

ÉGBOLTFELMÉRÉSEK A VILÁGEGYETEM MEGISMERÉSÉNEK SZOLGÁLATÁBAN

Szabó M. Gyula

PhD, egyetemi tanársegéd, tudományos munkatárs,
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék, MTA KTM CSKI
szgy@titan.physx.u-szeged.hu

Az utóbbi időben egyre többet hallani a csillagászat olyan újdonságairól, amelyeket nem egyedi észlelések, hanem mindent megfigyelő égboltfelmérések, automatizált műszerek folyamatos észlelési programjai alapján fedeztek fel. A megfigyelési módszerek és a számítástechnika fejlődése megsokszorozta az égboltfelmérési technika erejét. Mi ennek a titka? Erre a kérdésre vállalkozom indirekt választ adni az égboltfelmérések legjelentősebb eredményeinek áttekintésével.

Történelmi megfigyelések

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 felfedezését teszi lehetővé.

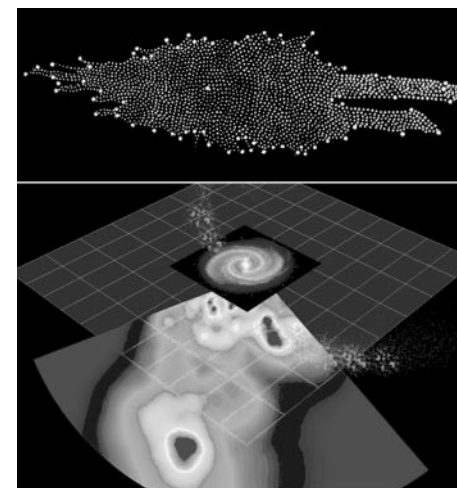
Ezt csillagásztörténeti példákkal lehet illusztrálni. Már a legkorábbi csillagászati megfigyelésekből is készült olyan katalógus, amely valamilyen szempont alapján kiválasztott

égi objektumok teljeskörű összefoglalására vállalkozott. Az első jelentős, még szabad szemel „égboltfölmérés” *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 égterületen 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 (1. ábra).

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



1. ábra • A Tejútrendszer legelső (*William Herschel*, 1785) – fent, és legújabb modellje (SDSS, 2009) – lent.

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 Observatorium 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 fotóemulzió által meghatározott kék és vörös hullámhossztartományt lefedő felméréssel. A felvételek digitalizálva szabadon elérhetőek; számos égterületen máig ez a felmérés a legjobb határfényességű referencia.

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. Öt-szín-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 spektroszkópiai 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 1000–2500 nm közötti tartományt fedik le, a felmérés az egész eget tartalmazza. Határ-fényessége megközelíti az SDSS-ét, ami jelentős teljesítmény, hiszen az éjszakai égbolt természetes, rekombinációs eredetű fénylése e hullámhossztartományban egy nagyváros fényszennyezésével vetekszik.

A milliméteres-centiméteres hullámhossztartományban figyelhető meg a mikrohullámú háttérsugárzás, illetve a kozmikus háttérben a mai világegyetem ujjlenyomatai. Az ezt megfigyelő COBE-műhold 1989-ben állt pályára, a WMAP pedig 2001-ben, mindkét adatgyűjtés hosszú éveken keresztül zajlott. A rádióégbolt-felmérések 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 publikáltak 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) gamma-égbolt-felmérést kell megemlítenünk.

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–Auszt-

rál 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 (várható felbocsátása 2012) nagyfelbontású spektrumokat és ezekből származtatott nagyon pontos asztrometriát és fotometriát végez majd kb. a RAVE határ-fényességével az egész égboltról. 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 tízenöt év csillagászatában meghatározó szerepet tölthetnek be.

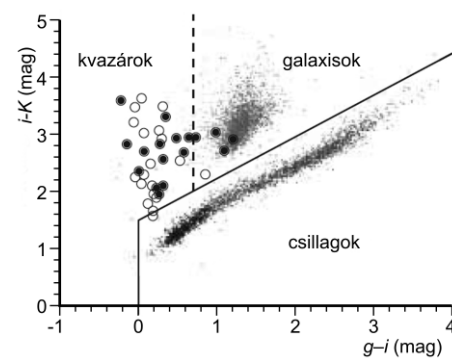
Virtuális obszervatórium

Az égboltfelmérések által termelt adatok az elérhető legjobb technikával készülnek. Ha a méréseket közzéteszik az interneten, a hozzáférés rendkívül egyszerűvé válik, és a költséges, időigényes és az adatminőség szempontjából kockázatos egyedi megfigyelési programok helyébe az adatbányászat léphet. Így virtuálissá válik az adatgyűjtés, amely tény megalapozza a *virtuális obszervatórium* fogalmát. Az adatkezelés azonban további ígéretes perspektívákat is kínál.

Nagy jelentőségű, hogy egy-egy objektum különböző hullámhosszakon kapott összes mérési adatát egyben szemlélhetjük, hiszen így ábrázolhatjuk a spektrális energiaeloszlást, ami egy kis felbontású spektrumnak tekinthető. Az adatok ábrázolása apró trükköket igényel, hiszen sok információt egyszerű, áttekinthető módon, síkban ábrázolva kell bemutatni (2. ábra). Ezzel a technikával példá-

ul összehasonlíthatóvá válnak az optikai és rádiótartománybeli fluxusok arányai, a színindexek a megfelelő kétszínidiagramon (így egyszerre négy adat ábrázolható). A rádiótartománybeli kétszínidiagram alapján lehet színezni az adatpontokat, amelyeket például optikai kétszínidiagramon lehet elhelyezni (egyszerre nyolc adat ábrázolható).

A keresésekhez jól használhatók egyes robotok, pl. a Gator keresőrendszer, amely a különböző helyről származó adatokat koordináták alapján azonosítja a 2MASS adataiban. A Virtuális Obszervatórium (VO) projekt mintegy öt éve folyamatosan épülő rendszer: a kiválasztott objektumok adatai már előre kigyűjtve szerepelnek, a különféle égboltfelmérésekben szereplő adatait táblázatszerűen vizsgálhatjuk, szűrhetjük, kereshetjük, és vehetjük össze. A felhasználó szempontjából jelentős, hogy egyre több forrás legyen elérhető a VO-n keresztül. A VO fejlesztésében magyar kutatók (Szalay A. Sándor, az MTA tagja, a Johns Hopkins Egyetem professzora, és munkatársai) közreműködése meghatározó.



2. ábra • Az optikai fotometriából származó g és i sávbeli, és a közeli-infravörös K sávbeli fényességekből számított $g-i$ és $i-K$ színindex alapján készített kétszínidiagramon jól elválnak egymástól a csillagok, a közönséges galaxisok és a kvazárok

A Naprendszer az égboltfelmérések szemével

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.

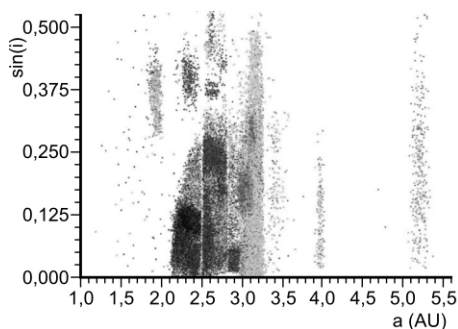
A nagyon pontosan ismert pályájú, így katalógusszámmal ellátott kisbolygók száma az 1980-as években enyhén növekvő, ezer körüli értékről a LINEAR- (1998-tól) és NEAT- (2001-től) programok hatására ugrásszerű növekedésbe kezdett, és mára meghaladta a kétszázezret (3. ábra). E programok célja, hogy fölfedezzük a Földre is veszélyt jelentő égitestek legnagyobb képviselőit. Mára már több mint ezer potenciálisan veszélyes kisbolygót tartanak számon, és a fővén 2–4 km-nél nagyobb méretű égitestjeinek túlnyomó többségét ismerjük.

Az SDSS eredményei szerint 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 szétदारabolódásával 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. kráter-

képződés) 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 törtek, 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 tartományában is egyre több kis égitestet fedeznek fel. Kétezer körül jár az ismert pályájú trójai kisbolygók száma. Ezek a fővonalú kisbolygóknál távolabb, a Jupiter pályá-



3. ábra • A kisbolygók pályahajlásának eloszlása (a a Naptól való távolság csillagászati egységben, i a pályasíknak az ekliptika síkjával bezárt szöge). A kisbolygók nagy számán kívül jól látszik a különböző kisbolygócsaládok léte, és a bizonyos naptávolságokban fellépő rezonanciaútrök is.

ján, 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 fővövhöz hasonlóan már a trójai öv alcsaládjait is kimutatták.

A Tejútrendszer szerkezete

Galaxisunk spirálgalaxis: a központi vidéket nagy kiterjedésű korong övezi, amelynek leglátványosabb sajátossága, hogy ebben tekerednek a spirálkarok. A korong vertikális szerkezete a Galaxis történetével kapcsolatos ismereteink egyik legfontosabb forrása. Ezt csillagszámlálással, elsősorban az SDSS és a 2MASS adataival lehet föltérképezni (1. ábra). Az eredmények megerősítették, hogy a Galaxis három fő korongkomponenst tartalmaz, a csillagkeletkezési területek által kijelölt (kb. 200 fényév skálamagasságú) vékony korongot, a csillagok nagy részét adó vastag korongot (kb. 1000 fényév), illetve a csillagok környezetünkben mintegy 4 %-át adó öreg korongot (kb. 5000 fényév skálamagassággal). A korong lapos, a Galaxis centruma tőlünk mintegy 25 ezer fényévre van.

A csillagközi anyag különböző formáinak eloszlását jellemző skálamagasságokat meghatározva kiderült, hogy a csillagkeletkezési területek, illetve a hideg felhőmagok rajzolják ki a vékony korongot. Ezzel beigazolódott, hogy a csillagok a Galaxisban (és minden bizonnyal a spirálgalaxisokban általában) a fősíkhöz közel jönnek létre, és csak később, különféle dinamikai hatások (csillag-csillag kölcsönhatás, csillag-spirálkar kölcsönhatás,

galaxisütközések stb.) következtében szóródnak ki a csillagok alkotta vastag korongba.

Az infravörös tartományt vizsgáló űrobservatóriumok (lásd *Ábrahám Péter és Kiss Csaba* tanulmányát e számunkban – a szerk.) megfigyelték, hogy a csillagok hogyan keletkeznek a csillagközi anyag összehúzódásából. Ugyanilyen fontos kérdés a csillagkeletkezés üteme, illetve a különböző tömegű csillagok térbeli sűrűsége a Nap környezetében. A legkisebb tömegű (ultrahideg) vörös törpecsillagokat és a barna törpéket, a késői M-, az L- (lítium törpe) és T- (metán törpe) spektrálosztályt a DENIS, az SDSS és a 2MASS mérte föl. A három mérés megháromszorozta az ismert ultrahideg csillagok számát.

A közeli-infravörös tartományban, a 2 mikrométer körüli hullámhosszakon a csillagközi por már majdnem teljesen átlátszó. Így a 2MASS felmérés megmutathatta a Galaxis legfiatalabb csillaghalmozait, amelyek a keletkezésükben közrejátszó csillagközi anyag fényelnyelésétől még nem látszanak az optikai hullámhosszakon. A 2MASS a Tejútrendszer középső vidékén megmutatta az egyedi csillagokat, lehetővé téve vizsgálatukat az optikaihoz közeli hullámhosszon, ám az optikai megfigyelést ellehetetlenítő, 40 magnitúdós fényelnyelés kedvezőtlen hatásai nélkül. Természetesen már korábban is megfigyelték a Galaxis centrumát infravörös hullámhosszakon, a 2MASS adatai azonban a központot az egész Galaxisba illeszkedve is megmutatták. Kiderült, hogy a Galaxis központjában a csillagok nagyjából hengersizmetrikus eloszlást követnek, azaz a Galaxis magja elnyúlt – ez a szerkezet a küllős spirálgalaxisokra jellemző. A Galaxis középpontjában több fiatal, nagy tömegű csillaghalmozatot fedeztek fel, ami mutatja, hogy a csillagkeletkezés a középpont környékén is jelentős.

A Galaxis külső tartományait, halóját az öreg, vagyis a Hertzsprung–Russell-diagram horizontális ágán levő óriáscsillagok segítségével lehet a legkönnyebben vizsgálni. Szerencsés, hogy e csillagok szerkezete, így színindexei kissé eltérnek a fiatalabb, I. populációs óriáscsillagok színétől (az SDSS $u-g$ szín a felszíni gravitációra érzékeny, a $g-r$ a hőmérsékletre), így egyszeri fotometriai vizsgálattal is nagy hatékonysággal azonosíthatók. Ha horizontális ági változócsillagot találnak, az nyilvánvalóan RR Lyrae típusú változócsillag, amelynek abszolút fényessége, ebből következően távolsága elég pontosan ismert. Már az SDSS első adataiban sikerrel alkalmazták ezt az eljárást, több mint 3500 RR Lyrae jelöltet azonosítva az 500 négyzetfokos területen. Ezzel a technikával 250 ezer fényévig feltérképezhető a Tejútrendszer halója, ideértve a kísérőgalaxisokhoz vezető hidak szerkezetét is. Az eddigi eredmények alapján a halóban a csillagsűrűség a távolság harmadik hatványával fordított arányban változik, ám a lokális szubstrukturák hatása igen nagy. Valószínű, hogy a nagymértékű inhomogenitások korábban elnyelt törpegalaxisok szétszórt csillagaiból származnak: azaz a Tejútrendszer halója nagyrészt akkréciós eredetű. Valójában a Galaxis számos tartományában vannak olyan lokális inhomogenitások, amelyeket az elnyelt törpegalaxisok szétszórt csillagai okoznak. Úgy tűnik, a *galaktikus kannibalizmus*, galaxisok ütközése és összeolvadása nem egzotikus folyamat, hanem éppenséggel kulcsfontosságú a nagy tömegű galaxisok kialakulásában.

A Lokális csoport

Tejútrendszerünk egy kisebb galaxistársulás, a *Lokális csoport* része. A Galaxis nagy tömege miatt számos törpegalaxis kering körülöt-

tünk: a Tejútrendszer a környezetével a Lokális csoporton belül saját alrendszert alkot. A mai napig húsz kísérőgalaxist ismerünk, melyek közül a legkorábban felfedezett kettő a két Magellán-felhő, a két legutóbbi pedig 2007-es felfedezés. Figyelemreméltó, hogy ezek majdnem mindegyikét égboltfelmérésekkel találták meg. A már említett Magellán-felhőkön kívül a Sculptor és a Fornax törpegalaxisok a kivételek: ezeket *Harlow Shapley* 1938-ban egy dél-afrikai expedíció során fedezte föl.

1950-ben és 1954-ben a Palomar Observatóriumban fedezték föl a Leo I, Leo II, Draco és Ursa Minor törpegalaxisokat, melyek abszolút fényessége -9 és -12 magnitúdó közötti. A második Palomar-felmérés segítségével találták meg a Carina törpegalaxist 1977-ben. Az UK Schmidt-távcsővel végzett égboltfelmérés az 1990-es évek elején két kísérőgalaxis felfedezéséhez vezetett. A Sextans törpegalaxist tőlünk 320 ezer fényévre 1990-ben találták meg, ez már az előzőeknél halványabb, -8 magnitúdó abszolút fényességű. 1994-ben került sor aztán a harmadik legfényesebb kísérőgalaxis, a Sagittarius törpe felfedezésére. Vörös törpe csillagok radiálissebesség-mérését végezték az Angol-Ausztrál távcsővel, amikor nyilvánvalóvá vált, hogy a Tejút korongjába fűrődő alakzatban a csillagok jellegzetesen együtt mozognak. A területet a csillagközi fényelnyelés és a Tejút korongja miatt nehéz tanulmányozni; pedig kár, hiszen egy -15 magnitúdó abszolút fényességű galaxist láthatnánk arrafelé, a Galaxis korongjának túlsó peremén.

Egy évtized szünet után, 2003-ban kapott új lendületet a kísérőgalaxisok felfedezése. Ekkor a 2MASS adataiban találtak egy jellegzetes csillagpopulációt, amely egy kisebb, a Canis Major területén található csomóból és

az ebből kinyúló nagyon hosszú csápokból áll. Itt egy, a korong körül keringő galaxisroncs szétszóródásának lehetünk szemtanúi; az árapálysavok valójában több rotációra lemaradva is követhetőek a Canis Major irreguláris törpegalaxis mögött. 2005-ben újabb galaxist fedeztek föl: a tőlünk 360 ezer fényévre keringő, mindössze $-6,8$ magnitúdó abszolút fényességű Ursa Major törpegalaxist. Ez a felfedezés egyben az SDSS első törpegalaxisát jelenti, amelyet két újabb galaxis követett: az egyik esetben a legtávolabbi, a másikban viszont a legközelebbi kísérőgalaxissal van szó. A Canes Venatici törpe tőlünk 720 ezer fényévre kering, abszolút fényessége $-7,9$ magnitúdó. A legközelebbi galaxis, a Bootes törpe mindössze $-5,8$ magnitúdóval, azaz egy szerény gömbhalmaz fénytelsítménnyel ragyog, tőlünk nem egészen 200 ezer fényévre. 2007-ben az SDSS II a Lokális csoporthoz tartozó újabb öt galaxis felfedezését jelentette be, és a program végére több tucat további fölfedezést várnak.

A távoli Univerzum és kozmológiai vizsgálatok

Galaxisok típusai, tulajdonságai: A galaxisokat gyakran osztályozzák a Hubble-féle rendszer szerint (E0–E7 elliptikus, Sa, Sb, Sc spirális), amelynek számos, további morfológiai szempontokat (átmeneti formák, küllő, különböző gyűrűk stb.) figyelembe vevő kiterjesztése is létezik. Kozmológiai távolságok esetén azonban a legtöbb objektum csillagszerű vagy igen kis szögátmérőjű, ebből következően a Hubble-osztályok földi megfigyelések alapján kozmológiai távolságban nem értelmezhetőek. A spektrális energiaszlás alapján alkotott fotometriai osztályozás a galaxisok SDSS-színindexein alapul. A galaxis spektroszkópiái típusát egy törtszám jellemzi, ez lényegében

azt méri, hogy mennyire kék vagy vörös az adott galaxis. A meglepő tulajdonsága ennek az osztályozásnak a bimodalitás, vagyis az, hogy a galaxisok nagy többsége két fő fotometriai típus egyikébe teljes biztonsággal besorolható: így beszélhetünk kék és vörös galaxisokról. A két osztály morfológiai paramétere (központi koncentrációja) szintén különböző. Ez az osztályozás részben megfeleltethető a Hubble-típusoknak: a kék galaxisok nagy része spirális, a vörös galaxisok nagy része elliptikus ugyan, de bizonyítható, hogy a megfelelés nem tökéletes: vannak kék elliptikus és vörös spirális galaxisok is, mintegy 10 % arányban. Az átmeneti vagy bizonytalan besorolású objektumok csoportja nem nagy, illetve az átfedés mértéke fotometriai hibákkal magyarázható. Tekintetbe véve a Hubble-osztályok keveredését a fotometriai csoportokban, jogosan vetődik föl a kérdés, hogy miért nem figyelünk meg átmeneti fotometriai típusú objektumokat – erre ma még nem tudjuk a pontos választ.

A kék és a vörös galaxisok egy galaxis-halmazban belül másként is rendeződnek, a kék galaxisok jobban csomósodnak. Ez nem meglepő, tekintetbe véve, hogy a vörös galaxisok közé számos kisebb elliptikus, sferoidális és egyéb törpegalaxis tartozik, amelyek a galaxis-halmazok halójában és a halmazok közti mezőben is gyakran fordulnak elő.

Csillagkeletkezés, barionos és sötét anyag extragalaxisokban: A galaxisok építőelemeinek mennyiségét jól tudjuk becsülni égboltfelmérési technikákkal. Egy galaxis tömeg/fényesség aránya modellszámítások alapján jól becsülhető a 400 nm-es fényesség és a hidrogén Balmer-sorozatából a H δ vonal erősségének arányával. Az SDSS-fotometria és a galaxis vöröseltolódása alapján kiszámítható a galaxis távolsága és abszolút fényessége;

ez a már ismert tömeg/fényesség arányon keresztül a tömeg meghatározásához vezet. A látható tömeg közvetlenül becsülhető a fényesség alapján. A csillagközi anyag aránya becsülhető a $g-r$ és $r-i$ fényességek vörösedéséből; ugyanez lehetséges az emissziós galaxisok esetében a H α /H β arányból. A GALEX fluxusaival kiegészítve a spektrumokat a nagy tömegű csillagok és a por hatását még pontosabban figyelembe lehetett venni. Ha egy jól választott infravörös színindex alapján a portartalom becsülhető, a galaxis csillagkeletkezési rátáját a GALEX-SDSS-színindexek segítségével, tisztán fotometriai módszerrel szintén meg lehet mérni.

E módszerekkel lehetővé vált az egymilliárd SDSS-galaxis látható, csillagközi és sötét anyagának vizsgálata. Az eredmények szerint a nagy tömegű galaxisokban már jórészt lezajlott a csillagkeletkezés: az egymilliárd naptömegű galaxisok 10 %-a még csillagontó (tömegének 5 %-a az elmúlt százmillió évben keletkezett), ám a százmilliárd naptömegű objektumok között már egy ilyen sem találgunk. Figyelemreméltó, hogy 10 % elliptikus galaxis is van a nagy csillagkeletkezési rátájú csoportban. A galaxis csillagainak összömege függ a galaxis nehézelem-tartalmától (a csillagászatban a héliumnál nagyobb rendszámú elemekre összefoglaló néven fémekként hivatkoznak): nincsenek kis tömegű, kiemelkedően nagy fémességű galaxisok. Fontos eredmény, hogy a sötét anyag legalább 40 %-a is a galaxisokban van jelen.

A Hubble-úrtávcső mélyvizsgálati területeit (Deep Field) a GALEX segítségével is megfigyelték. Ezek további földi megfigyelésekkel kiegészítve több mint 8000, $z \approx 0,7$ vöröseltolódásnak megfelelő távolságban lévő galaxis fotometriai és morfológiai vizsgálataira is lehetőséget adtak. Látszik a morfológiai

és fotometriai paraméterek együttes fejlődése: a galaxisok megjelenését elsősorban a csillagkeletkezés határozza meg. A $z \approx 0,7$ távolságú galaxisok tulajdonságai hasonlóak a környezetünkhöz, de a csillagkeletkezési ráták átlagosan még magasabbak, mint napjainkban. Megfigyelhető, hogy a $z \approx 0,7$ kor és a mi korunk között még növekszik a vörös galaxisok darabszáma is.

Csillagontó és aktív galaxisok: A galaxisok két nagy csoportjában figyelhetünk meg jelentős emissziós vonalakat, amelyek azonban teljesen eltérő folyamatok miatt alakulnak ki. Az aktív galaxisok közepén egy sűrű tóruszba ágyazott, nagy tömegű aktív fekete lyuk helyezkedik el, amely folyamatosan nyeli el az anyagot az akkréciós korongon keresztül, erre merőlegesen pedig nagy energiájú plazmasugár tör elő, amely a rádiótartományban látványos. Az aktivitás emisszióra készíti a rendszer körüli diffúz csillagközi anyagot, amely az optikai spektrumban is megjelenik. A csillagontó galaxisokban valamilyen folyamat (például gravitációs kölcsönhatás) heves csillagkeletkezést indukál, és a fiatal csillagok ultraibolya sugárzása miatt figyelhetjük meg a csillagközi anyag optikai emisszióját. A kétféle folyamatot a csillagközi anyagra jellemző spektrumvonalak intenzitásaránya (például: NII/H α , OIII/H β) alapján lehet megkülönböztetni. A csillagontó galaxisok a megfigyelések szerint kékek és kis koncentrációs indexűek. A GALEX képein főleg a csillagontó galaxisok látszanak, de az aktív galaxisok 10 %-a is megjelenik, a ROSAT viszont leginkább az utóbbiakat látta.

A csillagontó galaxisok 60 mikrométeren 1 magnitúdóval fényesebbek az átlagos galaxisoknál. Ennek három lehetséges oka van: a csillagontó galaxisokban a por melegebb az átlagosnál; a por több az átlagosnál; a beeső

ultraibolya sugárzás erősebb az átlagos galaxisra jellemző értéknél. A helyes magyarázatra a GALEX által detektált ultraibolya sugárzás vezetett: a 60 mikrométeres sugárzás növekedésének elsődleges oka a csillagontó galaxis nagyobb ultraibolya fluxusa.

Kvazárok: A kvazárok a korai Univerzum fiatal, aktív galaxismagjai: a centrális fekete lyukba behulló, nagy mennyiségű anyag sugárzását látjuk. A fényforrás kis méretű, és a kvazárok messze vannak tőlünk, ezért kiterjedésük ezred ívmásodpercben mérhető: emiatt a legtöbb égbolttelkép pontforrásként detektálja őket. Az energiatermelés nagyon nagy mértékű, a kvazárok abszolút fényessége általában -25 magnitúdó körüli, ám ismerünk -30 magnitúdó abszolút fényességű kvazárokat is! A színekben jellegzetes, általában többször ionizált elemektől (MgII, CIII, CIV, SiIV, OIV, különféle ionizációs fokú Fe stb.) származó, a gyors mozgások miatt rendkívül kiszélesedett emissziós vonalak jelennek meg. Ezek az elemek arra utalnak, hogy ebben az anyagban már a kvazárok korszaka előtt lezajlott egy csillagkeletkezés (III. populációs csillagok), és a csillagok robbanása már a korai univerzumot „beszennyezte” nehézelemekkel. Az SDSS fedezte föl a távoli kvazárok színekében a Gunn–Peterson-vályút: a $z=6$ körüli kvazárok színekében a hidrogén Lyman-alfa vonalától rövidebb hullámhosszakon folyamatosan jelen lévő jelentős abszorpció figyelhető meg. Ez arra utal, hogy a sugárzás kezdetben semleges hidrogénben haladt, amely a sugárzás elnyelésével ionizálódott. A közelebbi kvazárok színekében nem folytonos, hanem eseti jellegű Lyman-alfa abszorpció vonalakat láthatunk (Lyman-alfa erdő), jól mutatva, hogy a korai csillagok sugárzásától a semleges hidrogén elkezdett ionizálódni, és semleges állapotban csak el-

szórt felhőkben maradt meg. Azon túl, hogy így megismerhettük a galaxisok közötti anyag állapotának fejlődését, az abszorpciós szerkezetek alapján ismét olyan megfigyelhető jelenséghez jutottunk, amelyből közvetlenül következtethetünk az anyag, sötét anyag, sötét energia arányára a Világegyetemben.

A kvazárok színe a részben szinkrotron eredetű kontinuum sugárzás miatt optikai hullámhosszakon kékes, ezért spektroszkópia hiányában fotometriailag is jól fölismerhetők. A behulló anyag mennyiségének időbeli fluktuációja miatt a kvazárok rövid időskálán (10–500 nap) jelentős fényváltozásokat mutatnak. A Palomar-égbolttelkép és az SDSS közös katalógusa azokat a változó fényességű, csillagszerű forrásokat tartalmazza, amelyek a két felmérés között legalább 0,5 magnitúdós fényváltozást mutattak; ezek nagy része fél-szabályos változócsillag vagy kvazár.

Mikrohullámú háttérsugárzás: A Világegyetem minden irányából érkezik hozzánk a mikrohullámú háttérsugárzás, amelynek jelenléte az ősrobbanás legfontosabb bizonyítéka. E sugárzás fotonjai akkor szabadultak ki, amikor a fiatal, mintegy 300 ezer éves Világegyetem tágulása és fokozatos hűlése során a plazma rekombináldott, az atommagok befogták az elektronokat. Így a sugárzás számára nem átlátszó plazma átlátszó anyagokká, semleges hidrogénné és részben héliummá vált. A kozmikus háttérsugárzás majdnem homogén eloszlású. Tökéletesen homogén anyagból viszont nem alakult volna ki a mai inhomogén Univerzum: ennek megfelelően a COBE- és WMAP-műholdak megtalálták az 1/10 000 nagyságrendnyi eltéréseket mutató lokális csomósodásokat, foltokat, azaz anizotrópiát is. Ezek közül leggyakoribb a mintegy egy foknyi látszó területű foltok csoportja.

A Világegyetem fejlődése, a távoli galaxis-halmazok és a közeli galaxisok is módosítják a háttérsugárzás szerkezetét. A legfontosabb zavaró komponens maga a Tejútrendszer: a WMAP adataiból megállapítható a Tejútrendszer sugárzási teljesítménye a 2,83–3,65 mm hullámhossztartományon (W sáv; 3×10^{30} watt), és az Androméda-galaxisé is (az előző érték 1,8-szerese). E zavaró hatások azonban az anizotrópiához képest is kicsik, így annak vizsgálatát nem befolyásolják jelentősen.

Az anizotrópia szerkezetéből ki lehet olvasni, hogy mekkora mértékű csomósodások vezettek a mai nagy léptékű szerkezet kialakulásához, és ennek fényében megvizsgálhatjuk a kozmológiai modelleket. Az eredmények szerint az anyag lassabban csomósodott annál, mintha csak a gravitáció játszott volna szerepet, amiből következtethetünk arra, hogy a csomósodás ellen ható valamely folyamat (a sötét energia) fontos szerepet játszott a struktúra alakulásában, az Univerzum fejlődésében. Ugyanígy azt is megfigyelhetjük, hogy mekkora volt a mai Világegyetem egy pontból belátható része (az eseményhorizont) a lecsatlódás, azaz a háttérsugárzás keletkezésének idején. A háttérsugárzás közös horizont alá tartozó celláiban az anyag ugyanis rendezett mintázatba tudott alakulni, itt az anyag mintegy összehangolódott, ami a foltok jellegzetes, egy fok körüli méretét okozta. A mikrohullámú háttérsugárzás vizsgálatáért és a csúcsok értelmezéséért ítélték oda a 2006-os fizikai Nobel-díjat *John C. Mathernek* és *George F. Smootnak*. Láthatjuk-e ennek a szerkezetnek a nyomát a mai Világegyetem szerkezetében? A kozmológiai modellek szerint a mai galaxisok eloszlásában nagyon nagy méretű csomókat kell keresni, annál is jóval nagyobbakat, mint egy óriás galaxis-halmaz.

A nagy léptékű szerkezet és a háttérsugárzás összevetése: A nagy léptékű szerkezet vizsgálata az irány- és távolságinformációk közvetlen téri ábrázolása az egyik lehetőség. A 2dF és az SDSS alapján az ég különböző szeleteit vizsgálva mindenütt egy jellegzetes, szivacsos szerkezetet látunk: a galaxisok szálakban és falakban csoportosulnak, és az ezekből összeálló szövet alkotja ezt a nagy léptékű szerkezetet. Ennél egyszerűbben is vizsgálhatjuk azonban a galaxisok eloszlását kétpont-korrelációs függvényekkel: azt figyeljük meg, hogy egy adott galaxistól adott távolságra milyen valószínűséggel találunk további galaxisokat. Kiderült, hogy a galaxisok eloszlása nem véletlenszerű: egy adott galaxistól távolodva egyre kisebb valószínűséggel találunk egy másikat, míg kb. 300 millió fényévet meghaladó távolságban ez a valószínűség „beáll” egy konstans értékre. Ez azonban még nem a korai Univerzum csomósodásaiból származó szerkezet.

Az SDSS majdnem ötvézezer távoli vörös galaxis alapján végezte el a főnti vizsgálatot, a kiválasztott galaxisok átlagos vörösetolódása 0,32 volt, az elért térfogat 90 milliárd köbfényév. Eredményeik szerint a galaxisok eloszlásának csomósodása (kétpont-korrelációs függvénye) 450–550 millió fényév között kis növekedést mutat (barioncsúcs), ami arra utal, hogy a galaxisok szerkezetében ilyen méretű „óriáscsomók” is megjelennek – igaz, ezekben a sűrűsödés a környezetükhöz képest szinte elenyészően csekély. Ez a szerkezet az akusztikus hullámok rég keresett maradványa! Látva a háttérsugárzásban az első csúcs szög méretét és ismerve a most talált barioncsúcs skálahosszát, végül egy „abszolút méterrudat” kaphatunk, amely a kozmikus háttérsugárzás keletkezéséig ér. Ennek a méterrúdnak a hossza szintén fontos kozmológiai paraméter,

amit a különböző modelleknek reprodukálniuk kell.

A közeljövőben várható eredmények

A jövőben több nagytávcsöves földi és űrtávcsöves égboltfelismerés indul. A Pan-STARRS optikai felmérés a Hawaii Egyetem négy darab 1,8 méteres távcsövére épül. A 2007–2010 közöttre tervezett projekt adatai egyelőre nem nyilvánosak. A Large Synoptic Survey Telescope (LSST) egy 8,4 méteres, egytűkrű távcső lesz, amely 15 másodperc expozícióval 24,5 magnitúdóig örökíti meg az eget a következő évtized közepétől. A kamerafej ember méretű, 3500 megapixeles CCD-elrendezés lesz, a műszer látómezeje 10 négyzetfok. Ilyen módon az egész eget nagyjából háromnaponta végigméri majd a műszer! A várakozások szerint az LSST föl fogja fedezni a Földre veszélyes összes kisbolygót, a fővben lévő kisbolygókat 500 méter átmérőig, az összes RR Lyrae változócsillagot 250 ezer fényéven belül, a mira típusú változócsillagokat 2,5 millió fényéven belül; évente fölfedez és kimér 3500 szupernóvát. A program töredékidejében 10–20 perces expozíciókkal galaxishalmazokról végeznek megfigyeléseket (öt látómező, 50 négyzetfok), s ezek eredményeképpen még tízezer szupernóva fölfedezése várható évente, azaz évente egy nagyságrenddel több, mint a történelem előtti időktől máig összesen!

Az űrcsillagászatban továbbra is helye lesz az égboltfelismeréseknek. Az ESA 2009-ben indított Planck-műholdja a háttérsugárzást vizsgálja majd a WMAP-nél kétszer jobb felbontással. Várható, hogy a későbbi Világegyetem hatásait is ezzel a felméréssel lehet majd először részletesen megvizsgálni. A leg egzotikusabb vállalkozás kétségtelenül az ESA–NASA már működő LIGO–VIRGO interferométere, és ennek továbbviteleként a

LISA-műholdak pályára bocsátása, aminek célja a gravitációs hullámok fölfedezése és a gravitációs megfigyelő csillagászat megalapozása lesz. E területnek az a különleges jelentősége, hogy gravitációs hullámok segítségével beláthatunk a háttérsugárzás mögé, a Világegyetem korai állapotába. Az úttörőnek nevezhető LISA már akkor is sikeres lesz, ha egyáltalán talál gravitációs hullámot. A rendszer három műholdból fog állni, amelyek egymástól ötmillió kilométerre keringenek, a gravitációs hullámok a közöttük lévő távolságokat változtatják majd. A műholdak távolságát lézeres módszerrel kell majd megmérni, hiszen a szokványos gravitációs hullámok még ilyen nagy kartávolságok mellett is csak atomi méretű változásokat okoznak.

Összefoglalásul megállapíthatjuk, hogy a számítástechnika (adatbányászat, képfeldolgozás), a műszertechnika és az űrtechnika fejlődése egyszerre tette lehetővé az összes hullámhossz elérését és az egyes adatok ösz-

szekapcsolását. Az internet és a kutatói mobilitás szintén napjainkra eső gyors fejlődése lehetővé tette, hogy ezekbe a kutatásokba nagyon sok kutató kapcsolódhasson a világ bármely tájáról, és létrejöttek az égboltfelismerések sajátos, nagy szellemi potenciált felhalmozó, interkontinentális asztrofizikai műhelyei. Az égboltfelismerési módszer máris sok izgalmas megfigyeléshez és meglepő válaszokhoz vezetett, de ezek alapján is csak sejteni lehet a benne rejlő jövőbeni lehetőségeket.

A szerző köszöni az MTA Bolyai János Posztdoktori Ösztöndíj, az OTKA K 76816 és az MTA Lendület Fiala Kutatói Programja támogatását.

Kulcsszavak: égboltfelismerés, csillagászati megfigyelési technikák, műholdak, virtuális obszervatórium, Naprendszer, kisbolygók, a Tejútrendszer szerkezete, Lokális csoport, galaxisok, galaxishalmazok, a Világegyetem nagy léptékű szerkezete

IRODALOM

- Csabai I. (2004): A Világegyetem térképe. Természet Világa. 135, 7.
 Kiss László (2005): Vörös óriás változócsillagok. In: Holl András – Mizser A. – Taracsák G. (szerk.): *Meteor csillagászati évkönyv 2006*. MCSE, Bp., 228–244.
 Szabados László (2000): A mikrováltozó-csillagászat és a mega-változócsillagászat felé. In: Mizser Attila – Szabados L. – Taracsák G. (szerk.): *Meteor csillagászati évkönyv 2001*. MCSE, Budapest, 237–248.

- Szabó M. Gyula (2006): Nagy égboltfelismerések a csillagászatban. Fizikai Szemle. 56, 12, 403–407.
 Szabó M. Gyula (2006): Szupernóvák megfigyelése – hogyan tovább? Meteor. 12, 37–42.
 Szabó M. Gyula (2007): Égboltfelismerések kozmológiája. In: Benkő József – Mizser Attila (szerk.): *Meteor csillagászati évkönyv 2008*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 266–285. o.
 Szabó M. Gyula (2007): Galaxisunk felmérése. Meteor. 37, 7–8, 33–37.