

# Égboltfelmérési módszerek szerepe a Naprendszer vizsgálatában

Szabó M. Gyula

*ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris  
Kutatóközpont, Szombathely, HUNGARY*

## Bevezetés

A Big Data módszerek egyik leglátványosabb hasznélvezője a csillagászat. Jól jelzik ezt az utóbbi években, évtizedekben induló égboltfelmérések eredményei, a kozmológiai léptéktől a Naprendszerünk vizsgálatáig terjedő megannyi távolságskálán. Jelen cikk a módszerek fejlődésének áttekintése után a Naprendszer vizsgálatát érintő, közelmúltbeli eredményeket ismerteti.

## Történelmi előzmények

A csillagászat klasszikus vizsgálati módszere az egyedi objektumok minden részletre kiterjedő vizsgálata. Égboltfelméréskor viszont nagyon sok adat egyidejű vizsgálatával megsokszorozzuk a kiértékelhető mérések számát, emiatt pontosabb átlagokat kaphatunk; másrészt az adatok egymással való összevetése minőségileg új lehetőségeket nyit meg, és korábban nem megfigyelhető jelenségek fölismerését teszi lehetővé.

Ezt csillagászat-történeti példákkal lehet illusztrálni. Már a legkorábbi csillagászati megfigyelésekből is készült olyan katalógus, amely valamilyen szempont alapján kiválasztott égi objektumok teljes körű összefoglalására vállalkozott. Az első jelentős, még szabad szemes "égboltfelmérés" Hipparkhosz görög csillagász (Kr. e. 190-125) nevéhez köthető, aki az Alexandriából látszó égbolton 850 csillag fényességét és pozícióját gyűjtötte össze. Katalógusát majdnem kétezer éven keresztül használták. Hipparkhosz a csillagok pozícióját korábbi mérésekkel összevetve azt tapasztalta, hogy hosszú idő alatt a tavaszpont – az Egyenlítő valamint a Föld pályasíkja égi vetületeinek egyik metszéspontja – kelet felé mozgott az ekliptikán. Ez a megfigyelés helyes, a Föld precessziójából adódóan a forgástengely lassan elfordul, amit Hipparkhosz ezzel a felméréssel kísérletileg fölfedezett.

A távcső feltalálásával kiderült, hogy a Tejút számtalan csillagból áll. A Galaxis méretének és alakjának eldöntése céljából William Herschel 684 égiterrületen számlálta meg a csillagokat. Majd föltételezve, hogy minden csillag egyforma fényességű (és eltekintve az akkor még nem ismert csillagközi fényelnyeléstől) elkészítette a Galaxis térképét. Természetesen ez a térkép a Nap kis környezetéből vett adatokra épül, ám a rajzolt alakzaton jól azonosítható a Galaxis korong alakja. A Napot Herschel hibásan majdnem a Galaxis centrumába helyezte, de

az a megfigyelése alapján véve helyes, hogy a Nap nem a Tejútrendszer közepén foglal helyet.

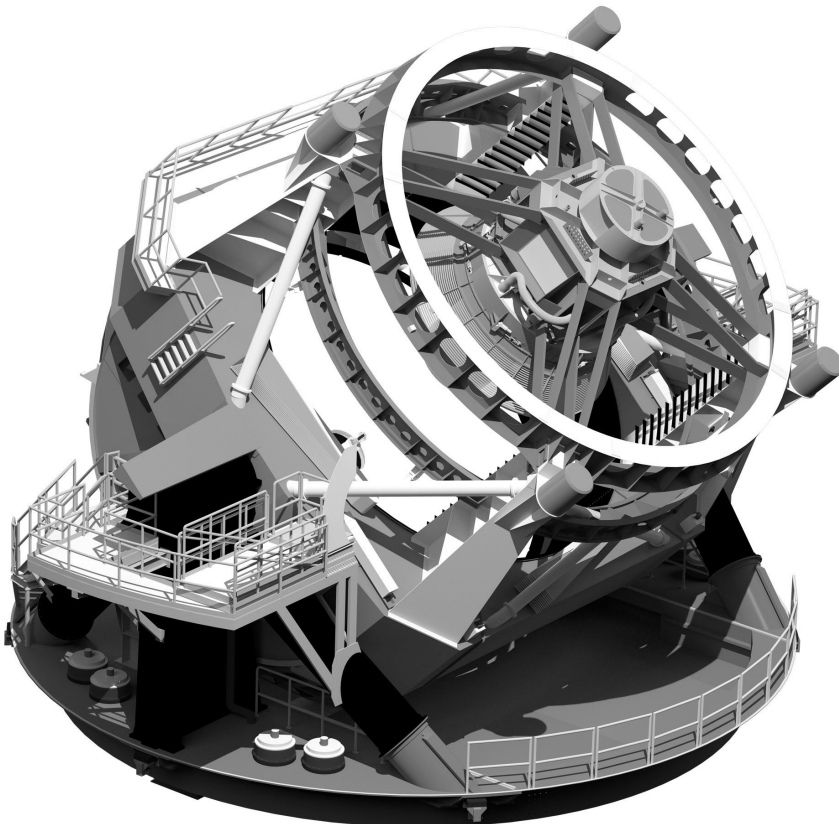
A 18-19. században egyre több vizuális technikával összeállított csillagkatalógus született. Ezek közül kiemelkedő a fotográfia elterjedése előtti utolsó nagy katalógus, a Friedrich G.W. Argelander által 1859-1862 között összeállított Bonner Durchmusterung, amely az északi égbolt 324 188 csillagát tartalmazta 9 magnitúdó határfényességig. E katalógus alapján született meg az első jelentős fotografikus égboltfelmérés, a csillagokról színképi információt is tartalmazó Henry Draper-katalógus. E felmérésben több mint 225 ezer csillag spektrumát vették föl több műszerrel. A teljes katalógus 1924-ben jelent meg, 1949-ig két újabb kiegészítéssel. A fölmérés legfontosabb eredménye a csillagok színképosztályozásának megalkotása volt, ami egyenesen vezetett a csillagok modern asztrofizikai elméletéhez. A 20. század első felét tekintve meg kell még emlékezni a Hubble-törvény felfedezéséről, amely szerint a galaxisok színképében észlelt vöröseltolódás ("félklasszikus" értelmezésben a galaxisok tőlünk való távolodási sebessége) arányos a távolságukkal; vagyis az Univerzum tágul. Ez az eredmény Vesto Slipher vöröseltolódás-katalógusának és Edwin Hubble saját méréseinek összevetésével, vagyis részben égboltfelmérési technikával született meg.

## Napjaink égboltfelmérései

A 20. század második felének első kiemelkedő jelentőségű felmérése a Palomar Observatórium Égboltfelmérés (POSS). 1950-1957 között végezték az első fotografikus felmérést, amely a nyolcvanas évek közepén kiegészült egy jobb (változó, jellemzően 20,5 magnitúdó körüli) határfényességű, kétféle fotoemulzió által meghatározott kék és vörös hullámhossztartományt lefedő felméréssel. A felvételek digitalizálva szabadon elérhetők; számos égterületen máig ez a felmérés a legjobb határfényességű referencia a vizuális tartományban.

2000-ben indult a Sloan Digitális Égboltfelmérés (SDSS). Az elsősorban kozmológiai célú felmérés 2,5 méteres távcsővel dolgozott; az Arizonából látható teljes égbolt mintegy harmadrészét számos alkalommal végigmérte, 120 megapixeles kamerája 22 magnitúdós határfényességig mindent megörökített. Ötszín-fotometriai (u: 354 nm, g: 475 nm, r: 622 nm, i: 763 nm, z: 905 nm központi hullámhosszú) katalógusában mintegy félmilliárd forrás szerepel, amihez százezer csillag, száz-ezer kvazár és egymillió galaxis spektroszkópiái vizsgálata is társul. 2006 óta az SDSS II felmérés a Galaxis szerkezetét tanulmányozza, és távoli szupernóvákat keres. Az SDSS-sel nagyjából egy időben váltak publikussá a Két Mikronos Égboltfelmérés (2MASS) 1997 és 2003 között gyűjtött adatai. A megfigyelések a közeli-infravörös hullámhossztartományon az 1 000-2 500 nm közötti tartományt fedik le, a felmérés az egész eget tartalmazza. Határfényessége megközelíti az SDSS-ét, ami jelentős teljesítmény, hiszen az éjszakai égbolt természetes, rekombinációs eredetű fénylése e hullámhossztartományban egy nagyváros fényszennyezésével vetekszik.

A milliméteres-centiméteres hullámhossz-tartományban figyelhető meg a mikro-hullámú háttérsugárzás, illetve a kozmikus háttéren a mai világegyetem ujjenyomatai. Az ezt megfigyelő COBE-műhold 1989-ben állt pályára, a WMAP pedig 2001-ben, mindkét adatgyűjtés hosszú éveken keresztül zajlott. A rádióégboltfelmérések a 6 cm és 1 m közötti hullámhossztartományt fedik le földi megfigyelésekkel (GB6 6 cm, 1986-1987; FIRST 20 cm, 1993-2004; NVSS, 1997-ben publikálták a 20-90 cm tartományt). Az NVSS utódaként éppen napjainkban zajlik a 4 méteres hullámhosszon a VLSS-felmérés. Az optikai tartománytól a rövidebb hullámhosszak felé haladva a GALEX-műhold (Galaxy Evolution Explorer, 2003-tól) távoli és közeli ultraibolya, 153 és 231 nm-es hullámhosszon végzett megfigyelései következnek. Az extrém rövid hullámhosszak kategóriájában két űrtávcsöves programot, a ROSAT (1990-1999) röntgenhullámhosszú égboltfelmérést és a Compton Gammasugár-obszervatórium egyik műszerével végzett EGRET (1991-2000) gammaégbolt-felmérést kell megemlítenünk.



**1. ábra.** A közeljövő talán legfontosabb égboltfelmérő műszere, a Large Synoptic Survey Telescope (LSST).

A spektroszkópiai technikát használó égboltfelmérések segítségével csillagok és galaxisok fontos fizikai paraméterein túl ezek radiális sebességét is megmérhetjük. A legfontosabb források a 2dF Galaxisspektroszkópiai Felmérés (205 ezer galaxis és kvazár radiális sebessége, 1997-2002) adatai, az Angol-Ausztrál Távcső (AAT) adataira épülve, és az SDSS spektroszkópiai adatbázisa hasonló mennyiségű objektummal. Folyamatban van a Radiális Sebesség Kísérlet (RAVE) földi bázisú felmérés, amely a galaktikus fősík kivételével lefedi a déli égboltot, és 50 millió csillagról szolgáltat majd radiálissebesség-adatokat. Az ESA Gaia szondája nagyfelbontású spektrumokat és ezekből származtatott nagyon pontos asztrometriát és fotometriát végez az egész égboltról, a nagyjából egymilliárd célcillagot a tervek szerint átlagosan hetvenszer fogja végigszkennelni. Az űrobszervatórium idén július 25-én kezdte meg a tudományos méréseket, és a tranzienskereső promgramban már szupernóvát is talált. A belátható jövőben több földi bázisú, nagy- vagy óriástávcsöves kategóriába sorolható optikai program is indul: ezek közül a legígéretesebbek a Pan-STARRS és a Nagy Szinoptikus Égboltfelmérés (LSST), amelyek az elkövetkező tizenöt év csillagászatában meghatározó szerepet tölthetnek be.

## A Naprendszer az égboltfelmérések szemével

Az utóbbi évtizedben százezer számra fedezték föl a kisbolygóöv tagjait, mára a főöv 2-4 km-es méretnél nagyobb égitestjeinek túlnyomó többségét ismerjük. A nagyon pontosan ismert pályájú, így katalógusszámmal ellátott kisbolygók darabszáma az 1980-as években jellemző, évente kis mértékben növekvő pár 1 000 körüli értékről a LINEAR (1998-) és NEAT (2001-) programok hatására ugrásszerű növekedésbe kezdett, és mára meghaladta a 300 000 darabszámot (3. ábra). A bejelentett, de még nem elég pontosan ismert pályájú kisbolygókat is figyelembe véve több, mint félmillió aszteroidáról tudunk. Ezek a Naprendszer minden régiójában megtalálhatók, és jól mintavételezik az evolúciós hatásokat a Naprendszer egész területén. Jelenleg több mint 2 000 üstökösöt ismerünk.

Megfigyelésükkel képet kapunk a jeges égitestek eloszlásáról és viselkedéséről, és általában a víz szerepéről, a naprendszerekben előforduló vízraktárakról, és nem utolsósorban a víz transzportjáról – amely az élet szempontjából is kimagaslóan fontos szempont.

A kisbolygókereső programok fő célja, hogy fölfedezzük a Földre is veszélyt jelentő égitestek legnagyobb képviselőit – mára már több mint ezer potenciálisan veszélyes kisbolygót tartanak számon. A pályaelemek terében elkülönülő, ismert kisbolygócsaládok színe is különböző az egyes csomókban – ez erősen alátámasztani látszik azt az elképzelést, hogy a kisbolygók több, jellegzetes (bazaltos, szilikátos, kondritos) anyagú égitest katasztrofális ütközésével és hierarchikus szétbomlásával jöttek létre (Ivezic és mtsai. 2002). Az elmúlt években a Naprendszer távolabbi tartományai is benépesülnek kis égitestekkel. Edward Bowell ASTORB katalógusa alapján 2012. szeptember elején 2 000 darab körül jár a

Jupiter Lagrange-pontjai körül keringő, ismert trójai kisbolygók száma. Az égi mechanika szerint a két trójai Lagrange-pont egyformán stabil – ennek fényében meglepő, hogy a vezető pont körül mintegy 1,6-szor több égitestet találunk (Szabó és mtsai. 2007; jelen értekezés 3. fejezete). Ez valószínűleg a Naprendszer kialakulása körüli állapotokat és a bolygók korábbi vándorlásának hatását tükrözi (Pál és Süli, 2006). A főövhez hasonlóan már a trójai öv alcsaládjait is kimutatták (Roig és mtsai. 2008).

Az elmúlt években kezdett benépesülni a Neptunuszon túli terület (TNO objektumok; Barucci 2008), bár az objektumok nagy naptávolsága és lassú mozgása miatt egyelőre csak a legnagyobb tagokat sikerült megfigyelni. Jelentős áttörést hozott a területen a Herschel űrobszervatórium. A közlés alatt álló eredmények több mint 130, 100-2400 km közötti átmérőjű TNO megfigyelésével fedik fel e távoli égitestek változatos albedóit, méreteloszlását és e paramétereit, valamint ezek korrelációit a pályaelemekkel (Müller és mtsai. 2012).

A Naprendszerhez tartozó nagy objektumok, a bolygók és azok holdjainak vizsgálatában az égboltfelmérések szerepe csekély. Ennek igazi erőssége a kis égitestek, kisbolygók és üstökösök vizsgálata. Mivel ezek az égitestek szinte mindenhol megtalálhatók a Naprendszerben, megfigyelésük az égi mechanika, valamint a Naprendszer és általában a bolygórendszerek fejlődésével kapcsolatos vizsgálatok elengedhetetlen megfigyelési alapja.

Az SDSS eredményei szerint a pályaelemek terében elkülönülő, ismert kisbolygó-családok színe is különböző az egyes csoportokban. Ez erősen alátámasztani látszik azt az elképzelést, hogy a kisbolygók több, jellegzetes (bazaltos, szilikátos, kondritos) anyagú égitest katasztrófális ütközésével és hierarchikus szétDarabolódásával jöttek létre. Jól megfigyelhető, hogy a mikrobecsapódások és a Nap ultraibolya sugárzásának hatására az idős kisbolygók felszíne egyre vörösebb és sötétebb lesz: tehát egy kisbolygó színárnyalata jó korindikátor. Magyar kutatások alapján mintegy 20%-uk esetében van jelen a felszínen jól detektálható, a környezettől eltérő színű folt, amelyek különböző folyamatok (pl. kráterképződés) eredményei lehetnek, de biztosan nem jellemző, hogy eltérő színű égitestek összetapadásos ütközéséből származnak.

A Naprendszer története során az eredetileg kialakult, néhány száz vagy ezer kilométer méretű kisbolygók óriási ütközésekben kisebb-nagyobb darabokra törttek, és azóta is számtalan kisebb becsapódás érte a felszínüket. Kiderült, hogy a kisbolygók alakja a becsapódások hatására fejlődik: a fiatal családokban inkább elnyúltabb, az idősebb családokban a gömb alakhoz közelebb álló égitesteket találunk. Ennek oka minden bizonnyal az, hogy a kis becsapódások két-hárommilliárd év alatt "legömbölyítik" a kisbolygókat. A kis becsapódások rengéseket okoznak, amelyek hatására az anyag a csúcsokból a völgyekbe vándorol.

Az utóbbi években a Naprendszer távolabbi tartományjaiban is egyre több kis égitestet fedeznek fel. Kétezer körül jár az ismert pályájú trójai kisbolygók száma. Ezek a főövbeli kisbolygóknál távolabbi, a Jupiter pályáján, az égi mechanikai szempontból stabil Lagrange-pontok körül keringenek. A két trójai Lagrange-

pont egyformán stabil, ennek fényében meglepő, hogy a vezető pont körül mintegy 1,6-szer több égitestet találunk. Ez valószínűleg a Naprendszer kialakulása körüli állapotokat és a bolygók korábbi vándorlásának hatását tükrözi. A jelenség kimutatása szintén magyar kutatócsoportokhoz köthető. A fővőhöz hasonlóan már a trójai öv alcsaládjait is kimutatták.

## A jövő

Hasonlóan a Big Data módszerek összességéhez, a csillagászati alkalmazások előtt is fényes jövő áll. A Large Synoptic Survey Telescope (LSST) már a kétezres évek elején egyértelműen kijelölte a fejlődés irányát. Ez a meder az elmúlt években a szemünk láttára alakította át a csillagászat művelésének "vízfolyásait", megannyi észlelési programot a "survey astronomy" filozófiájának eszköztárával megerősítve, újragondolva. Azok az adatbázisok, amelyek már ma a legkülönbözőbb problémákban segítségül hívható adatforrásokot jelenthetik (csak példaképpen: SDSS optikai, 2MASS, WISE, Akari infravörös, Galex, ROSAT ultraibolya/röntgen, 6 és 20 cm-es rádiófelmerések, MACHO, OGLE, ASAS, NSVS idősoros felmerések, RAVE, GAIA asztrometriai/spektroszkópiai felmerések, Kepler, K2, CHEOPS, TeSS, PLATO exobolygókutató-felmerések), egy-két évtizede még elképzelhetetlen súllyal jelennek meg a csillagászat eszköztárában. A módszerek pedig magukkal hoztak megannyi új, ma már értelezhető és megválaszolható kérdést, jelentősen a "survey astronomy" lehetőségeihez alakítva a csillagászat új irányait.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkkel kapcsolatos munkákat az ESA PECS No. 4000110889/14/NL/NDe, az OTKA K104607, Szombathely Megyei Jogú Város (S-11-1027 és 61.360-22/2013 megállapodások) és az MTA Bolyai Posztdoktori Ösztöndíja támogatta.