

Babcsán Gábor

## Az amatőr távcsövek optikai teljesítményéről

A csillagászati távcső ablak a Világegyetemre. A mozaiktükrökkel szerelt óriási teleszkópok és a Hubble-űrtávcső világában csillagászati ismereteink ugrásszerűen és szinte áttekinthetetlenül gyarapodnak. A modern képfeldolgozási módszerek által élénk tárt kép lélegzetelállítóan részletes. Mi szükségünk tehát egy otthoni kis csillagászati távcsőre? Kell-e még 10–20 cm-es objektív-átmérőjű műszereket az ég felé fordítanunk az Internet korában? A válasz természetesen: igen. A személyes kapcsolat – élmény, kutatás vagy gyönyörködés – ugyanis más dolog. Az okulárban látott világ élménye, az amatőrök számára is elérhetővé vált fotós és CCD-technikák az óriási és rideg ismeretanyagot személyessé, emberarcúvá teszik.

A jelenleg gyártott rengetegféle amatőr távcső között meglehetősen nehéz eligazodni. Egyszerűsödik a helyzet, ha felhasználói szempontokat veszünk figyelembe. Ha például bolygók megfigyelésével kívánunk foglalkozni, arra elegendő egy kis látómezejű műszer is, viszont a látómező közepén a lehető legjobb legyen a leképezés!

Az *optikai teljesítmény* az, ami elsősorban meghatározza, hogy milyen típusú megfigyelésekre előnyös vagy kevésbé használható egy-egy típus. A távcsövek optikai teljesítőképességének áttekintése segít megválaszolni a kérdést, hogy melyik az észlelési területünkre szabott, vagyis a számunkra „legjobb” távcső.

## Áttörés az amatőr távcsövek világában

A 20. század közepéig az amatőr csillagászat meglehetősen kevesek hobija volt. Amatőröknek szánt műszereket komoly cégek (pl. *Zeiss*) vagy profi műhelyek (pl. *Unitron*) gyártottak, kis darabszámban, kitűnő minőségben és persze drágán. Ma a piac óriási és a minőség is a tömeges igényekhez igazodott. A változás Amerikában kezdődött, és onnan terjedt át Japánra valamint Európa gazdagabbik felére.

A hatvanas évekig az 5–10 cm-es, akromatikus refraktorokat és az ekvatoriális szerelésű, 15–30 cm-es Newton-reflektorokat tekintették amatőr távcső-

nek. Óriási változás volt, amikor a hetvenes-nyolcvanas években az amerikai *Coultter* elterjesztette a könnyű, egyszerű mechanikájú, és ami a legfontosabb: olcsó, Dobson-szerelésű Newton-távcsöveket. A legtöbb Dobsonnál kompromisszumot kell kötnünk a mechanikai és optikai jellemzők tekintetében, ám e típus elérhető áron óriási fénygyűjtőképességet kínál, amellyel a galaxisok és gázködök világa valóban a fényképekre emlékeztető látványt nyújt.

Hasonlóan forradalmi változást hozott a *Celestron*, az általa elterjesztett Schmidt – Cassegrain-távcsövekkel. Ez kompakt, katadioptrikus<sup>1</sup> típus mindenfajta észlelési munkára viszonylag jól alkalmazható. Átmérőjéhez képest könnyű, szállítható műszer, ideális a városokban, a fényszennyezett helyen élőknek. A *Meade* szintén a Schmidt – Cassegrain-távcsövek elterjedésének köszönhetően jutott el mai piacvezető helyzetéig.

Éppen a Schmidt – Cassegrain-távcsövek teremtettek alapot a legutóbbi évtized új irányzatának, a számítógéppel automatizált műszerek elterjedésének. A több tízezer objektum adatbázisát tartalmazó és elérhető árú teleszkóp új-fajta, „okos és demokratikus” műszertípus, annak minden előnyével és hátrányával.

A hetvenes évek végén a refraktorok fejlődése is új lendületet vett. A hagyományos refraktorok törvényszerű színi hibáját csak hosszú fókusztávolsággal lehet mérsékelni. 10 cm-es objektívátmérő fölött egy jó képalkotású akromatikus refraktornak nehézkesen hosszú a tubusa és a látómezeje sem túl nagy. A japánok (*Takahashi, Goto*) 1976-ban egy különleges üvegyanyagú, kalciumfluorid kristályt tartalmazó apokromatikus (APO) objektívet készítettek, amelynek színi hibája nagy fényerőnél is elhanyagolható. Később más gyártók (*Pentax, AstroPhysics, Vixen, Meade* stb.) kedvezőbb árú, ED és SD jelzésű objektívjei gyorsították az apokromatikus refraktorok elterjedését. A 7–15 cm-es APO-k viszonylag kompakt, nagy látómezejű és rendkívül éles képet adó távcsövek. Az ár fontosságát mutatja, hogy az utóbbi években egyre népszerűbbek a kínai gyártású optikák (*Soligor, Synta, Helios* stb.).

## A távcső mint szűrő

Első közelítésben azt mondhatnánk, hogy minél nagyobb átmérőjű az objektív, annál halványabb objektumokat láthatunk, és a látvány is annál részletesebb. A dolog mégsem ilyen egyszerű. Az egyik műszer például nagy égterületet mutat, azt azonban nem érdemes túlságosan felnagyítani. A másik távcső kisebb környezetet lát, de arról borotvaéles képet ad. Az érdeklődő első kér-

---

1. A katadioptrikus távcső objektívje fényvisszaverő és fénytörő eszköz, tehát tükrök és lencse (vagy korrekciós lemez) kombinációjából áll.

dése biztosan az, hogy milyen nagyítású a távcső. A nagyítás azonban csak az alkalmazott okulártól függ, a távcső minőségéről nem sokat mond, és túlzottan nagy nagyítás használata esetén már szinte semmi nem látszik a valóságból. A távcsövek használhatóságát és teljesítményét a következő optikai paraméterek jellemzik: fénygyűjtőképesség, felbontóképesség, kontrasztátvitel, a látómező mérete és vignettáltsága.

A *fénygyűjtőképesség* határozza meg, hogy milyen halvány objektumot tudunk meglátni a távcsőben. Elsősorban az objektív átmérőjétől (pontosabban felületétől) függ, de az optika egyéb jellemzői akár 50%-kal is módosíthatják az értékét.

A *felbontóképesség* esetében a helyzet még összetettebb. Ez elsősorban az átmérőtől függ, de az optikai minőség itt egyenrangú. Ráadásul a földi légkör állandó turbulenciái határt szabnak a ténylegesen elérhető felbontóképességnek. Olyannyira, hogy sokszor a kisebb átmérőjű műszer több részletet mutat. Ez érvényesül például a vizuális bolygó- vagy kettőscsillag-megfigyelésnél.

A *látómező mérete* legalább olyan fontos tényező, mint az előző két paraméter. Keveset ér a nagy látómező, ha a kép széle torz és nem kellően kontrasztos. A kiterjedt égi objektumok megfigyelése során nem elegendő, ha csak a látómező közepén elfogadható a képalkotás. Az optika jellemzőitől (elméleti optikai hibák, központi kitakarás hatása) és a valódi optikai minőségtől függ, hogy milyen kontrasztosan képezi le a távcső az optikai tengelyen és attól különböző szögtávolságra lévő objektumokat. A távcső nem egyszerűen egy hatalmas szem, inkább szűrő, illetve szűrők sorozata, amely a valóság és a látásunk között áll.

A *kontrasztátvitel* erősen leegyszerűsítve azt adja meg, hogy a tárgy felületi fényességében lévő éles változások (pl. világos és sötét területek közötti éles határok, vagy a környezetüktől erősen eltérő fényességű részletek) hogyan jelennek meg az optikai rendszer által alkotott képen.

## Több fényt!

A csillagászati távcső legmegkapóbb tulajdonsága, hogy hihetetlenül fényesen mutatja az éjszakai ég halvány objektumait. Egy 15 cm-es távcső kb. ötszázszor annyi fényt gyűjt, mint a sötétben kitágult pupillánk. A vizuális megfigyelésnél a *határmagnitúdó* jellemzi a távcső fénygyűjtőképességét. Ideális körülmények között, sötét égen a szabadszemes határ  $6^m.5 - 7^m.0$  közötti. A 15 cm-es műszer kb. ötszázszoros fénygyűjtése közel 7 magnitúdót jelent, azaz jó körülmények között egy  $14^m$  fényességű csillag még éppen érzékelhető benne.

A fénygyűjtőképesség első közelítésben az objektív területétől függ. A gyakorlatban az azonos átmérőjű, de különböző típusú és minőségű optikák fényhasznosítása azonban jelentősen eltér egymástól. A tükrös távcsöveknél a fényhasznosítás mértéke jórészt attól függ, hogy a tükröző bevonat milyen hatásokkal veri vissza a fényt. A tükröknél az általánosan használt alumíniumbevonat a színkép látható tartományában a fény 86–89%-át reflektálja. Ez soknak tűnhet, ám a tükrös műszerekben legalább két visszaverő felület van, amelyből az egyik, a segédtükrő általában a fényútban van, tehát további fényvesztéséget okoz. Emiatt a reflektorok fényhasznosítása általában 60–75%-os, de a nagy kitakarású katadioptrikus rendszereknél, vagy a fényerős Newton-távcsöveknél – ahol sajnos gyakoriak a beállítási (jusztirozási) pontatlanságok – még rosszabb is lehet.

Az alumíniumnál sokkal jobb a vastag ezüstréteg reflexióképessége (vizuális tartományban 96%), de hátránya, hogy a levegőn lassan elhomályosodik a nemesfémréteg. A legnagyobb reflexiós értékeket a gyakorlatban inkább *többretegű, vékony alumíniumbevonattal* érik el. Vákuumkamrában sok vékony alumíniumréteget gőzölnek egymásra, majd ezt puha és sérülékeny bevonatot néhány száz nanométer vastagságú, kemény szilícium-dioxid védőréteggel fedik le. Az ilyen tükrök visszaverőképessége a 96–97%-ot is elérheti, de áruk jóval magasabb, mint az egyszerű bevonattal ellátott tükröké. A legjobb bevonatokat használva a kis központi kitakarású Newton-távcsöveknél (vagy a ferdetükrös rendszereknél) a fényhasznosítás mértéke megközelítheti a 85–90%-ot.

A reflexió a lencsénél is szerepet játszik a fényvesztésben. Ugyanis mindegyik üveg-levegő határfelületen fellép visszaverődés, és ha nem alkalmaznánk reflexiógátló bevonatokat, akkor határfelületenként kb. 8% fényvesztéssel kellene számolnunk. A modern objektíveknél  $\lambda/4$  vastagságú magnéziumfluorid réteget használnak, amely a reflexiós veszteséget a látható tartományban 1–2%-ra csökkenti. Több vékony rétegből álló bevonat esetén (MC – Multi Coated) a reflexió értéke határfelületenként 1% alá szorítható.

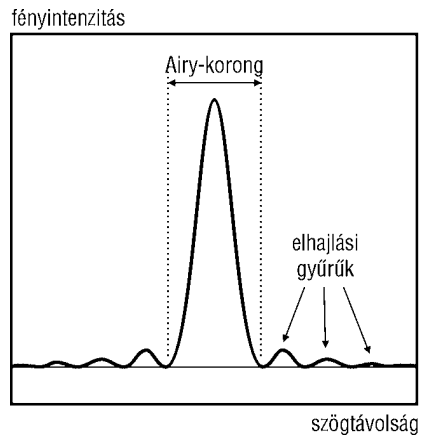
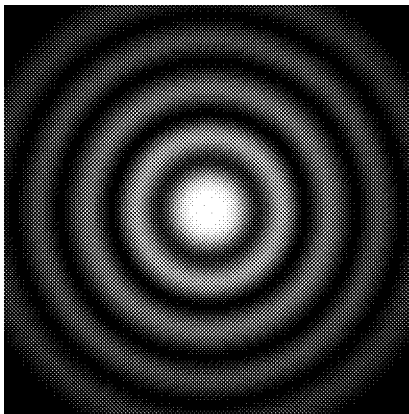
Jóval nagyobb fényvesztéséget jelent magának az üvegyagnak a fényelnyelése. 1 cm vastag közönséges optikai üveg kb. 1% fényvesztéséget okoz. Csekély, de korántsem elhanyagolható fényvesztéséget jelent a látott kép szempontjából a lencsék színi hibája is. Emiatt ugyanis a különböző hullámhosszú fénysugarak nem pontosan ugyanott fókuszálódnak, azaz a fény egy része nem vesz részt az éles kép létrehozásában. Mindeme hatások ellenére tény, hogy a refraktorok a gyakorlatban lényegesen jobb fényhasznosításúak, mint a tükrös távcsövek. Egy jó minőségű refraktorobjektívénél az eredő fényátesztés értéke biztosan 90% fölötti.

A távcsövek határmagnitúdójára vonatkozó elméleti megfontolások csupán az optikai tengely közelében érvényesülnek ilyen egyszerűen. A látómező egé-

szében a távcsövek közötti különbségek még jelentősebbek. A jól korrigált típusoknál az optikai tengelytől távolodva csak mérsékelten romlik a képalkotás és ezáltal a határmagnitúdó. A rosszabb minőségű rendszereknél elsősorban az erős kómahiba ronthatja a határmagnitúdót a látómező széle felé haladva. Ha például nagy látómezőt igénylő mélyég-fotózásra szeretnénk használni a műszert, ezt a hibát megfelelő kómakorrektorokkal lehet részlegesen javítani.

## A felbontóképesség

A felbontóképesség egyszerűen fogalmazva arra jellemző, hogy milyen finom részletek különböztethetők meg a műszerrel látott képen. Az objektív felbontóképessége az átmérőjével arányos, és pontszerű fényforrások (például kettőscsillagok) esetén, matematikailag is könnyen leírható. A kör alakú távcsőobjektív egy pontszerű fényforrásról a fény hullámtermészete miatt egy sajátos fényeloszlású *elhajlási (diffrakciós) képet* hoz létre a fókusz síkban (6.1. ábra.). Az elhajlási kép közepén egy fényes központi korong, az *Airy-korong* látható, amit koncentrikusan egyre halványuló fénygyűrűk (*diffrakciós gyűrűk*) vesznek körül.



6.1. ábra. Pontszerű fényforrás (csillag) elhajlási képe (balra), és az intenzitás változása a kép középpontjából kifelé haladva (jobbra)

G. AIRY mutatta ki elsőként, hogy a központi korong sugara a hullámhosszal egyenesen, az objektív átmérőjével ( $D$ ) fordítottan arányos. Ideális esetben a fény 84%-a koncentrálódik a központi korongba, 7% az első gyű-

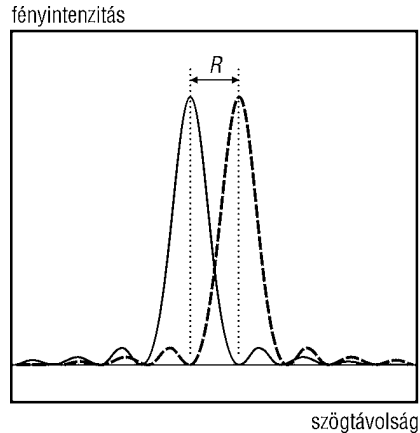
rúbe, míg a maradék 9% a többi gyűrűbe jut. Nem ideális objektív esetén a fény ettől eltérően oszlik el az elhajlási képben. Az optika reális minőségét, leképezésének „jóságát” jellemzi, hogyan oszlik meg a fény mennyiség az Airy-korong és a többi – különösképpen az első – gyűrű között. A felbontóképesség számszerű jellemzésére a gyakorlatban a *Rayleigh-formula* terjedt el. A képlet az 550 nm-es hullámhosszú (sárgászöld) fényre érvényes, amelyre az emberi szem a legérzékenyebb. Azt a szögtávolságot adja meg, amelynél egy szoros kettőscsillag egyik komponensének Airy-korongja éppen a másik csillag elhajlási képének első sötét gyűrűjébe esik (6.2. ábra).

$$R = \frac{138}{D}$$

ahol  $R$  a felbontóképesség ívmásodpercben és  $D$  az objektív átmérője mm-ben. A különféle távcsőtípusokban a kettőscsillagokra tapasztalható tényleges felbontás természetesen kis mértékben eltér ettől az elméleti értéktől, és függ a komponensek színétől is.

A kettőscsillagok a felbontóképesség vizsgálatának ideális objektumai, hiszen a kontrasztkülönbség a sötét ég és fényes csillagok között a lehető legnagyobb. Egyéb objektumok részleteinek felbonthatóságára azonban nincs semmiféle egyszerű formula. A kiterjedt objektumok esetét – leegyszerűsítve – úgy képzelhetjük el, hogy az objektum minden pontjáról kiinduló fény létrehozza a fókuszsík megfelelő helyén a maga Airy-korongját és elhajlási gyűrűit, és ezek összegződését látjuk a távcsőben az objektum képeként.

Egy bolygóészlelő áhított „trófeája” például a Szaturnusz gyűrűjén megpillantani az Encke-rést, ami egy kiváló, 15 cm-es távcsővel lehetséges is. Egy 15 cm-es távcső felbontóképessége elméletileg 0''8, az Encke-rés szélessége 0''1, a hossza viszont sokkal nagyobb 0''8-nél. Egy keskeny és hosszú részlet láthatóságára a Rayleigh-formula semmit sem mond. Az Encke-rés láthatósága azonban szintén egy speciális példája a felbontásnak, hiszen a formája egyedi és a kontrasztkülönbség is nagy. A kiterjedt objektumoknál azonban többnyire az a helyzet, hogy a megkülönböztetni kívánt részletek között csak



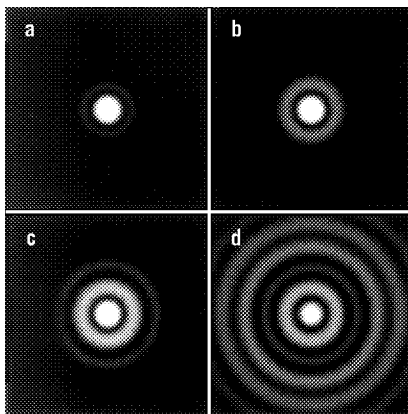
6.2. ábra. A felbontóképesség Rayleigh-kritériumának szemléltetése

kicsi a kontrasztkülönbség. Egy-egy finom részlet láthatóságánál fontos szerepet játszik a távcső reális optikai minősége, ami matematikailag az *optikai modulációátviteli függvény*nel jellemezhető [1].

Ha a műszer optikai hibákkal terhelt, vagy ha központi kitakarást – pl. a reflektorok esetében segédtükröt – helyezünk a fényútba, az elhajlási képen kevesebb fény jut az Airy-korongba és több a gyűrűkbe, vagyis csökken a kontraszt a korong és a közvetlen környezete között.

A 6.3. ábrán látható, hogy a leggyakoribb optikai hibának, a szférikus aberrációnak milyen hatása van egy csillag diffrakciós képére. (Hasonló hatást okoz a központi kitakarás.) Erős gömbi hiba esetén a diffrakciós gyűrűk kifényesednek, az Airy-korong és a környezete közötti kontraszt romlik. Ez láthatatlanná teszi (belemossa a háttérbe) az alacsony kontrasztkülönbségű részleteket, különösen a bolygószeleléseknél, de a mélyég-megfigyelések esetében is.

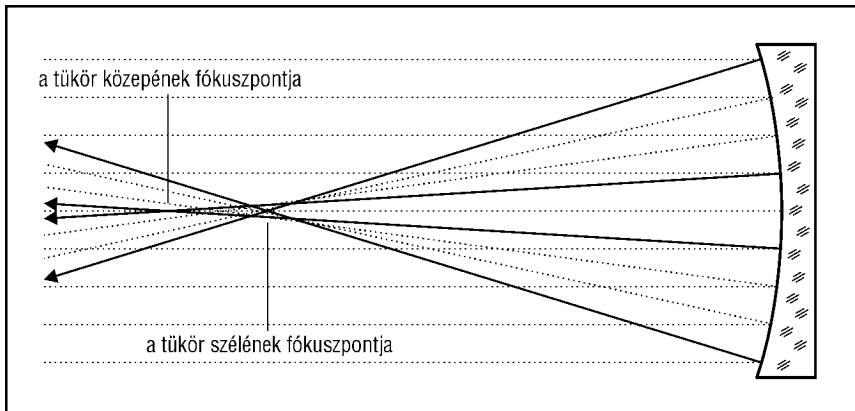
Az optikai tengelytől távolodva a képhibák függvényében tovább romlik a felbontás, és ennek mértéke távcsőtípusonként nagyon eltérő. Egy jó képalkotású refraktor kisebb átmérő mellett is részletesebb képet ad pl. a kiterjedt Orion-ködről, mint egy olyan fényerős Newton-távcső, amely optikailag átlagos és a kómahibája nagy. A távcsőtesztek gyakori hibája, hogy a távcső felbontóképességét egyenlő fényességű komponensekből álló kettőscsillagokkal vizsgálják, és ez valójában keveset mond a műszer egyéb objektumoknál tapasztalható minőségéről.



6.3. ábra. Egy pontszerű fényforrás, például egy csillag képe különböző mértékű gömbi hibát mutató távcsövekben: a) tökéletes optika, b)  $1/3$ , c)  $1/4$ , d)  $5/3$  hullámhossznyi nagyságú gömbi hiba

## Leképezési hibák

Egy távcső képalkotásának jellemzőit (felbontás, fénygyűjtés) hullámmélelti törvényszerűségek határozzák meg. A képalkotás minőségének a különböző leképezési hibák (aberrációk) szabnak korlátot. A leképezés hibáit torzulási diagramokkal lehet szemléletesen leírni.



6.4. ábra. A gömbtükör gömbi hibája. Az optikai tengelytől egyre távolabb lévő koncentrikus területeknek egyre rövidebb a fókusz távolsága

### Színi hiba (kromatikus aberráció)

Lencsére jellemző hiba, azért lép fel, mert a lencse anyagának törésmutatója függ a fény hullámhosszától. A különböző színekre tehát nem azonos a lencse fókusz távolsága. A színi hiba eltérő anyagú negatív és pozitív lencse kombinációjával csökkenthető. A korrekciót vizuális célra készülő távcsövek esetében a sárgászöld színképtartományra érdemes elvégezni, amelyre az emberi szem a legérzékenyebb. A két színre korrigált *akromátok* fókusz távolsága két különböző hullámhosszra azonos. A színi hibára legjobban korrigált apokromátok pedig három színre mutatnak azonos gyújtótávolságot, ezeknél színezés szemmel alig érzékelhető.

### Gömbi hiba (szférikus aberráció)

Egy gömbtükör vagy egy gömbfelületekkel határolt lencse szélének a fókusz távolsága geometriai okból kisebb, mint a középső részeké (6.4. ábra). Ezért az optikai tengellyel párhuzamosan beérkező sugárnyaláb nem a fókusz pontban találkozik, hanem az optikai tengely egy szakaszára képeződik le. A szférikus aberráció tükröknél a gömbfelület helyett paraboloidfelület kialakításával vagy korrekciós lencsetag alkalmazásával (*Schmidt-távcső*, *Makszutov-távcső*); lencsék esetében két vagy három, eltérő anyagú gyűjtő- és szórólencse kombinációjával, *aplanát* lencserendszerrel csökkenthető, de teljesen nem szüntethető meg.

A gömbi hiba mértéke a lencsék esetében függ a fény hullámhosszától is (szferokromatizmus). A vizuális refraktoroknál az emberi szem érzékenysége



maximumára optimalizálják a gömbi hibát. A gömbi hiba színtüggése a hosszú gyújtótávolságú ( $f/15$ ) akromátoknál, illetve az apokromatikus refraktoroknál nem jelentős.

### *Kómahiba*

Az optikai tengellyel szöget bezáró, körszimmetrikus sugárnyaláb nem körszimmetrikusan képződik le. A csillagok elhajlási képe a látómező szélén elnyúlt, szélsőséges esetben „esernyőszerű”. A kómahiba kisebb-nagyobb mértékben minden távcsőtípusnál fellép. Csak bonyolult optikai rendszerrel lehet jól korrigálni. Nagyobb gömbi hibával mindig nagyobb kómahiba is együtt jár.

### *Asztigmatizmus*

Az optikai tengellyel szöget bezáró, körszimmetrikus sugárnyaláb sehol nem találkozik egy pontban. A pontszerű forrás képe a fókusz síkban kerek foltként, a fókusz síkon belül és kívül egymásra merőleges nagytengelyű ellipszis-ként látszik. Az asztigmatizmus jól tanulmányozható nagy látómezejű, fényerős refraktoroknál (pl. binokulárban). Csak több lencséből álló, bonyolult lencserendszerekkel, *anasztigmátokkal* korrigálható eredményesen. Anasztigmátokat elsősorban fényképezőgép-objektív céljára készítenek.

### *Görbült képfelület*

Nagy kiterjedésű tárgy éles képe nem a fókusz síkban, hanem a fókuszponton áthaladó görbült felületre képeződik le. Elsősorban a fényképezésnél – főleg a nagy látószögű objektívek esetében – van jelentősége. A csillagászatban a nagy látómezejű Schmidt-távcsövek erősen görbült fókuszfelületét nem korrigálják, hanem a fotólemezt deformálják a fókuszfelület alakjára. A vizuális csillagászati észlelésnél viszont csak fényerős távcsövekben és kis nagyításoknál zavaró: a látómező széle és közepe nem állítható egyidejűleg élesre. Ha a látómező közepét állítjuk élesre, a képfelület görbülete a látómező szélén a kómahibához hasonló látványként jelenik meg. Az anasztigmátok általában a képfelület görbületét is megfelelő mértékben javítják.

### *Hullámfronthiba*

Az eddig felsorolt leképezési hibák geometriai és fizikai törvényszerűségekből következnek, és az elméletileg tökéletes lencséknél, illetve tükröknél is fellépnek. A hullámfronthibával azonban az objektív tényleges minősége, az ideálistól való eltérése jellemezhető. Azt adja meg, hogy az optikai felületek gyártási pontatlanságai, egyenetlenségei hogyan torzítják a – korábban felsorolt elméleti hibákkal egyébként már megterhelt – leképezést. Ha az optikai eszközön monokromatikus (egyféle hullámhosszúságú) fényhullám halad

át, mennyit fog torzulni a fényhullám azonos fázisú helyeit összekötő felület – a hullámfront – az optika gyártási pontatlanságai miatt. A hullámfronthiba a távcsövek teljesítőképességének egyik fő jellemzője, ezért e témakört a továbbiakban részletesen tárgyaljuk. Pontos leírásához a látómező több ezer pontján elvégzett interferometrikus mérés szükséges.

A 6.5. ábra négy távcsőtípus foltdiagramját mutatja az optikai tengelytől az okulárban nézve  $40^\circ$  távolságig. A műszerekben ugyanaz az okulártípus, egy jól korrigált modern 13 mm-es Nagler-okulár szerepel. Az ábra több érdekes tanulsággal szolgál:

- Az okulárban látott kép teljes torzulását az objektív és okulár torzításainak eredője szabja meg.
- A különböző távcsőtípusok eltérően reagálnak ugyanannak az okulárnak a képhibáira. Emiatt van jelentősége a távcsőtípusokhoz leginkább megfelelő okulárok kiválasztásának.
- A modern apokromatikus refraktorok nagyon jól vannak korrigálva (még nagy fényerőnél is). Kómahibájuk sokszor kisebb, mint a legjobb okulároké.
- A foltdiagramban szereplő Nagler-okulár kómahibára korrigált, modern okulár. Sajnos a hagyományos okulártípusok, pl. az Erfle saját asztigmatizmusa nagyobb mértékű, mint a legtöbb távcsőobjektív asztigmatizmusa.
- A képtorzulások erősen függenek a távcső fényerejétől. Kisebb fényerő alacsonyabb torzulásokat eredményez. A kis fényerő előnyös azért is, mert az  $f/8 - f/15$  közötti fényerejű távcsövekben kitűnően funkcionálnak a hagyományos okulárok, pl. orthoszkopikus, Plössl, Erfle stb.  $f/15$ -ös fényerőnél még a nagyon egyszerű típusok (pl. Ramsden, Huygens) is jól beválnak. Fényerős rendszereknél viszont a modern, soktagú és kóma-korrigált – általában nagy látómezejű – okulárok előnyösek.
- A mindezek miatt ajánlható a távcsöveknél egy jó minőségű, lehetőleg apokromatikus Barlow nyújtótag.

## A hullámfronthiba és az optika minősége

A távcsőgyártók reklámjaiban gyakran szereplő „tökéletes” vagy „diffrakcióhatártól” kifejezés gyakran csak üzleti fogás, a műszer valóságos leképezése mást mutat. Egy optika gyártási hibái pontosan leírhatók az objektív által leképezett hullámfront torzulásával, a hullámfronthibával. Rayleigh a 19. században úgy találta, hogy az optikai leképezés akkor „elegendően jó”, ha a leképezésben részt vevő bármelyik két fényhullám találkozásánál a fáziseltolódásuk a hullámhossz negyedénél kisebb. A diffrakcióhatártól optika leképezése teljesíti ezt a feltételt. A hullámfronthiba  $\lambda/4$  tűrőhatára megfelelő felté-

Műszer	pontszerű fényforrás képének torzulása – képskála: $\underline{10''}$				
	távolság az okulárban a látómező közepétől mérve				
	0°	10°	20°	30°	40°
200 mm-es, f/6 Newton-tükör	•				
13 mm-es Nagler-okulár	•				
együtt	•				
200 mm-es, f/6 Jones–Bird-tükör	•	•			
13 mm-es Nagler-okulár	•				
együtt	•				
100 mm-es, f/5.5 apokromát lencse	•	•	•	•	•
13 mm-es Nagler-okulár	•				
együtt	•				
100 mm-es, f/8 fluorit lencse	•	•	•	•	•
13 mm-es Nagler-okulár	•	•			
együtt	•	•			

6.5. ábra. Négy távcső torzulási diagramjai (magyarázat a szövegben)

telnek bizonyult az optikai minőség jellemzésénél. Valóban ez a határ, amely fölött a távcső jól használható a kontrasztos leképezést igénylő észlelésre (pl. bolygómegfigyelésre).

Az objektív hullámfronthibájának maximális értéke a *csúcs–völgy-hiba* (PV-hiba). A maximális PV-hibánál azonban sokkal fontosabb az átlagos hullámfronthiba. Egy szabálytalan felület átlagos deformációja matematikailag a *négyzetes középhiba* (RMS) értékkel jellemezhető. A Rayleigh-feltételt teljesítő optika esetében, ha annak hibái teljesen véletlenszerűen oszlanak el, akkor a hibák RMS értéke  $\lambda/13.3$ .

A hullámfronthibával kapcsolatos másik jellemző optikai paraméter, a *definíciós fényesség* (DF). Kiszámolható, hogy az objektív – ha a szükségsszerűen fellépő képképzési hibákon túl elméletileg tökéletes volna – egy pontszerű fényforrás (csillag) fényének hány százalékát összpontosítaná az Airy-korongban. A valódi, hullámfronthibával is terhelt objektív természetesen ennel kevesebb fényt összpontosít az Airy-korongba. A definíciós fényesség a valójában összegyűjtött fény és az elméleti érték hányadosa.

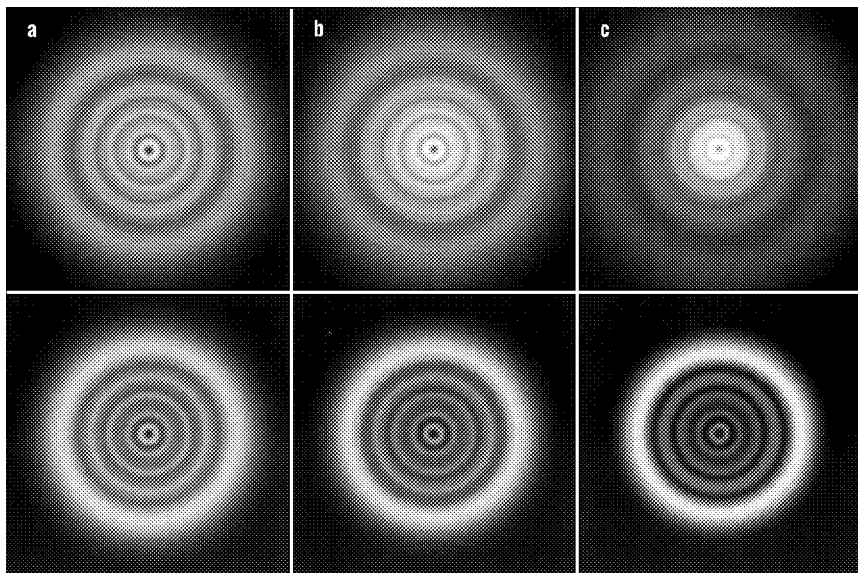
Egy diffrakcióhatárolt optikai rendszer definíciós fényessége 0.8 feletti. A definíciós fényességet az önálló objektívre szokás megadni, a tükrös távcsöveknél általában nem veszik figyelembe a központi kitakarás hatását, amely tovább csökkenti a DF értékét. Egy  $\lambda/6$ -os Newton-tükör definíciós fényessége például 0.92, azaz a műszer optikailag kitűnő. Ám a Newton-távcsöveknél tipikus 25%-os kitakarásnál a definíciós fényesség értéke 0.81-re romlik, ami már alig haladja meg a diffrakcióhatároltságra jellemző értéket.

SUITER alpmunkájában [2.] a jó optikai leképezést a Rayleigh-határral definiálta, és számszerű jellemzésére a következő DF határokat adja meg: 0.70–0.80: gyenge – jó; 0.80–0.88: jó – kitűnő; 0.88–1.00: kitűnő – tökéletes.

A valós optikai minőség és a központi kitakarás olyan fontos tényezők a képképzésben, hogy hatásukat érdemes alaposan szemügyre venni.

## Csillagteszt

Nem kétséges, hogy egy interferométerrel sok ezer pontban végzett mérés valódi „domborzati térképet” rajzol az optika hullámfronthibájáról. Az ebből számított RMS érték, illetve definíciós fényesség pontosan jelzi a műszer minőségét. Kevés távcsőről készül azonban mérés, mert interferométerrel végzett vizsgálat költséges dolog. Másrészt a minőségi távcsőgyártók sem érdekelték abban, hogy interferometrius teszttel adják el a műszereiket, hiszen az ő gyártási minőségük is (persze magasabb szinten) ingadozó. Létezik azonban egy könnyen kivitelezhető teszt, amely markánsan megmutatja az optikai



6.6. ábra. A gömbi hiba megjelenése a csillagtesztben. Felső sor: fókuszponton kívüli, alsó sor: fókuszponton belüli képek. A korrigálatlan gömbi hiba mértéke az a) esetben  $1/8$ , b) esetben  $1/4$ , a c) esetben  $1/3$  hullámhossznyi

hibákat, sőt segítségével az optikai minőség bizonyos pontossággal meg is becsülhető. Az eljárás egy fényes csillag extra- és intrafokális (fókuszon kívüli és belüli) képének összehasonlításán alapul. Ha egy jó távcsőben, nagy nagyításnál pontosan élesre állítjuk egy fényes csillag képét, akkor láthatjuk az Airy-korongot, és körülötte egy vagy két elhajlási gyűrűt. Az eddig leírtak alapján tudjuk, hogy az optikai hibák vagy a központi kitakarás hatására a korongba kevesebb, a külső gyűrűkbe több fény összpontosul. Forgásszimmetrikus optikai hibák (például a gömbi hiba alul- vagy túlkorrigálása) forgásszimmetrikus eltéréseket okoz az elhajlási képben (a gyűrűk kifényesednek). Nem forgásszimmetrikus hibák (asztigmatikus felületű optika, a rossz befogás miatt deformálódott objektív, jusztirozatlanság stb.) esetén a diffrakciós kép is szabálytalan lesz. Az optikai hibák a pontosan fókuszált csillagképben is mutatkoznak, de sokkal jobban tanulmányozhatók az élesség elállításával, az extra- és intrafokális kép összehasonlításával (6.6. ábra).

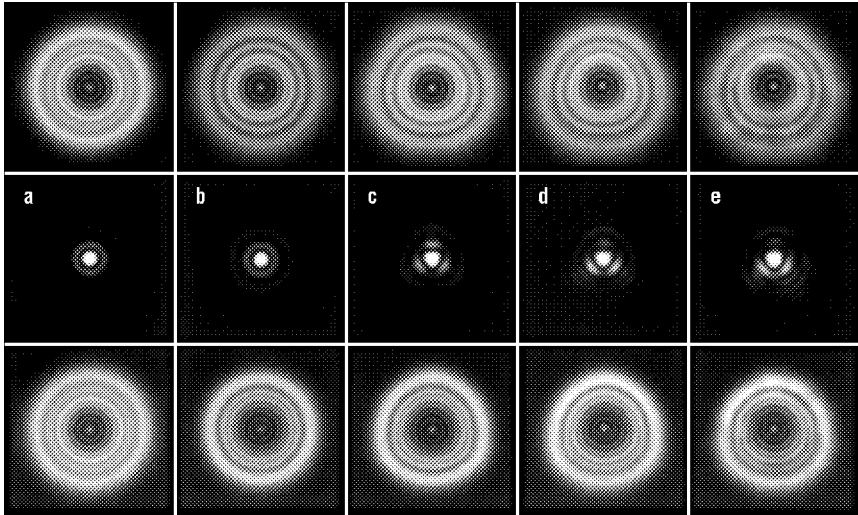
### A csillagteszt elvégzése

- Állítsunk egy fényes (pl. elsőrendű) csillagot a látómező közepére, és akkora életlen csillagkorongot vizsgáljunk, amelyben 5 – 10 interferenciagyűrű látszik.

- Megbízható teszt csak nyugodt légkörnél végezhető. Különösen érzékenyek a légköri turbulenciákra a 20 cm-nél nagyobb átmérőjű távcsövek.
- Használjunk az objektív mm-ben mért átmérőjével nagyjából megegyező nagyítást és jó minőségű (pl. orthoszkopikus) okulárt.
- A fókuszon belüli és kívüli kép összehasonlításához a két esetben ugyanakora állítsuk a csillagkorongok méretét.
- A refraktoroknál a színi hiba és a szferokromatizmus miatt használjunk zöld vagy sárga szűrőt. A fotografikus képalkotás vizsgálatára viszont a kék szín-szűrővel végzett teszt alkalmas.
- A tükrös távcsövek központi kitakarásának hatása „kis sötét lyuk” formájában mutatkozik az extra-, illetve intrafokális képben. Emiatt az egyéb hibák okozta eltérés jobban látszik az elhajlási képeken, mint a refraktoroknál.
- Az extra- és intrafokális kép eltérése markánsan jelzi az optikai hibákat. A csillagteszt nagyon érzékeny, már  $\lambda/10$  hullámfronthiba (ez definíciós fényességben 0.97-nek felel meg) is észrevehető eltérést okoz.
- Az extra- és intrafokális kép viszonylagos hasonlósága  $\lambda/6 - \lambda/8$  közötti hullámfronthibára enged következtetni. Ez a minőségi távcsőgyártók optikáira jellemző érték. Nagyon jó minőségű optikák esetében a két kép gyakorlatilag egyforma (pl. a Zeiss 80/1200 AS, illetve 63/840 C objektívénél).
- A gyakorlatban leggyakrabban tapasztalható eltérés a rosszul korrigált gömbi hiba. A Rayleigh-határnak megfelelő  $\lambda/4$  hullámfronthiba már feltűnő különbségként jelentkezik a diffrakciós képek összehasonlításakor.
- Ha az extra- és intrafokális kép nem forgásszimmetrikus, annak leggyakrabban egyszerűen az az oka, hogy az optikai elemek rosszul vannak jusztírozva. Ilyen hibát okozhat még, ha az objektív túlságosan meg van szorítva a foglatban vagy felülete durván asztigmatikus (ez ritkán fordul elő).

Az ég alatti csillagteszt sokat elárul a távcső optikájáról, de – különösen a nagyobb távcsőátmérőknél – a légköri nyugtalanság miatt mozgó diffrakciós képet nehéz vizsgálni (6.7. ábra). Sokkal könnyebb laboratóriumi körülmények között műcsillagos teszttel dolgozni. Egy hélium-neon lézer fényét bocsássuk át egy néhány mikron átmérőjű nyíláson, ez a műcsillag. A műcsillagon áthaladó fénysugarat vezessük egy lehetőleg minél jobb minőségű segéd-távcső okulárkihuzatába. A segéd-távcsövet kollimátorként használjuk, segítségével a műcsillagon áthaladó fénysugárból széles, párhuzamos fénynyalábot állítunk elő. Ezt a fénynyalábot képezzük le a vizsgálandó távcsővel. Itt a kép nyugodt, tehát akár 1000-szeres nagyítással is tanulmányozható.

Több száz különféle távcső képalkotását az ég alatt vagy műcsillagos teszttel tanulmányozva az a tapasztalatom, hogy az extra- és intrafokális kép alapján csak durva közelítésben becsülhető meg az optikai minőség. Szabályos hibáknál és a diffrakcióhatárolt minőség közelében a becslés viszonylag pon-



6.7. ábra. A kép minőségét rontó tényezők együttes megjelenése a csillagtesztben. Felső sor: fókuszponton kívüli, középső sor: fókuszban látott, alsó sor: fókuszponton belüli képek. a) tökéletes objektív 25% kitakarással, b) + rosszul korrigált gömbi hiba, c) + az optika három pontos megfogásának túlfeszítése, d) + az optikai rendszer juszitírozási hibája, e) + a légköri turbulencia hatása

tos – némi gyakorlattal eldönthető, hogy a maradék gömbi hiba  $\lambda/4$ -hez ( $DF=0.8$ ) vagy  $\lambda/6$ -hoz ( $DF=0.91$ ) áll közelebb. Szabálytalan hibáknál vagy nagyon rossz, illetve nagyon jó optikai minőségénél azonban kevés a támpont a reális megítéléshez.  $\lambda/3$ -nál erősebb gömbi hiba esetén az optikai minőség már rossz, ilyen műszer inkább kis nagyítást igénylő mélyég-megfigyelésre vagy nagylátószögű fotózásra lehet alkalmas. A másik véglet, a  $\lambda/8$ -nál kisebb gömbi hiba közel tökéletes minőséget jelent, itt a definíciós fényesség 0.95-nél nagyobb. A gyári optikákra a kettő közötti érték jellemző.

## A központi kitakarás hatása

A képminőséget rontó tényező a központi kitakarás, amelyet a tükrös műszerekben és a katadioptrikus távcsövekben levő segédtükrök okoz. Számértéke azt adja meg, hogy a segédtükrök, vagy a takarást okozó egyéb optikai elem a főtükrök átmérőjének hány százaléka. A központi kitakarás a pontszerű objektumok elhajlási képében hasonló hatást okoz, mint a gömbi eltérés: az Airy-korongba kevesebb, az első diffrakciós gyűrűbe több fény jut. Így a kitakarást

növelve romlik a kép kontrasztja. A legtöbb amatőr túlbecsüli a központi kitakarás hatását, mert általában kitűnő refraktorokat hasonlítanak össze közepes minőségű, tömeggyártásban készült reflektorokkal, és a látott különbségeket egyedül a központi kitakarás hatásának tulajdonítják.

A központi kitakarás hatásával kapcsolatban a következőket érdemes szem előtt tartani.

A kontrasztátvitel 15%-os kitakarásnál gyakorlatilag alig romlik. Az észlelési gyakorlatban az ilyen kis méretű segédtükört tartalmazó (általában Newton-rendszerű) reflektor képalkotása alig különböztethető meg egy tökéletes reflektorétól. Egy közel tökéletes tükörrel készült távcső definíciós fényessége 15%-os kitakarással kb. 0.95, azaz egy nagyon jó minőségű ( $\lambda/8$  hullámfront-hibájú, színihibától mentes) refraktorénak felel meg. Ha a kitakarás 20–25%, a kontrasztátvitel még viszonylag mérsékelten romlik. Kitűnő minőségű optikai felületek esetén a képalkotás jó, a DF 0.80–0.90 között lehet. Az optikai rendszer kontrasztátvitelére 30% kitakarás felett kezd el drámaian romlani. A képélesség közel tökéletes felületű optikánál is már csak jó – közepes.

Érdemes tehát a kitakarást a lehető legkisebbre méretezni, ennek persze korlátot szab, hogy a főtükör által összegyűjtött fénykúpnak teljesen rá kell férnie a segédtükörrre. Túl kicsi segédtükörnél kicsi lesz a teljesen megvilágított (vignettálatlan) látómező. A Newton-távcsövek segédtükreinek optimális mérete:  $f/8$ -nál 15–20%,  $f/6$ -nál 25%,  $f/4$ -nél 30–35%. A Cassegrain típusú vagy katadioptrikus rendszerek 28–40% közötti takarású segédtükörrel dolgoznak általában. Az észlelési gyakorlatban a 20% körüli kitakarás képélességet csökkentő hatása csak a nagyon alacsony kontrasztú égitestek megfigyelésénél jelentkezik (pl. a bolygók halvány felszíni részletei). Az optikai minőség hibái ennél jóval nagyobb hatással vannak a képélességre.

Egy átlagos segédtükörtartó szerkezet (a „lábak”) csupán 1–2%-ot takar ki a főtükör felületéből, tehát a leképezés romlásában csekély a szerepe. A legkedvezőbb diffrakciós képet az egyetlen görbe lábön álló segédtükör adja, itt láthatatlanul „elkenődik” a láb okozta fényelhajlási hiba. Ez viszont a rezgésekre való hajlama miatt kedvezőtlenebb. A közhiedelemmel ellentétben a háromágú segédtükörtartó kevésbé rontja a képet, mint a négyágú (csak fel-tűnőbben látszik), mivel a kitakart terület három láb esetén kisebb!

## A refraktorok gyengéje: a színezés

Az átlátszó közeg (pl. üveg) törésmutatója függ a fény színétől is. Ezt jól mutatja a prizmán áthaladó fehér fény sugar, ami a kilépő oldalon a szivárvány színeire bomlik. Az optikában használatos anyagok törésmutatójának hullám-



hosszfüggését a *diszperzióképesség* vagy *relatív diszperzió* ( $V$ ) nevű mennyiséggel jellemzik:

$$V = \frac{n_k - n_v}{n_s - 1}$$

ahol  $n_k$  a kék,  $n_v$  a vörös,  $n_s$  pedig a sárga fényre vonatkozó törésmutató.

A diszperzióképesség jellemzi kép színeződésének mértékét. A színi hiba egytagú objektíveknél nagyon erős. A törésmutató értéke modern optikai üvegeknel 1.44–1.96 közötti. Két különböző törésmutatójú lencse kombinációjával a színi hiba minimalizálható, így készülnek az akromatikus objektívek. NEWTON *Optika* című művében már megtalálhatók az akromatikus lencseszerek kidolgozásának alapjai. Ötven évvel az Optika megjelenése után C. M. HALL készített két különböző anyagból objektívet, de az észlelési gyakorlatban csak később terjedtek el a londoni DOLLOND akromatikus lencsési.

A legtöbb vizuális távcsőnél az optikusok két színre korrigálják az objektívet, ezeknél azonos a fókusz távolság a vörös (Fraunhofer C vonal, 656 nm – H $\alpha$ ) és kékeszöld színben (F vonal, 486 nm – H $\beta$ ). A fókuszpont ehhez közel van a sárgászöldben is, míg a spektrum két végére (mélyvörös és ibolya) jelentősen eltérő fókusz távolság adódik. Az emberi szem kevésbé érzékeny a vörös és az ibolya színre, így ez a hiba a valóságban kevésbé jelentős. A hagyományos akromátoknál a fókusz távolság hullámhossztól függő változása a C és F vonal között még elég kicsi (kb. 1/2000-ed rész).

Az akromátok máig legkedveltebb típusát FRAUNHOFER tervezte 1807-ben. A Fraunhofer-objektívek egy koronaüveg gyűjtőlencséből és egy flintüveg szórólencséből állnak. A lencsék közti légrés minimalizálja a gömbi hibát és a kómahibát is.

A színi hiba miatt a fókusz távolság a kék-ibolya tartományban mutatja a legnagyobb eltérést. Ez főként a fekete-fehér asztrofotózásakor lényeges, hiszen ez a filmemulzió éppen a kék fényre a legérzékenyebb. Az akromátok jelentős színi hibája a fényes csillagok körüli kékes halóként jól kivehető a színes fotókon is.

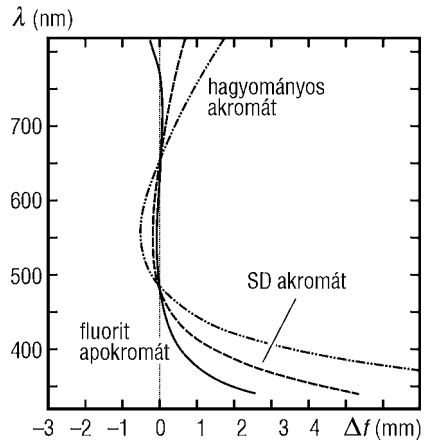
A színi hiba mértéke függ az objektív méretétől és fényerejétől. Az észlelési gyakorlatban egy 15 cm-es  $f/15$  nyílásviszonyú akromát színezése még elfogadható. A fényes objektumok, például a bolygók körül kékeslila haló látszik, de a kép elég éles, és a bolygófelszínen az eredeti színek dominálnak. A nagy átmérőjű akromatikus refraktorok azonban kis fényerő mellett túlságosan hosszú tubust és nehéz mechanikát igényelnek, és kicsi a látómezejük.

A refraktorok további fejlődését a modern, alacsony diszperziójú üvegyanagok tették lehetővé. Az optikai elméletet H. D. TAYLOR már 1892-ben kidolgozta, de az apokromatikus refraktorok elterjedésére egészen az 1970–80-as évekig várni kellett. Az apokromátokat három színre (vörös, sárgászöld és

kék) korrigálják. A maradék színi hiba kisebb, mint a fókusz-távolság tízezred része. Az apokromátoknál a színi hiba és a szferokromatizmus még viszonylag nagy fényerőnél is minimális. Az apokromát általában három különféle törésmutatójú lencséből áll (triplett), de különleges üvegyanagok használata esetén két lencséből is elkészíthető (duplett). A háromlencsés objektív előnye, hogy a tervezőnek több lehetősége van az összes leképezési hiba egyidejű minimalizálására. A háromlencsés objektívek megfelelő pontosságú gyártása viszont jóval nehezebb, mint a kétlencséseké. A fényvesztés szempontjából is jobb a kétlencsés konstrukció. A dubletteknél a kalciumfluorid kristályüveg (fluorit) alkalmazása hozza a legjobb eredményt, mivel az optikai üvegek között ennek a legkisebb a törésmutatója. A színi hiba még  $f/8$  nyílászólyonynál is jelentéktelen mértékű (*Takahashi* vagy *Vixen* fluorit-refraktorok). Sajnos a fluorit önmagában is nagyon drága, és a  $\text{CaF}_2$  nedvességérzékenysége miatt a bonyolult megmunkálási technika tovább növeli a költségeket.

A vizuális megfigyelésnél a kép-kontrasztot a színi hiba viszonylag kevésbé befolyásolja. A magyarázat az emberi szem spektrális érzékenységiében keresendő. Szemünk főleg a sárgászöld fényre érzékeny, a kék és vörös fényre az érzékenység ennek csupán 10–20%-a. Az akromátok és apokromátok színi hibája viszont éppen a kék és vörös tartományban erős, a sárgászöld fényben elhanyagolható. Egy jól korrigált 10–15 cm-es  $f/15$ -ös nyílászólyonú akromatikus refraktornál a színi hiba képélességet rontó hatása mérsékelt, legfeljebb akkora, mint a tükröknél a 15–20%-os kítakarásé. Az apokromátoknál ez a hatás még kisebb.

A fényerős akromátok színi hibája viszont drámaian nagy. Ez nemcsak esztétikailag zavaró (pl. hamis színű kettőscsillagok), hanem – például bolygó-észlelésnél – a finom részleteket is elmossa. Egy jó minőségű 80 mm-es akromát  $f/15$ -nél megközelíti egy azonos méretű  $f/8$ -as apokromát teljesítményét. Nyugodt légkörnél 200-szoros nagyítást is elbír. Egy 80 mm-es  $f/8$ -as akromát viszont már túlzottan színes képet ad, és nem érdemes vele 100-szoros nagyítás fölé menni. Kis és közepes nagyításoknál – például a mélyég-objektumok megfigyelésénél – a fényerős akromátok jól beválnak.



6.8. ábra. Színi hibára korrigált lencsék gyújtótávolságának hullámhosszfüggése

## Az okulárok szerepe

A. NAGLER híres mondása – „Az okulár a távcsöved fele!” – rámutat, hogy az okulár szerepe a vizuális észlelésnél nagyon fontos. Terjedelmi korlátok miatt e témát csak vázlatosan tudjuk érinteni. Az okulárok képalkotásán múlik, hogy mi „jön át” az objektív leképezéséből. Az okulároknál főként az optikai tengelyen kívüli képalkotás a döntő, mivel a három vagy több tagú okulártípusoknál a leképezés az optikai tengely mentén már közel ideális.

Az okulárok teljesítményének megítélésénél számos jellemzőt figyelembe kell venni. Közülük a fontosabbak: a képkontraszt, a fényáteresztő képesség az optikai tengelyen, a színre korrigáltság, az optikai tengelyen kívüli képtorzulások (pl. kómahiba), a látómező mérete, a pupillatávolság és a belső reflexiók.

### *Néhány általános szempont a vizuális megfigyelésekhez:*

- Az okulárok optikai tengelyen kívüli torzítása erősen függ az objektív fényerejétől. A fényerő növelésével egyre nagyobb lesz a kómahiba.
- $f/15$  nyílászórány körüli távcsöveknél még az egyszerű okulárok kómahibája is minimális. Meglepi tény, hogy a legegyszerűbb, kéttagú *Huygens-okulár* is jó képet ad a hagyományos  $f/15$ -ös refraktorokkal.
- A háromtagú *Kellner-okulár* elsősorban a színi hibája miatt marad el a Plössl- és orthoszkopikus okulár mögött. Kis és közepes nagyításra a Kellner-okulár jól megfelel.
- Az orthoszkopikus, a Plössl- és a super-Plössl-okulárok nagyon jól korrigáltak a képhibákra. A viszonylag kevés (4–5) lencsetag kitűnő fényáteresztő képességet eredményezhet.
- Az okulárok pupillatávolsága fontos kényelmi szempont az észlelésnél. Sajnos a rövid fókuszu Plössl- és orthoszkopikus okulárnál túl rövid (10 mm alatti) pupillatávolság esetén a megfigyelés hosszú távon kényelmetlenné válik.
- Nagy nagyításnál a legjobb eredményt egy kitűnő (apokromatikus) Barlow-lencse adja, hosszabb fókuszu okulárokkal kombinálva. Egyes okulártípusoknál a Barlow-lencse be van építve az okulárba.
- A maximális képkontrasztot a 4–6 tagú (gyakran ED lencsét tartalmazó) okulárok nyújtják, ezek látómezeje 45–60° között van. (*Brandon ortho*, *Pentax* és *Zeiss ED ortho*, *Takahashi LE*, *Tele Vue Radian* stb.).
- A fényerős távcsöveknél a legjobb eredményt a nagy látómezejű, kómakorrigált típusok adják (*Tele Vue Panoptic*, *Nagler*, *Pentax XL*). A sok lencsetag ezeknél csekély kontrasztvesztést okoz a látómező közepén.
- Az okulárok gyártási minősége erősen eltérő. A drága okulároktól (*Tele Vue*, *Pentax*, *Meade*, *Zeiss* stb.) a legjobb teljesítményt várhatjuk, de egy tömeggyár-

tású távol-keleti Super Plössl neve inkább csak az optikai elrendezésre utal, nem a minőségre.

- Az okulár minősége éppen a legnagyobb és a legkisebb nagyítás környékén a legkritikusabb. A refraktorokhoz gyakran mellékelnek prizmat szériatartozékként. Ez teljesen hibás gyakorlat, mivel a prizma színi hibája felerősíti a lencsék maradék színi hibáját. Így a lencsés távcsöveknél inkább precíz zenitűkröt használjunk, vagy — például a bolygók megfigyelésénél — vállaljuk a kényelmetlen „direkt” megfigyelési pozíciót. Az egyszerű akromatikus Barlow-lencse a refraktoroknál szintén növeli a színezést, ezért a nagyobb nagyításoknál inkább apokromatikus Barlow-lencsét alkalmazunk.

## Az alkalmazható nagyítás

A vizuális észlelés fontos kérdése, hogy mekkora az optimális nagyítás. Az alkalmazható nagyítás a megfigyelt objektum kontrasztjának, az objektív átmérőjének és minőségének függvénye. Az alacsony kontrasztú, halvány objektumokról (ilyenek például a Tejút diffúz ködei) a legtöbb részletet akkor kapjuk, ha az okulárban a kilépő pupilla mérete 2–4 mm közötti. A nagyítás alsó határának a távcső–okulár rendszer kómahibája és a kép vignettáltsága szab gyakorlati határt. Például egy közel tökéletes, 10 cm-es apokromatikus refraktor 20-szoros nagyítással ideális képet ad a halvány diffúz ködökről. Nyugodt légkörnél a bolygókon viszont akár 300-szorosig is érdemes fokozni a nagyítást. A legfontosabb nagyítástartomány e távcsövel az 50–150-szeres közötti, ez a legtöbb objektumtípus kontrasztviszonyaira alkalmas. Egy fényerős 200/1000-es Newton-távcsőnél kissé szűkebb a kihasználható nagyítástartomány a nagyobb kómahiba és a kevésbé ideális kontrasztátvitel miatt.

## Röviden a különböző távcsőtípusokról

### *Akromatikus refraktorok*

Klasszikus amatőr távcsövek. A legelterjedtebb Fraunhofer-refraktor színi hibája nem jelentős. A kontraszt nagyon jó, feltéve, ha a lencseelemek precízen készítették. A hosszú fókuszú akromátoknál szerencsére legtöbbször még a tömeggyártmányok is megfelelőek. A látómező jól korrigált, és a zárt tubus miatt a 6–15 cm átmérő közötti Fraunhofer-refraktorok kitűnő távcsövek a kettőscsillagok, a Nap, a Hold, a bolygók tanulmányozására. Egy 15 cm-es  $f/15$ -ös lencse már szinte obszervatóriumi távcsőnek számít. A fényerős

( $f/5 - f/9$ ) akromátok kitűnőek mint kompakt és nagy látómezejű utazótávcsövek. Színi hibájuk nagyobb nagyításoknál már zavaró.

### *Apokromatikus refraktorok*

Színi hibájuk csak tötrésze az akromátokénak, a fókuszban legfeljebb csak a legfényesebb objektumoknál (Vega, Vénusz) jelentkezik gyenge elszíneződés. A kontraszt és a látómező korrigáltsága szintén kitűnő (természetesen csak akkor, ha az optikai elemek is jók). További vonzó előny a nagy látómező (nemritkán  $3 - 4^\circ$  is lehet). A  $7 - 9$  cm-es apokromátok elsőrangú utazótávcsövek. Szinte ideális távcsövek, elterjedésüknek mégis gátat szab a rendkívül magas árak.  $15$  cm-es átmérő felett az ár már tényleg „csillagászati”, és lényegesen olcsóbb alternatívák vannak minden észlelési területre.

### *Newton-távcsövek*

Az amatőrök körében legelterjedtebb műszerek. A házi készítésű Newtonok kritikus pontja a segédtükör. Az igazán jó minőségű, gyári segédtükör ára a főtüköréhez közelít. A rendszer érzékeny a jusztyrozásra (különösen a fényerős reflektorok), ezért mechanikailag megfelelően stabil tükörtartókat kíván. A nyitott tubus miatt időről időre elpiszkolódnak az optikák, és a tubusbeli áramlások sem ideálisak (ami kritikus lehet bolygók megfigyelésénél). A fényerős ( $f/4 - f/5$ ) Newtonok segédtükre nagy, a főtükör méretének  $25 - 35\%$ -a. Ez a képkontrasztot alaposan lerontja, és a nagy fényerő miatt a kómahiba is jelentős. A kómahibán kómakorrektorral lehet segíteni. Az amatőrök számára a nagy teljesítményű, de megfizethető távcsőtípust a  $25 - 40$  cm átmérőjű, fényerős Newtonok jelentik.  $f/6$ -os fényerőnél a központi kitakarást  $20 - 25\%$ -ra csökkentve a kontraszt romlását is számottevően csökkenthetjük. A kis fényerejű ( $f/8$  körül) és kis ( $15\%$  körüli) kitakarású Newtonok a legjobb leképezésű távcsövek közé tartoznak, bár a tubushossz előnytelenül megnő, és a vignettálatlan látómező is viszonylag kicsi.

### *Cassegrain-távcsövek*

Nagy átmérő mellett is kicsi tubushosszuk miatt terjedtek el. A középen átfúrt paraboloid főtükör fénykúpját hiperboloid felületű segédtükör nyújtja meg. Többféle Cassegrain-jellegű rendszer létezik, de mindegyiknek nagy ( $30 - 35\%$ ) a központi kitakarása, s ez jelentős kontrasztromlással jár. A kómahiba sem elhanyagolható, ezért rendkívül fontos a pontos jusztyrozás.  $25$  cm-es átmérő fölött e műszerek mint komoly „obszervatóriumi” távcsövek ajánlhatók.

### *Schmidt–Cassegrain-távcsövek*

A Cassegraineknél sokkal elterjedtebbek az amatőr gyakorlatban. Ezek katadioptrikus rendszerek. A főtükör gömb felületű, melynek optikai hibáit egy negyedrendű felületű korrekciós lencse korrigálja. A Schmidt–Cassegrain-távcsöveknél a kitakarás nagy (30–35%). A kontrasztviszonyok kompromisszumot igényelnek az észleléseknél. Mégis nagyon közkedveltek, mert a rendszer nagyon kompakt, a látómező korrigáltsága pedig kitűnő. A Schmidt–Cassegrain-távcsövek (a legismertebbek a *Celestron* és a *Meade* gyártmányai) sokoldalú és könnyen szállítható távcsövek. Az áruk megfizethető, de néhány szempontból a képalkotásban kompromisszumot kell kötnünk.

### *Makszutov-távcsövek*

Közülük a Makszutov–Cassegrain-rendszer csupa gömbfelület határolta, katadioptrikus rendszer. A gömbfelületekben rejlik a típus előnye, az olcsó gyártástechnológia mellett elérhető nagy optikai pontosság. E precíz távcsövek a nagy (30% körüli) kitakarás ellenére kontrasztos képet adnak. A látómező nagyon jól korrigált. Általában a legmagasabb minőségi kategóriába tartoznak, de ez meglátszik az árakon is. A világhírű *Zeiss* és *Questar* mellett jó és olcsóbb Makszutov-távcsöveket készítenek orosz cégek, például az *Intes* is.

A Makszutov-távcsövek nemrégiben kifejlesztett típusa a *Makszutov–Newton*. Itt a korrekciós tagra egy Newton-segédtükröt rögzítenek. Ezeknél a távcsöveknél a kis kitakarású (20%) segédtükröknek köszönhetően a kontraszt ezeknél már-már refraktorszerű. A kómahiba is mérsékeltebb, a zárt tubus pedig további előnyt jelent. E típus egyetlen számottevő hátránya a korlátozott méretű,  $1^\circ$  alatti vignettálatlan látómező.

### Irodalom

- [1.] ABBOTT, F.: Modulációátviteli függvény. *Kép- és Hangtechnika*, 1984, 161. o.
- [2.] SUITER, H. R.: *Star Testing Astronomical Telescopes* Willmann-Bell, 1994.
- [3.] NUSSBAUM, A.–PHILLIPS, R. A.: *Modern optika mérnököknek és kutatóknak*, 1982, Budapest, Műszaki Könyvkiadó.