



Távcsőkészítés

A titokzatos Airy-korong

A vérbeli amatőr csillagász különös bizsergést érez, amikor meglát egy távcsövet, és azonnal szeretné kipróbálni, vajon milyen képet ad. Ami engem illet, kb. 25 éve látam az egykori Váci utcai Ofotértben 12 000 Ft körüli áron egy kis Zeiss Telementort, és ha csak tehettem, mindig útba ejtettem a kirakatot. Úgy emlékszem, reménytelenül szerelmes lettem abba a távcsőbe. Azért reménytelenül, mert egyetemistaként havonta 1000 Ft-ból kellett megélnem.

Azóta sokféle kisebb-nagyobb távcső volt a kezemben, és mind a mai napig egyfajta csodavárással veszem a kezembe a legegyszerűbb távcsövet is, hogy aztán megállapítsam, igaza volt Sajó Péternek. Talán még emlékeznek a régi amatőrök, hogy 1979-ben, a Föld és Égben megjelent egykori tagtársunk, Sajó Péter tollából egy cikk: „A távcsövek teljesítőképessége” címmel. Ebben roppant szakszerűen leírta, hogy mitől függ a csillagászati optikák nyújtotta kép minősége. Lebilincselte a tudása, és az írásmódja. Talán egyetlen fölösleges szó sem volt ebben a cikkben. Javasolom, hogy a Meteorban változatlan formában jelentessük meg Péter három kiváló cikkét (Föld és Ég 1979/2., 1979/7. és 1980/11.).

Azóta motoszkált bennem, hogy megértsem; miért viselkednek ilyen különös módon a lencsék és a tükrök? Miért nem adnak pontszerű képet a nyilvánvalóan pontszerű csillagokról? Honnan tudja egy optika, hogy neki kisebb, vagy nagyobb foltban – szakszerűbben mondva, Airy-korongban – kell összegyűjtenie a fényt? Miért teszi tönkre a nagy segédtükör a keletkezett kép minőségét? Tényleg annyira érzékeny a tükör felülete a csiszolásra, hogy $\lambda/16$ felületi pontosság szükséges a megfelelő leképezéshez? Ilyen és hasonló kérdések vetődtek fel bennem, mígnem elhatároztam, hogy számítógéppel és szerény Turbo Pascal tudással végére járok a dolognak.

Előbb felmelegítettem tudásomat a fizikai optika témakörben. (Jó szívvel ajánlom többek között Bernolák Kálmán A fény című könyvecskéjét, ahol a fényhullámok interferenciája részletesen megtalálható.) Benne van egy csinos levezetés a távcsövek szögfelbontó-képességéről is (218. o.), de ez a kíváncsiságomat nem elégítette ki: nem lehet vele hibás optikai felületet, takarásokat, extra- és intrafokális helyzeteket, stb. számolni. Ezért nekiláttam egy levezetésnek, melynek most a végeredményét közlöm. Csak azok figyelmebe ajánlom, akiknek jó osztályzatuk volt számtanból (ötös, négyes, hármas, kettes).

A csillagokból, bolygókról a távcső objektívjén keresztül nagyon sok (tegyük fel, hogy n számú) fényhullám indul el a fókusz sík felé, amelyek szerencsés esetben erősíthetők, gyengíthetők egymást. Ezt hívjuk interferenciának. A fókusz síkon keletkező kép legnagyobb intenzitását jelöljük I_{\max} -szal. Egy tetszőleges pont fényintenzitása a fókusz síkon a középponthoz viszonyítva:

$$(1) I_{\max} = \frac{(S \cos \varphi)^2 + (S \sin \varphi)^2}{n^2}$$

$$(2) \text{Ahol } \varphi = \frac{2\pi \cdot s}{\lambda}$$

s: a fény által megtett út az objektívtól a fókuszszíkgig

λ : a fény hullámhossza

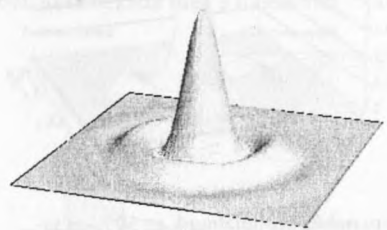
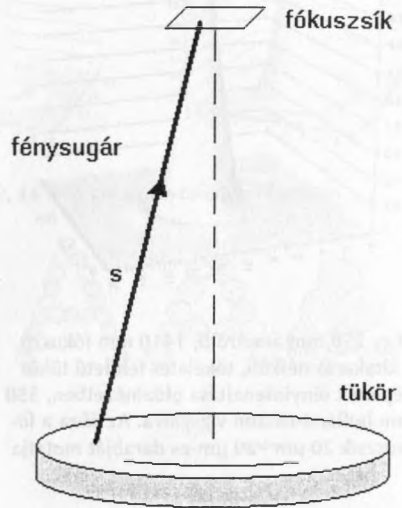
n : 1-től n -ig összegezzük

φ : a fényhullám fázishelyzete

Tekintsük a mellékelt ábrát! A tükörről visszaverődő fénysugarak a fókuszszíkban alkotnak képet az interferencia szabályai szerint. Indítsunk tehát a tükör felszínének különböző pontjairól (lehetőleg több száz pontból) fénysugarakat a fókuszszík minden egyes pontjába. Ha értékelhető képet kívánunk kapni, akkor a fókuszszík legalább $50 \cdot 50 = 2500$ pontban rögzítse a beérkező fénysugarakat (mint valami CCD mátrix). Könnyen belátható, hogy így rengeteg számításra lesz szükség, hiszen pl. $25 \cdot 25 = 625$ tükörpont mindegyikéből fénysugár indul a 2500 képpont mindegyikéhez. Ez kb. másfél millió számítási ciklust igényel, amit természetesen csak számítógéppel tudunk végrehajtani.

Négyyszeresen egymásba ágyazott ciklussal kiszámítatjuk a tükör és a fókuszszík egy-egy pontja közötti távolságot, majd a (2) képlet segítségével a fénysugár fázishelyzetét. Ezután az (1) képlet alkalmazásával összegezzük a képpontokba érkező fényhullámok intenzitását. Az így összegzett értékeket már ábrázolhatjuk például az Excel program segítségével. Ez utóbbi program rendkívül sok jó tulajdonságának egyike, hogy az előállított kép Word dokumentumba is elhelyezhető.

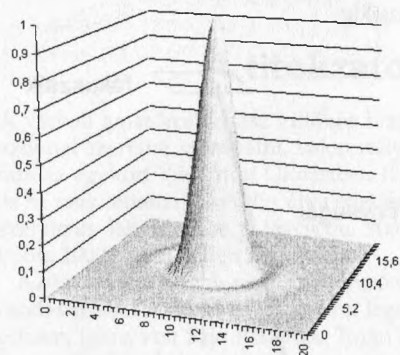
A fentiekben röviden leírt számítási módszer előnye, hogy tetszőleges szimulációkat tesz lehetővé. Például különböző alakú és méretű tárgyakat helyezhetünk a fénysugarak útjába (segédtükrök hatását vizsgálhatjuk), tetszőlegesen deformálhatjuk a tükör felületét, ami lehetővé teszi a zónahibák, és egyéb, az ideálistól eltérő felületi hibák vizsgálatát. Az előállított térbeli fényintenzitási görbe értelmezése nem okozhat különösebb gondot: minél magasabb valamely pontban a korong magassága, annál fényesebb a kép. (Airy-



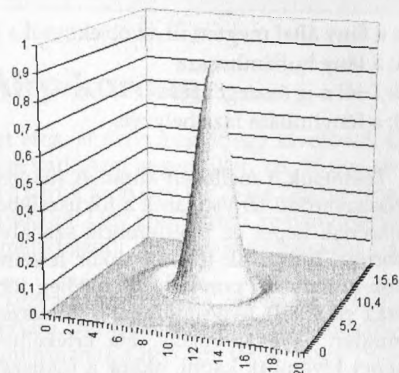
korongnak nevezzük a fényintenzitási görbe belső kúpjának a fókuszsíkon megjelenő vetületét.)

Nem kívánok itt a program részleteibe belebocsátkozni, de ha valakit érdekel a levezetés vagy a program, szívesen megosztom tudásomat e téren is.

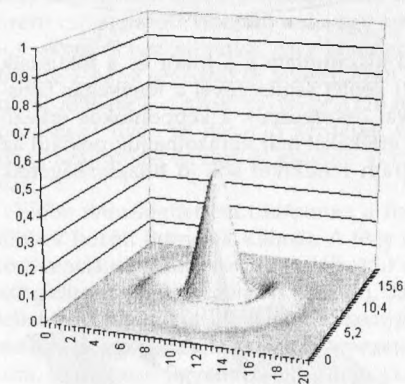
Nézzük ezek után a program futtatásának eredményeit!



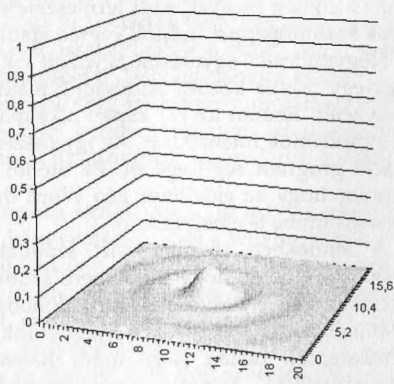
Egy 250 mm átmérőjű, 1410 mm fókuszú, kitarítás nélküli, tökéletes felületű tükör képének fényintenzitása oldalnézetben, 550 nm hullámhosszon vizsgálva. Az ábra a fókusz sík $20\ \mu\text{m} \cdot 20\ \mu\text{m}$ -es darabját mutatja



Ugyanez az optika 5 cm átmérőjű segédtükörrel, azaz 20%-os kitarással. A kúp magassága csökkent, és az első elhajlási gyűrű felerősödött, de a helyzet még nem tragikus

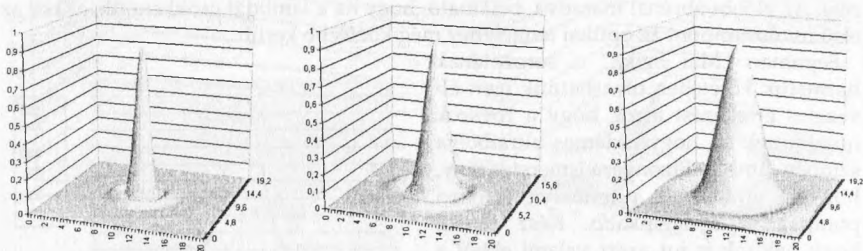


Nem nehéz szimulálnunk az 50%-os takarású segédtükör esetét sem. A kvázi-Cassegrain-távcsövek jó része ilyen képet ad. Itt már nem elhanyagolható az elhajlási gyűrűk hatása



Végül elrettentő példaként nézzük meg a 80%-os kitararású esetet. (Napperem blendék). Az ábra önmagáért beszél

Az eddigiekben az Airy-korongot előállító programmal és annak felhasználásával foglalkoztunk. Láttuk, hogy nem okoz nehézséget a tükrököt terhelő segédtükrök hatását megvizsgálni. Most nézzük meg, milyen hatása van az objektívátmérő növelésének és csökkentésének!



Az Airy-korong méretének alakulása 40, 15 és 5 cm-es távcsőátmérő esetén

Ahogy az ábrából kiderül, az objektív átmérőjének csökkentésével az Airy-korong mérete egyre terebélyesebb lesz, azaz szemből nézve egyre nagyobb köröket látunk. Ezzel nyilván romlik az objektív felbontása, azaz romlik a kép minősége. Tegyük egy próbát! Próbáljunk meg először kisebb, majd egyre nagyobb körökkel például egy A betűt kirakni!

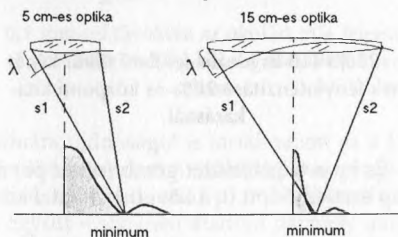
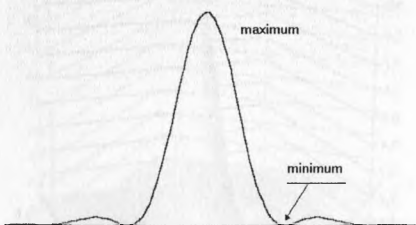
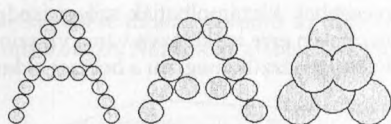
Nyilvánvalóan egyre rosszabb a kép, a harmadik esetben az A betű már alig felismerhető. Ez érthetővé teszi, miért rajzol egy (tökéletes) nagyobb átmérőjű optika szebb képet, mint a kisebb. Nem véletlen tehát, hogy a csillagászok egyre nagyobb átmérőjű távcsöveket építenek.

De még mindig nem világos, hogy miért karcsúbb az Airy-korong nagyobb átmérők esetén! Vágjuk ketté a fényintenzitás görbét, azaz nézzük meg a metszetét!

A maximum nyilván ott jön létre, ahol legnagyobb a hullámok erősítése, a minimum pedig ott, ahol teljesen kioltják egymást. Fordítsuk most figyelmünket az első minimum kialakulására. Ez határozza meg ugyanis, hogy mekkorának látjuk a belső korong átmérőjét.

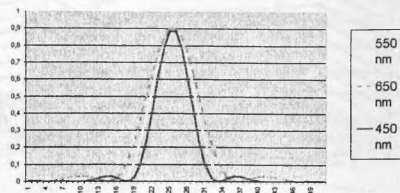
Most tekintsük a következő ábrát, és figyeljük az első minimum kialakulását!

Az első minimum (hullámok teljes kioltása) ott alakul ki, ahol az optika átmérőjének két végpontjából elinduló fényhullámok útkülönbsége éppen egyenlő a fény



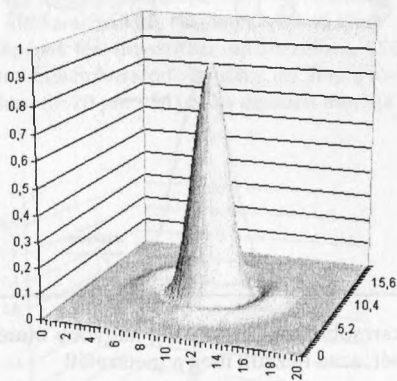
hullámhosszával, λ -val. Könnyen belátható, hogy ez a feltétel nagyobb optika esetén az optikai tengelyhez közelebb teljesül. Vagyis kisebb lesz az Airy-korong átmérője. Ez persze felveti azt a kérdést is, hogy ezek szerint az Airy-korong átmérője (vagyis a felbontóképesség) függ a fény hullámhosszától? Természetesen igen. Minél „kékebb” a fény, azaz minél rövidebb a fény hullámhossza, annál kisebb az Airy-korong átmérője. Az előbbi ábránál maradvá, belátható, hogy ha a lambdát csökkentjük, akkor az első minimumpont az optikai tengelyhez még közelebb kerül.

Feynman „Mai fizika” c. sorozatának harmadik kötetében olvashatunk igen élvezetes értekezést arról, hogy a rovarok hogy jöttek rá, hogy érdemes ultraibolya színben látniuk. Bizonyára ismeretes tény, hogy a virágok is ultraibolya színben pompáznak a leginkább. Kész csoda, hogy nekünk is jut azért valami ebből a pompából.

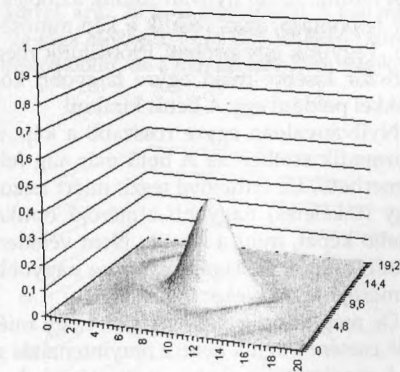


A fenti ábra az Airy-korong frekvenciafüggését mutatja a cikk elején bemutatott 250/1410-es tükör esetére. Az 50 pixeles felbontás 20 μm -nek felel meg, ebből az ügyesebbek kiszámolhatják szögmásodpercben is a felbontást. Programomban természetesen erre is skálázva van a vízszintes tengely.

És most nézzük meg, mi a helyzet akkor, ha nem tökéletes felületű a tükör!

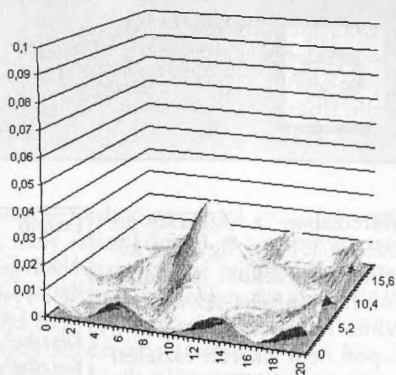
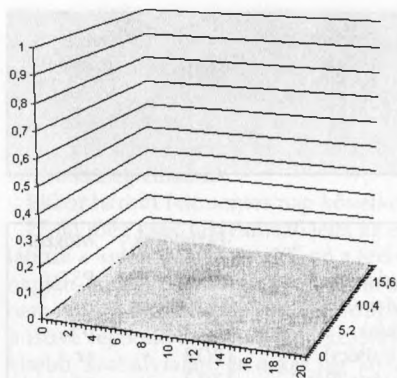


250/1410-es ideális felületű tükör képének fényintenzitása 20%-os központi kitarásánál



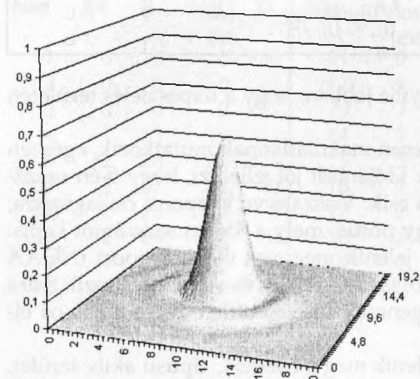
Ugyanez a parabolatükör, de a külső 20%-a gömbfelületű

És ha a teljes felület gömb (nincs parabolizálva)? Ez esetben alig látszik valami. A kép szétkenődött (l. a következő oldal két felső ábráját).

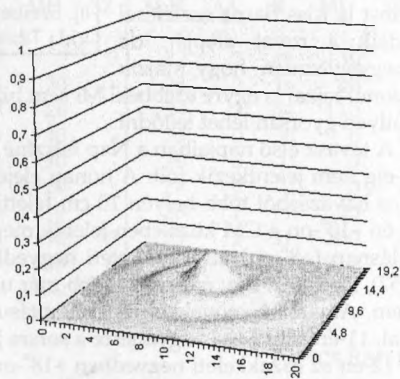


**A 100%-ban gömbfelületű tükör fényintenzitása
(kis nagyítással: balra, nagy nagyítással: jobbra)**

Az igazán „profi” amatőrök komoly következtetést tudnak levonni az intra- és extrafokális képből az objektív minőségére vonatkozóan. Nézzük az alábbi sorozatot:



0,05 mm-rel növelve az objektív és az okulár távolságát láthatjuk az extrafokális képet



0,1 mm-rel távolítva az okulárt már jelentősen csökken az Airy-korong fényének intenzitása

Bízom benne, hogy több amatőrtársam számára újdonságot is tartalmazott ez a kis bemutató. Terveim között szerepel, hogy továbbfejlesszem a számítógépes programot, hogy olyan különleges eseteket is tudjon számolni, mint pl. a hajlított (íves) segédtüköretartó. A szoftvert – forráskóddal együtt – szívesen átadom bármely amatőr barátomnak. Várom a megjegyzéseket, javaslatokat. Derítsük ki együtt az Airy-korong titkait!

SCHMIDT ZOLTÁN