



Távcsőkészítés

A távcsőtükrök optikai minőségéről

Az utóbbi időben Magyarországot is elérte a gyári optikák piaca. Olyan sok minőséget jellemző kifejezéssel találkozunk ezzel kapcsolatban, hogy a tisztánlátás kedvéért nem árt ezekről egy kis összefoglalást készíteni.

Vizsgálati hullámhossz (lambda): Ha azt olvassuk egy optikai rendszerről, hogy lambda/6-os, szinte sosem teszük hozzá, mekkora is ez a lambda (továbbiakban: L). Az emberi szem érzékenységeinek maximuma 555 nm körüli, a laboratóriumokban viszont HeNe lézerrel mérnek, aminek hullámhossza 632 nm. Egy korrekt mérési protokollban így 14%-kal kellene korrigálni a L/x értékét, (tehát rontani az eredményen) sajnos ez csak a legritkábban történik meg.

Az „egyenetlenség” mérési módszerei:

1. **PV (Peak to Valley)** Egy „konzervatív” mérési módszer, melyet először 1857-ben említenek és a legnagyobb eltérést (PV = csúcs-völgy) jelenti a vizsgált felületen. Jól írja le a zónák egyenetlenségét, valamint a karcosságot.

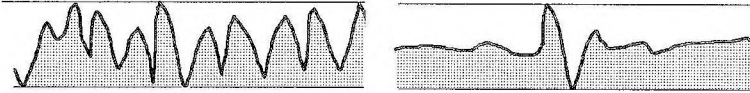
2. **RMS (Root Mean Square).** A középiskolában tanult „közepes négyzetes szórás”. Egy véletlenszerű eloszlás esetén az RMS értéke kb. 3,3-szor kisebb, mint a PV, mégis ugyanazt az optikai minőséget takarja. (Tehát $L/6$ PV ugyanaz mint $L/20$ RMS.) A gyakorlatban ez a polírozás minőséget jelenti, ha az optika PV értéke nem mutat nagyobb hibát.

Egyenetlenség: ez vonatkozhat az optikai felületre éppúgy, mint a hullámfrontra. Tükröző felület esetén a különbség a két érték közt egy 2-es faktor. Ha ugyanis egy felület pl. $L/6$ -os (valamilyik hullámhosszon), akkor a hullámfront hibája $L/3$ -as lesz, hisz a fénynek meg kell tennie az utat (szemléletesen) a „völgy” aljáig és vissza, miközben a felületről már visszafelé tart.

Rayleigh-kritérium: E szerint egy jól használható (diffrakcióhatárolt) optika hullámfronthibája a szem maximális érzékenységet jelentő hullámhosszon legfeljebb $L/4$ PV lehet. (Ez szebb köntösben: „A tükör felületének hibája HeNe lézerrel mérve $+/-L/18$ PV-nél garantáltan jobb!”) Durva közelítésként elmondhatjuk, hogy $L/2,5$ illetve $L/1$ hullámfronthiba (Rayleigh definíciója szerint!) azt jelenti, hogy a nagyítást nemigen érdemes $0,8D$ ill $0,4D$ fölé „hajszolni” (ahol D az objektív átmérőjét jelenti mm-ben).

Maréchal-kritérium: Egy diffrakcióhatárolt optika hullámfront-hibájának RMS értéke $L/16$ a HeNe hullámhosszán (vagy $L/14$ az 555 nm-es hullámhosszon). A lézer-interferometrius mérés 1000-nél több mérési pontot tartalmaz. A gyakorlatban a két kritérium nem mindig identikus. Példaként bemutatunk két különböző felületű tüköröt (l. a következő oldal ábráját). Mindkét tükör felületi hibája $L/4$ Rayleigh szerint (csúcs-völgy, azaz PV kb. ugyanakkora). A baloldali felület azonban túl érdes (nincs megfelelően polírozva) és a tükörnek valószínűleg valahol nagyobb hibája is van,

amit azonban a mérési pontok éppen elkerültek. Maréchal kritériuma szerint a baloldali felületi hibája $L/14$ körüli, a hullámfrontonra vonatkoztatott hiba tehát $L/7$ RMS, azaz a tükrök sokkal több szórt fényt juttat az Airy korongon kívüli térbe és a gyűrűkbe, így kevésbé vagy egyáltalán nem alkalmas csillagászati megfigyelésre. A jobb oldali tükrök felülete viszont Maréchal szerint $L/40$ körüli, tehát a tükrök jó ($L/20$ hullámfront RMS).



Definíciós fényesség = Centrális fényhasznosítás:

(EER= encircled energy ratio, DH= Definitionshelligkeit) Az Airy-korongban ténylegesen összegyűjtött és elméletileg összegyűjtendő fény hányadosa (bővebben lásd Schné Attila írását a Meteor 2000/12-es számának 60. oldalán).

Effektív Kontrasztmérő: (Dk = Effektiver Kontrast-Durchmesser) jelenti annak a kitakarástól mentes ideális távcsőnek az átmérőjét, amely a vizsgált távcsővel (átmérője = D) azonos kontrasztú (20%-os kontrasztkülönbségre vonatkoztatott) képet produkálna. Egy közelítő képletet vezetett le erre William P. Zmek:

$$Dk = (D - D_s) \exp(-33 \text{ RMS}^2),$$

ahol D_s a segédtükrő átmérője, RMS pedig a Maréchal szerinti hullámfronthiba 555 nm-en, hullámhossz-egységben (tehát $L/14 = 0,0714$), $\exp(\dots)$ jelentése pedig értelemszerűen: $e^{(\dots)}$, ahol $e = 2,7183\dots$

Pl. egy 114 mm átmérőjű, 20 mm-es segédtükrű Newton Dk -ja a következőképpen függ az RMS értékektől (ideális optika esetén is a segédtükrő miatt 94 mm/114 mm = 82,5%):

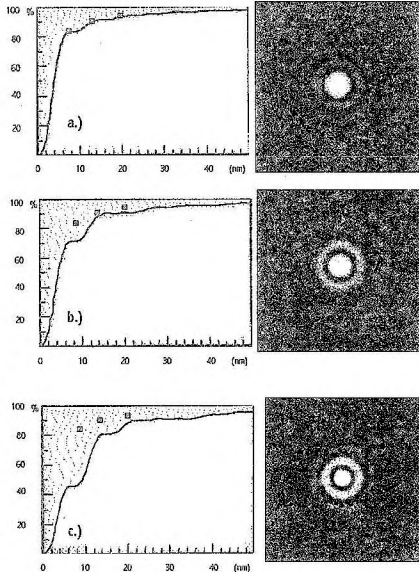
RMS (L)	0,025	0,030	0,050	0,075	0,100	0,150
RMS (L/x)	1/40	1/33	1/20	1/13,3	1/10	1/6,7
PV (közelítőleg)	1/12	1/10	1/6	1/4	1/3	1/2
Dk (mm és %)	92 (81%)	91 (80%)	86 (75%)	78 /68%)	67 (59%)	44 (38%)

A centrális fényhasznosítás görbéje: Ez a (diffrakciós kép energia-eloszlásának integrálásával nyert) diagram elárulja, hogy egy csillag fénye (100%) hogyan oszlik meg az Airy-korong és a diffrakciós gyűrűk között. Leolvasható róla a fénykoncentráció (FK) mértéke, azaz, hogy a fókusz síkban az energia 80%-a mekkora átmérőn belül koncentrálódik. Ez egy közel tökéletes optika esetén azonos az Airy-korong méretével, ha a rendszer kitakarással és felületi hibával terhelt, ez az érték növekszik (ld. Meteor 2000/12, 60. oldal). A gyakorlatban FK értékét mm-ben (fotografikus esetben ez összehasonlítható a film szemcseméretével, ami kb. 0,025 mm), vagy szögmásodpercben (vizuálisra korrigált optikák) adják meg.

A *vízszintes* tengelyen a képsíkot tüntettük fel, a *függőleges* tengelyen pedig az energia (fény) eloszlását 10%-os léptékben. A kis fekete négyzetek és az első görbe egy ideális optika energia-eloszlását mutatja. Ha a görbe közel horizontálisan fut, azt jelenti, hogy ott nagyon kicsi a fény mennyiség növekedése: ezek a sötétebb tartományok a diffrakciós gyűrűk között. Ideális esetben az Airy-korong a fény 84%-át tar-

talmazza, nem ideális esetben (középső görbe) ennél kevesebbet. A definíciós fényesség csökken, ám a felbontóképeség még nem (!), hisz az Airy-korong mérete és az első gyűrű helye ugyanott marad, csak a kontraszt romlik valamelyest, amely bolygóészlelés és egyenlőtlen kettősök észlelésénél jelenthet problémát (ideális esetben az érintkező kettős halványabbik tagja benne ül a fényesebbik Airy-korongja és első diffrakciós gyűrűje közti sötét részben. Egy hibával terhelt optika esetében azonban a rés már nem sötét, és így el is nyomhatja a halványabb csillag fényét). A harmadik görbe egy optikai hibával terhelt és 43%-os kitakarású segédtkörrel (l. a tesztet) felékesített Schmidt-Cassegrain rendszer energiaeloszlását mutatja be. A kontrasztviszonyok drámaian romlottak, ám vegyük észre, hogy az Airy korong mérete is valamelyest lecsökkent, így azt a meglepő ténytet tapasztaljuk, hogy azonos fényességű (de csak azonos fényességű!) kettősök észlelése esetén a nyolcas alakú kép filigránabb (viszont sokkal diffúzabb!), mint kisebb kitakarás esetén. Ez azonban nem ellensúlyozza azt a minőségromlást, amit a bolygók, sőt mély-ég objektumok felületén látható kontrasztcsökkenés okoz (a és b ábra). Itt szeretnék köszönetet mondani Wolfgang Rohrnak, aki jó évtizedes interferometrius mérési anyagát hozzáférhetővé tette számomra.

Láthatjuk tehát, hogy már egy közel (!) diffrakcióhatárolt (kb. L/3,5 PV hullámfronthiba 555 nm-en mérve) távcsövel is elérhetjük azt a felbontást (egyenlő kettősökre), amit elméletileg elvárhatnánk. Kontraszt szempontjából viszont egyes gyári SC tubusok alig valamivel jobbak, mint egy kis 114/900-as Vixen-Newton, (tehát a hosszú fókuszt nem jelent automatikusan bolygózó távcsövet!) és ha planétánkat nem pontosan a látómező közepére állítottuk, még egy kis 8 cm-es (f/15) refraktor is lényegesen szebb képet ad róla. Ez jól egyezik az Amatőr-csillagászok kézikönyve 61. oldalán leírt észlelési tapasztalatokkal. Újra tudatosíthatjuk magunkban, hogy milyen fontos a fényerős Newtonok juszტიrozása (lásd a kontrasztmérő drasztikus csökkenését akár csak 3 mm-re az optikai tengelytől – saját f/4,5-ös Dobsonomon tapasztalhattam!). Apropó kontraszt! A kontraszt igen fontos a mélyég észleléseknél is, és az sem titok, hogy egy jól megépített és juszტიrozott (!) 20–25 cm-es Newtonnak nem kell szégyenkeznie egy 15 cm-es apokromatikus refraktorttal szemben sem. Legalábbis, ami az optikai tengely közelében keletkező képet illeti...



A fénykoncentráció változása a fókuszokban, és a hozzá tartozó diffrakciós kép.
a. ideális felület (hullámfronthiba= 0), kitakarás nélkül; b. lambda/4-es (PV) hullámfronthiba és 20%-os kitakarás; c. lambda/4-es (PV) hullámfronthiba és 43%-os kitakarás esetén. Bővebben lásd a szövegben

Távcsőoptikák hullámfronthibájának minősége az optikai tengely mentén

Optika méret Gyártó	PV (L/x) 632nm	RMS (L/x) 632nm	Definíciós fényesség (%)	Kontraszt- Átmérő (mm, %) Kitakarás (mm)	Fénykonc. (") (mm-ben)	Felbontó- képesség (")
80/1200 AS C.Z. Jena	1/11,6 (L/8)	1/85	99,4%	79,4 (99,4%) 0	1,7 0,0097	1,6
100/600 BW-Optik	1/3,2 (L/4)	1/19	89,7%	89,0 89,0% 0	2,1 0,0060	1,3
100/1000 APQ C.Z. Jena	1/6	1/40	97,5%	97,4 97,4% 0	1,5 0,0071	1,2
152/1140 Fluorit APO régí típus	1/5,2	1/37	97,3%	147,7 97,2% 0	1,0 0,0054	0,8
152/1140 ED-APO újabb típus	1/4	1/15	91,2%	138,0 90,9% 0	?	0,8
114/900 Newton Vixen	1/3,7 (L/4)	1/25	94%	87,8 77,0% 20	2,6 0,0113	1,3
150/1500 MC INTES	1/5,6 (L/8)	1/31	96%	96,0 64% 50	?	0,8
150/1200 Newton TAL (Mizar)	1/5,9 (L/10)	1/38	97%	114,5 76% 32	?	0,8
200/1750 Klevzov TAL (Mizar)	1/4,3 (L/8)	1/25	94%	126 63% 66	?	0,6
203/2030 SC Meade	1/3,7 (L/4)	1/22	92,7%	108 53% 86	1,3 0,0129	0,8
203/2030 SC Celestron	1/4,3 (L/10)	1/30	95,9%	117 58% 80	1,3 0,0128	0,8
235/2350 SC Celestron	1/10 (L/10)	1/45	97%	145 62% 86	?	0,6
250/1250 Newton GuanSheng	1/3,7 (L/4)	1/22	92%	172 69% 63	?	0,6
254/1219 Newton ICS	1/3,6 (L/4)	1/28 (L/25)	95%	191 75% 53	?	0,6
254/1250 Newton Scheckling	1/10	1/45	98%	Csak főtükör	-	-
280/2800 SC Celestron	1/2,8 (L/4)	1/12	80%	150 56% 93	?	?
305/3050 SC Meade	1/3,3 (L/4)	1/16	86%	169 52% 108	?	?

A mérést a teljes optikai rendszerre végezték el. A PV (L/x) rovatban zárójelben található a prospektusban megadott *garantált* legnagyobb hullámfronthibát! Ezt csak a 80/1200-as Zeiss AS és a Celestron 9 Schmidt-Cassegrain teljesíti. Refraktorok esetében a színi hibát nem vették figyelembe (monokromatikus mérés).

Megjegyzés: a Klevzov-rendszer egy gömbtükrös változata a Cassegrain-távcsőnek. A főtükör hullámfronthibája L/9-es, a segédtükör és a korrektor okozza az eredő L/4,3-as hibát.

Minőség az optikai tengelyen és attól 5 mm (3, 10, 15 mm) távolságra (ex)

Gyártó Típus Méret Kítakarás	C. Zeiss AS 80/1200 0	EDF Apo 152/1140 0	VIXEN Newton 114/900 20	Meade SC 203/2030 86	Celestron SC 203/2030 80	ICS Newton 254/1219 53
PV-tengely L/x	1/11,6	1/5,2	1/3,7	1/3,7	1/4,3	1/3,6
PV-ex L/x	1/8,6 [\]	1/1 [\]	1/2,8	1/1,2	1/1,5	?
RMS-tengely L/x	1/85	1/37	1/25	1/22	1/30	1/28
RMS-ex L/x	1/47 [\]	1/5,5 [\]	1/20	1/6	1/8	?
Definíciós fényesség	99,4%	97,3%	94%	92,7%	95,9%	95%
Definíciós fényesség-ex	98,4% [\]	31% [\]	91,5%	43,4%	55,3%	42% [#]
Kontraszt Átmérő	79,4 mm 99,4%	147,7 mm 97%	87,8 mm 77%	107,7 mm 53%	117,4 mm 58%	190,9 mm 75%
Kontraszt Átmérő-ex	78,4 mm [\] 98,4% [\]	37,3 mm [\] 25% [\]	84,8 mm 74%	45,2 mm 22%	63,6 mm 31%	ca. 20% [#]
Fénykonc. (mm)	1,7 0,0097	1,0 _n 0,0054	2,6 _n 0,0113	1,3 _n 0,0129	1,3 _n 0,0128	?
Fénykonc.-ex (mm)	1,7 [\] 0,0099 [\]	2,6 [\] 0,0141 [\]	3,2 0,0141	2,3 0,0227	2,1 0,0202	?
Felbontás	1,6	0,8	1,3	0,8	0,8	0,6

Jelmagyarázat: \: 10mm-re, \\[\]: 15mm-re, #: 3mm-re

SZÁNTHÓ LAJOS

Irodalom

Sterne und Weltraum 1996/11–12. „Prüfung astron. Optik mit Laserinterferometrie“ (P. Rucks)

Sterne und Weltraum 1992/5., 1992/10., 1993/12., 1998/7., 1999/3. (Interferometrikus tesztek)

Astronomie 2000 „Optische Qualität“ (Martin Birkmaier)