

Távolságmérés a galaxisok között

Az égitestek távolsága a csillagászat legalapvetőbb problémái közé tartozik. Legyen szó akár naprendszerbeli égitestekről, akár csillagokról, csillaghalmazokról, vagy a legtávolabbi galaxisokról, legfontosabb jellemzőik egyike a távolságuk. Mindezt tömören a „közeli bolha – távoli elefánt” problémájaként szokták megfogalmazni: mindaddig, amíg csak irányokat látunk, addig a közeli bolha is nagyobbban látszódnak, mint a távoli elefánt, és ilyen megfigyelésekből meglehetősen hamis következtetést vonnánk le a bolhák és az elefántok méretarányaira. Márpedig az égen egyik csillag, vagy galaxis mellé sincs „odaírva”, hogy milyen messze van, így az égitestek valódi természetének megismerése minden esetben azzal kezdődik, hogy valahogyan megbecsüljük térbeli távolságukat. Nem kívánjuk teljes mértékben áttekinteni a csillagászati távolságmérés technikáit – arra egy egész Meteor-évfolyamot ki kellene bérlelni. Így aztán nem foglalkozunk az egyedi csillagok különböző parallaxisaival (trigonometriai, spektroszkópiái stb.), a csillaghalmazok távolságmérésével, hanem egyből kilépünk a galaxisok közé. Célunk néhány újabb (az utóbbi 10–15 évben) kifejlesztett távolságmérési technika ismertetése, ezért a lassan évszázados múltira visszatekintő cefeida periódus–fényesség relációt is csak érinteni fogjuk. Az alábbi fogalmakat használó módszerek kerülnek bővebben terítékre:

1. planetáris köd luminozitás-függvény
2. gömbhalmaz luminozitás-függvény
3. felületi fényesség-fluktuációk
4. Szunyajev–Zeldovics-hatás
5. gravitációs lencsék

Szándékosan nem térünk ki néhány olyan módszerre, amelyek már vagy 20–25 éve ismertek (pl. Tully–Fisher-reláció), és így már bevonultak a magyar szakirodalomba, vagy pedig amelyekről az utóbbi időben részletesebben is olvashattunk magyarul (pl. szupernóvák szerepe a távolságmérésben, I. Vinkó J. és munkatársai cikkét a Meteor csillagászati évkönyv 2001-es kötetében). Szintén nem foglalkozunk a távolság fogalmának kozmológiai értelmezésével, illetve a az egész Univerzumra kiterjesztett vizsgálatok esetén fellépő távolság-értelmezési problémákkal, bármennyire is izgalmas kérdéseket vessenek fel. Az alábbiakban mindenütt a köznapi értelemben vett távolságfogalmat használjuk, amit egy sima méterrúddal is megmérhetnénk, ha gondolatban egy pillanat alatt végigfuthatnánk a megfigyelő és a célobjektum közötti távolságot. Mindezek fényében a Hubble-törvényt is csak érintőlegesen említjük meg, minthogy tárgyalása túl messzire elvezetne cikkünk keretei közül. Figyelmünk középpontjában durván a 10 és 1000 megaparszek (Mpc) közötti tartomány található, az itt használt módszerek közül ismertetjük az érdekesebbeket. A figyelmes olvasó mindegyikkel találkozhatott már a Csillagászati évkönyv különböző köteteinek újdonságokkal foglalkozó hírei között, írásunkkal most megpróbálunk egy áttekintő összefoglalást adni róluk.

A távolságlétra fokai

Ahogy egyre messzebbre tekintünk a Világegyetemben, úgy válnak egyre bizonytalanabbá elképzeléseink az égitestek távolságáról. Az előttünk heverő billentyűzet

még kéznyújtásnyi távolságával pontosan belátható messzeségben van. A csillagok közé kilépve a Föld pályamozgását tükröző parallaxis-szög mérése még viszonylag pontos távolságmérést tesz lehetővé. Utána viszont egyre pontatlanabbak adataink. A geometriai módszereket közvetlen távolságmérésnek tekinthetjük, és ezek alapozzák meg a nagyobb hatótávolságú eljárásokat. Ha felismerjük a geometriai módszerekkel megismert égitestek egyéb jellemzőinek távolságfüggését, ezen egyéb paraméterek távolabbi objektumokra történő kimérésével már közvetett módszerekhez jutunk el. Szinte mindegyikben megbújik valahol a vizsgált égitestek látszó (m) és abszolút (M) fényességének különbsége, a távolságmodulus, ami igen egyszerűen függ a távolságtól, amennyiben eltekintünk a csillagközi anyag fényelnyelésétől:

$$m - M = -5 + 5 \log d$$

ahol d az objektum távolsága parszekben. Ha valamilyen módon következtetni tudunk egy csillag (planetáris köd, gömbhalmaz, szupernóva, galaxis) abszolút fényességére, akkor abból és a látszó fényességéből a fenti formulával számíthatjuk ki a távolságát. A kozmikus távolságskála lépcsői egymás fölött vannak, mint a létre fokai: legalul a közvetlen módszerekkel megmért objektumok találhatóak, amelyekre alapozva sorra épülnek fel a különböző másodlagos távolságmérési eljárások.

Ez utóbbiak legfontosabbika a cefeida periódus-fényesség reláció, mely azt állítja, hogy a cefeidák fényváltozási periódusa egyértelműen megadja azok abszolút fényességét. A látszó fényességből, valamint a periódusból számított abszolút fényességéből pedig adódik a távolság (l. még Halmazváltozók I. cikkünket a Meteor 2000/10-es számában). A Hubble Űrtávcső (HST) egyik legfontosabb feladata ezen reláció alkalmazása távolabbi galaxisokra (20–25 Mpc távolságig), felvéve az azokban található cefeidák fénygörbéit. Azonban még a HST-vel sem lehet ennél a távolságnál messzebb levő cefeidákat felbontani, így a kilépés a távolabbi galaxisok közé új fokok kialakítását igényli a kozmikus távolságlétrán. Tulajdonképpen ezek közül néhányat foglalkozik jelen írás.

A planetáris köd luminozitás-függvény

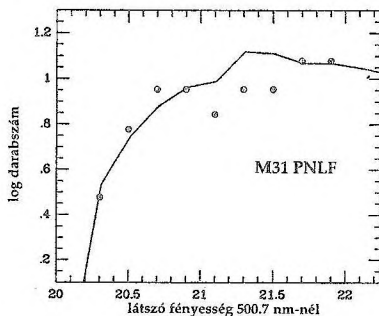
A kis és közepes tömegű csillagok életének látványos végét jelzik a planetáris ködök (l. Meteor 2000/7–8). Az egykori vörös óriás által ledobott gázburok, ami fényesen ragyog a közepén megbúvó fehér törpe ultraibolya sugárzásától gerjesztve – legtömegebben így lehetne összefoglalni ezt a csodálatos objektumtípust. Színképüket nagyon jellegzetes emissziós vonalak uralkják, közülük szinte az összes planetáris ködben az 500,7 és a 495,9 nm-es hullámhosszú vonalpár a legerősebb.

Éppen ez a színképi jellegzetesség teszi lehetővé viszonylag könnyű azonosításukat a galaxisokban. Ha az 500,7 nm-es hullámhossz sávjában áteresztő szűrővel készítünk egy képet egy galaxisról, majd azt összehasonlítjuk egy széles hullámhossztartományban felvett képpel, akkor a keskenysávú képen azonnal kiugranak a fényük jelentős részét abban a kis tartományban kisugárzó planetáris ködök.

A közeli, tejútrendszerbeli planetáris ködök tanulmányozása már évtizedekkel ezelőtt kiderítette, hogy ezek a ködök a fényesebb egyedi objektumok közé tartoznak, jellemzően $-1... -4$ magnitúdós abszolút fényességgel (ez a szuperóriás csillagok abszolút fényességének tartománya). Az 1970-es években H.C. Ford és D.C. Jenner felvetette, hogy a planetáris ködök abszolút fényességének van egy felső korlátja, mégpedig kb. $-4,5$ magnitúdó. 1978-ban publikálták azt az eredményt, miszerint az M81

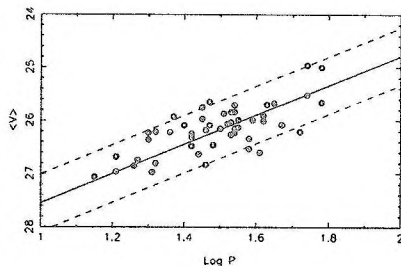
8 db planetáris ködje átlagosan 20-szor halványabb az M31 planetáris ködjéinél, amiből a fenti feltételezéssel élve megbecsülték az M81 távolságát (a kapott 3 Mpc jó összhangban állt az egyéb módszerek eredményeivel).

Az 1980-as évek legvégén G.H. Jacoby és munkatársai az találták, hogy ez a megközelítés túl durva eredményt ad, és nem a legfényesebb planetáris ködök átlagfényességét kell meghatározni, hanem fel kell venni egy-egy galaxisnál az ún. planetáris köd luminozitás-függvényt (PNLF). Ez egy olyan diagram, aminek vízszintes tengelyén a planetáris ködök látszó fényessége szerepel, felosztva kicsiny szakaszokra, függőleges tengelyén pedig az adott fényesség tartományokba eső planetáris ködök száma. Az alábbi ábrán példaképpen bemutatjuk az M31 PNLF-jét.

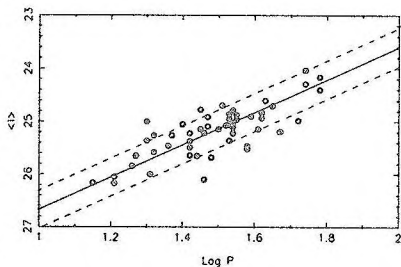


Az M31 planetáris köd luminozitás-függvénye (Ciardullo és munkatársai, 1989).

Jacoby és csoportja a még friss CCD technikával és keskenysávú szűrőkkel felfegyverkezve planetáris ködök százait azonosította közeli galaxisokban. A megfelelő PNLF-ek felrajzolása meglepően hasonló eredményekre vezetett: a planetáris ködök abszolút fényessége széles tartományon lassan változik, ám egy adott fényességnél nagyon meredeken levág. Az Andromedaköd periódus-fényesség relációval meghatározott távolsága alapján ez a levágás $-4,48$ magnitúdónál történik (figyeljük meg, hogyan „lopóznak be” a módszerbe a cefeidák!). Mindennek az lehet a fő oka, hogy a planetáris ködök központi csillagai igen kis tömegtartományt fednek le, illetve nem is lehetnek akármekkoraik: a Chandrasekhar-féle határtömegnél (kb. 1,4 nap-tömeg) nem lehet nagyobb egy fehér törpe. Ebből az következik, hogy a ködöt gerjesztő ultrabolya fotonok száma sem lehet tetszőleges.



A gyakorlatban a PNLF alkalmazása igen egyszerű: keskenysávú képeket készítve egy galaxisról azonosítjuk benne a planetáris ködöket, felrajzoljuk a látszó fényességeik eloszlását, amit a vízszintes tengely mentén elcsúsztatva fedésbe hozunk az M31 eloszlásával. A csúsztatás mértéke pedig nem más, mint az adott galaxis és az



Az NGC 1365 cefeidáinak periódus-fényesség relációi a V és az I fotometriai sávokban, a Hubble Űrtávcső mérései alapján (Silbermann és munkatársai, 1999)

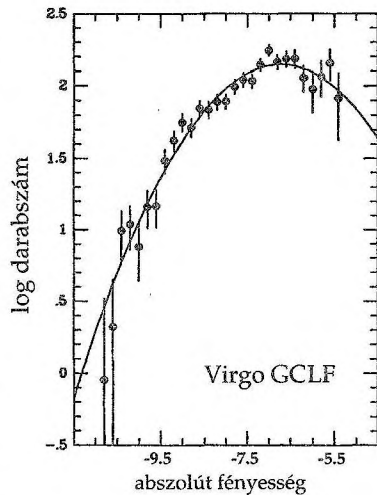
M31 távolságmodulusainak különbsége, amiből adódik a vizsgált csillagváros távolsága. Jelenleg a HST-vel kb. 20 Mpc a módszer hatótávolsága, ami ugyan nem múlja felül a periódus-fényesség reláció határait, ám alkalmazása nagyságrendekkel kisebb távcsőidőt igényel, mint a cefeidák fénygörbéjének felvétele. Emellett a galaxis-halmazok óriás elliptikus galaxisaiban sok ezer planetáris kód van, így nagy pontossággal kimérhető luminozítás-függvényük.

A gömbhalmaz luminozítás-függvény

Gömbhalmazt az összes nagy galaxis halójában találunk. Közel 160 darabot ismerünk saját Tejútrendszerünkben, míg az M31-ben 250-nél is többet azonosítottak már. Az óriás elliptikus galaxisok még többet, akár több ezer gömbhalmazt is tartalmaznak. Átlagos abszolút fényességük -7^m körüli, ám a legfényesebbek elérik a -11^m -s értéket. Ez pedig fényesebb a legfényesebb csillagoknál is (kivéve a szupernóvákat), tehát elvben nagy távolságig lehet őket detektálni.

A távolságmérésbe való bevonásukkal már 1955-ben megpróbálkozott W.A. Baum, aki az M87 legfényesebb gömbhalmazait összehasonlította az M31 legfényesebb gömbhalmazaiával, majd feltette, hogy a látzó fényességek különbsége csak az eltérő távolságok miatt van. Ez a megközelítés – hasonlóan a planetáris ködökhöz – nem adott elég pontos eredményeket. Az 1970-es évek elején javasolta R. Racine a gömbhalmaz luminozítás-függvény (GCLF) alkalmazását. Az elv ugyanaz, mint a (később kitalált) PNLF-nél, egyedül az eloszlás alakja más (l. ábra). Legtöbb gömbhalmazt a -7 magnitúdós abszolút fényesség környezetében találunk, míg halványabból is és fényesebből is viszonylag szimmetrikus eloszlásban látunk kevesebbet. Ezt Gauss-görbével szokták illeszteni, ami kétparaméteres függvény: egyik az eloszlás maximumának fényessége, másik az eloszlás szélessége.

Míg a PNLF alakja elméletileg is megindokolható, addig a GCLF tisztán empirikus összefüggés, egyelőre nem ismerünk olyan fizikai törvényt, ami megjósolná a GCLF megfigyelt alakját. Az eddig megvizsgált gömbhalmaz rendszerek mindegyike mintegy 1^m szélességű eloszlást mutat, ugyanakkor az eloszlás maximuma -6^m körül van (kb. 0^m a bizonytalanság). A módszer elvi hatótávolsága kb. 50 Mpc a HST-vel, míg ha sikerül pontosan kalibrálni a GCLF fényes oldalát (azaz nem kell kimérni az eloszlás maximumát), akkor akár 200 Mpc-re is feltornázható az alkalmazás határa.

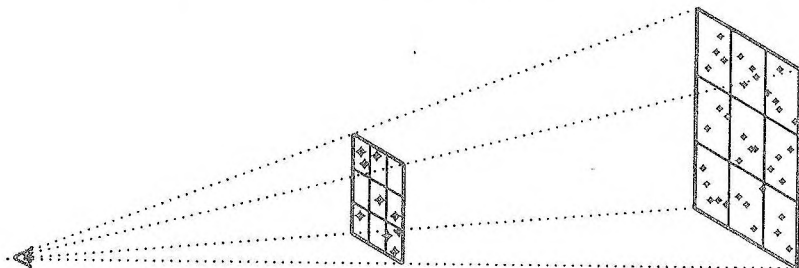


A Virgo-galaxishalmaz gömbhalmaz luminozítás-függvénye. A diagram megszerkesztéséhez négy óriás elliptikus galaxis közel 2000 gömbhalmazát vizsgálták meg (Harris 1991). Az abszolút fényességek kiszámításánál a Virgo-halmaz távolságát 17 Mpc-nek vették

Felületi fényesség-fluktuációk

Az eddigi módszerek galaxisok építőköveiként azonosítását igénylik. 1988-ban J.L. Tonry és D.P. Schneider egy olyan eljárást fektetett le, amelyik egyedi csillagokra felbontható galaxisokra használható. Az egész azon alapul, hogy habár a távoli galaxisok csillagait már nem tudjuk megkülönböztetni, diszkrét és egyenetlen hatásuk mégis megfigyelhető ingadozást okoz a galaxisok felületi fényességében. A közelebbi, ám felbontatlan galaxisok csomóságnak látszanak, míg a távolabbiaknál a felületi fényesség kisimul. Ezek után egyetlen kérdés, hogy hogyan lehet megfogni a felületi fényesség csomóságát?

Szerencsére a CCD technika itt is gyümölcsözőnek bizonyult. A CCD kamerával felvett galaxisképeken mérni tudjuk az egyedi pixelek intenzitását, illetve az egyedi pixelek átlagtól való eltérését. Viszonylag könnyen belátható, hogy a pixelek szórása a csillagok „zajszerű” eloszlása esetén éppen a távolsággal fordítottan skálázódik. Mellékelt ábránkon áttekintjük a módszer koncepcióját.



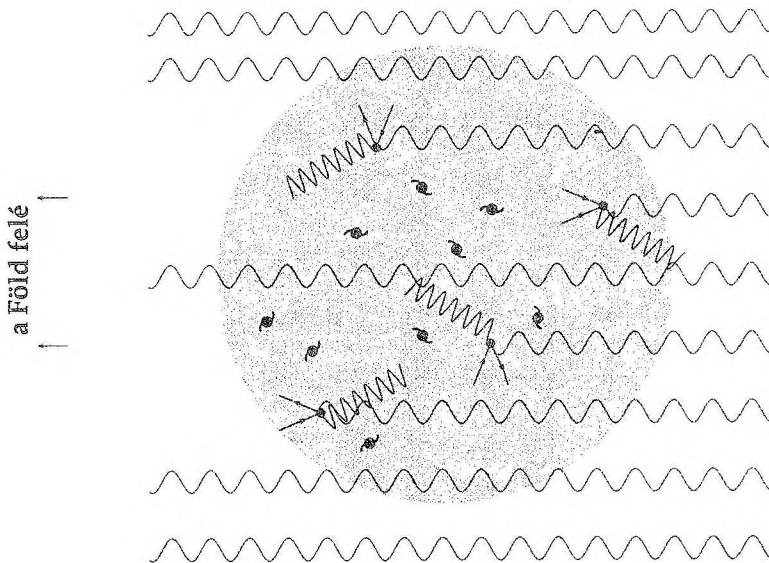
A felületi fényesség-fluktuációk módszerének alapelve: a közeli galaxisok képein a pixelenként leképezett csillagok száma erősen változik, így az egyedi képelemek átlagtól mért eltérése nagy. Távoli galaxisoknál pixelenként sok csillagot képezünk le, a képelemek átlagtól mért eltérése kicsi. A csillagok Poisson-eloszlása esetén a pixelek fluktuációja a távolsággal fordítottan skálázódik

A módszer alkalmazása elvben egyszerű, nagy a hatótávolsága (földi műszerekkel 40 Mpc, a HST-vel 125 Mpc), egyetlen nehézség az alappontok meghatározása. Az alapelvekből ugyanis az következik, hogy hasonló szerkezetű galaxisok távolságainak aránya számítható ki, azaz a különféle galaxistípusokhoz keresni kell olyan közeli galaxist, amit felületi fényesség-fluktuációk mérésére is lehet használni, ugyanakkor más módszerekkel is megmérhető a távolsága. A témában intenzív vizsgálatok folynak és várhatóan még sokat finomodik a konkrét kivitelezés.

Szunyajev-Zeldovics-hatás

Eddig csupa olyan másodlagos távolságmérési módszert ismertettünk, amelyek mindegyike tartalmazza a cefeida periódus-fényesség relációt. A cikk hátralevő részében két olyan jelenség kerül sorra, melyek elsődleges módszerekhez vezetnek. Először nézzük a Szunyajev-Zeldovics-hatást!

A Szunyajev-Zeldovics (S-Z) hatás 1969-es megfogalmazása óta élénk vizsgálatokat váltott ki, mivel galaxishalmazok közvetlen távolságmérését teszi lehetővé, mindenféle közbeiktatott másodlagos távolság-indikátorok (pl. cefeidák, planetáris ködök, gömbhalmazok) nélkül. A jelenség a halmazok intergalaktikus forró plazmája és a mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás kölcsönhatásán alapul. Röntgenmérésekből ismeretes, hogy a galaxishalmazokat igen ritka és forró plazma tölti ki, amelyben nagy energiájú, relativisztikus mozgású elektronok találhatók. A mikrohullámú fotonok az inverz Compton-effektusnak köszönhetően szóródnak ezeken az elektronokon és megváltozik a háttérsugárzás spektrális eloszlása. Végeredményben a galaxishalmazok irányában a háttérsugárzásnak egy 10^{-4} -es relatív fluktuációja lép fel, amit a földi észlelő az ívperc skálán fellépő relatív háttérsugárzási hőmérséklet-ingadozásként detektál (l. ábra). Távolságmérésre úgy használható a S-Z-effektus, hogy a halmazok röntgenspektrumának, ill. a háttérsugárzás fluktuációinak modellezése becslést ad magának a halmaznak a valódi átmérőjére, amit összevetve a látszó átmérővel, kaphatjuk a galaxishalmaz távolságát. Ezt pedig összehasonlítva a halmaz vöröseltolódásával, a Hubble-törvényen keresztül becslést kaphatunk magára a Hubble-állandóra.



A Szunyajev-Zeldovics hatás. A galaxisok közti forró plazma elektronjai kölcsönhatnak a mikrohullámú háttérsugárzás fotonjaival, amelyek kiszóródnak a látóirányunkból

A módszernek több előnye és legalább annyi hátránya van. Legfontosabb előny, hogy tisztán geometriai távolságmérésre vezet, ráadásul nagyon nagy hatótávolsággal (a kozmológiailag érdekes $z = 1$ -ig). Mindezt sajnos ellensúlyozza a legfőbb hát-

rány, a jelenleg még igen nagy bizonytalanság (30–50%). Ám a lehetőségek az egyre pontosabb röntgenméréseknek (pl. a Chandra és az XMM-Newton műholdak jóvoltából), valamint a háttérsugárzás fluktuációinak részletesebb értelmezésének köszönhetően egyre bővülnek, és a S–Z-hatás immáron valódi alternatívaként jelenik meg a Hubble-állandó meghatározásában. Megbízható eredményekhez természetesen nem egyedi galaxishalmazok vizsgálatával, hanem minél több galaxishalmaz statisztikus analizésével juthatunk. 2000 végén amerikai kutatók egy 33 galaxishalmazból álló minta vizsgálatával a $H_0 = 60$ km/s/Mpc (Omega = 0,3) és a $H_0 = 58$ km/s/Mpc (Omega = 1) eredményre jutottak, míg a közvetlen mérési hibát immár $\pm 5\%$ -ra teszik. Ezek az értékek valamivel kisebbek, mint a jelenleg sokak által elfogadott kb. 70 km/s/Mpc-es Hubble-állandó, de messzemenő következtetéseket egyelőre nem lehet levonni. Természetesen eddig azonosítatlan szisztematikus hibák is bonyolíthatják a helyzetet, ám várhatóan még sokat fogunk hallani a S–Z-effektusról és a segítségével származtatott kozmológiai következtetésekről.

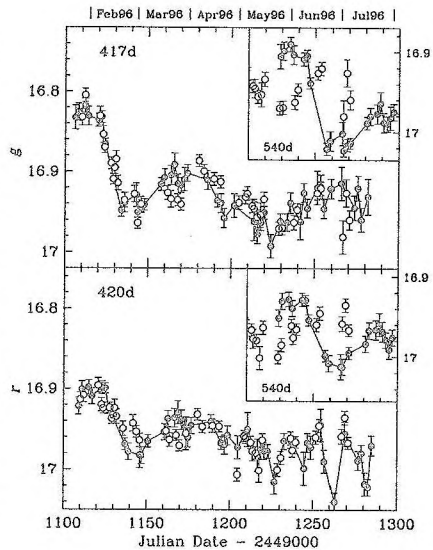
Gravitációs lencsék

A fény útja a nagytömegű testek közelében eltérül – sokszor, sok helyen olvashattuk már. Az is jól ismert, hogy a gravitációs lencsehatás hogyan képes megváltoztatni távoli kvazárok képét, illetve hogyan képes fényüket felerősíteni. Elegendő egy nagytömegű galaxist behelyezni a kvazár és a földi megfigyelő közé, majd megfigyelni, hogy a galaxis gravitációs tere hogyan hajlítja meg a fénysugarak útját egészen a megfigyelő detektoráig. Ha ügyesen helyezük el a gravitációs lencseként működő galaxist, akár kettős képet is kaphatunk egyetlen kvazárról.

Az egyik legismertebb ilyen kettőskvazár a Q0957+561A és B, melyet D. Walsh és munkatársai fedeztek fel 1979-ben. Két kvazár látszik $6,1''$ -re egymástól, melyek spektrumának tökéletes egyezése igazolta, hogy ugyanannak az objektumnak a gravitációs lencsehatás révén megkettőzött képét látjuk (Bakos Gáspár az 1990-es évek elején vizuálisan is észlelte a rendszert a Szitkay-féle 44,5 cm-es Dobsonnal).

Mint minden becsületes kvazár, a Q0957+561AB is változtatja fényességét.

És itt válik érdekessé a rendszer a csillagászati távolságmérés szempontjából. S. Refsdal norvég csillagász még 1964-ben kiszámította, hogy mi történik egy gravitációs lencse által kicsit különbözőképpen leképezett fényforrás két képének fényválto-



A Q0957+561A (fehér körök) és B (fekete körök) fénygörbéi egymásra csúsztatva ($\Delta t = 417 \pm 3$ nap). A kis inzertek a periódusanalízis által másodlagosan valószínűsített 540 napos fáziscsúszással készültek; jól látszik, hogy nem érhető el teljes fedés

zásával. Legyen egy gravitációs lencsénk D_L távolságban, egy változó fényességű fényforrásunk D_S távolságban, illetve legyen a két kép fényváltozása között valamilyen Δt időkülönbség. Refsdal kimutatta, hogy Δt értéke arányos a D_L és D_S távolságok reciprokaiknak különbségével, azaz, ha valamilyen független módon meghatározuk D_L és D_S arányát, akkor két fénygörbe közötti fáziscúsúsás kimérésével megkaphatjuk mind a kvazár, mind a leképező galaxis távolságát. D_L és D_S arányát a Hubble-törvénnyel becsülhetjük meg, tehát meg kell mérni a kvazár és a galaxis vöröseltolódását, amelyek aránya éppen a távolságok aránya lesz. Az arányképzés miatt a távolságok aránya nem tartalmazza a Hubble-állandót, tehát abszolút távolságmérés válik lehetővé! A távolságból és vöröseltolódásból pedig fordított úton járva a Hubble-állandó értékére következtethetünk. A módszerben el van rejtve egy bonyolult elméleti gravitációs lencse-modellezés is, így egy adott objektum esetében a bizonytalanságok meglehetősen nagyok. Ám ha több tucat, esetleg több száz ilyen rendszerre elvégezhetnénk a méréseket, egész megbízható eredményt kaphatunk a Hubble-állandó értékére.

1997-ben T. Kundic és munkatársai közölték a Q0957+561A és B fénygörbéinek elemzését. Több éves megfigyelés-sorozattal kimutatták, hogy a két kvazárkép ugyanazt a fényváltozást mutatja, csak éppen a B kép 417 ± 3 nappal később követi az A kép fénygörbéjét (l. ábra). Ebből a leképező galaxis távolságát $1400\text{--}2100$ Mpc közé tették, a Hubble-állandóra pedig 64 ± 13 km/s/Mpc értéket kaptak. Ez lényegében tökéletesen megegyezik a mostanában leginkább elfogadott 70 ± 7 km/s/Mpc-kel (l. fentebb).

Hosszú utat jártunk be a számítógépes billentyűzettől kiindulva a 2000 Mpc-re levő gravitációs lencsékig. Közben betekintettünk az utóbbi évek távolságméréssel kapcsolatos eredményeibe, valamint láthattuk, hogyan keverednek a megfigyelési eredmények az elméleti jóslatokkal. Az extragalaktikus csillagászat robbanásszerű fejlődésen esett keresztül az elmúlt $20\text{--}25$ évben, amit legapróbb részleteiben gyakorlatilag lehetetlen követni. Reméljük, hogy Kedves Olvasó is hasonlóan élvezte a fenti utazást a galaxisok világába, és bízunk benne, hogy ha legközelebb távcsővégre kap közülük egy szép példányt, pár pillanatra megáll és elmereng a Világegyetem szépein, illetve az emberi megismerés csodálatosságán.

Jelen írás elkészítésénél nagyban támaszkodtam Stephen Webb „Measuring the Universe – The Cosmological Distance Ladder” (Springer-Praxis, 1999) könyvére, valamint a Szegedi Tudományegyetem negyedéves csillagász hallgatóinak tartott Általános csillagászat előadásaimra.

KISS LÁSZLÓ

MCSE-kiadványok a Műszaki Könyvruházban és a Technika Könyvesboltban!

Felhívjuk tagjaink és az érdeklődők figyelmét, hogy a Műszaki Könyvruházban is kaphatók az MCSE egyes kiadványai (Évkönyvek, a Meteor friss számai és csillagásztörténeti kiadványaink).

A Műszaki Könyvruház címe: Budapest VI. ker., Liszt Ferenc tér 9.

A Technika Könyvesbolt címe: Budapest XI. ker., Bartók B. út 15.