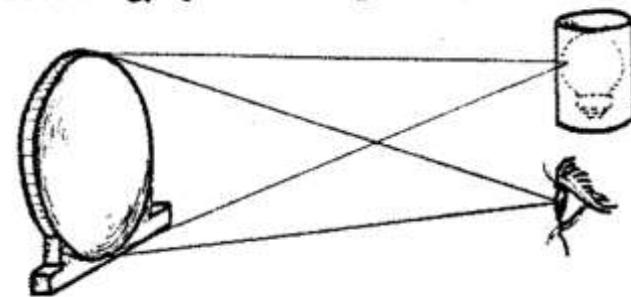
Csak tükrök
tesztelésére jó!

Egy klasszikus mű:



IV.4.1. A Foucault fénypróba

Első durva próbánk tehát az lehet, hogy a tükörtől kétszeres gyújtótávolságra /150 cm gyújtótávolság esetén 300 cm-re/ elhelyezünk egy izzószálas villanykörtét. A tükört úgy irányozzuk be, hogy a róla visszaverődő kép közvetlenül a lámpa mellett keletkezzék.



tást.

A tükörnek ez az állítása eleinte nehézkesen megy, de hamarosan megtanuljuk a gyors beállítást.

Első örömünk az lesz, hogy az izzószál képét tisztán vetíti ki tükrünk. Ez azonban még semmit nem mond a tükör jó-ságáról.

Jegyezzük meg, hogy a lámpa közvetlen közelében pontosan hol keletkezett a kép. Borítsuk most le a lámpát a konzerves dobozzal, amelynek a tükör felé néző oldalába előbb tű hegyével parányi lyukat ütöttünk. Ez a megvilágított fényes lyuk lesz a következőkben a műcsillagunk.

A papírlapot eltávolítjuk és fejünkkel kissé hátrálva megkeressük a műcsillag képét. A tükörben innen távolabbról nézve mint parányi fényes pontot látjuk. Ha megtaláltuk, akkor most már nagyon ovatosan közelítsünk addig a távolságig, ahol az előbb még az izzószál éles képét szemléltük. A tükörben látott fénypont egyre nőni látszik s még jobban közelítve fejünkkel az egész tükörfelület kivilágosodik.

Mi ennek az érdekes jelenségnek az oka?

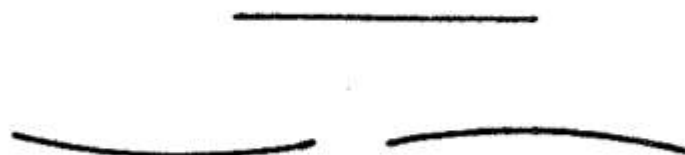
A konzervdobozba ütött lyukról fénysugár indul a tükörfelület minden pontjára. Az onnan visszaverődő fénysugarak a képpontban összefutnak. Ha tehát szemünk a képpontban van, a tükör minden pontjáról érkező sugarakat felfogja szemünk - ezért látjuk az egész felületet világosnak.

Ha most ebből a helyzetből még jobban közelítünk a tükör irányába, a fénykorong ismét fényponttá szűkül.

Menjünk szemünkkel ismét a képpontba. Minthogy most szemünk a tükör görbületi középpontjában van, a tükörfelület minden pontjától egyforma távolságban van szemünk. Ugy látjuk, mint ha a tükör teljes sík felület lenne. Ha valóban ezt látjuk, meg lehetünk elégedve eddigi munkánkkal.

Szabadszemmel is sok mindent megláthatunk a tükör jó-ságáról, vagy hibáiból.

Amikor elértük a képpontot szemünkkel, nagyon finoman millimétereket jobbra-balra mozgatjuk szemünket és megjelenik minden hiba, ami a tükröt esetleg terheli.



Ha a tükrünk közepe mélyebb a gömbnél, a képpontból nézve nem sík felületet, hanem tálszerűen mélyedő alakot látunk.

Ha a tükrünk közepe magasabb az ideális gömbnél, akkor a képpontból közepén ki-

domborodó felületet látunk.

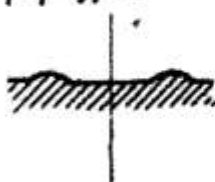
E két említett hiba szabályos felületi hiba, az egész felület mélyebb vagy laposabb a gömbnél.

Meglátjuk azonban pusztá szemmel az un. zónahibákat is.

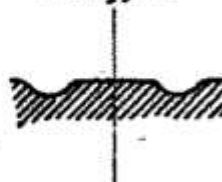
Ilyen zónahiba lehet pl. az, hogy a tükör felülete általában síknak látszik, de a közepén néhány cm átmérőjű krátert látunk, vagy éppen ilyen méretű domboszerű kiemelkedést.

Az is zónahiba, amikor a peremtől bizonyos távolságban gyűrű alakban jelentkezik árokszerű, körbefutó mélyedés, vagy kiemelkedés.

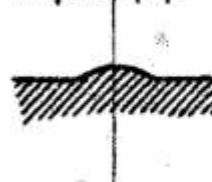
púp-gyűrű



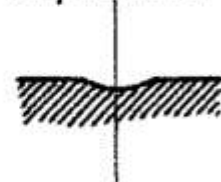
árok-gyűrű



központi púp



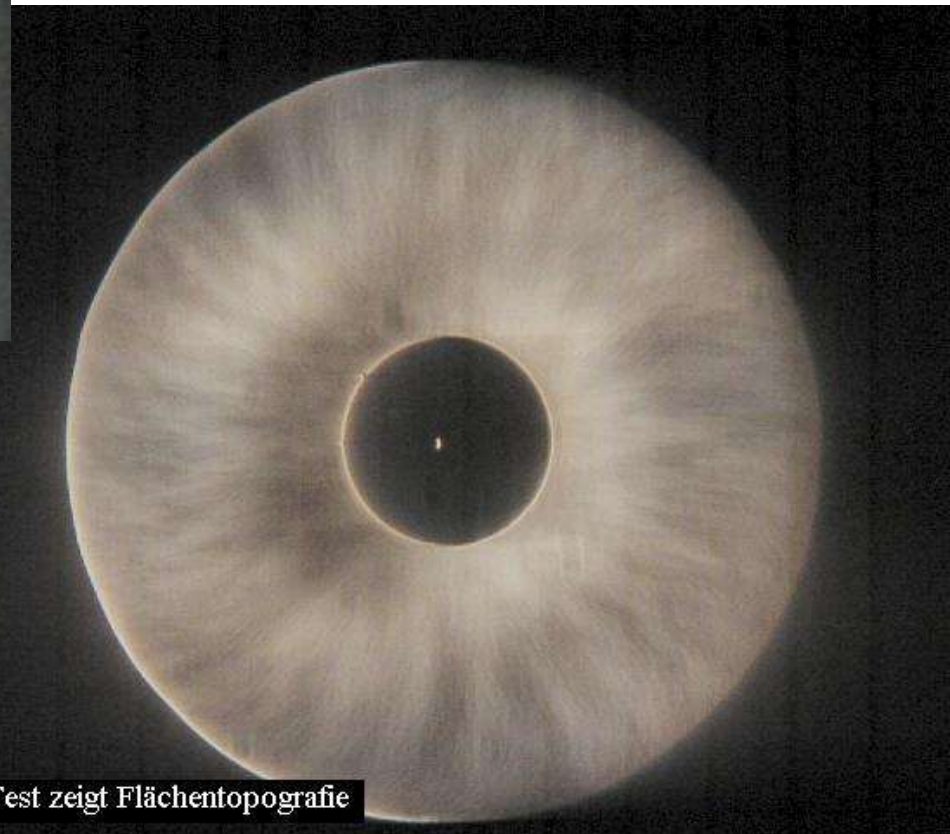
központi kráter



A teszt érzékenyebb a tükör közepének, mint a peremének hibáira.

Ezek a hibák általában a felület nagyon kis egyenetlenségeiből származnak. Ettől még az izzósál képét élesnek látjuk - csak hogy a csillagászati célra használandó tükörnek jobbnak kell lenni egy egyszerű - földi leképezésre alkalmas tükörnél.

Példák felhőszerű felületi hiba és
polírozási hiba megjelenésére.



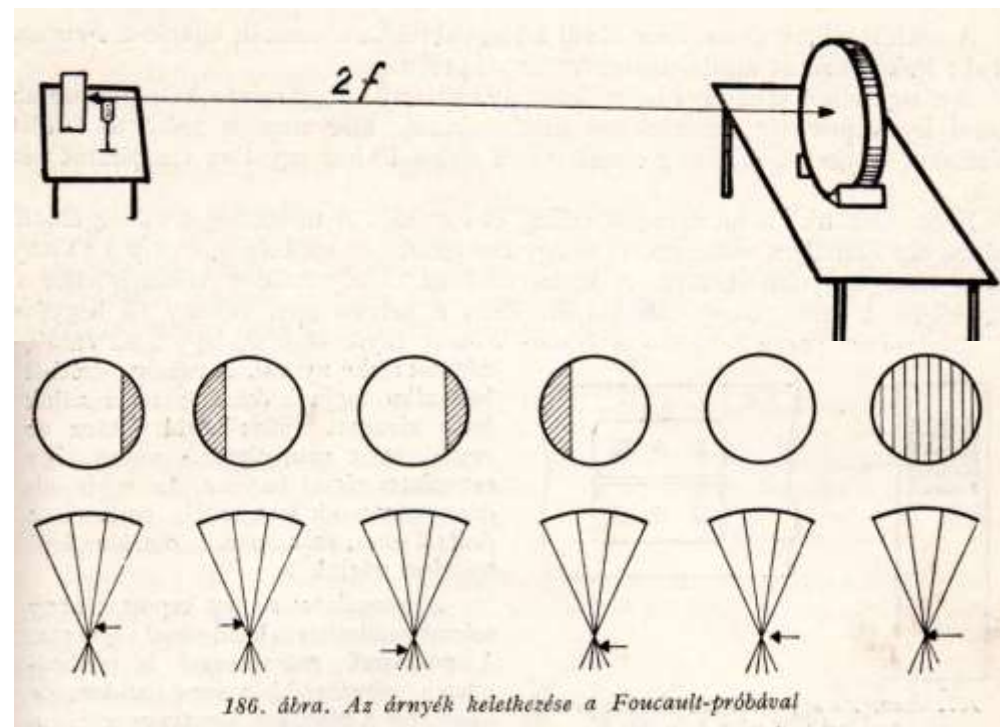
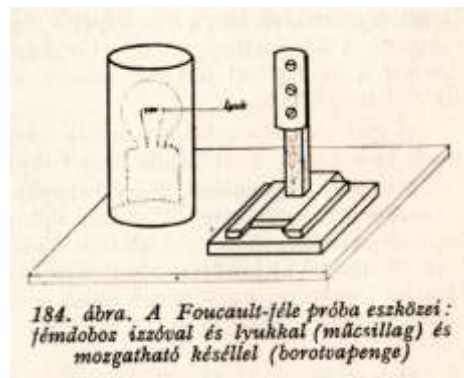
Foucault-Test zeigt Flächentopografie

A Foucault-féle „késél” próba (főtükrök tesztelésére)

A Foucault-féle késél-tesztet **1858-ban Léon Foucault francia fizikus** írta le az optikai tükrök kúpmetset (kör-gömb, ellipszis-ellipszoid, parabola-paraboloid, hiperbola-hiperboloid) alakjának mérésére szolgáló módszerként.

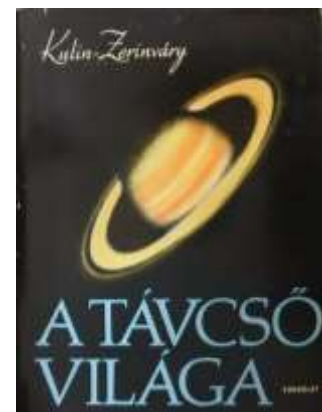
A tesztelendő tükröt függőlegesen egy állványba helyezik. **A műcsillagot és mellette a „késél” eszközt a tükör fókusz távolságának kétszeres távolságára állítják be. A „késélt” úgy állítják be, hogy a műcsillag tükrőről visszavert kúpos sugárnyalábját megszakítsa.**

A „késél” mögül nézve a tükröt egy mintázat látható a tükör felületén. Ha a tükörfelület egy tökéletes gömb, akkor a tükör egyenletesen megvilágítottnak tűnik a teljes felületen. Ha a tükör gömb alakú, de hibákkal, például dudorokkal vagy bemélyedésekkel terhelt, a hibák magasságban jelentősen felnagyítva jelennek meg.



Jobbra: Gömbtükör árnyékképe
(a „késél” helyét nyilak mutatják)

A paraboloid tükrök árnyékképe más! A perem és a szél fókusza eltér, nem lehet egyszerre átvágni a „késéll.”



**Ma már jobb
minőségű eszközök
kaphatók a
távcsőboltokban.**



Fényes, 20 mikron méretű csillag

Termékvariánsok

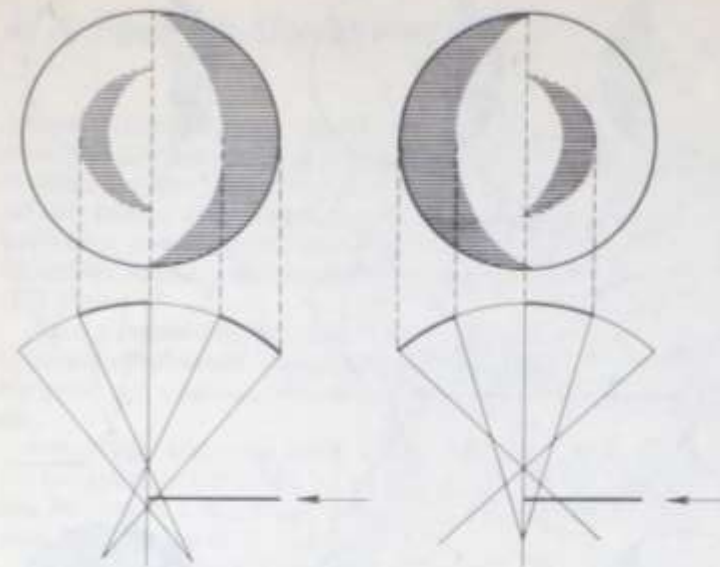


Műcsillag (fehérfényű) optika teszteléshez (ArtStar)

Futarkészlet: [Készlet készítés](#)
Szállítók: [Szállítók listája](#)

A termék részletes leírása

Cellagtesztre, kollektálásra való műcellag. A csillag átmérője 20 mikron, távolságba elhelyezve (minél messzebb, annál jobb) a távcső optikáját borító kollektálót el tudjuk végezni. A szett tartozéka egy elemtartó, melybe 2 db AA nem tartozék.



175. ábra. A paraboloidtükör jellegzetes árnyékrajzai

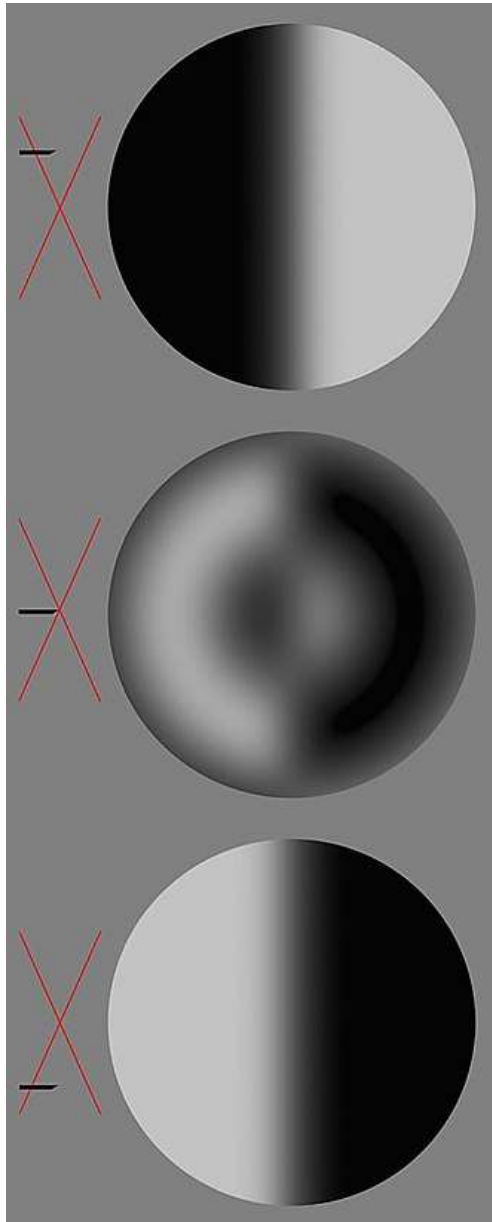
A paraboloidfelület kialakításakor a tükröz közepét mélyítjük. Ha a műcsillag a kétszeres fókuszban (görbületi középpontban) van, a tükröz pereméről visszavert sugarak nem ott egysülnek képpé, mint ahol a középső zóna sugarai. Nem találunk a sugárkúpban egyetlen helyet sem, ahol a kést betolva, valamennyi sugarat egyszerre vágthatnánk át. Az egyik zóna sugarait átvágjuk, a másik zónáról még jön fény, és így alakul ki a jellegzetes árnyékrajz. Az egyszerűség kedvéért azt mondtuk, hogy a gömbfelületből úgy lesz paraboloid, hogy a peremet meghagyva, a közepe felé fokozatosan mélyítjük a tükröt. Voltaképpen így nem kaphatunk ideális paraboloidot. Lényegében a gömbfelület egy alakítjuk, hogy a közepet kissé mélyítjük és a peremet kissé laposítjuk.

Ha a kést (pengét) ott toljuk be a sugárkúpba, ahol a középső zóna kép-pontja van, a tükör jobb peremét és középső zónáját látjuk egyszerre elsöté-tetni (175. ábra). Ha a peremzóna középpontjában toljuk be a pengét, a bal oldali perem és a középső zóna sötétedik el egyszerre. Ha a kést jobb oldalról toljuk be, az a benyomásunk, mintha a tükör közepe mélyebb, pereme lapo-sabb lenne a síknál. Most már csak az a kérdés, hogy ennek a negyedrendű fe-fületnek hol van a legmagasabb pontja. Elméleti számításokból levezethető, hogy az árnyékrajz tetőpontjainak a tükör sugarának 0,7 részénél kell jelent-kezni. A sötét és világos zónák árnyalatai éles határ nélkül, folyamatosan mennek át egymásba.

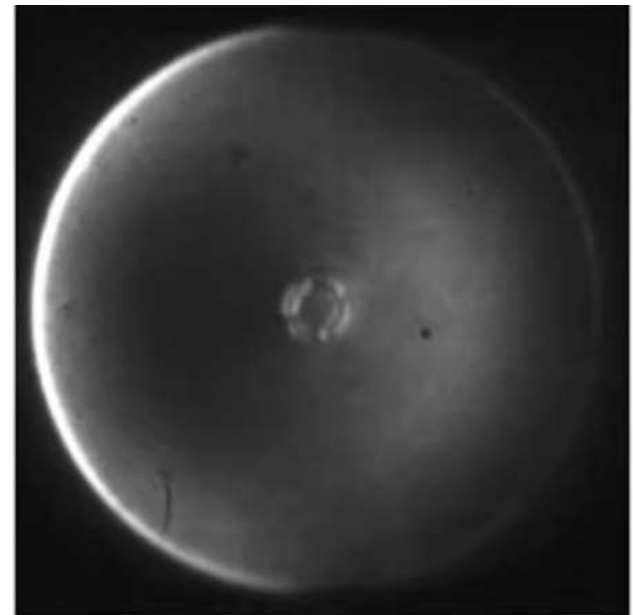
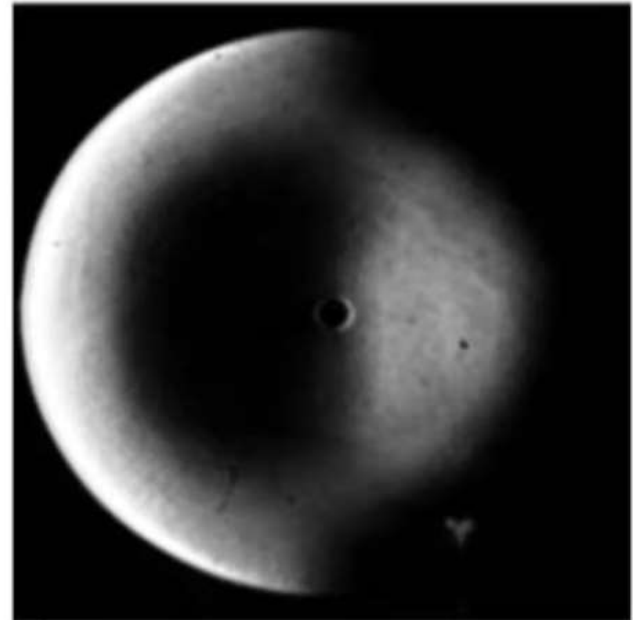
Minél nagyobb a nyílászviszony, ennek a paraboloid árnyékrajznak annál kifejezettebben kell jelentkezni.



Felülről lefelé: Parabolatükör, amelyen a kés éle által az R görbületi sugáron belül (piros X), R-nél és R-en kívül létrehozott Foucault-árnyékminták láthatók.



Példák fényerős és nem fényerős tükör késél-próba képére:

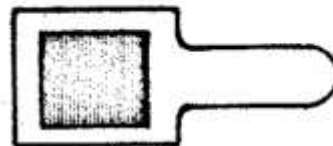


IV.4.2. Rácspróba

Célszerű az okulárpróbán kívül még egy másik vizsgálati módszert is alkalmazni.

A rajz szerint elkészítjük rácsunkat. Ablaka nem több 10x20 mm-nél.

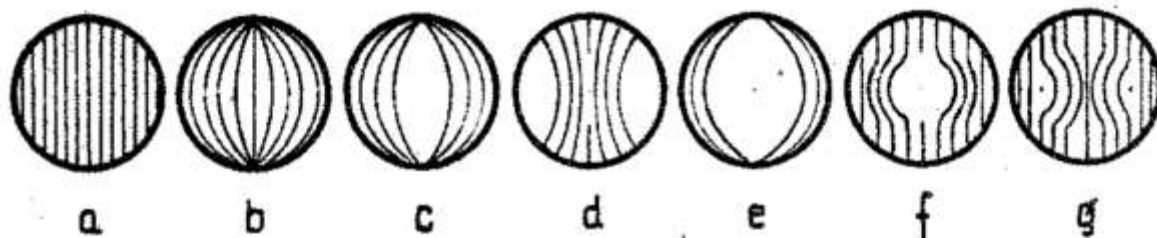
A műanyagból vagy fémből készült lapba ablakot vágunk és 0,1 - 0,2 mm vastagságu huzalt duplán összefogva szorosan



felcsavarunk. A huzal elejét és végét ragasztással rögzítjük. Utána a kettős huzal egyikét legombolyítjuk, azáltal a huzal vastagságának megfelelő rács keletkezik, de egyelőre még az ablak mindkét oldalán. Miután a huzalt a kerethez rögzítettük ragasztással, ollóval az egyik oldalon levágjuk a hu-

zalokat.

A ráccsal úgy vizsgálunk, hogy közvetlenül szemünk pupillájához helyezzük. A képpontból a tükörbe nézve gömbtükör esetén párhuzamos egyenes vonalakat látunk. Az egyenes párhuzamosság megmarad akkor is, ha a képponton kissé kívülről szemléljük a tükröt.



A rácskép megmutatja az általános felületi hibákat és a zónahibákat is. Rajzunk a jellegzetes hibák alkalmával jelentkező rácsképeket mutatja be.

a/ a felület gömb, b/ a felület paraboloid, c/ nagy fényerejű paraboloid, azt mondjuk, hogy a rácskép hordós, d/ a felület laposabb a kelletténél, a szálak közepén összehajolnak, ezt nevezzük párnás alaknak, e/ a felület erősen mély, f/ a felület nagyrésze jó, közepén krátterszerű mélyedés, g/a felület általában jó, közepén pupszerű kiemelkedés van.

KULIN GYÖRGY

TÁVCSŐTÜKÖR házi készítése



EGYSZERŰ LENCSES TÁVCSÖVEK
KÉZI MIKROSKÓP
OKULÁROK
TÜKÖR CSISZOLÁSA, FÉNYEZÉSE
TÁVCSŐTÍPUSOK
TENGELYRENDSZEREK

Budapest, 1970

Ronchi-teszt, Ronchi-okulár (gyári megoldás a rácsra) (rácsteszt a fő- és segédtükrökre együtt)

Nemzetközi **kvázi-szabvány** az amatőr távcsövek tesztelésére a 10 vonal/mm-es Ronchi okulár, amely a távcsőbe helyezve körülbelül **öt-hat csíkot jelenít meg**.

DE: Minél kevesebb a vonalak száma a képen, annál érzékenyebb a teszt! Ha a távcső kihuzatban kifelé vagy befelé mozgatva pl. csak háromra csökkentjük a látható sávok számát, akkor nagyon kevés optika felel meg a „tökéletes” minősítésnek!

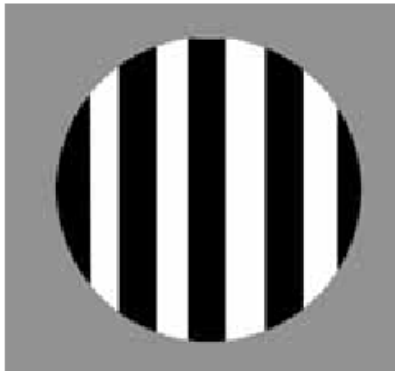
Viszont egy gyengébb optika is jónak látszhat, ha több (pl. 10) vonalat használunk a látómezőben.

Néhány hiba (pl. asztigmatizmus) csak az intra- és extrafokális képek összehasonlításával észlelhető.

Hasonlítsuk össze a fókuszon belüli és kívüli képet!

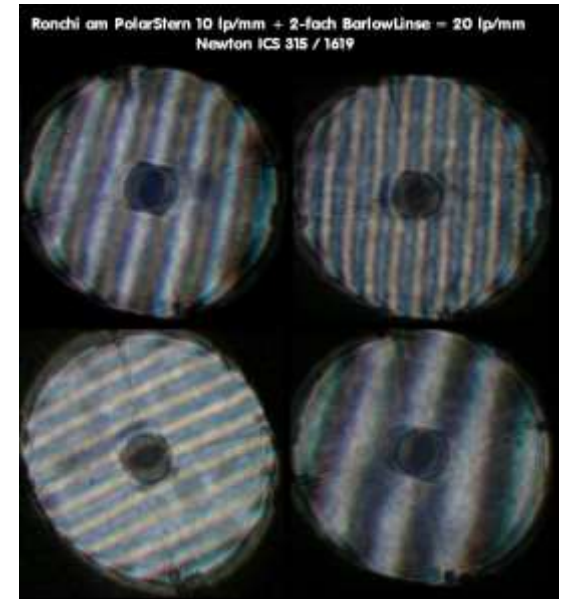
Bal: belül

Jobb: kívül



Tökéletes optika

Egy tökéletes optika egyenes és párhuzamos csíkokat mutat, deformáció nélkül a fókuszon mindkét oldalán!

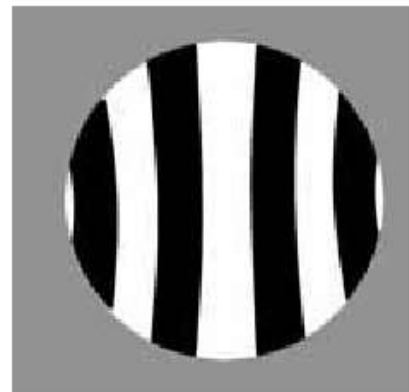
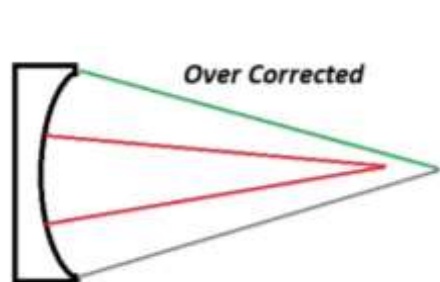


Így néz ki a valóságban:
A Sarkcsillag képe Ronchi-okulárban
(középen a segédtükrör árnyéka látszik)

Túlkorrigált tükör

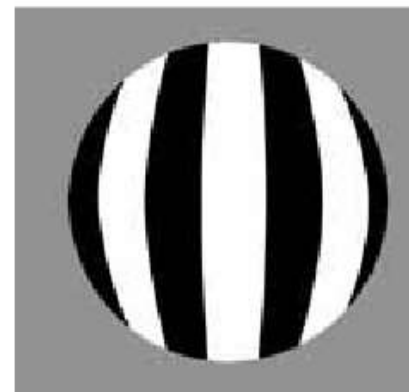
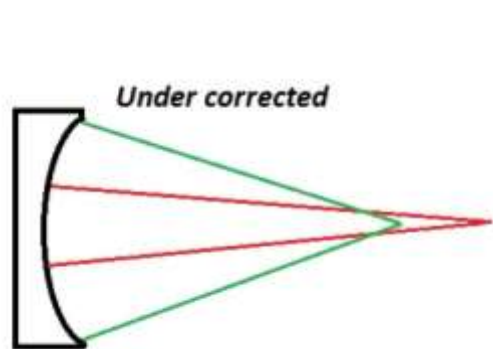
A tengelyen kívüli sugaraknak más a fókuszuk, mint a tengelyen lévő sugaraknak (**a szélek túlságosan le vannak csiszolva**).

Fókuszáláskor sok diffrációs gyűrű látható. Rossz kontrasztot eredményez pl. bolygó megfigyeléskor. A fotografikus parabolatükröknek enyhe túlkorrekciójuk lehet, de mivel sok kómakorrektor alulkorrekciót okoz, így a két hiba így kiegyenlítheti egymást.



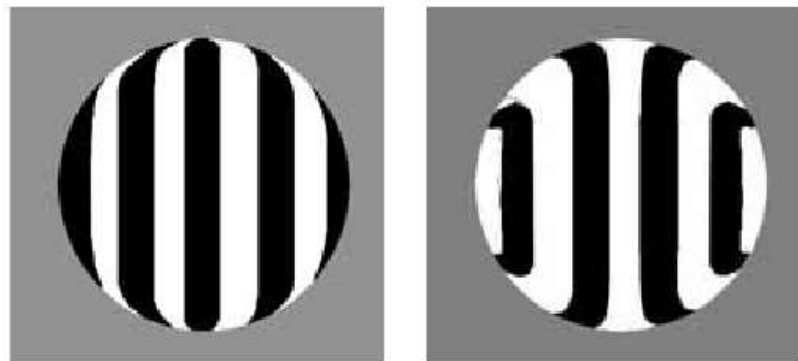
Alulkorrigált tükör

Ugyanaz a helyzet, mint fent, csak a szélek nem lettek megfelelően parabolizálva. Rossz kontrasztot eredményez pl. bolygó megfigyelések esetén, de asztrofotózásnál a képek kis mérete miatt ez nem számít túl sokat saját fókuszban fotózva (kicsi a csillagok képe). Sok kómakorrektor némi alulkorrekciót okoz, ami hozzáadódhat, fokozhatja az objektív hibáját.



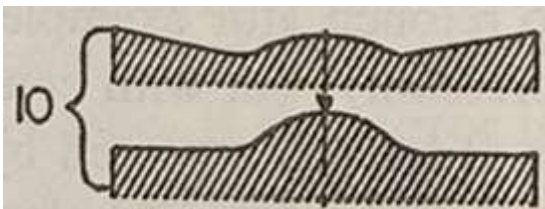
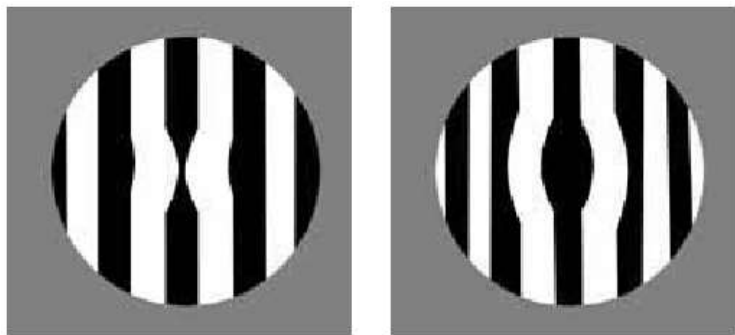
Peremhiba (lecsapott perem, peremkopás)

Különösen az olcsó optikák szenvednek ettől a problémától a (túl) gyors gyártás miatt. A tengelyen kívüli sugarak fókuszusa más, mint a tengelyen lévő sugaraké. Mivel a külső gyűrűnek hatalmas felülete van, ez nagy hatással van a képminőségre. A mély-ég objektumok megfigyelésénél ez nem zavaró, de a bolygók megfigyelésekor a külső gyűrűt egy gyűrű alakú fedőlemezsel kell eltakarni.

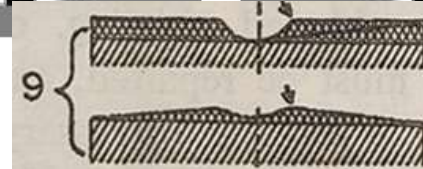
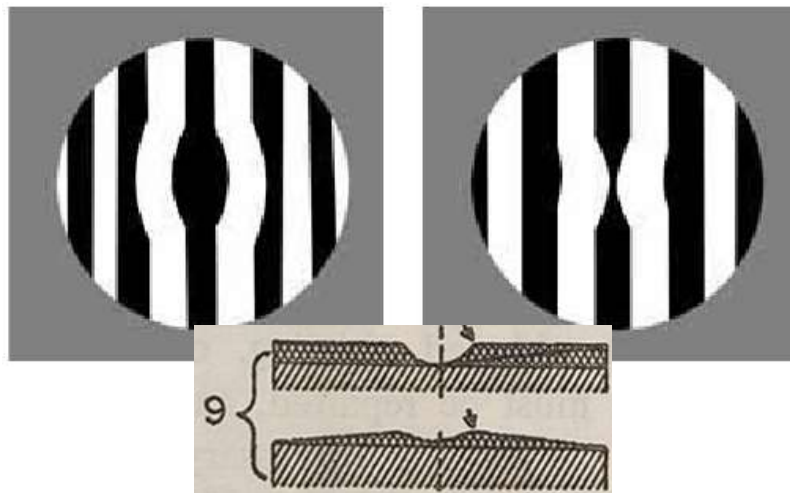


Központi kiemelkedés

Nagyon gyakori hiba. A kis felület miatt ennek a hibának kisebb hatása van a képminőségre, mint a lecsapott peremnek. A központi segédtükörrel rendelkező rendszerekben a hatás még kisebb, mivel a főtükör közepén lévő hiba többnyire a segédtükör árnyékában van.

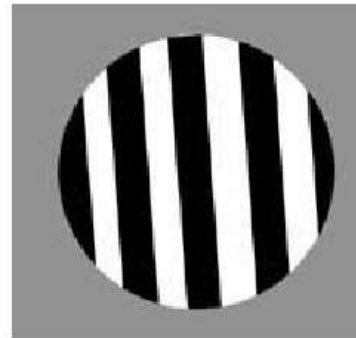
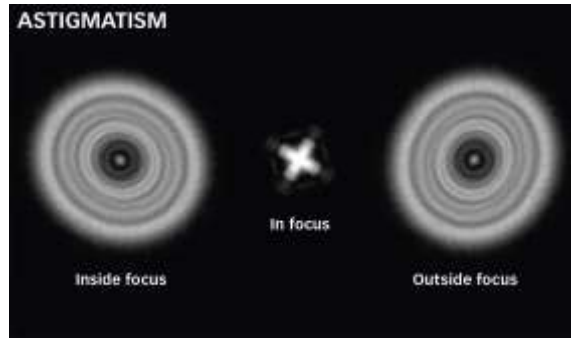


Központi bemélyedés (ez sem zavaró nagyon)



Asztigmia (asztigmatizmus)

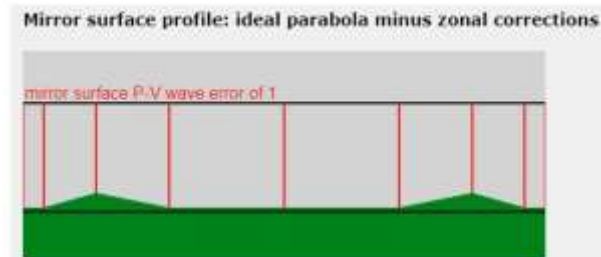
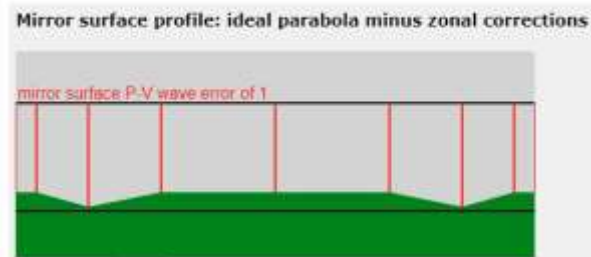
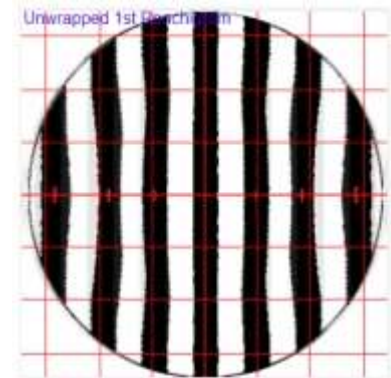
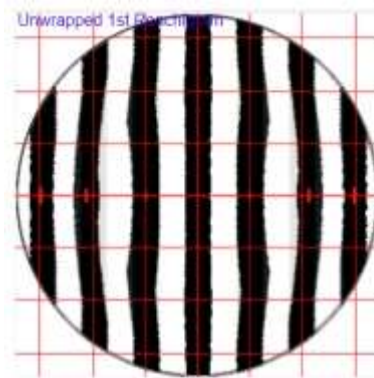
Gyakori és nagyon kellemetlen hiba! Ez a hiba nagyon egyszerűen megfigyelhető egy csillagteszten: A diffrakciós korong ellipszis alakú, és 90° -kal elfordul, amikor a fókuszszíkon halad át. A csillag képe a fókuszban sem pont (korong), hanem kereszt alakú. Néhány műszertípusnál (RC, Makszutov, SC) az asztigmatizmus bizonyos mértékig korrigálható. Az asztigmatizmus gyenge minőségű zenittükrökből is származhat!



Zónahiba

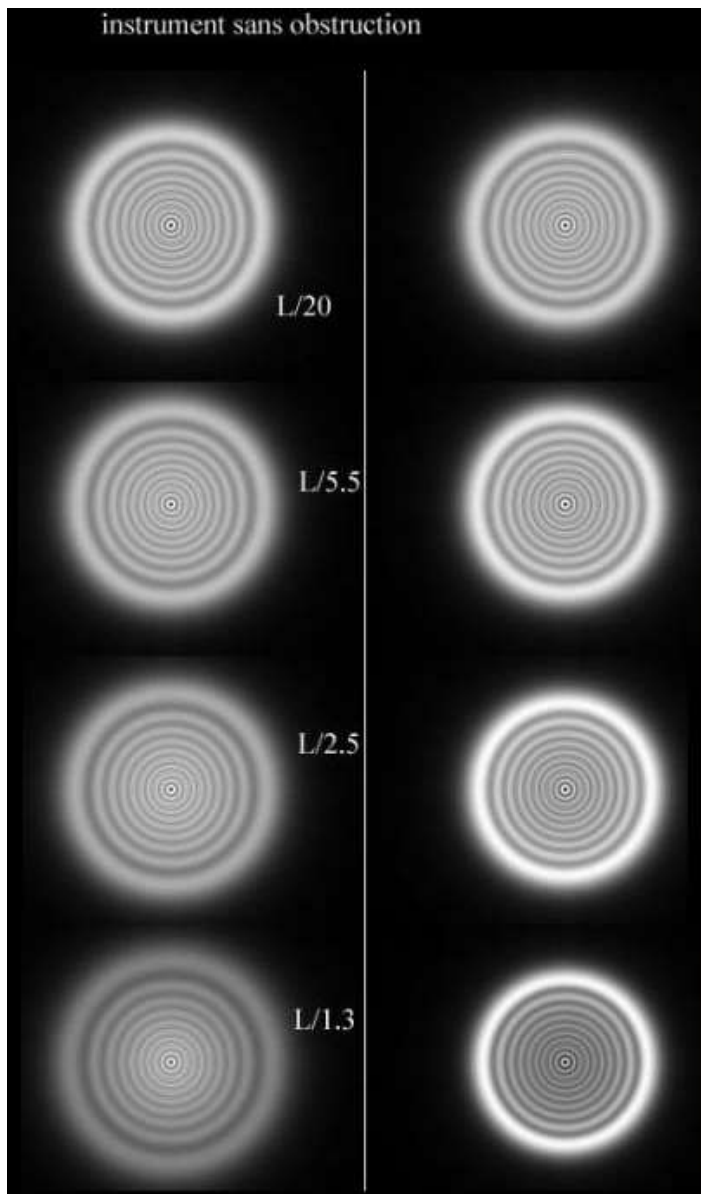
Szinte minden optikai felület mutat zonális aberrációkat (csak a mértéke más). Míg egy kicsi zónahiba a belső részen kisebb, addig egy erős, nagy kiterjedésű zóna a külső részen jelentős negatív hatással bír.

Roszsabb esetben egy optikán több zónahiba is lehet, ami akár használhatatlanná is teheti.

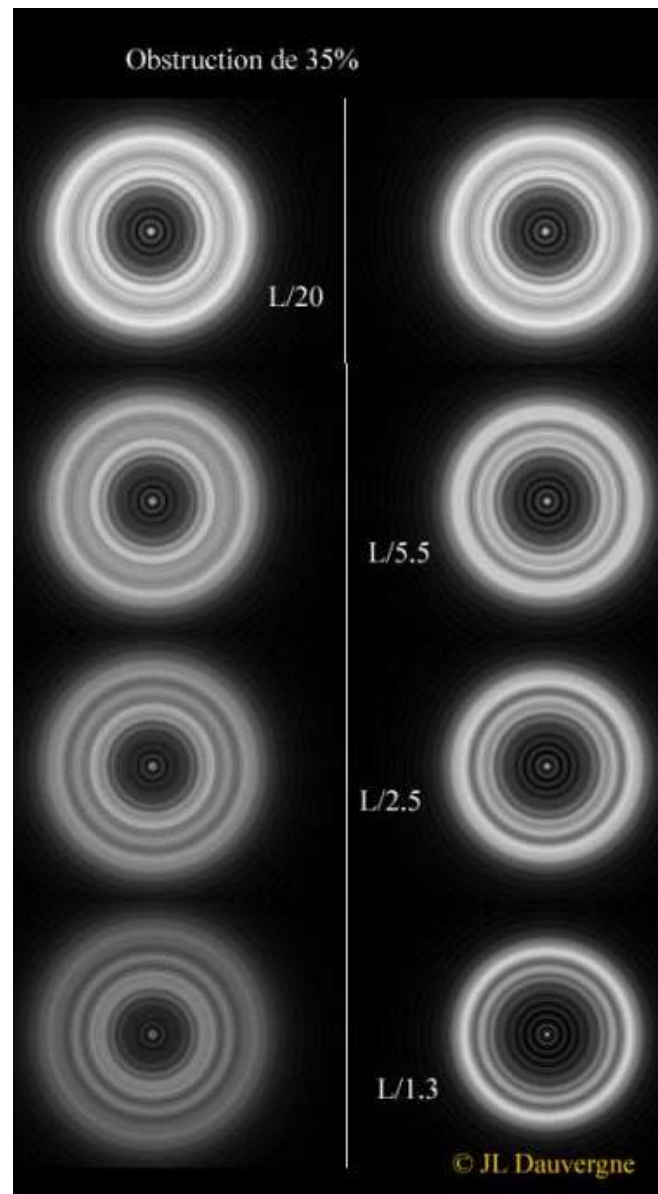


IV.4.3. Csillagteszt – kép fókuszon belül, fókuszon kívül

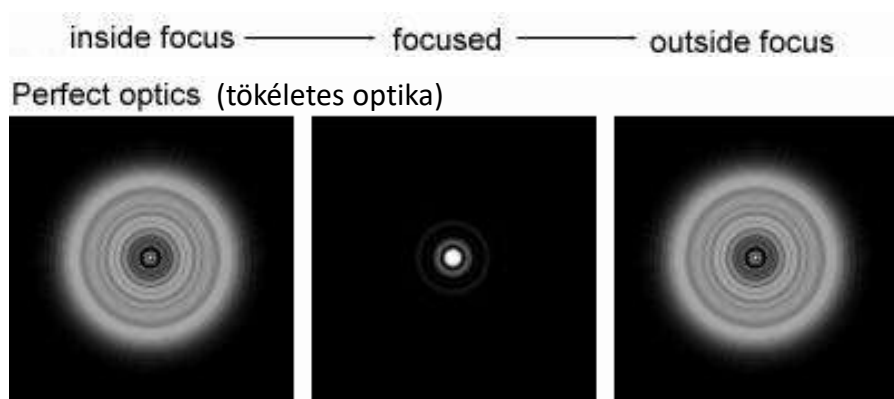
Általános megállapítás: **minél nagyobb az eltérés defókuszált képek között, annál rosszabb az optika minősége, P-V értéke.** Alábbi példák egy kitakarásmentes és egy 35%-os központi segédtükörrel szerelt, különböző optikai minőségű távcsövek intra- (bal oszlop) és extrafokális (jobb oszlop) képét mutatja.



Az ábrák
P-V értéket
mutatnak!



Pontos eredményt műcsillagon, vagy rendkívül nyugodt légkör esetén kapunk.
 Javasolt kb. 5-6 diffrakciós gyűrűnél vizsgálni a képkalkotást.
 A hibák esetén a fényeloszlás fókuszon belül és kívül aszimmetrikus és fordított lesz.



A legismertebb optikai hibák (aberrációk) megjelenése:

Astigmatism (asztiómia)



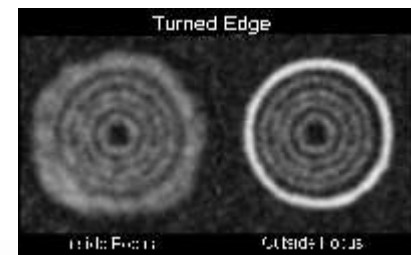
Spherical aberration (correction error) (gömbi hiba)



Turned-down edge (peremkopás)



Zones (zónahiba)



Bad Collimation



Pinched Mirror / Optics



Optical Surface Damaged



Eltolódott gyűrűk a defókuszált képen:

A rossz juszttírozás (kollimáció) eredményei. Az objektív (főtükör) beállításával lehet orvosolni a hibát. A fókuszban kómahibát eredményez.

Coma from misalignment



Háromszög alakú kép:

Három ponton túlságosan megszorított objektív. Általában a főtükrök leszorító karmantyút okozzák, amelyek megnyomják a tükör felületét. A lencsék foglalata ritkán okoz ilyet.

Állandó foltok a defókuszált képen:

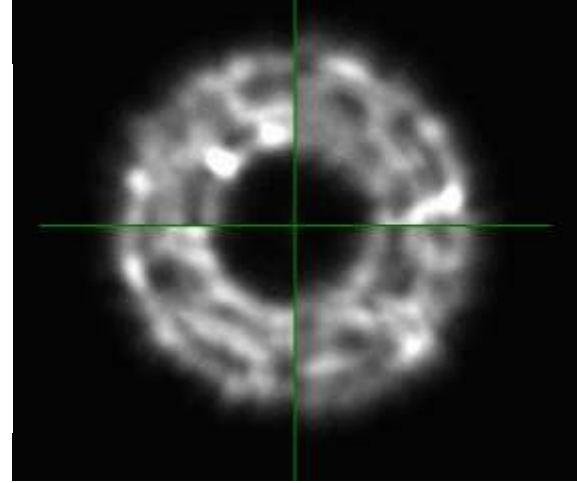
Felületi hibák eredménye, amelyeket a tükör rossz polírozása, vagy későbbi sérülések okozhattak.

Atmospheric Turbulence



**Állandóan hullámzó,
mozgó kép:**

A rossz légköri nyugodtság
miatt nem alkalmas a
csillag képe a teszt
elvégzésére.

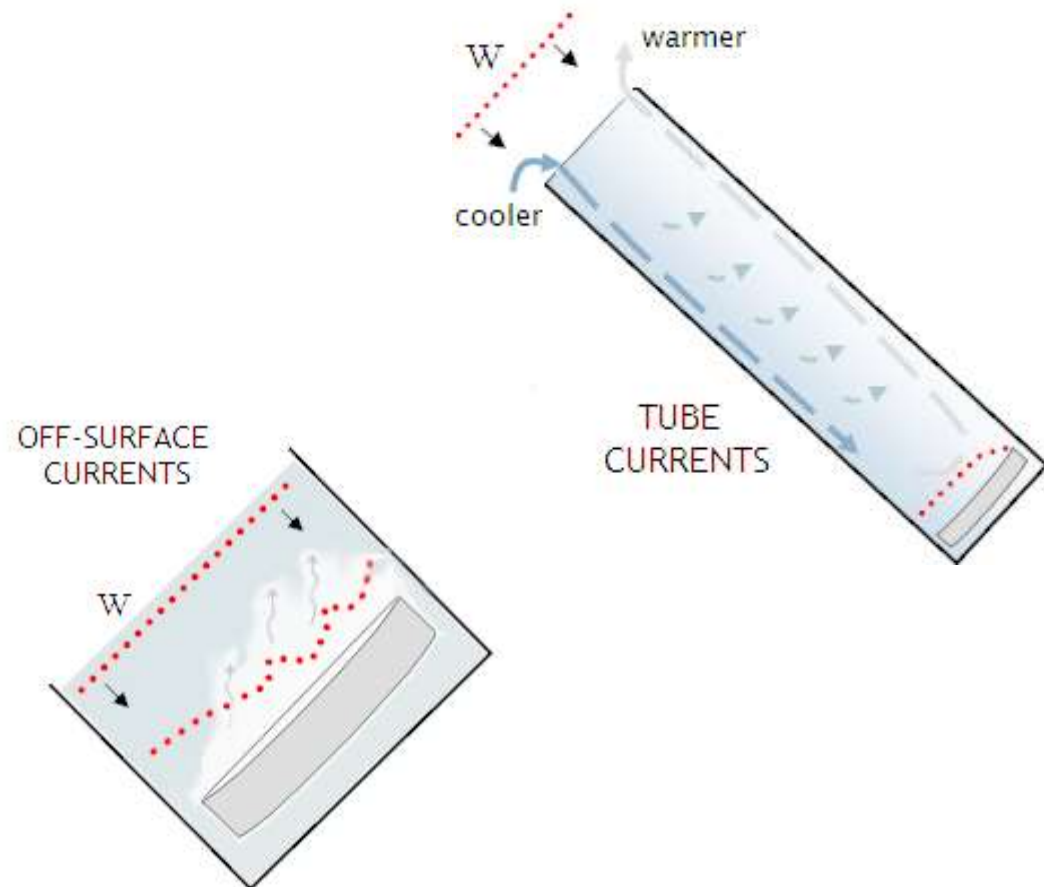


Tube Currents



**A defókuszált kép csóva alakú
elnyúlása egy irányban:**

A távcső tubusa még nem hűlt ki,
ezért a cső felső felében kifelé
áramlik a melegebb levegő.



Néhány általános tapasztalat:

- a fényerő növelésével exponenciálisan nő az abberációk (gömbi hiba, kóma hiba, színi hiba stb.) lehetősége, továbbá drasztikusan nő a jusztirozási érzékenység és csökken a polírozási toleranciaküszöb,
- egy nagy objektívet sokkal nehezebb pontosan elkészíteni, mint pl. egy fele akkorát,
- az objektívek 95 %-nál a peremen romlik el a képalkotás,
- a newtonoknál sokszor a segédtükör pontatlansága rontja le az egész rendszer teljesítményét.



Felhasznált és ajánlott irodalom:

Kulin György (és Zerinváry Szilárd): A távcső világa (több kiadás)

Kulin György: Távcsőtükör házi készítése, TIT, 1970

Berente Béla: Hogyan tesztljük csillagra távcsövünket? Meteor 1986/4.

MCSE: Amatőrcsillagászok kézikönyve (több kiadás)

<https://www.2020mag.com/ce/taming-the-wild-wavefront---pa-D7578>

<https://www.bbastrodesigns.com/JoyOfMirrorMaking/Parabolizing.html>

<https://www.innovationsforesight.com/aitelescopecollimation/>

<https://macsnet.hu/babcsan-gabor-orjarat-a-hullamfronthiba-korul/>

<https://teleskop-austria.at/support/Unsortiert/theory/kalibracio.php#celok>

<http://r2.astro-foren.com/index.php/de/2-uncategorised/809-ajax-002-foucault-test>

<http://r2.astro-foren.com/index.php/de/9-beitraege/01-aeltere-berichte-auf-rohr-ajax-de-alles-ueber-apos/666-a062c-lzos-for-apm-152-1216-nr-384>

<https://www.teleskop-express.de/Bilder/shop/ts-okulare/ronchi-manual.pdf>

<https://www.telescope-optics.net/aberrations.htm>

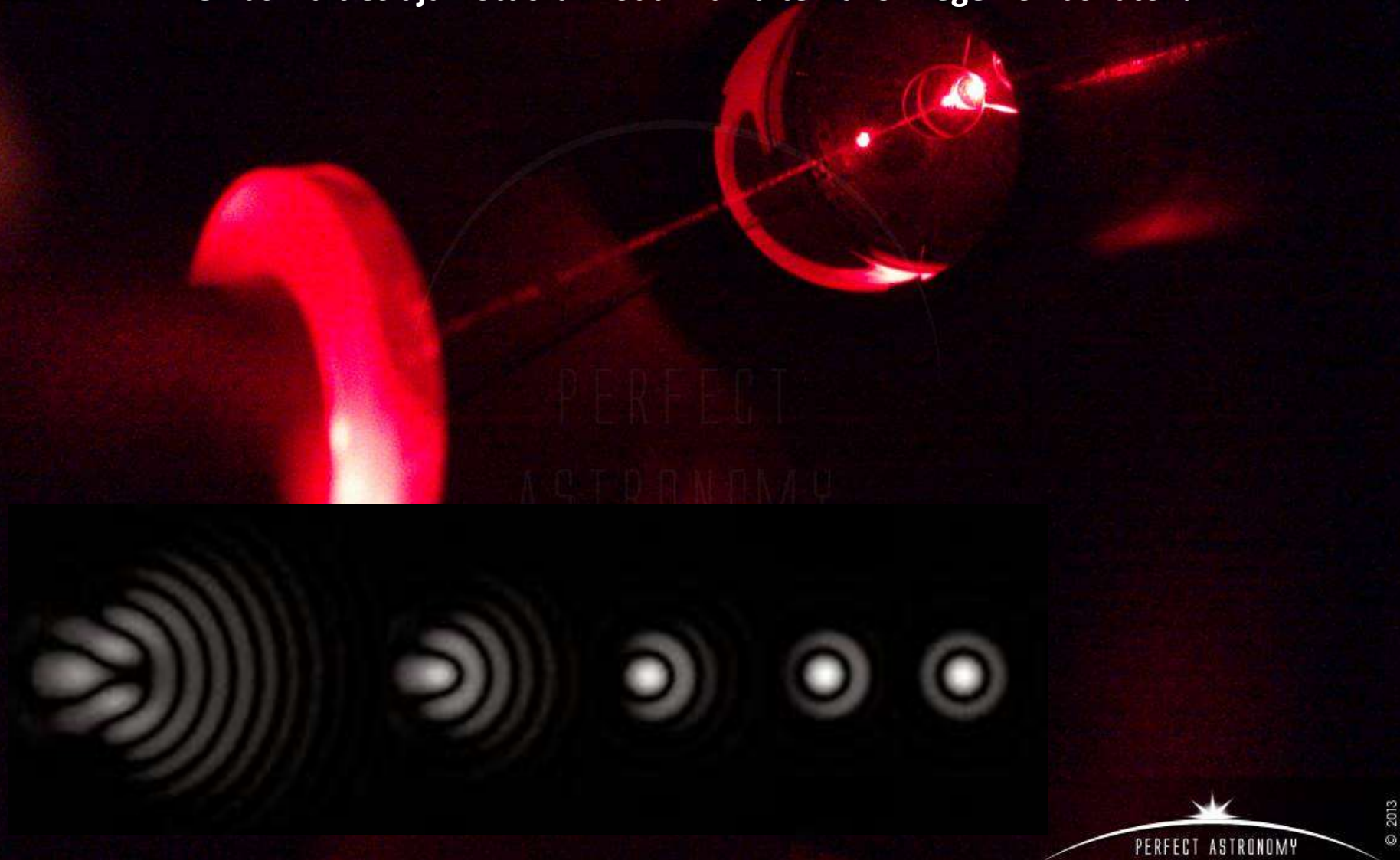
https://www.telescope-optics.net/ray_geometric_aberrations.htm

<https://www.telescope-optics.net/effects1.htm>

https://en.wikipedia.org/wiki/Foucault_knife-edge_test

V. A tükrös távcsövek optikai elemeinek beállítása, zavaró reflexiók csökkentése, vignettáció

- gyakorlatias megközelítés csillagászati szakkörösök számára, belső használatra –
- A felhasznált és ajánlott szakirodalmak a témakör végén olvashatók! –



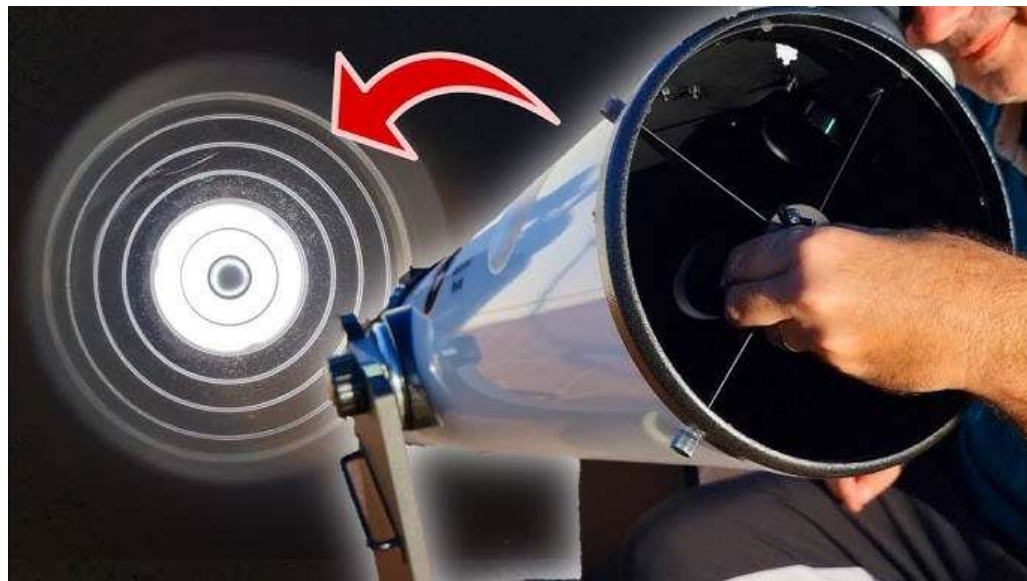
V.1. A jusztírozás és kollimálás fogalma

A „**jusztírozás**” jelentése: szabályozás, beállítás, illesztés, kiegyenlítés, vagy **egy rendszer finomhangolását jelenti**. A német kifejezés a latin „justus” szóból ered, ami igazságot vagy helyeset jelent.

A „**kollimáció**” szó a latin eredetű angol „collimation” szóból származik, ami a „collineare”, azaz a „vonalakat együvé rendez” szóból ered. A jelentése **fizikai értelemben a fénysugarak párhuzamosítása optikai eszközzel**.

Tehát egy távcső jusztírozása vagy kollimálása az optikai alkatrészeinek (lencsék, tükrök, prizmák, okulárok) megfelelő pozícióba igazítása.

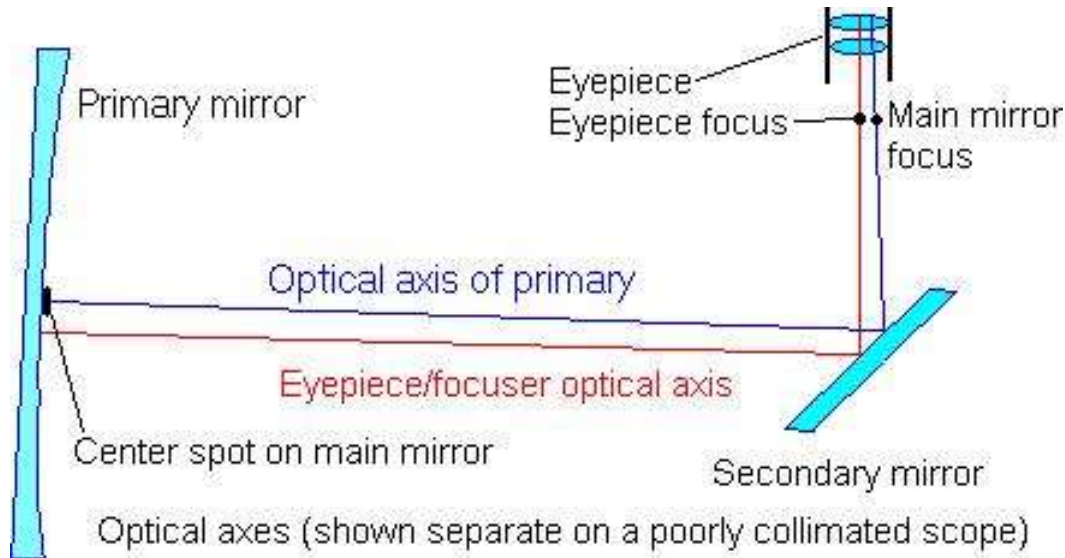
Megjegyzés: Egy jól elkészített és megfelelően használt refraktort megfelelő használat mellett lényegében soha nem kell jusztírozni, viszont az amatőrök körében népszerű **Newton és Schmidt-Cassegrain reflektorokat gyakrabban, a Makszutov-Cassegraineiket ritkábban**. Egy fixen felállított távcsövet viszonylag ritkán kell újra kollimálni, szemben a mobil távcsövekkel.



Miért van szükség időnként kollimálásra? (leginkább a Newtonoknál)

A **főtükör** nem lehet mereven rögzíteni, feszültség nélkül kell a helyén tartani, mert különban meghajlik, megváltozik az optikai alakja. A **segéd-tükör** „póklábak” tartják, amelyek helyzete szintén egészen kis mértékben **megváltozhat a helyzete, amikor a távcsövet mozgatjuk, szállítjuk.**

A kollimálás (jusztirozás) célja:



A Newton-féle távcsőben két optikai tengely van:

1. a főtükör optikai tengelye és
2. a szemlencse optikai tengelye.

A kollimálás célja, hogy az ábrán pirossal és kékkel jelölt optikai tengelyek egybeessenek a lehető legnagyobb mértékben.

Megjegyzések:

- A legtöbb műszerben a fókuszírozó rögzített (vagy legalábbis nem könnyen állítható), ezért praktikus annak tengelyét referenciaként használni és a tükröket ahhoz mérten beállítani.
- A Newton-távcsőben a segéd-tükör csak eltéríti az optikai tengelyeket, de nincsen saját optikai tengelye, amit figyelembe kellene venni a rendszer jusztirozásakor.

A kollimáció fő követelményei Newton-távcsöveknél

- Az optikai tengelyeknek egybe kell esniük a lehető legnagyobb mértékben.
- Az okulár behelyezése után a szemlencse fókusza és a főtükör fókusza egy közös fókuszszíkban helyezkedjen el a lehető legnagyobb mértékben.

Kiegészítő követelmények (ezek esetében kis eltérés belefér a tűréshatárba):

- Az optikai tengelynek a segédtükör optikai középpontjába kell esnie.
- A segédtükörnek 90 fokkal el kell térítenie az optikai tengelyt.
- Az optikai tengelynek (a fő- és a segédtükör között) a cső középpontjában kell haladnia.

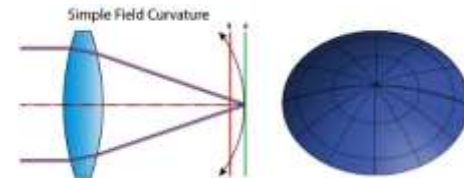
Egy Newton-távcső kollimálható úgy, hogy bizonyos tűréshatáron belül megfeleljen ezeknek a követelményeknek.

Megjegyzés:

A fókuszszík nem sík!

A távcső fókuszszíkja voltaképpen egy gömbszelet, aminek a sugara nagyjából megegyezik a főtükör fókusztávolságával.

Homorú a főtükör felől és domború a szemlencse felől nézve.



V.2. A kollimáció hibái

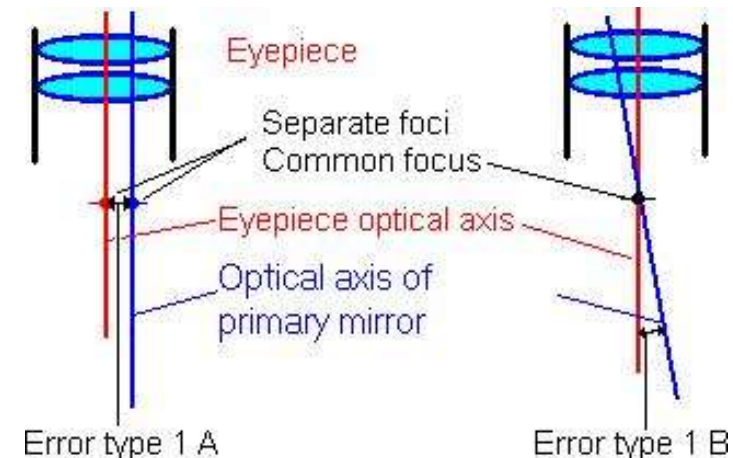
1A típusú hiba:

Az optikai tengelyek szétválnak a fókuszszíkban.

Kulcsfontosságú hiba, mert a képalkotás a fókuszszík közepe közelében tökéletes lehet, de attól távolodva egyre súlyosabb kómától szenved. **Az optikai tengelyek szétválása következtében nem az okulár látómezejének közepére vetül a főtükör fókuszszíkjának legélesebb része.**

1B típusú hiba:

az optikai tengelyek nem párhuzamosak, hanem szöget zárnak be. Ez a hibatípus azt jelenti, hogy a szemlencse fókuszszíkja, vagy az elektronikus detektor síkja a főtükör fókuszszíkjával szöget zár be, azaz a látott kép szélein életlen (intra- és extrafokális) kép keletkezik.



Ismétlés: Kómamentes terület mérete a fókuszsíkban (az 1A hiba tűréshatár-számításához)

Az optikai tengely körüli fókuszsíkban van egy kicsi terület („sweet spot”), ahol a kómának elhanyagolható hatása van. Meglepő, hogy egy nagy távcsőtükörnek nincs nagyobb éles területe, mint egy kis tükörnek, mivel **az kizárólag a főtükör fényerejétől függ. Ha egy szenzor vagy okulár nagyobb területet lát a fókuszsíkból, mint a kómamentes terület, akkor a látómezejének szélén torzulni fognak a csillagok.**

Az alábbi táblázat az éles folt átmérőjét adja meg, ahol a kóma kisebb, mint $1/14$ hullámhossz RMS, és a Strehl-arány legfeljebb 0,2-vel csökken (ez nagyjából megfelel a Rayleigh „negyedhullám” diffrakciós korlátozási kritériumának).

Fényerő	Kómamentes terület átmérője a fókuszsíkban (mm)
f/4	1,4
f/4,5	2,0
f/5	2,8
f/6	4,8
f/8	11
f/10	22

Ebből látszik, hogy a **fényerős távcsöveknél (pl. f/4) az éles folt közepre igazítása a okulár látómezőjén belül sokkal kritikusabb**, mint a kisebb fényerejű (pl. f/10) távcsöveknél.

Részletesebben ld. a 31. oldalon.

Ezért kell speciálisan korrigált okulárokat használni a nagy fényerejű távcsövekhez és korrektorokat a fotózáshoz. Közepes fényerejű távcsőben kis nagyításnál is megjelenhet a kóma a látómező szélén, nem megfelelően korrigált okulár esetén, de **nagy nagyításhoz már megfelelhet egy kevésbé korrigált okulár is**, amivel azzal a látómező teljes méretére „kinagyítjuk” a kómamentes területet.

Az 1A hiba tűréshatára a kis fényerejű „bolygózó” távcsövekben a kómamentes folt átmérőjének kb. $1/16$ -a, de fényerős „mélyező” távcsövekben elég a kómamentes folt átmérőjének $1/4$ -e is. Tehát **ennyivel tolódhat el egymáshoz képest vízszintesen az objektív és okulár optikai tengelye az okulárkihuzatban, hogy ne legyen zavaró a hatása.**

2-es típusú hiba: a főtükör optikai tengelye nem az optikai középpontban metszi a segédtükröt

A segédtükör a (főtükörhöz viszonyított) méretétől függően a fókuszsík egy részét teljesen megvilágítja, ahol **a teljes megvilágítású területen (ld. 173. old.)** belüli bármely pont látja a főtükör teljes felületét, de **ezen kívül fényvesztés, látómezőszűkítés (vignettáció) jelentkezik.**

Ha fényerős (F/3-5) távcsövekben azt szeretnénk, hogy a teljes megvilágítású területet lehetőleg jobban egybe essen az okulár látómezejével, vagy a kamera érzékelőjével, akkor szükség lehet a segédtükör eltolására.

Kis kitérő: A fényerős Newton-távcsövek segédtükrének eltolása

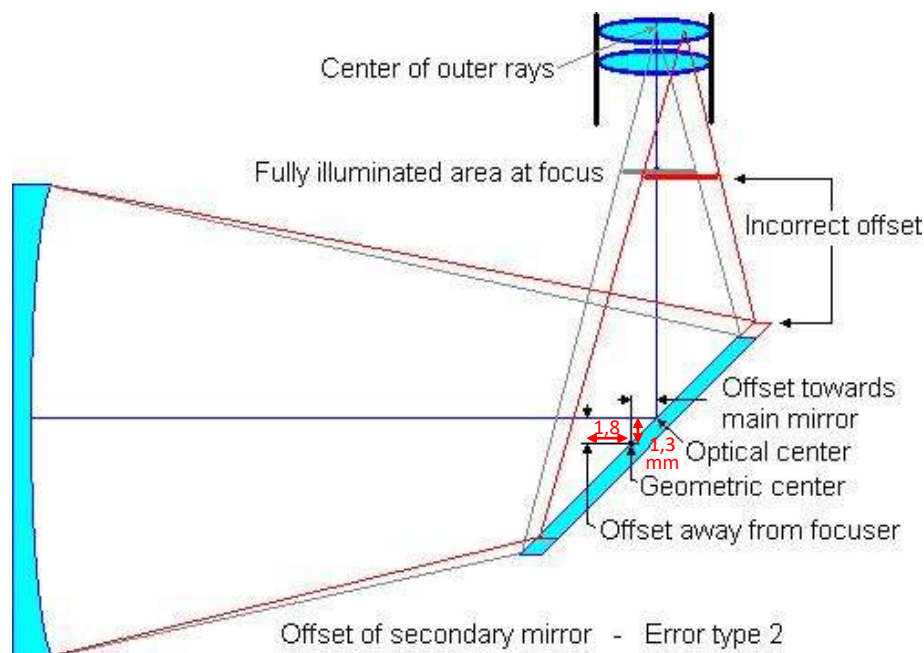
A jusztírozás során a fókuszírozón keresztül nézzük a 45 fokban megdőntött ellipszis alakú segédtükröt, aminek látóirányú vetülete egy kör. **A perspektíva miatt azonban a körnek tűnő segédtükör középpontja eltolódik az ellipszis geometriai középpontjától a fókuszírozó felé.** Ahhoz, hogy optikailag középre igazított legyen a segédtükröt mind a fókuszírozótól el kell távolítani, mind a főtükör felé el kell tolni.

Példa:

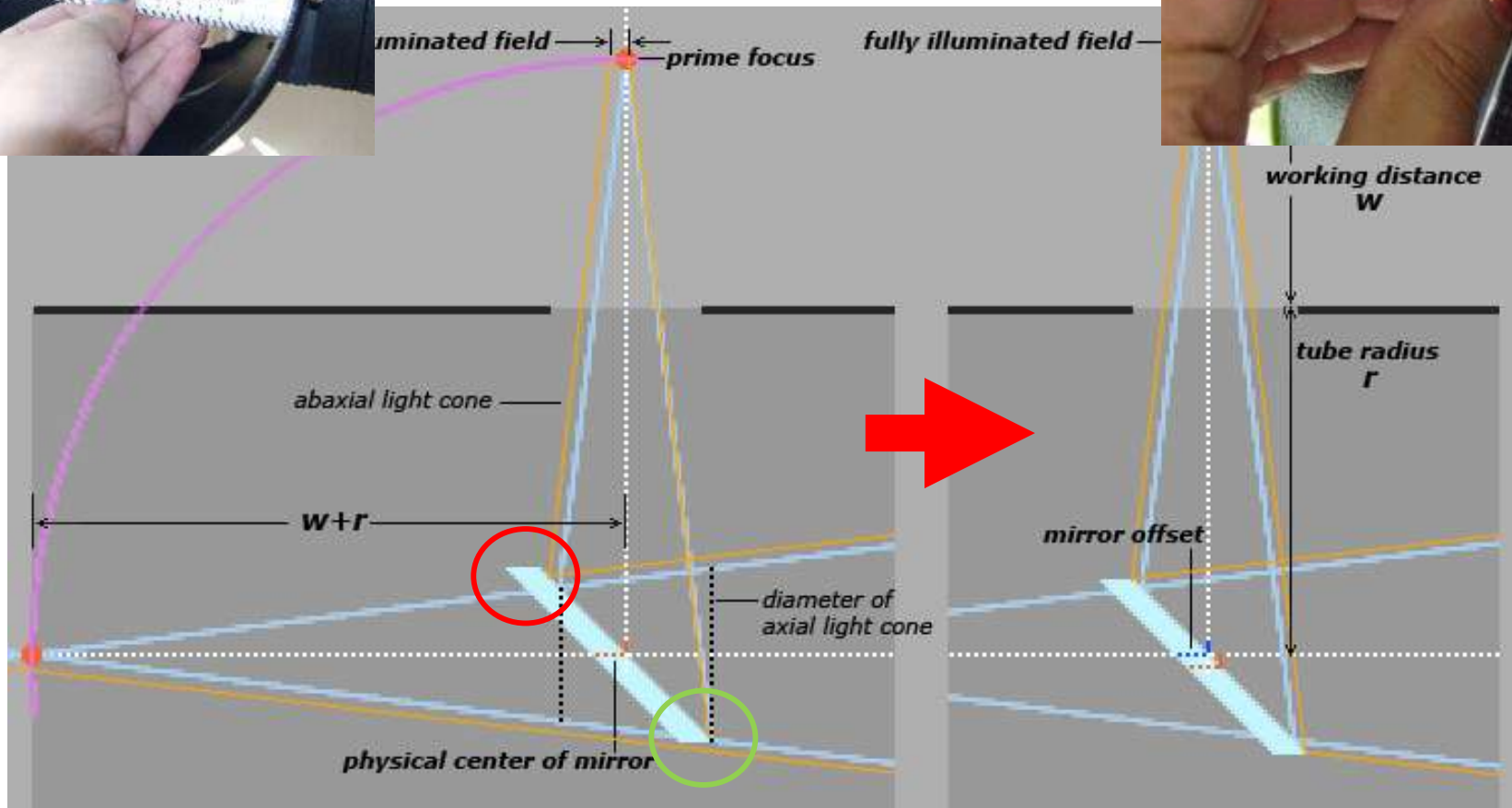
Egy 33 mm-es kistengelyű segédtükörrel szerelt f/6-os Newton-távcsőben a fókuszírozótól való eltolás mértéke:

$$33 / (4 \times 6) = 1,3 \text{ mm.}$$

Ugyanebben a távcsőben a segédtükör eltolásának mértékét a főtükör irányába úgy kapjuk meg, hogy az előző eltolási értéket megszorozzuk 1,414-gyel (2 négyzetgyöke):
 $1,3 \times 1,414 = 1,8 \text{ mm}$



Segédtükör eltolása a Newton-távcsövekben



Egy ellipszis alakú, középponttal az optikai tengelyen elhelyezett segédtükör nem veri vissza egyenletesen a főtükörről érkező fénykúpot, mivel a tükör alsó oldala (zöld kör) nagyobb átmérőjűen metszi az axiális fénykúpot, mint a felső oldala (piros kör).

3. típusú hiba:

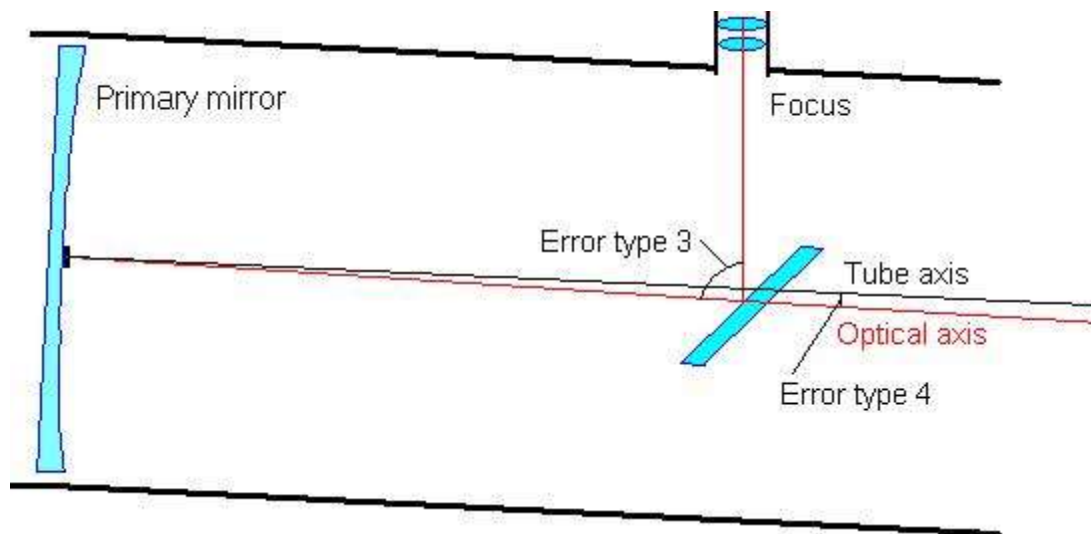
A közös optikai tengely nem verődik vissza 90 fokban

A szabványos segédtükrök és tartók („póklábak”) 90 fokos visszaverődésre vannak tervezve. Ezért a fókuszírozó tengelyéből nézve az elliptikus tükör kör alakúnak látszik. Azonban **90 foknál nagyobb vagy kisebb szög esetén enyhén elliptikusnak tűnik és a teljesen megvilágított mező is kissé elliptikus lesz.** Ha kollimált a rendszer, de a segédtükör tartólábának síkja nem párhuzamos az optikai tengellyel, akkor visszavert képe ferdének tűnhet.

4. típusú hiba:

A közös optikai tengely nem esik egybe a távcső tubus tengelyével

Ha az optikai tengely erősen decentralizált, akkor a cső előre néző nyílása enyhe vignettálást okozhat az egyik oldalon. Ez néha pozicionálási hibát okozhat a GOTO rendszerek használatakor.



V.3. A kollimálás, juszírozás folyamata, módszerei

A juszírozás két (három) fő lépése:

0. (Ha tudjuk, akkor állítsuk be a fókuszírozót a Newton-távcsöveknél a tubusra merőlegesen.)
1. **Először a segédtükröt helyzetét és dőlését kell beállítani** úgy, hogy a szemlencse tengelye a főtükröt középen metssze el,
2. **majd a főtükröt dőlését** úgy, hogy annak optikai tengelye a fókuszírozó középvonalába kerüljön.

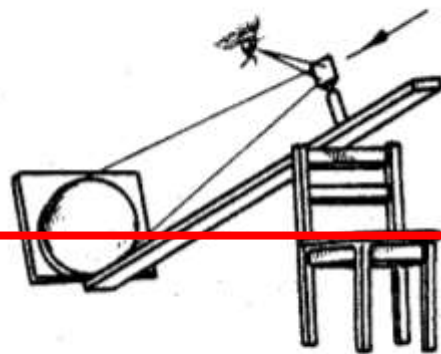
V.3.1. Juszírozás pusztá szemmel

Segédeszköz nélkül csak kis fényerejű távcsövek esetén járhat sikerrel!

A klasszikus művekben a juszírozás módszertanáról és eszközeiről nem, vagy csak nagyon felületesen írtak.



A vizsgálathoz az lenne a megfelelőbb, ha állványunk és csövünk már készen lenne. De ha nincsen még készen, ideiglenes szerelést csinálunk. Ugy ahogyan azt rajzunk mutatja.

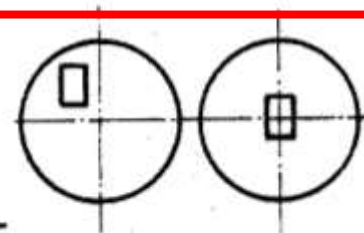


Megfelelő hosszúságú deszka végére tükrünkkel valamivel nagyobb deszkát szegezünk. A tükröt megtámasztására két léccet erősítünk fel. Felszereljük a prizmat, vagy segédtükröt úgy, hogy a kép a deszkán kívül keletkezzék, ne kelljen fejünkkel a tükrökhöz közelről állni.

Nagyon fontos azonban, hogy a tükrök és a prizma be legyen szabályozva. Szabadszemmel a prizma felé tekintve látnunk kell benne a tükröt és annak közepén a prizmat. Ha a prizma képe nem pontosan a tükrökhöz közepén van, a tükrök síkjának változtatásával elérhetjük a helyes beállítást.

A deszka végét szék támlájára helyezzük és az ég felé irányítjuk, a Holdra, vagy fényes csillagra. Ha a Napra állítjuk, a prizma árnyékának a tükrökhöz közepére kell esni és a visszavert sugaraknak a prizma felé. Ekkor helyes a beállítás.

Ne tévesszen meg bennünket az, ha a föl-

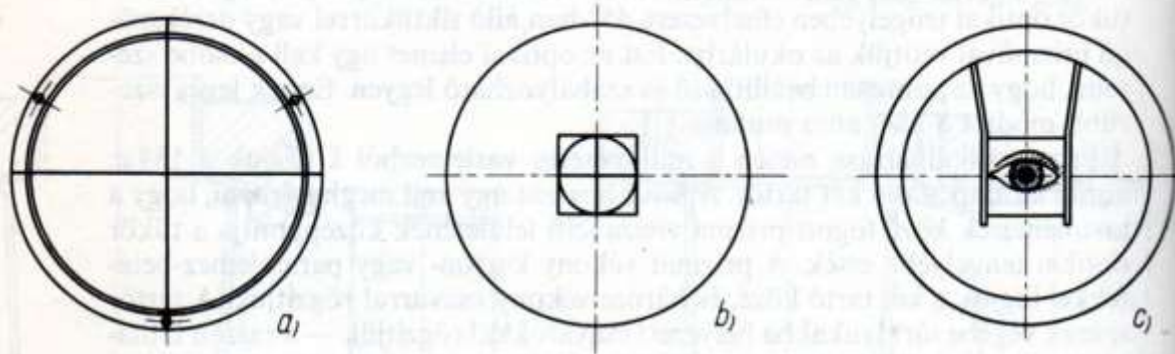


Pár mondat a jusztírozásról
Kulin György egy másik
klasszikus művében (1980):



Megjegyzés:

Már egy egyszerű műanyag
csődarab okulárkihuzatba illesztése
is segíthet a pontosabb
jusztírozásban!



186. ábra.

hátra mozgatásával és elfordításával tudjuk a prizmát az optikai tengelybe állítani.

A tükör és prizma besabályozását (*jusztírozását*) az alábbiak szerint végezzük: a távcsőtubust vízszintesen lefektetjük úgy, hogy az okulárcső függőlegesen felfelé nézzen, a tükörtartó felőli végén a merevítőgyűrűre függőleges és vízszintes-irányban vékony drótszálat feszítünk ki. Ellenőrizzük, hogy a drótszálak pontosan a cső középpontjában és derékszögben metszik-e egymást (186.a. ábra). Szemünket az okulárcső végére helyezve, látjuk a prizma-ban visszatükröződni a cső belső falát, a merevítőkarika nyílását, és a benne kifeszített szálkeresztet.

A karika szabad nyílásának és a szálkeresztnek pontosan a prizma felületének középpontjában kell látszani, eltérés esetén a prizmát addig kell állíthatni, amíg a 186.b. ábrán mutatott képet látjuk. A beállítás után a csavarokat meghúzzuk, hogy a prizma a továbbiakban el ne mozduljon, és ezután felszereljük a cső végére a tartóba helyezett alumíniumozott tükröt. Az okulárcsőbe be-

nézve, most látjuk a prizmán tükröződni a főtükör felületét, rajta a prizma és a tartólábak képét. Amennyiben a prizma képe nem esik pontosan a tükröfelület középpontjára, ez azt jelenti, hogy a tükör felülete nem merőleges a cső tengelyére, és azt valamelyik irányban dönteni kell. Erre szolgálnak a tükörtartó peremében levő támasztócsavarok. Az egyik szorítócsavart kissé meglazítva, a mellette levő támasztócsavart meghúzzuk, és megnézzük az okulárcsővön keresztül, hogy a prizma képe milyen irányban mozdul el a tükör felületén. Ha javul a helyzet, a csavarokat addig állíthatjuk, míg a prizma képét behoztuk a tükör közepébe. Pontos beállításkor a tükröfelület közepén látjuk a prizmát, és benne tükröződik az okulárcső végén benéző szemünk (186.c. ábra). A szorító- és tartócsavarok meghúzása után távcsövünk megfigyelésre készen áll.

Hasznos segítség: Jel helyezése a Newton-távcső főtükreinek közepére



1. ábra.
A főtükör körvonalának
megrajzolása.



3. ábra.
A központi lyuk
kivágása.



2a, 2b. ábra.
A papírsablon félbe-, majd negyedbe hajtása.



4. ábra.
A sablon ráillesztése a
főtükörré.

Esetleg vékony alkoholos filccel
tehetünk kis jelölést a segéd-tükör
közepére is.



5. ábra.
A központi jel
felragasztása.



6. ábra.
A központi jellel ellátott
főtükör.

Jusztírozó kupak segít a segédtükör középre állításában

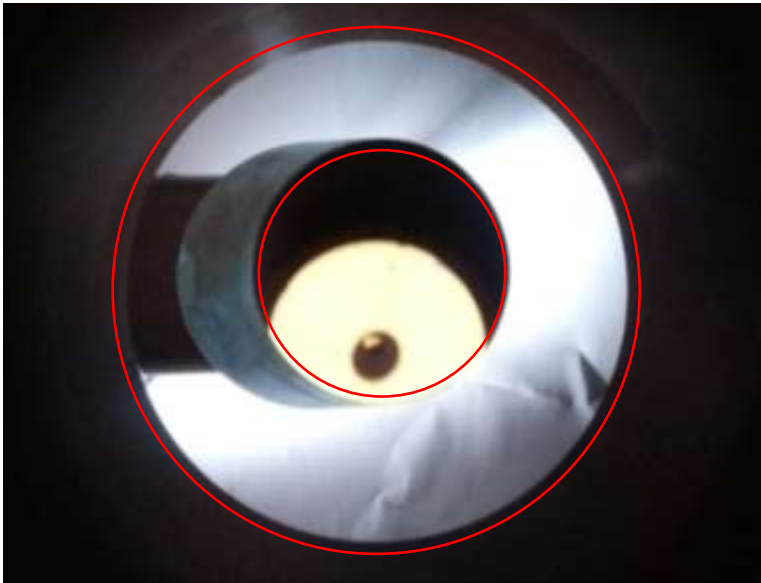
Elkészíthetjük a távcső okulár kihuzatának fedeléből is, pont középre fúrjunk egy kb. 2 mm átmérőjű lukat.



Jusztírozó kupak

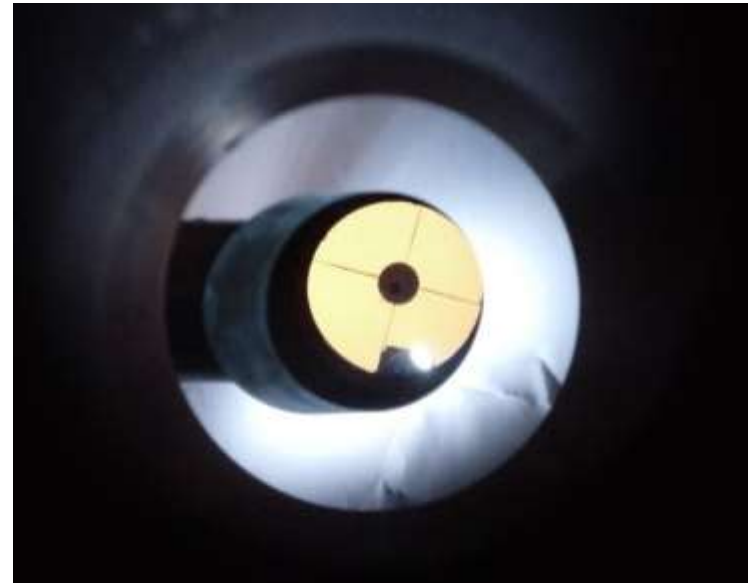


Tegyünk a tubus belsejébe okulárkihuzattal szemközti oldalra egy világos papírlapot



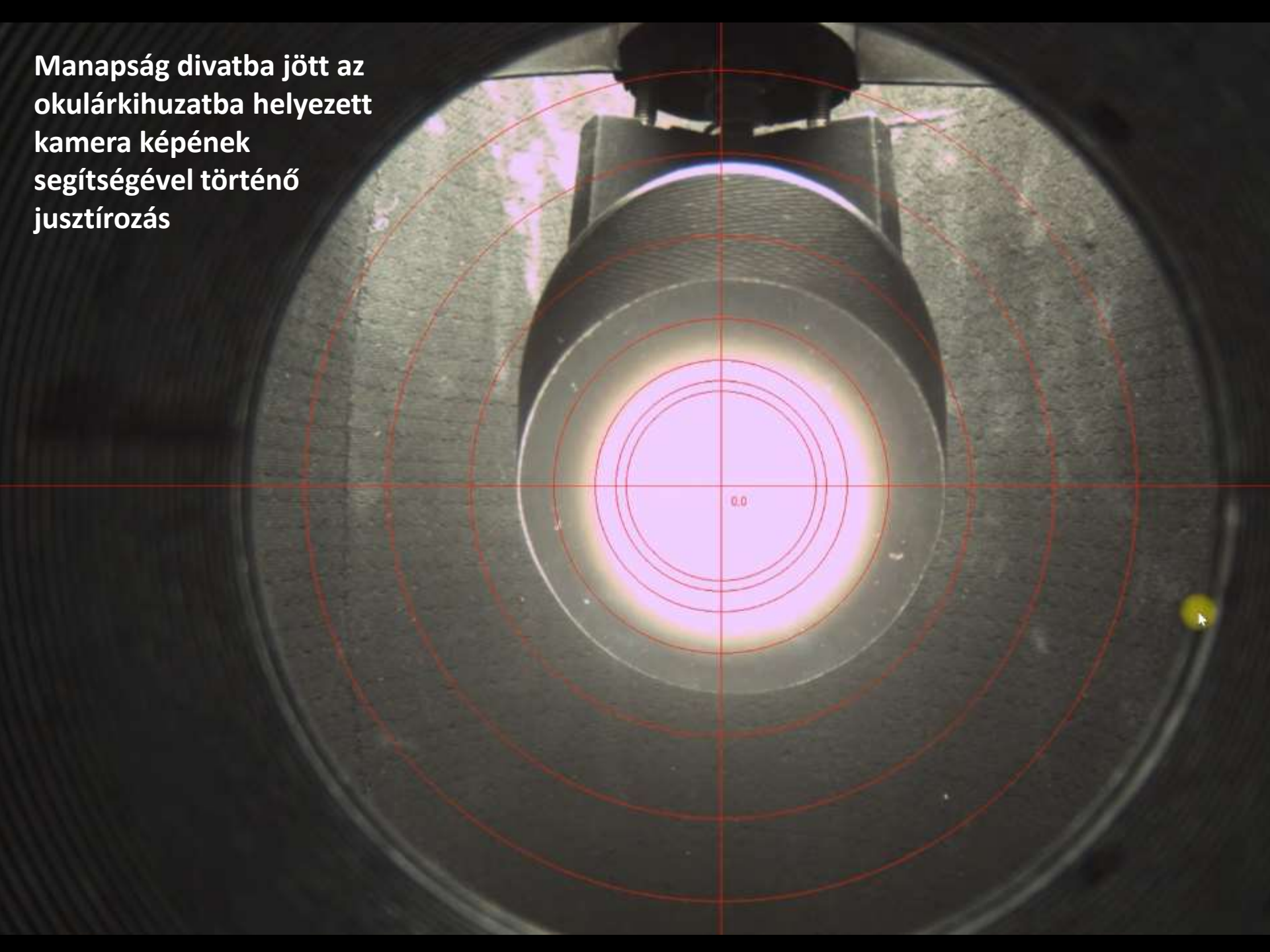
Ha a segédtükör nincsen középen:

- 1) mozgassuk a távcsőtubus hossz tengelye mentén,
- 2) szabályozzuk be a három állító csavarral



A fő- és segédtükör tükröződő képével egyelőre ne foglalkozzunk, csak a segédtükör körvonalának központosításával

**Manapság divatba jött az
okulárkihuzatba helyezett
kamera képének
segítségével történő
jusztirozás**





Állító és rögzítő csavarok használata

Mindig csak kicsit (mondjuk negyed fordulatot) tekerjünk egy csavaron!

Segédtekőr esetén:

Ha az egyik csavart kifelé tekertük, akkor a másik kettőt ugyanannyit tekerjük befelé. Ez fordítva is igaz.

A főtekőrtartó állító csavarjai általában rugóval vannak megfeszítve, ezért elég az egyiket tekerni.
A főtekőr állítása előtt a főtekőrtartó rögzítő csavarjait lazítsuk meg, majd a jusztirozás végén óvatosan szorítsuk meg (a csavarokon egymás után körbejárva mindig csak egy kicsit húzzunk, többször visszatérve mindegyikhez)



V.3.2. Newton-távcső jusztirozása vagy kollimálása lézerrel

(Feltételezzük, hogy az okulárkihuzat megfelelően van beállítva.)



9a, 9b. ábra.

A segéd-tükör állítócsavarjaival végzett jusztirozás után a főtükör középpontjára vetül a lézersugár.

1. lépés: A segéd-tükör jusztirozása:

Figyelem! Ez a lépés feltételezi, hogy a segéd-tükör tökéletesen van beszerelve a tubusba, központosítva, eltolva (ld. 146. old). Helyezzük bele az okulárkihuzatba a kollimációs lézert. Keressük meg a lézer fénypontját a főtükörön. Ezt a fénypontot a segéd-tükör vetíti a főtükörre. **A cél az, hogy a lézerfény éppen a főtükör középpontját találja el.** Ha nem ez a helyzet, **a segéd-tükör-tartón levő három állítócsavar finom állításával korrigálja a segéd-tükör dőlésszögét** egészen addig, amíg a lézerfény a főtükör középpontjára nem vetül. Az állításkor egyszerre csak egy állítócsavaron állítsunk, igen finoman. A hiba nem haladhatja meg a főtükör átmérőjének 1-2 százalékát.



2. lépés: A főtükör beállítása

A jusztirozás utolsó lépése a főtükör dőlésszögének beállítása. A távcső hátoldalánál, a főtükörtartó állítócsavarjainak finom tekerésével állítsuk a jusztirokulárba visszaverődő lézerfény pöttyöt a közepén levő lyukba, ahonnan kiindult. Megjegyzés: Érdeemes a távcső tubust vízszintesre beállítani úgy, hogy az okulárkihuzat felül legyen. Így elkerülhetjük a jusztirozó lézer megdőlését, „lehajlását”.

V.3.3. Newton-távcsövek jusztirozása kollimációs (Cheshire) okulár segítségével

Megjegyzés: a Cheshire okulár használható a lencsés távcsövek kollimáláshoz is (hagyjuk rajta az objektív kupakot a távcsövön és az objektív mozgásával állítsuk középre a Cheshire okulár fénylő foltját)!



A kollimációs okulár **központosított látómezeje** és beépített **szálkeresztje** megkönnyíti az optikai elemek pontos beállítását.

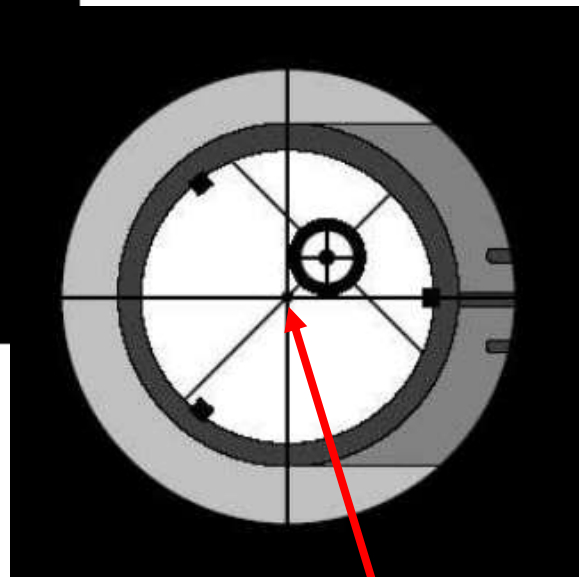
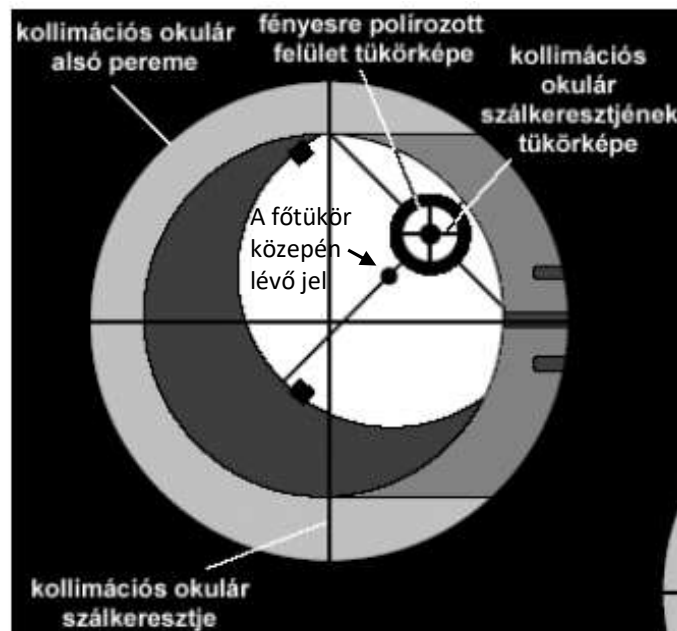
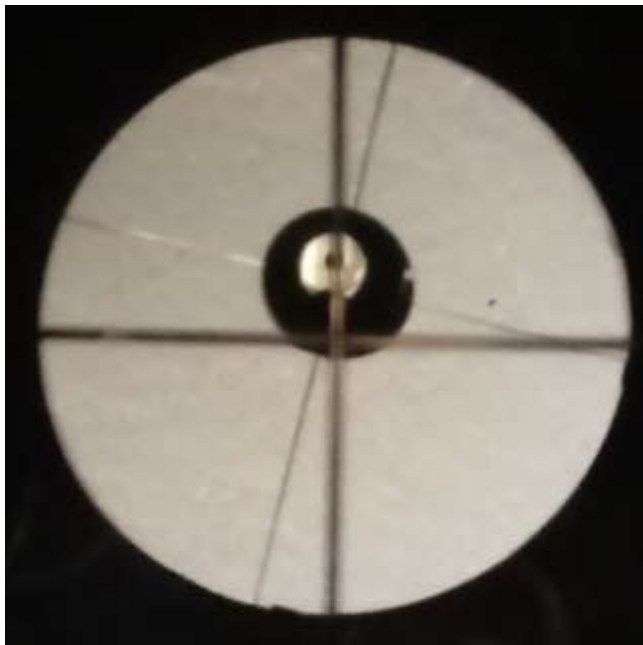
Belsejében egy **polírozott felületet is találunk 45 fokos szögben megdöntve, ami némi fényt tükröz a kihuzat belsejébe**. A kollimációs okulár belsejében található fényesre csiszolt felület gyűrű alakban rávetül az optikai elemekre, megkönnyítve ezáltal a beállításukat.

A főtükör pontos kollimációjához a közepén lévő jelet kell figyelembe vennünk (ld. 151. old.).

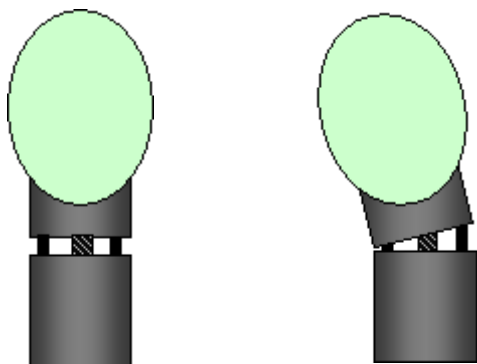
Lépések:

0. lépés: Ellenőrizzük, hogy a fókuszírozó merőleges-e a tubusra. Ellenőrizzük, hogy a segédtükör megfelelően van-e beállítva: cső központi tengelyében van, az okulárkihuzatban közepén és kör alakban látszik (vagy megfelelően el van tolva).

1. lépés: A kollimációs okulárt úgy csúszassuk be a kihuzatba, hogy az átnéző-lyukon történő beletekintéskor **alsó pereme kismértékben nagyobbnak látszódjon, mint a segédtükör**. Forgassuk az okulárt úgy, hogy a kivágott oldala valamilyen **külső fényforrás felé nézzen**. Győződjünk meg arról, hogy elég világos van a szobában, ugyanis magát a segédtüköröt is kellően tisztán kell látnunk (vagy kissé oldalról világítsunk be a távcsőbe egy lámpával).



Nem megfelelően beállított rendszer képe



Ha az állítás körben a segédtükrőtartó extrém módon elhajlik, vagy annak tükröződése ferde helyzetben látszik, akkor valami nem jó. Kezdjük újra az egész beállítást az alapoktól!

2. lépés: Segédtükrör beállítása

A segédtükröt kell úgy állítani, a főtűkör képe pontosan a segédtükr közepére kerüljön, vagyis a főtűkör közepén levő jelzés a kollimációs okulár szálkeresztjébe kerül.

Használjuk a **segédtükr-tartón található csavarokat** a segédtükr állításához. **A főtűkör tükörképe pontosan középen van, amikor a pereme és a segédtükr pereme között szabályos gyűrűt látunk.**



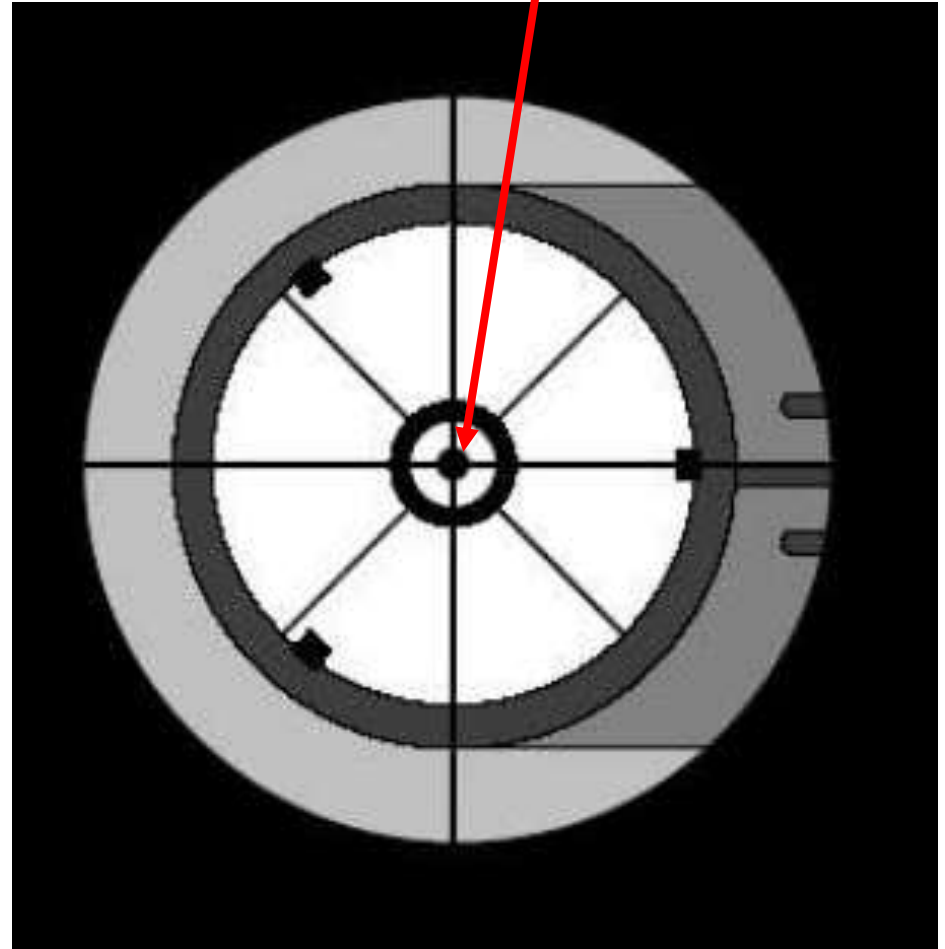
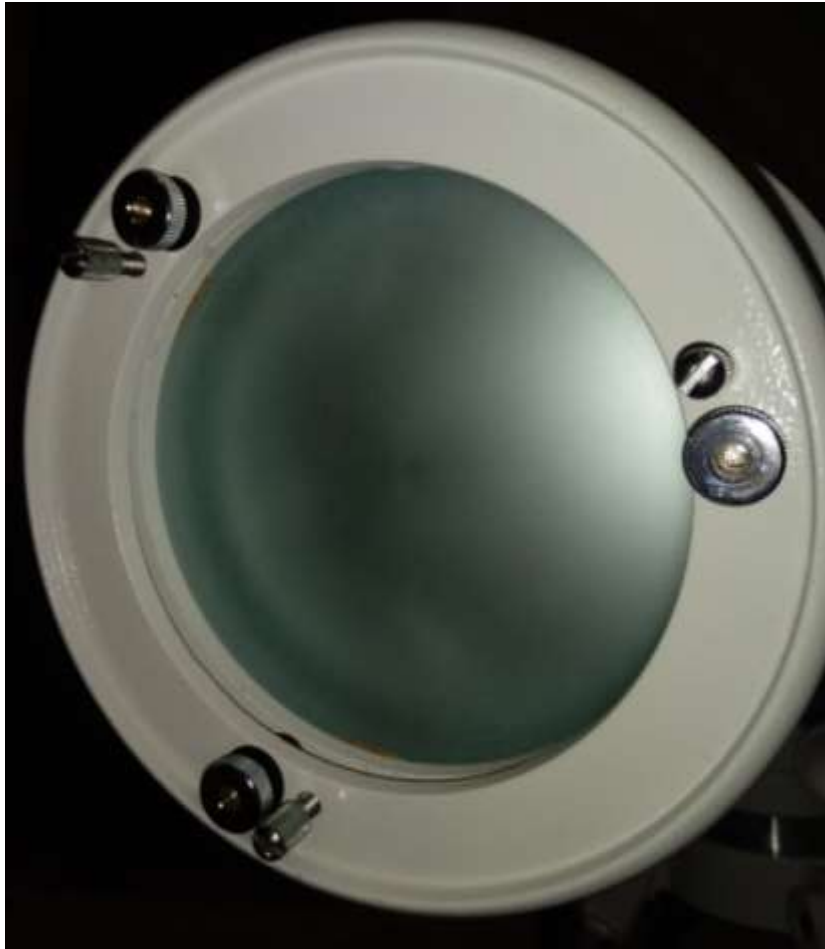
Érdemes a hagyományos segédtükör mozgató csavarok helyére kézzel forgatgató csavarokat tenni. Ezek belső végét, ahol a segédtükörtartót nyomják, reszelővel kissé gömbölyítsük le.



3. lépés: a főtükör beállítása

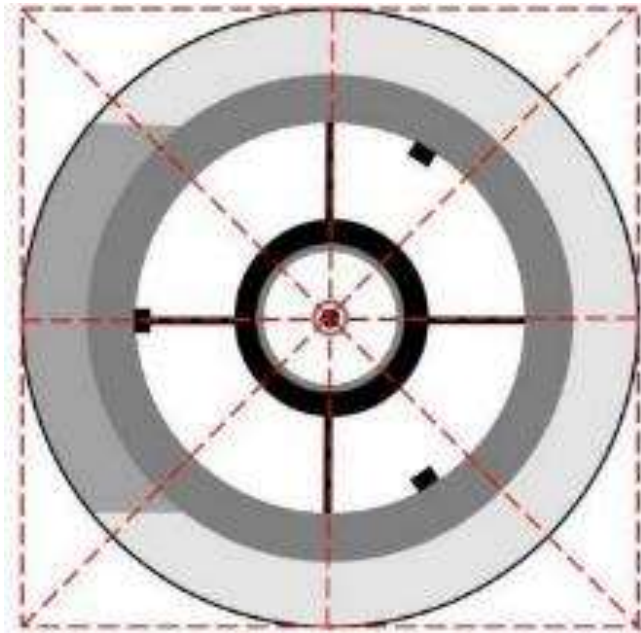
A tubus végén a főtükörfoglatat alján lévő három csavar segítségével állítsuk be (billentsük) a főtükört úgy, hogy a segédtükrök tükörképe pontosan a szálkereszt alá kerüljön.

A végső beállítást csillagon kell elvégeznünk! (ld. később, 161. oldal)

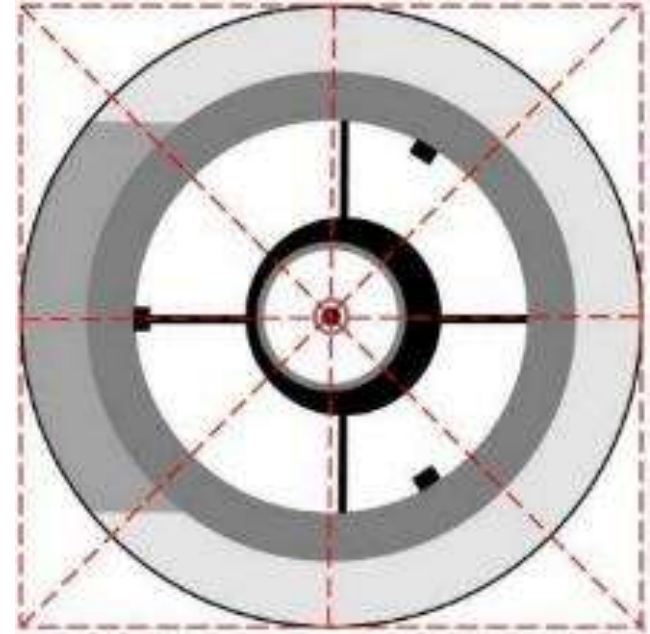


Másként kell beállítani egy kis- és nagy fényerejű távcsövet!

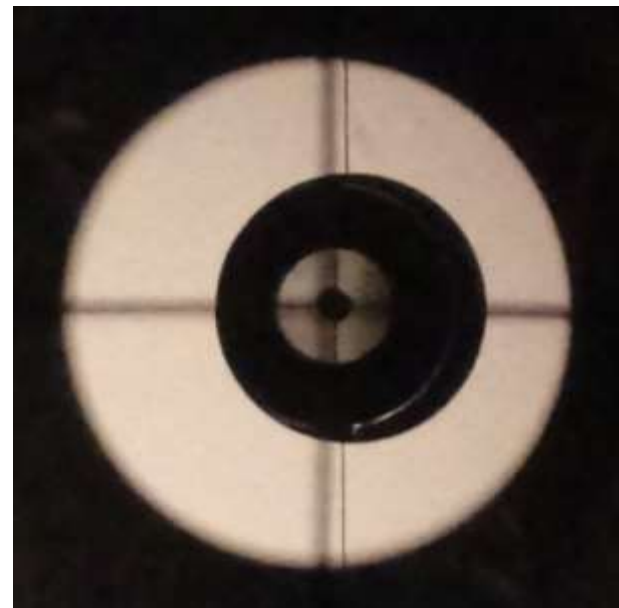
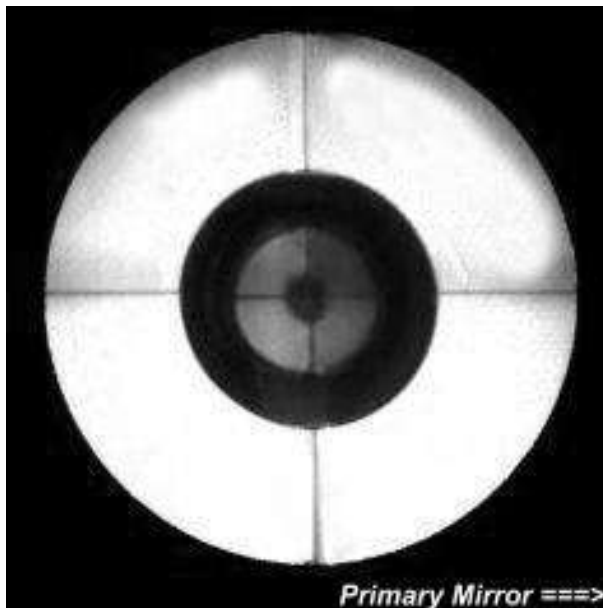
Egy jól beállított nagy fényerejű (pl. F/4) távcsőben nem koncentrikus minden elem képe.



Megfelelően
jusztirozott f/8 - 10-es
Newton-távcső képe



Megfelelően
jusztirozott f/3 - 4-es
Newton-távcső képe



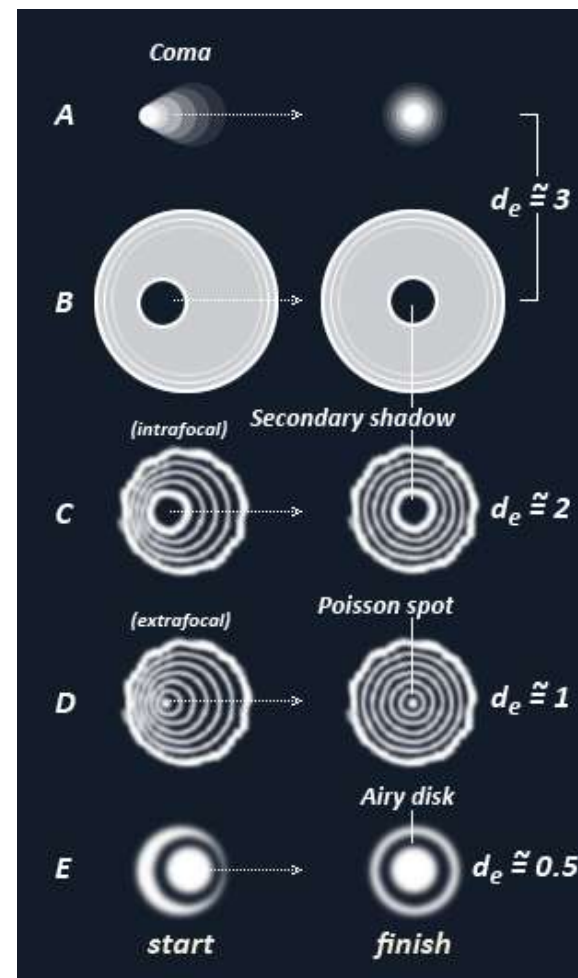
V.3.4. Newton-távcső jusztírozása defókuszált csillaggal

A végső beállítást egy 1-2 magnitúdós csillag segítségével végezzük el (pl. Sarkcsillag). Állítsuk rá egy fényes csillagra majd **lassan tekerjük el az élességet**. Ha a távcső megfelelően kollimált, a defókuszált csillagkorongnak pontosan kör alakúnak kell lennie, ami koncentrikus gyűrűkből áll.

Newton-távcsövekben a segédtükör által okozott sötét árnyéknak pontosan a defókuszált csillag közepén kell látszódnia. Ha a „lyuk” a középponton kívülre esik, a távcső beállításra szorul. **A főtüköröt állítsuk úgy, hogy a csillag képe a gyűrű szélesebb oldala felé mozduljon el az okulár látómezejében.** Ezt ismételjük meg kevésbé defókuszált módon is, míg a lyuk középére nem kerül.



Ha a távcső elé tesszük a kezünket, annak árnyék képe segít a megfelelő állítócsavar kiválasztásában.



V.3.5. Schmidt- és Makszutow-Cassegrain-távcsövek juszttírozása

A Schmidt-Cassegrain-távcsöveket a segédtükör három csavarjával juszttírozhatjuk

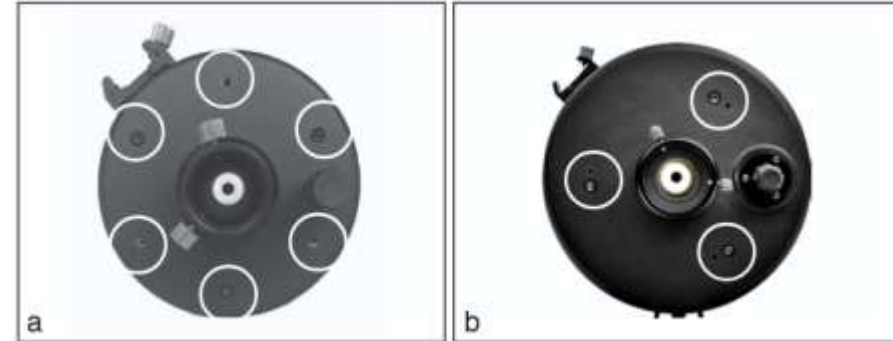
A korrekciós lemez is mozgatható, de ehhez csak megfelelő tudás birtokában érdemes nekifogni!



Segédtükör csavarok SC távcsövön

A csavarhúzó megcsúszhat, megkarcolhatja az optikát! Érdemes kézzel forgatható csavarokra cserélni a normál csavarokat.

Makszutow-Cassegrain-távcsöveket a főtükörtartó csavarjaival állíthatjuk be

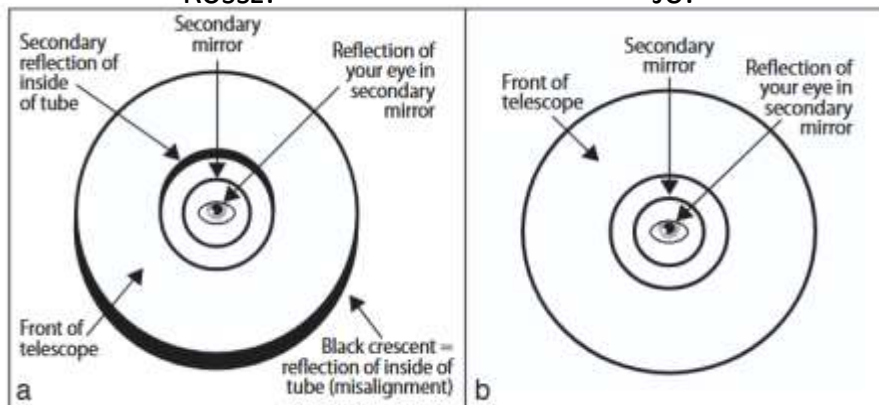


Főtükörtartó csavarok különböző MC távcsöveken

Nappali beállítás V1: Távolítsuk el a zenittükröt a távcső végéből. Pusztá szemmel nézzünk bele. Használjunk juszttírozó kupakot, vagy kollimációs (Cheshire) okulárt a szemünk központosításához. A távcsövet egy jól megvilágított szoba fehér falára irányítsuk. Állítsuk be úgy a látványt, hogy minden központos és koncentrikus legyen.

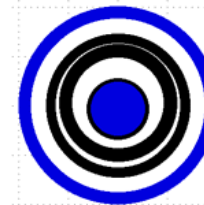
Rossz:

Jó:

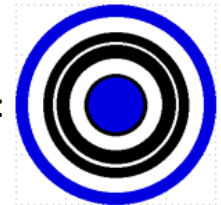


Nappali beállítás V2: A távcsövet felrakjuk egy állványra, vízszintesen, szemmagasságban. Ebben az esetben előről nézzünk bele és vizsgáljuk a megjelenő gyűrűk képét, koncentrikus voltát. A pontosságot javítja, ha egy másik állványra elhelyezünk egy kis lukkal ellátott karton, vagy műanyag lapot, amelyen keresztül nézünk. Keressük meg azt a pozíciót, ahol a segédtükör és annak árnyéka koncentrikusnak látszik. Ez lesz a luk helye. A luknak az optikai tengelyben kell lennie és a távcsőtől mért távolságának meg kell egyeznie a távcső fókusztávolságával. Állítsuk koncentrikusra a megjelenő gyűrűket.

Rossz:

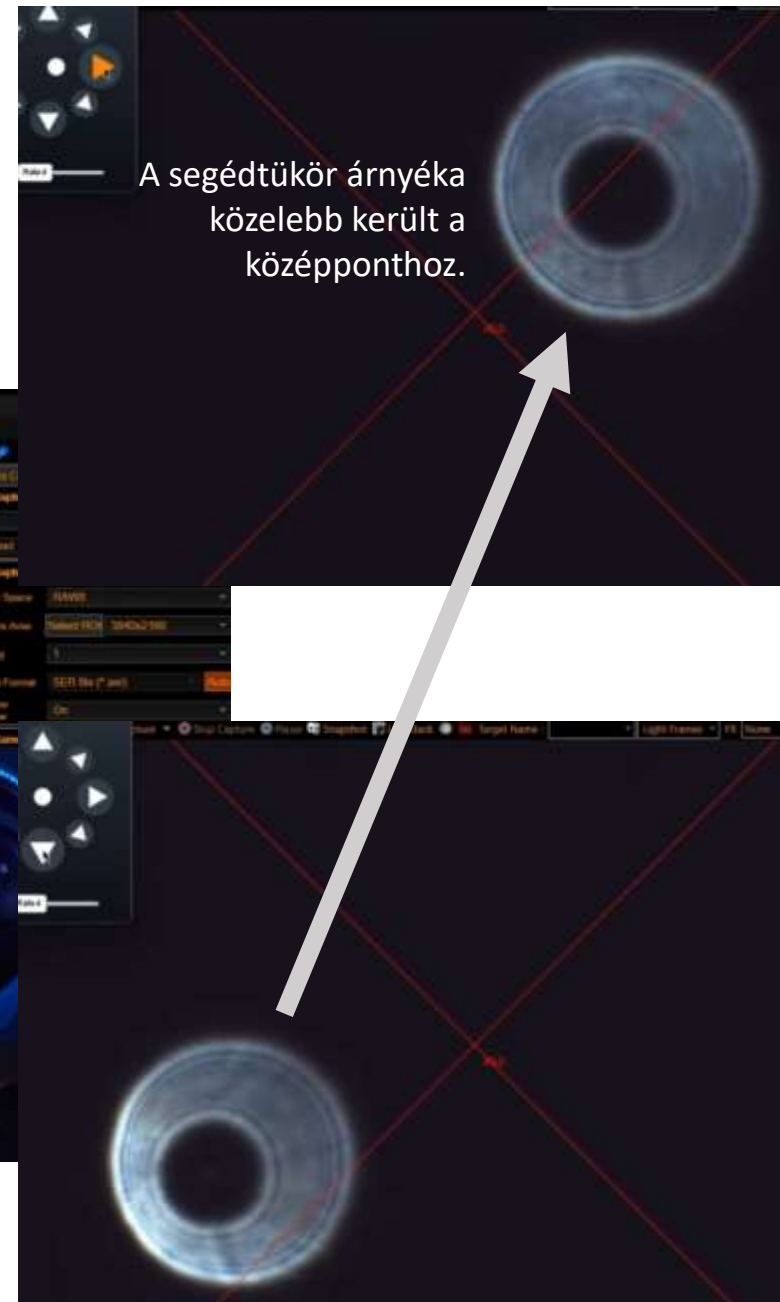


Jó:

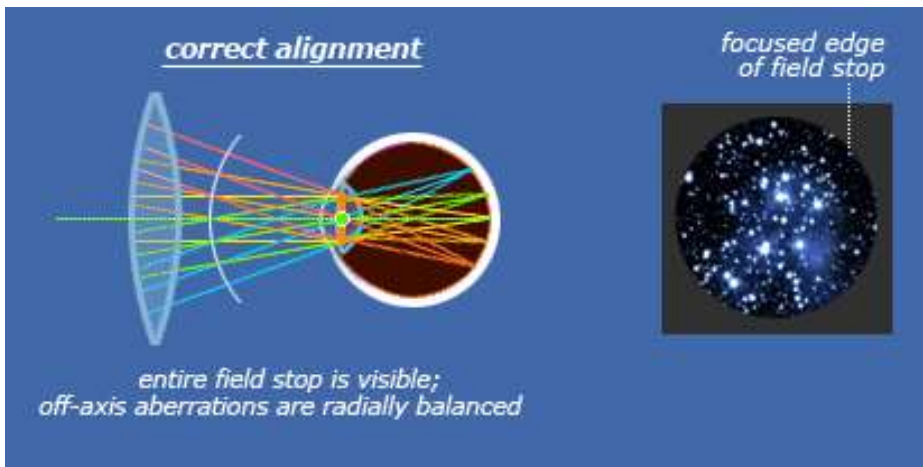


Schmidt-Cassegrain távcső jusztírozása csillagon a segédtükrő három csavarjával

Itt is a defókuszált gyűrű legvastagabb része irányába mozgassuk el az okulárban látott csillagkorongot.

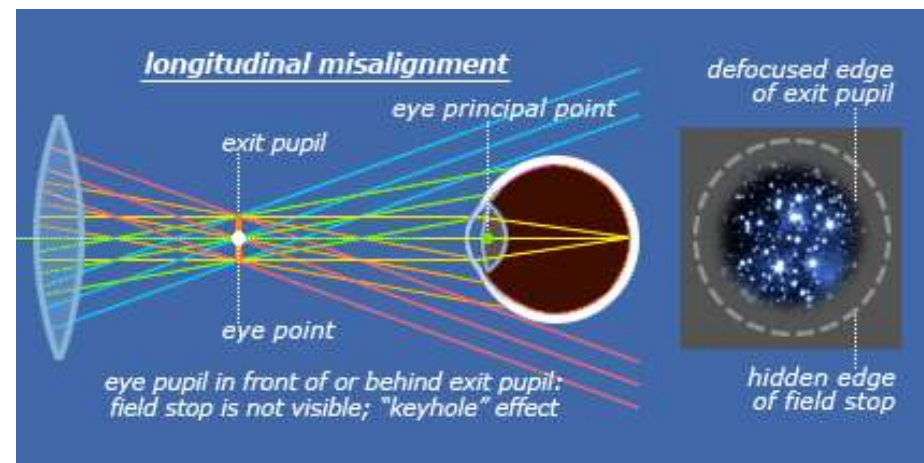


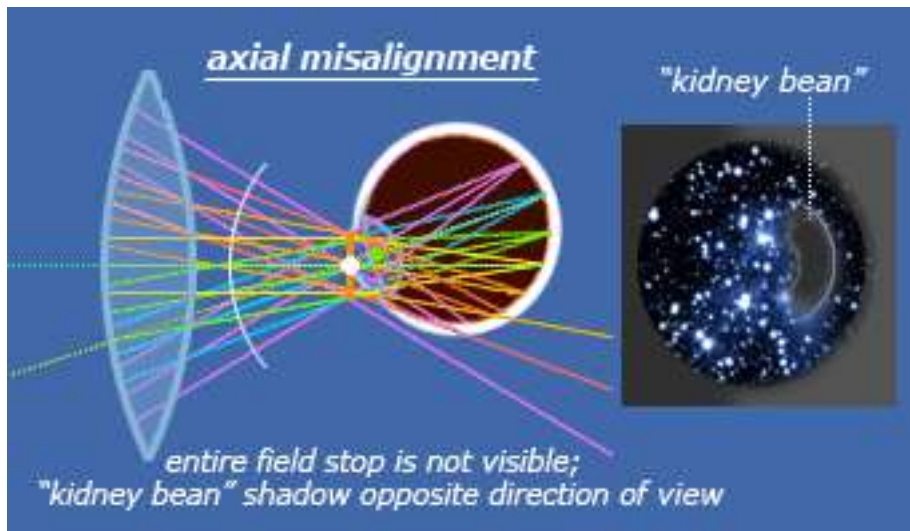
V.4. A megfigyelő szemének „juszttírozása”



A szem helyes beállítása esetén az okulár-szem távolság akkora legyen, hogy az okulár kilépő fókuszsíkja és a szemlencse egybe essen; továbbá a szem és az okulár tengelye egybe essen. Ilyen helyzetben a standard okulárban **az okulár belső blendéjének sötét körvonala a látott kép teljes kerületén látható és az esetleges optikai aberrációk** (különösen az asztigmatizmus és a mezőgörbület) **radiálisan kiegyensúlyozottak.**

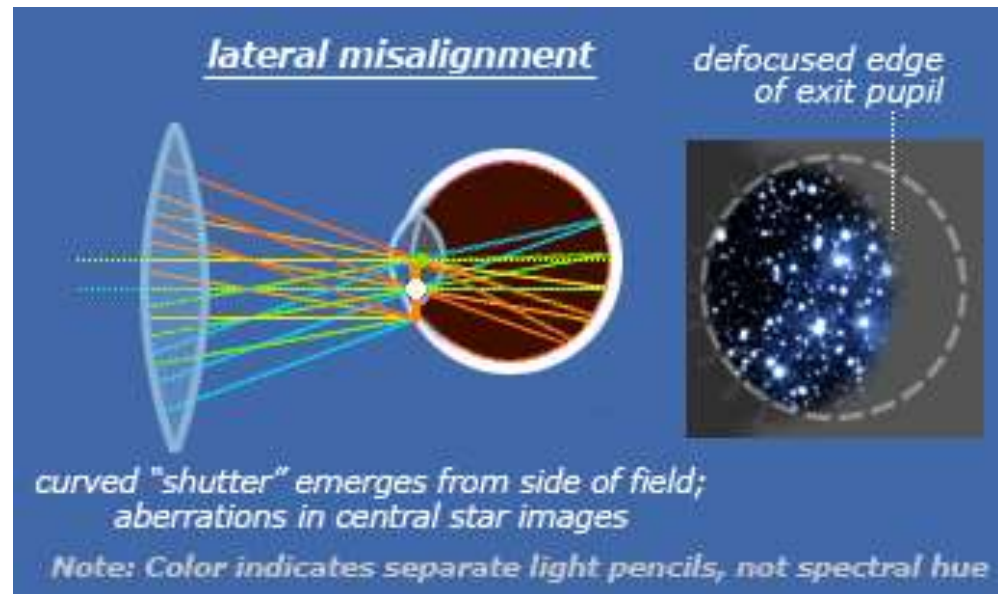
A szem hosszirányú eltolódása esetén a megfigyelő pupillája és az okulár optikai tengelyének középpontjában helyezkedik el, de az ideálisnál távolabb, vagy ritkább esetben közelebb. Mindkét helyzetben **a kilépő pupilla vignettálja a képterületet és „kulcslyukszerű” szűkülést hoz létre a látómezőben.**





A szem optikai tengelye szöget zár be az okulár optikai tengelyével. Ez nem okoz észrevehető hatást a hagyományos ($\leq 55^\circ$ látszólagos látómezejű) vagy jól korrigált széles látómezejű szemlencsékben. Azonban egyes széles vagy szuperszéles látómezejű okulárokban **egy lencse vagy bab árnyék jelenik meg a látómezőben**, amelyet gyakran a csillagok elmosódott fénye körvonalaz.

Oldalirányú eltolódás esetén az okulár és a szem optikai tengelye megközelítőleg párhuzamos és az okulár-szem távolság is megfelelő, de szem optikai tengelye és az okulár optikai tengelye oldalra el vannak tolódva egymástól. Ez egy **görbe, defókuszált árnyékot okoz**, amely a szem elmozdulásának oldalán jelenik meg a látómezőben.



V.5. A távcsövekben jelentkező reflexiók (fényvisszaverődések) és azok csökkentése

A belső reflexiók, „kóbor” fények drasztikusan lerontják a megfigyelés élményét. **Hatásuk nemcsak esztétikai hiba, hanem fizikai adatvesztés is az optikai rendszerben.** (Figyelem: furcsa fényléseket okozhat a poros, zsíros, párás okulár és objektív is! De most nem erről van szó.)

A reflexiók hatása a képre:

Kontrasztcsökkenés: Ez a legjelentősebb hatás. A kép „fátyolossá”, szürkévé válik, a fekete háttér (az égbolt) kivilágosodik. Emiatt a halvány mélyég-objektumok (galaxisok, ködök) beleolvadnak a háttérbe és láthatatlanná válnak.

Szellemképek (Ghosting): Fényes objektumok (Hold, bolygók) normális képe mellett azok halványabb, elmozdult másai jelenhetnek meg. Ez általában az optikai elemek hibájából alakul ki, pl. a nem megfelelő antireflexiós bevonatok használata miatt.

Fényudvarok (Halo): A fényes csillagok körül zavaró, diffúz fénygyűrűk alakulhatnak ki.

Becsillanás (Flare): Ha egy erős fényforrás (Hold, lámpa) a látómezőn kívül van, de a fénye bejut a tubusba, nagy, világos foltokat vagy csíkokat hozhat létre a látómezőben.



A zavaró fényszóródás csökkentése:

A tubus belső reflexióinak csökkentése:

A tubus belseje legyen matt fekete (beleértve a tükörtartókat és belső csavarokat is). A hagyományos festékek ezt csak részben teljesítik. A fekete velúrral való kibélelés javíthat ezen.

Blendék elhelyezése főleg a lencsés, de akár a tükrös távcsövek tubusában is. Ezek méretét érdemes előre kiszámolni, vagy papíron kiszerkeszteni. **Ld. 169. old.**

Különösen fontos Newtonokban, hogy a fókuszírozóval szemkötti tubusfal teljesen sötét és reflexiómentes legyen.

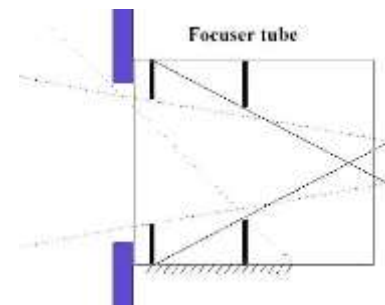
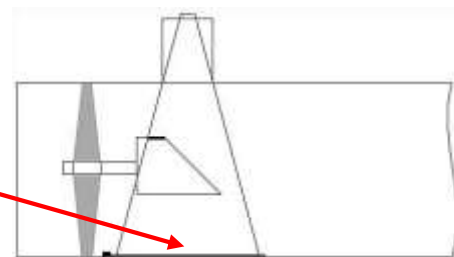
Newtonokban, Hold-megfigyelőknek hasznos lehet egy alacsony (fél fok), **félkör alakú blende az okulárkihuzattal szemkötti oldalon**, a belátott terület előtt, ami megakadályozza, hogy a holdfény az okulárral szemkötti csőfalat megvilágítsa.

Blendéket érdemes rakni a hosszabb fókuszírozókba is.

Az okulárok, fókusznyújtók belsejének reflexiómentesítése:

Az okulár csövének (nyakának) belseje és a Barlow-lencse belső része is legyen matt fekete!

Ha szükséges, akkor helyezzünk az okulárnyakba egy fekete velúrból, vagy fotókartonból készített béléscsövet.



Okulár belső reflexió velúrozás előtt és után



A tükrök széle:

A Newton-távcsövekben a főtükör külső peremét érdemes keskeny sávban mattfekete gyűrűvel (aperture mask) letakarni, vagy lefesteni. **A perem fazettázása (csiszolás során lecsapott része) is szórja a fényt. A peremeken általában nagyobb esély van a csiszolási hibákra is.**

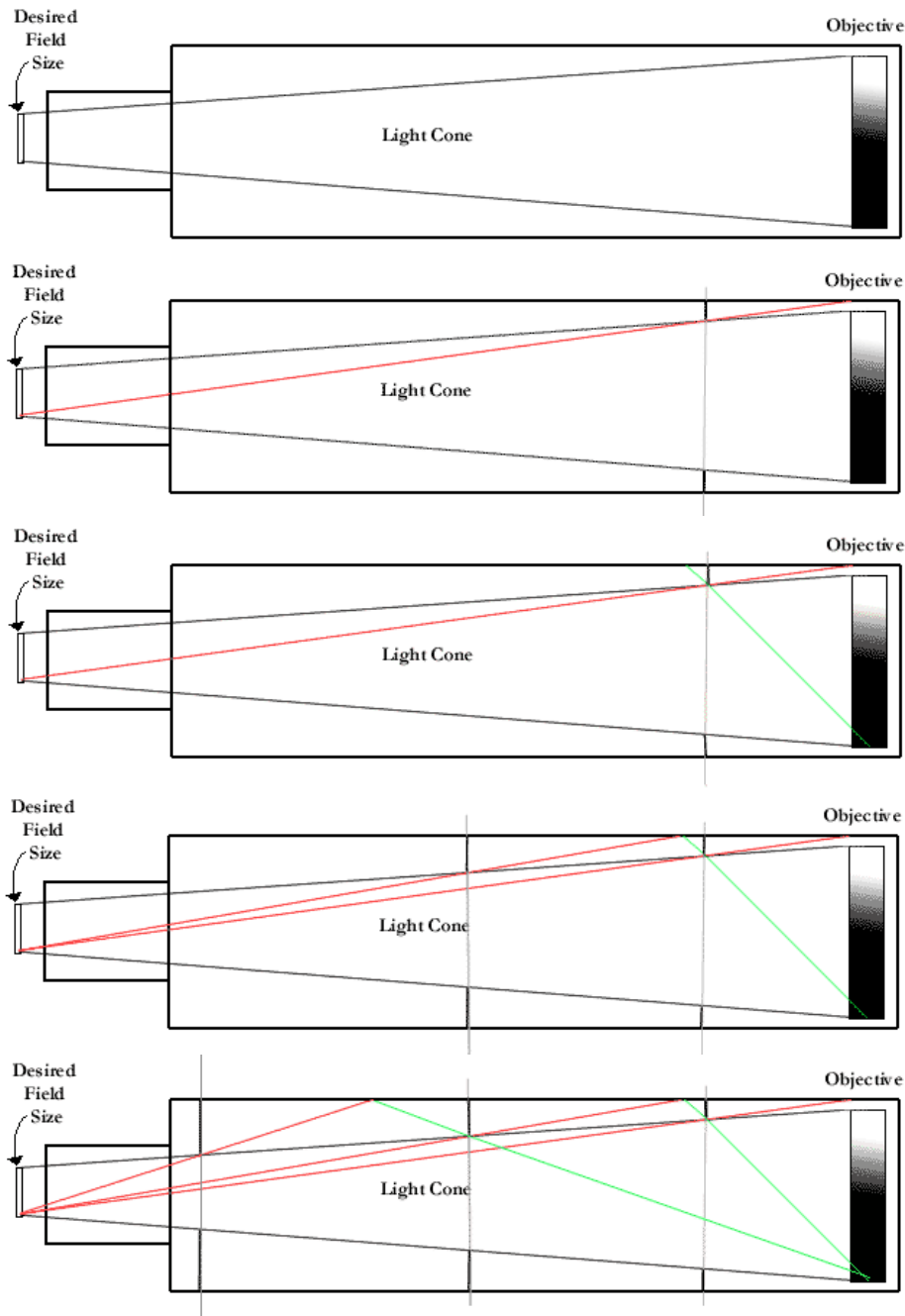
A segéd-tükör oldalát is érdemes mattfeketére lefesteni annak fényszórása miatt.

Árnyékoló cső (párávédő, dew shield):

A lencsés, Schmidt- és Makszutov-távcsöveknél különösen fontos, de a Newtonok esetén is jó hatása van, ha a tubus elejére legalább a saját átmérőjével megegyező, de inkább azt meghaladó hosszúságú toldó csövet illesztünk, ami **véd az oldalról esetleg beszűrődő lámpafénytől és a párasodástól. Az objektívre lecsapódó pára szórja, megtöri, elnyeli stb. a fényt!**



Lencsés távcső (refraktor) tubusblendéinek (baffle) készítése



1. Rajzoljuk le méretarányosan a távcsövet és határozzuk meg, hogy mekkora vignettálásmentes fókuszmezőt szeretnénk kapni (Desired Field Size). Ennek szélső pontjait kössük össze az objektív azonos oldalaival (szürke vonalak, fénykúp).
2. Kössük össze a fókuszmező alját az objektív feletti cső fallal (piros vonal). Ahol a piros és szürke vonal metszi egymást, az lesz az első blende helye és magassága (fekete vonalszakasz).
3. Kössük össze az objektív alsó részét a szemközti oldalon lévő blende belső oldalával és hosszabbítsuk meg a vonalat a tubusig (zöld vonal).
4. Az előző lépésben a csőfalon kijelölt pontot kössük össze a fókuszmező aljával (újabb piros vonal). Ahol az utóbbi vonal metszi a fénykúp szélét mutató szürke vonalat, ott lesz a 2. blende helye, illetve lemérhetjük annak magasságát is.
5. A 3. blende szerkesztését ugyanúgy végezzük el, mint a 2. blendéét (3. és 4. lépés ismétlése).

Blendék helyének és belső átmérőjének számítása

Egy lencsés távcső esetén a számításhoz az alábbi adatokra van szükségünk (minden mm-ben):

D_T : a tubus belső átmérője

D_L : az objektívlencse átmérője

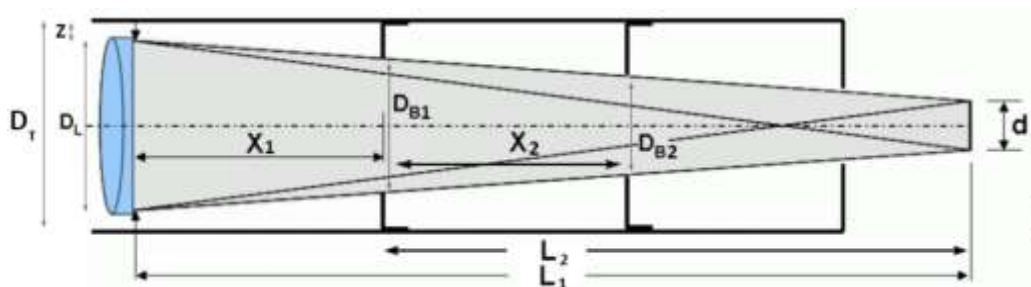
$$Z = (D_T - D_L) / 2$$

d : a kívánt vignettálásmentes fókusz sík átmérője

L_1 : az objektív és a fókusz sík távolsága; L_2 : az első blende és a fókusz sík távolsága ...

X_1 : az első blende távolsága az objektívtől; X_2 : az első és második blende távolsága ...

D_{B1} : az első blende belső átmérője; D_{B2} : a második blende belső átmérője ...



$$X_1 = Z * L_1 / (d + Z) \quad X_2 = Z * L_2 / (d + Z) \quad \dots$$

$$D_{B1} = d + \frac{(D_L - d) (L_1 - X_1)}{L_1} \quad D_{B2} = d + \frac{(D_{B1} - d) (L_2 - X_2)}{L_2} \quad \dots$$

Számítási példa egy 102/820-as lencsés távcsőre, melynek fókusz síkjába egy full frame (átló: 43,3 mm = d) kamerát szeretnénk tenni. ($Z = 10$ mm)

$$X_1 = 10 * 820 / (43,3 + 10) = 154 \text{ mm}$$

$$D_{B1} = 43,3 + ((102-43,3)*(820-154) / 820) = 91 \text{ mm}$$

$$L_2 = 820 - 154 = 666 \text{ mm}$$

$$X_2 = 10 * 666 / (43,3 + 10) = 125 \text{ mm}$$

$$D_{B2} = 43,3 + ((91-43,3)*(666-125) / 666) = 82 \text{ mm}$$

$$L_3 = 666 - 82 = 584 \text{ mm}$$

$$X_3 = 10 * 584 / (43,3 + 10) = 110 \text{ mm}$$

$$D_{B3} = 43,3 + ((82-43,3)*(584-110) / 584) = 75 \text{ mm} \quad \dots$$



V.6. A vignettáció, illetve a teljes megvilágítású terület és segédtükör mérete

Az optikában a vignettálás (vignetting) a kép fényerejének és/vagy telítettségének a szélek felé történő csökkentését jelenti a kép közepéhez (teljes megvilágítású területhez) képest.

A „vignette” szó ugyanabból a tőből származik, mint a „vine” = „szőlő, szőlőtőke” és az évszázadokkal ezelőtti szőlő és szőlőinda motívummal keretezett könyvlapok díszes szegélyére utal.

Mechanikus vignettálás – távcsövekre ez jellemző

Mechanikus vignettálás akkor alakul ki, amikor a képsík (fókuszsík) széléről kiinduló fénysugarakat részben, vagy teljesen eltakarják a távcső/fényképezőgép objektív egyes mechanikus elemei, pl. **túl hosszú árnyékoló cső, szűrők, túl szűk belső blendék, vagy a túl kicsi segédtükör**. A kép szélén jelentkező sötétedés jelentkezhet lágyan és fokozatosan vagy hirtelen – minél jelentősebb a szűkítő hatás, annál szűkebb területen megy át a teljesen megvilágított terület a megvilágítatlan részbe. Extrém esetben a látómező korlátozását eredményezi – a kép külső részei teljesen feketék lesznek.

Optikai vignettálás – soklencsés fotóobjektívekben tapasztalható

Ezt a fajta vignettálást a többlencsés objektív fizikai méretei okozzák. A lencse hátsó elemeit az előttük lévő elemek árnyékolják, ami csökkenti a tengelyen kívüli beeső fény tényleges lencsenyílását. Ennek eredményeként a fényintenzitás fokozatosan csökken a kép peremén.

Pixel-vignettálás – digitális kamerák érzékelőin jelentkezik

A pixel-vignettálás csak a digitális fényképezőgépeket érinti, és a digitális érzékelők szögfüggése okozza. A szenzorra merőlegeshez közeli beesési szögben eső fény erősebb jelet produkál, mint a ferde szögben érkező. A legtöbb digitális fényképezőgép beépített képfeldolgozást használ az optikai vignettálás és a pixel-vignettálás kompenzálására. Az érzékelőelemeken megfelelően eltoltt mikrolencsék használata a képérzékelő felett szintén csökkentheti a pixel-vignettálás hatását.

A teljes megvilágítású (vignettátalan) terület átmérője és a Newton segédtükrör méretezése

Egy Newton-távcsőben fontos ismernünk a fókuszsík teljes megvilágítású területének átmérőjét, ahol még nem jelentkezik vignettáció. (Fontos a 2-es típusú kollimációs hiba esetén is! Ld. 146. oldal.)

Ha a segédtükrör átmérőjét a főtükrör átmérőjéhez viszonyítjuk:

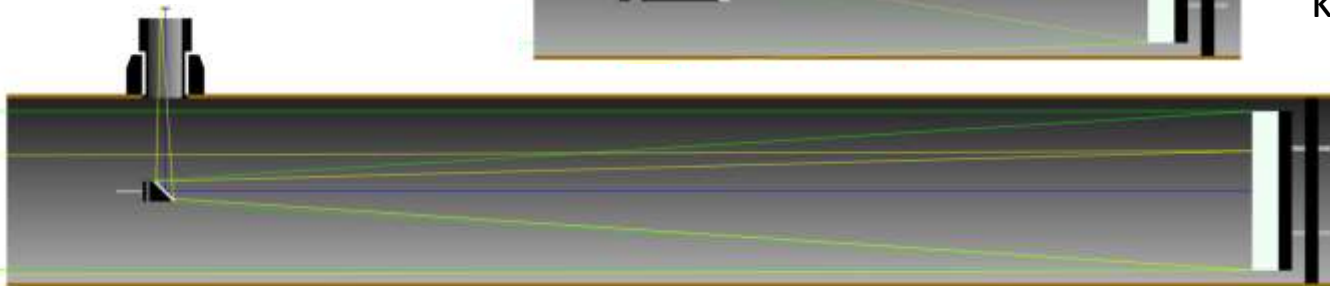
20% alatt: Kicsi teljesen megvilágított terület, de kiváló kontraszt jellemzi, bolygómegfigyelésre optimális. A kép széle vignettálódik, de ez a bolygómegfigyelést nem zavarja. Viszont **változócsillagok megfigyelésére nem alkalmas** a rendszer, mert a kép szélén észrevehetően csökken az összehasonlító csillagok fénye. **A fókuszsík közepének mindig 100%-ban megvilágítottnak kell lennie.**

20–25%: Általános célú tükrös távcsövek (vizuálisan szinte észrevehetetlen kontrasztvesztés és vignettáció). A legtöbb ember számára, amíg a mező szélén a megvilágítás nem csökken 50 százalék alá (ami nagyjából $\frac{1}{2}$ magnitúdónak felel meg), a vignettáció észrevétlen marad.

30% felett: Tipikusan fotós Newton-távcsövek (asztrográfok) jellemzője; itt a kontraszt rovására a teljes képmező kivilágítása az elsődleges. **A segédtükrörnek elég nagynek kell lennie ahhoz, hogy a kamera teljes érzékelőfelülete (chip) a teljesen megvilágított mezőben legyen,** ezért tesznek a fotónewtonokba akár 35-45% kitakarású segédtükröket is.



150/600-as
asztrográf 42%-os
központi kitakarással



150/1200-as
bolygózó távcső
13%-os központi
kitakarással

Segédtükör és teljesen megvilágított terület számítása:

A segédtükör, illetve a teljesen megvilágított mező méretének kiszámításához legyen **D** a főtükör átmérője, **d** a segédtükör átmérője (kistengelye), **F** a fókusz távolság, **h** a segédtükör optikai középpontjától a fókuszpontig mért távolság, és **X** a teljesen megvilágított terület átmérője (minden mm-ben):

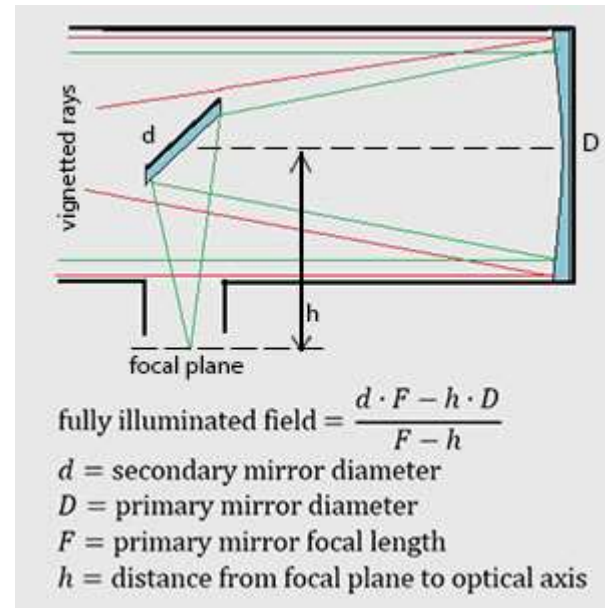
Teljesen megvilágított terület (mm): $X = (d \cdot F - h \cdot D) / (F - h)$

Segédtükör kistengelye (mm): $d = X + h \cdot (D - X) / F$

Ajánlott Newton-távcső tervező honlapok:

<https://stellafane.org/tm/newt-web/newt-web.html>

<https://www.bbastrodesigns.com/NewtDesigner.html#diagonal>

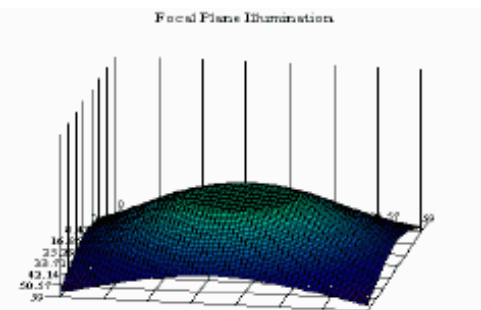


Mekkora a teljesen megvilágított terület átmérője a fókusz síkban egy 39%-os (**d** = 78 mm) kitakarású 200/1200-as Newtonban, ha a **h** = 180 mm?

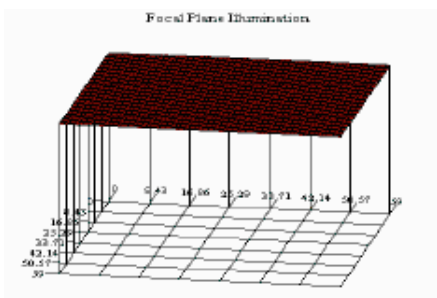
$$X = (78 \cdot 1200 - 180 \cdot 200) / (1200 - 180) = 56,5 \text{ mm}$$

Mekkora **segédtükörre (kistengely) van szükség** egy 200/1200-as Newtonban, hogy egy 53,7 mm átmérőjű érzékelő teljes felülete teljesen megvilágított legyen? (**X** = 53,7 és **h** = 180 mm)

$$d = 53,7 + 180 \cdot (200 - 53,7) / 1200 = 75,7 \text{ mm}$$

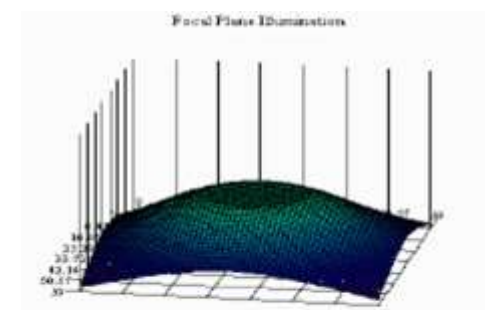


3,8 × 3,8 cm-es digitális kamera érzékelőfelülete (átló: 53,7 mm)



39%-os segédtükör esetén a teljes érzékelőn 100%-os a megvilágítás

A teljesen megvilágított terület változása 200/1200-as Newton-távcsőben, különböző méretű segédtükrök esetén



10%-os kitakarásnál a kép közepe sem kap teljes megvilágítást és szélei vignettáltak

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Kulin György (és Zerinváry Szilárd): A távcső világa (több kiadás)

Kulin György: Távcsőtükör házi készítése, TIT, 1970

MCSE: Amatőrcsillagászok kézikönyve (több kiadás)

<https://www.astro-baby.com/astrobaby/help/collimation-guide-newtonian-reflector/>

<https://www.bay-astronomers.org/TM/Topten.htm#01>

<https://www.bbastrodesigns.com/NewtDesigner.html#diagonal>

<http://www.berfield.com/baffles.html>

<https://www.cloudynights.com/forums/topic/214339-useful-info-about-secondary-mirror-alignment/page/19/#comment-13833706>

<https://www.fpi-protostar.com/bgrees/illum.htm>

<https://www.handprint.com/ASTRO/ae2.html>

<https://www.handprint.com/ASTRO/ae3.html#collimation>

<https://www.handprint.com/ASTRO/ae2.html#fieldfi>

<https://www.southdownsas.org.uk/Collimating.html>

<https://stellafane.org/tm/newt-web/newt-web.html>

<https://www.tavcso-mikroszkop.hu/manual/hu/kollimacios-okular.pdf>

<https://tavcso.hu/egyeb/manual/jusztirlezer.pdf>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Vignetting>

<https://www.youtube.com/watch?v=jF6cVNhFFps>

<https://www.youtube.com/watch?v=IZR-yOlwEyY>