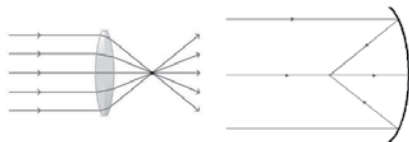


Távcsöves tudnivalók III.

Tükrös távcsövek

Cikksorozatunk előző részében tárgyaltuk a lencsés távcsövek alapjait. Egyszerűnek tűnő működésük mellett szót ejtettünk az egyszerű lencsék alapvető optikai hibáiról is, amelyek közül az egyik legjelentékenyebb a színi hiba. Mivel ennek alapvető oka, hogy a fény áthalad az üveg anyagán (amely a különféle hullámhosszokon eltérő hatást fejt ki), kézenfekvőnek látszik olyan optikai rendszer építése, amelyben a fény nem hatol be az optikai elem anyagába. Ez volt az alapötlete a Newton (és mások) által épített távcsöveknek: a fény összegyűjtését, fókuszálását nem egy domború lencse, hanem optikai szempontból hasonló képalkotásra képes homorú tükrök végzi. A tükröző felületről a fénysugarak a hullámhossztól függetlenül, azonos törvényszerűség szerint verődnek vissza, így a tükrös rendszer kiküszöböli a lencsék színi hibáját.



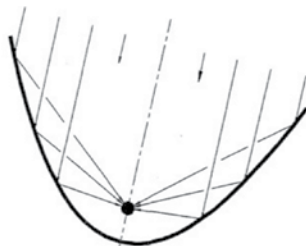
Domború lencse és a homorú tükrök képalkotása

A színi hiba megoldása azonban csak az egyik problémát szünteti meg. A homorú (domború) tükrök éppen úgy viselkednek, mint a domború (homorú) lencsék – sajnos ez igaz a gömbfelületekből adódó szférikus aberráció jelenségére is. Azaz, hasonlóan egy gömbfelülettel bíró domború lencséhez – figyelmen kívül hagyva most a színi hibát, vagy egyszínű (monokromatikus) fényt használva – a gömbi hiba pontosan ugyanúgy jelentkezik egy gömbfelületű tükrök esetében. E hiba elkerülése viszonylag egyszerű: gömbfelület helyett paraboloid



Newton híres távcsövének méretarányos, működő modellje elfér egy tenyerében (Tóth Marietta a 2009-es Mérnökbalón)

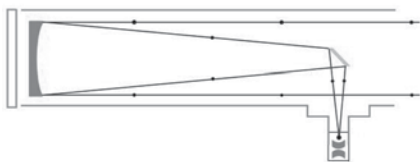
felületet kell kialakítani, amely a végtelenből jövő fénysugarakat is egyetlen fókuszpontba gyűjti össze. (Ahogyan a gömbfelületet is egy kör „megforgatásával” állítjuk elő, a paraboloid felületet is egy ismert parabola-görbe y tengely mentén történő megforgatásával képzelhetjük magunk elé.) Egy ilyen tükrőfelület tehát mentes az egyszerű lencsés távcsövek két fő hibájától: az üvegyagyon való áthaladás következtében keletkező színi hibájától és a gömbfelület szférikus hibájától.



Parabolatükrök képalkotása

Egy probléma azonban rögvest szembeötlik: a tükör visszaveri a fénysugarakat, így azok a tükör előtt egyesülnek képpé. Hogyan nagyíthatjuk fel az itt keletkező képet bármiféle eszközzel, hogyan végezhetünk megfigyeléseket, miközben a beérkező fény egy részét kitakarjuk?

A probléma megoldására számos optikai elrendezés született. A legegyszerűbb megoldásban kissé megdöntve használjuk a főtüköröt (ez a Herschel által alkalmazott megoldás), így annak képe nem a beeső sugárnyaláb belsejében, hanem a távcső falán kívül keletkezik. Bár a megoldás egyszerű, sajnos a „szemből” érkező fénysugarak megfelelő összegyűjtésére elkészített hagyományos paraboloid felületű tükör (ahol a parabola „csúcsa”, forgáspontja éppen a tükör felületének középpontjában van) erre nem alkalmas, a megfigyelhető kép jelentős mértékű hibával terhelt, a csillagok pont helyett apró üstökösökként rajzolódnak ki. A megoldás mindazonáltal életképes lehet, ha a tükör megmunkálásánál olyan felületet alakítanak ki, amely lényegében egy jóval nagyobb paraboloid felület szelete – egy olyan paraboloidé, amelynek fókusza a tubuson kívül, a kívánt helyen van. Ilyen aszimmetrikus paraboloid-felület elkészítése azonban rendkívül nehéz – nem is csoda, hogy ilyen műszerek gyakorlatilag nem is léteznek.



Fénymenet a Newton-távcsőben

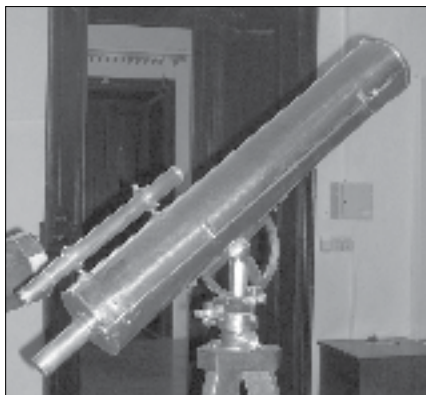
Napjainkban még mindig az Isaac Newton által alkalmazott egyszerű és nagyszerű elrendezés a legelterjedtebb: egy 45 fokban elhelyezett siktükör vetíti ki oldalra a főtükör által alkotott képet, amelyhez így már szabadon hozzáférhetünk. Természetesen ennek ára van: egy újabb felület kerül a fényútba (a korabeli tükrök alacsony fényvisszaverő képessége folytán ez a lencsés távcsövekhez

képest akár lényegesen halványabb képet is adhatott), emellett a segédtükör jelenléte azt eredményezi, hogy a fényelhajlás következtében az Airy-korongból több fény tolóódik ki a diffrakciós gyűrűkbe (l. Meteor 2013/1.), így csökkentve a rendszer kontrasztját. A segédtükört, néhány később ismertetendő rendszertől eltekintve, valamiféle szerkezetnek tartania kell (általában négylábú segédtükörtartó), aminek az elemei mentén szintén fényelhajlás jön létre, ami a Newton-távcsövek esetében megszokott, és fotókon esztétikus négyágú tüskéket eredményezi a csillagok körül. A segédtükör, valamint a tartószerkezet által okozott fény mennyiség-csökkenés valójában nem jelentős. Egy 200 mm átmérőjű távcső, amelyben 50 mm-es segédtükör kapott helyet, még mindig egy 192 mm-es tiszta átmérőjű műszernek felel meg fénygyűjtőképesség szempontjából. Nem véletlen, hogy a Newton-féle elrendezés ennyire elterjedt, hiszen akár saját magunk is vállalkozhatunk nem csak az optikai elemek összeszerelésére, de 30–40 ezer forint ráfordítással akár a főtükör megfelelő minőségű csiszolására is! Kiváltképpen akkor, ha kevésbé fényerős műszert tervezünk, mivel $f/10$ -es fényerő alatt a gömb- és paraboloid felület közötti eltérés már elhanyagolható, így a felületet még parabolizálnunk sem kell okvetlenül (minél fényerősebb egy tükör, annál nagyobb az eltérés a gömb és az ideális paraboloid felület között, következésképpen annál nehezebb megfelelően pontosan elkészíteni a görbületet). Adott anyag lehetőségei mellett pedig mindenképp a Newton-elrendezésű távcsővel érhetjük el a legnagyobb átmérőt – azaz a legnagyobb fénygyűjtő-képességet és a legjobb felbontást.

A rendszer tubusa elöl nyitott, ami kedvező a környezeti hőmérséklet átvétele szempontjából, ámde kedvezőtlen a szennyeződések tekintetében. A főtükörré rakódó por idővel a képminőség romlásához vezet – szerencsére a mai tükrök a tükröző bevonat felett védőréteget is kapnak, így megfelelő elővigyázattal házilág is eredményesen tisztíthatók. Ha a tükröző felület előregszik – védőréteggel is

fedett alumínium-réteg esetében ez akár egy évtized is lehet – megfizethető áron elvégezhető az újraalumíniumozás.

Miként a lencses műszereknél, úgy a tükrös távcsöveknél is az objektív (jelen esetben a tükrör), és az éppen használt okulár fókusz távolságának hányadosa adja meg a nagyítás értékét. Nagy nagyítást kívánó megfigyelésekhez (például a Hold vagy a bolygók esetében) így rendkívül rövid fókuszu okulárra, vagy – a gyakorlatban ez az elterjedtebb – hosszabb fókuszu objektívre van szükség. A nagyobb nagyításokhoz előnyös hosszabb fókuszu fizikailag is hosszú tubussal jár együtt, ami megnehezítheti az észleléseket.

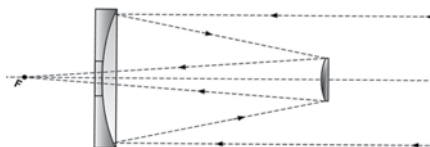


Gregory rendszerű tükrös távcső az egri Csillagászati Múzeumban. Az 1776-ban készült műszer élességállítását a segédtükör mozgásával oldották meg

Részben ennek a problémának a megoldására is születtek a továbbiakban ismertető távcsőtípusok, amelyek közös jellemzője, hogy bennük a fényút „összehajtogatva” helyezkedik el, emellett pedig beépített fókusznújtást tartalmaznak. Alapvetően két lehetőségünk van a fókuszu nyújtására. Elhelyezhetünk egy szórótágot még az objektív fókuszpontja előtt, amely tag az összetartó fénysugarakat kevésbé összetartóvá alakítja, így az eredő képnél úgy tűnik, mintha az egy sokkal nagyobb fókusztávolságú objektív által rajzolt kép lenne. Másik lehetőségünk, hogy gyűjtőtágot alkalmazunk: ekkor lényegében az objektív által alkotott képet

egy másik „beépített” távcsövön keresztül szemléljük, melynek első objektívje (a teljes műszert tekintve a nyújtótágot) az objektív által előállított képre van beállítva.

Az első bemutatott rendszerünk a Gregory-féle távcső, amelyben a főtükör előtt egy homorú, ellipszoid alakú segédtükör található. Ebben a rendszerben a segédtükör a főtükör fókuszában túl található, és a képet a főtükör közepén fúrt lyukon át vetíti ki a távcső végén. Az 1663-ban bevezetett elrendezés egyenes állású képet, és viszonylag jó leképezést biztosít, a teljes műszer fizikai hossza azonban valamivel meghaladja a főtükör fókuszsugarának hosszát.

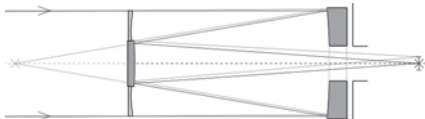


Cassegrain-távcső domború hiperboloid fókusznújtó segédtükörrel

Hasonló, de homorú segédtükör helyett domborút alkalmazó elrendezés a Cassegrain rendszer. A domború, hiperboloid segédtükör a fényútban a főtükör fókuszpontja előtt helyezkedik el, és „homorú lencseként” nyújtja meg a főtükör fókuszt, majd a keletkező kép szintén a főtükör közepén levő furaton jut ki. Bár hazai amatőrök is építettek Cassegrain rendszerű teleszkópokat, elkészítésüket több tényező is nehezíti. A hiperboloid felületű domború segédtükör elkészítése és tesztelése is nehéz feladat. Emellett a főtükör igen fényerős, nehezebb elkészíteni, mint egy egyszerű Newton-távcső főtükrét. Az alkalmazott nyújtás a görbületektől és az elrendezéstől függően általában 3x-os körüli, de akár 10x-es nyújtás sem lehetetlen, amely esetben a központi kitarakás igen csekély lesz, ami a képkontraszt szempontjából kedvező.

A központi kitarakás mértéke – mint ezt már említettük – a csillagok körüli Airy-korongban, valamint az azt körülvevő diffrakciós gyűrűkben összegyűlt fény mennyiségére van hatással. Minél kisebb a központi kitarakás, rendszerünk annál inkább megközelítheti a

tökéletes, kitakarásmentes rendszer képét; és minél nagyobb, annál több fény jut a diffrakciós gyűrűkbe. A jellemzően 35% körüli kitakarás általában nem okoz jelentős kontrasztvesztést, az egész rendszer optikai teljesítménye pedig a képhibákat tekintve valamelyest felülmúlja a Newton-rendszer teljesítményét. A Cassegrain-rendszer előnye vitathatatlanul a „beépített” hosszú fókusz, amely fizikailag meglepően rövid tubushosszal párosul, így könnyebben hordozható, ugyanakkor a hosszú fókusz következtében nem szükséges további fókusznyújtást alkalmazni.



Schmidt–Cassegrain rendszerű távcső. Figyeljük meg a furcsa görbületű korrekciós lemezt!

A klasszikus Cassegrain-elrendezésből számos további műszertípus született, mint például a Dall–Kirkham, vagy a Ritchey–Chrétien rendszerek, amelyek azonban az amatőrök között nem terjedtek el túlzottan (ennek oka a bonyolultabb felületek, a csak nagyobb átmérőben gazdaságos gyártás, és ennek következtében a magasabb ár). Ezen „összehajtott” reflektorok másik problémája, hogy a környezet hőmérsékletének felvételéig a tubus belsejében található turbulens, melegebb levegőn a fénysugár háromszor halad át, így a légtömeg által okozott zavarok meglehetősen felerősödve jelentkeznek.



Egy népszerű, „klasszikus”, Schmidt–Cassegrain: a 200 mm-es tömzsi tubusban 2000 mm-es fókusz fér el alig 60 cm-es fizikai tubushosszban

A következő lépést az optikai rendszerek további fejlesztése terén a katadioptrikus rendszerek jelentik. Az ilyen távcsövekben mind lencse(szerű) elemek, mind pedig tükrök szerepet játszanak a képképzésben. Amatőr viszonylatban a legelterjedtebb változat a Schmidt–Cassegrain típus, amely az égbolt nagyléptékű feltérképezésére kifejlesztett, fényerős Schmidt-távcsövek és a fent említett Cassegrain-rendszer „házassága”. Ebben a rendszerben – mint sok más katadioptrikus távcsőben – a fény először a tubus elején található korrekciós lemezen halad át, amely lényegében egy igen bonyolult felületű lencse. Ennek feladata a távoli célpontról érkező, egymással párhuzamos fénysugarak oly módon való deformálása, hogy azok az egyszerűbb felületű főtükörről visszaverődve a lehető legjobb leképezést biztosítsák. Fontos megjegyezni, hogy a korrekciós lemez fontos eleme a rendszernek, enélkül a további tükrök nem alkotnának megfelelő képet. Ezen rendszereknél is jelen van a némi kontrasztvesztést okozó központi kitakarás, hiszen itt is egy domború segédtükrő végzi a fénynek a főtükörben fúrt lyukon való kivetítését és a fókusz nyújtását. Mivel a tubus elején megtalálható a korrekciós lemez, a segédtükrő ennek belső felére rögzítve helyezkedik el, így nincsenek a Newton-távcsővel megörökített képen jellemző diffrakciós tüskék.

A Schmidt–Cassegrain rendszerek igen népszerűek (elsősorban tőlünk nyugatabbra), mivel viszonylag nagy átmérőben, fókusz-hosszukhoz képest fizikailag rövid tubusban érhetők el, azaz nagy teljesítményű, ugyanakkor a hasonló paraméterű Newton rendszerénél jóval könnyebben mozgatható műszert jelentenek.

A Schmidt–Cassegrainekhez igen hasonló, de minden optikai elemén gömbfelületet használó (a gömbfelületnek köszönhetően egyszerűbben és olcsóbban előállítható) rendszer a Makszutow–Cassegrain. Ebben az elrendezésben szintén megtalálható a homorú főtükrő, a domború (fókusznyújtó) segédtükrő, valamint a korrekciós lemezként funkcionáló, viszonylag vastag optikai tag. Az összesen négy optikai felület (a korrekciós tag két

oldala, a fő- és segédtükör) mind gömbfelület. Ezek a műszerek igen kis méretben is (akár 9 cm-től) elérhetőek, fókuszuk átmérőjükhöz képest igen nagy is lehet, így rendkívül kompakt, hordozható műszerként használhatók.



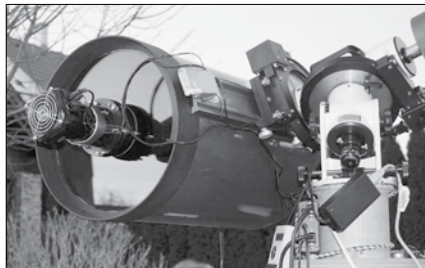
Makszutow-Cassegrain típusú távcső. Figyeljük meg a láthatóan erősen homorú felületű korrekciós lencsét!

További érdekes optikai rendszer a Makszutow-Newton, amely a hagyományos Newtonok hibáit korrigálja a Makszutow-rendszerben is használt korrekciós tag segítségével.

Az eddig tárgyalt tükrös rendszerek kapcsán érdemes foglalkozni a központi kitakarás már említett hatásaival. A lencsés távcsövek kontrasztos, „kemény” leképezéséhez képest igen sok (talán téves) meggyőződés is kapcsolódik a tükrös távcsövekhez. Kétségtelen, hogy a túlságosan nagy kitakarás jelentős kontrasztcsökkenéssel jár, azonban a kitakarásnak a gyakorlati életben kb. 15% értékig nincs észrevehető hatása. A kitakarás kb. 20%-nál kezd észrevehetővé válni, és még 25%-nál sem okoz nehézséget a távcső elméleti teljesítőképessége közelében történő használat. 30% fölött jelentkezik egyre feltűnőbben a kitakarás hatása a képminőségre. Mindazonáltal számos területen, ahol elsődleges cél a minél nagyobb fénygyűjtő képesség (és fényerő), és csupán másodlagos szempont a lehető legkontrasztosabb leképezés (pl. égboltfelmérések, fotometria stb.), még ennél is nagyobb kitakarású műszerek vannak használatban.

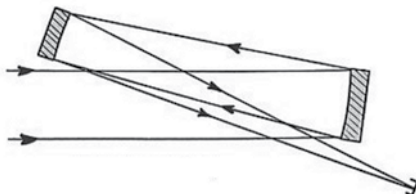
A kitakarásos, ugyanakkor igen nagy fényerejű műszerek hatékony alkalmazására kiváló példa a nagy átmérőjű Schmidt-Cassegrain rendszerek primer fókuszában történő fotózás. Ekkor a segédtükört elhagyják, és

az érzékelő közvetlenül a primer fókuszba kerül. Ilyen elrendezéssel akár $f/2$ -es fényerejű rendszerek is megvalósíthatók.



Rendkívül fényerős fotografikus műszer – a Schmidt-Cassegrain rendszer fókusznyújtó segédtükreinek helyére kerül a kamera

Ha a kitakarást teljes mértékben sikerülne kiküszöbölni, akkor egy közel tökéletes rendszert kaphatnánk. Ehhez azonban a megszozottól eltérően csiszolt tükrökre van szükség. Ezen rendszerek közös jellemzője, hogy a fényútban sehol nincs kitakarás, így a tükrös rendszerekből következő színhiba-mentesség mellett a távcsövek a lencsés műszerekhez hasonló kontrasztos képet adnak. A boltok kínálatában tudomásunk szerint nem található meg, számunkra eddig csak amatőr gyártásúak ismertek. Két leggyakoribb, de összességében véve is ritka típusuk a Kutter, illetve a Yolo rendszerek. Előbbi kis fényerőnél az optikai tengelyhez közel igen jól képez le, míg az utóbbi viszonylag nagy fényerő mellett is kiváló képet nyújt. Fizikai szempontból abszolút értelemben a Yolo-reflektor a legtökéletesebb leképezésű távcső, ám a tükröket sújtó, főként hőtani, foglálási, beállítás problémák nyilván itt is jelentkeznek. Ide kívánczok, hogy a már többször említett efféle problémák addig problémák igazán,



Yolo-távcső fénymenete

míg egy jól tervezett tubus nem állja útjukat, hiszen természetesen mindenre lehet műszaki megoldást találni...

Az eddigiekből kiderült, hogy a tükrös műszerek az elérhető fénygyűjtés tekintetében nagyon vonzó alternatívát jelentenek. Az átmérő növekedésével növekvő felbontóképesség jár együtt, melyet a kitarítás voltaképpen nem befolyásol, csupán mértékétől függően rontja a kontrasztot. A tükrök amatőrök számára nem lényeges, de megemlítenél előnye, hogy gyakorlatilag bármekkora átmérő mellett gyárthatók. Ez a magyarázata annak is, hogy a világ legnagyobb teleszkópjai mind tükrös rendszerűek. Az átmérő növelése azonban hazai légköri viszonyok között nem mindig kifizetődő, ugyanis az átmérő növelésével a légköri turbulenciákra is egyre érzékenyebb lesz a rendszer. Saját tapasztalataink alapján már egy 20 cm átmérőjű optika is viszonylag ritkán képes teljes kapacitással dolgozni. Ez persze addig igaz, amíg a legszigorúbb minőségi és légköri feltételekezt igénylő megfigyelési téma, a bolygók esetén gyakran szükséges nagy nagyításokban gondolkodunk. A minél több begyűjtött fény egyúttal a mélyég-észlelés egyik sarokköve is, de a közhiedelemmel ellentétben azon a területen is fontos a kontrasztos képalkotás. Bár a tükrök fényvisszaverő-képessége jócskán kilencven százalék fölött is lehet, mindig számolni kell a fényvesztéssel, mely minden távcsőnél fennáll, de a tükrösöknél általában nagyobb mértékű. Ennek ellenére egy amatőr viszonylatban közepes-nagy 20–30 cm-es tükrös imponáló fénygyűjtő-képessége egy jó optikával és tubussal párosulva feledhetetlen élményben részesíti a galaxisok, ködök világába merészkedő műkedvelőt, s ha a légköri körülmények megengedik, a bolygók szinte fényképszerűen jelennek meg az okulárban.

A fotózás területén a tükrös távcsövek kitűnően használhatók. Ennek egyik oka, hogy tetszőleges hullámhosszon való fotózás lehetséges, mert amit a tükrös visszaverni képes, azt mind ugyanoda képezi le. A másik, főleg napjaink digitális technikával felszerelt amatőrje számára fontos előny,

hogy a nagyobb átmérőjű tükrös nagyobb fénygyűjtése a CCD kisebb erősítése mellett is elégséges, ezért annak zaja jelentősen kisebb lesz, a kép pedig szebb, életszerűbb. Emellett a rövidebb expozíciós idők miatt a légköri nyugtalanság is kevésbé érvényesül. A webkamerás bolygófotózással kapcsolatban tucajtával tudok példákat felhozni arra, amikor egy nem túl nyugodt estén készült fénykép minősége is jócskán meghaladja az okulárban látható képét.

Hátravan még egy kevésbé fizikai, inkább érzelmi szempont, mely a tükrös távcsövekhez köt sok vállalkozó szellemű, alkotni kész amatőrt: az a tény, hogy a távcsőtükrös házilag is elkészíthető. (Megjegyzendő, hogy lencse is készíthető házilag, azonban ennek aránytalanul nagy anyagi és technikai feltételei mellett követelmény az előzetesen szerzett sokrétű csiszolási tapasztalat is.) A saját kivitelű tükrös mindig több örömet jelent az amatőrnek, mint bármilyen másik távcső használata. A megfélemlő szabályokat gondosan betartva, végtelen türelemmel és kitartással bárki elkészítheti saját főtükrét, némi kezűgyesség és egyszerű szerszámok birtokában pedig akár bonyolultabb távcsövet is. A végeredmény lényegében csak a türelmünkötől, és kitartásunktól függ: hány-szor vagyunk hajlandók újrakezdeni (egy, a csiszolás során esett karc miatt), mennyire vagyunk hajlandók tanulni hibáinkból, és apró lépésekben finomítva, folyamatosan ellenőrizve dolgozni a műszeren. Jelenleg néhány tízezer forint anyagi ráfordítással hozzá lehet jutni egy 15 cm-es tükrös elkészítéséhez szükséges nyersanyagokhoz. A boltok kínálatát figyelve rájövünk, hogy a házi előállítás anyagilag nem feltétlenül kifizetődő, anyagi jellegű megtérülésről akkor beszélhetünk, ha nem forgalmazott, vagy különlegesebb, nagyobb, magasabb árú műszer elkészítésébe vágunk bele.

A saját készítésű Newton-távcső, melynek főtükrét is magunk csiszoltuk, semmivel sem összehasonlítható, megfizethetetlen észlelési élmények sokaságát biztosítja tulajdonosa számára!

Kurucz János, Molnár Péter