

## IV. Az Univerzum kutatása

A csillagászat az elmúlt három évtizedben a korábnál látványosabban fejlődött. Nem véletlen, hogy ebben az időszakban a fizikai Nobel-díjak közül átlagosan minden ötödiket csillagászati eredményért ítelték oda. A rohamos fejlődés egyik fő tényezője az űreszközök fedélzetéről végzett csillagászati megfigyelések térnyerése. Az új eszközök révén a megfigyelhető objektumok köre is kitágult, az üstökösöktől, a Föld-típusú exobolygók keresésén és a csillagok szerkezetének nagyfelbontású vizsgálatán át a galaxisok, neutroncsillagok és fekete lyukak kozmikus eloszlásának feltérképezéséig terjed az új keletű és a megújult érdeklődést keltő kutatások spektruma. Mindegyikükhöz kapcsolódik sikeres magyar kutatás. A kutatási intenzitás jelentős növekedését jól illusztrálja, hogy a hazai csillagászok által publikált, legtöbbször idézett száz cikk mindegyike a rendszerváltás után jelent meg. Az alábbiakban hat kutatási témát emelünk ki a legeredményesebbek közül.



11.kép

*A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont és a Szegedi Tudományegyetem (SZTE) által alkotott konzorcium 2017-ben kezdődött „Tranziens Asztrofizikai Objektumok” című projektje (GINOP-2.3.2-15-2016-00033) keretében kifejlesztett számítógép-vezérelt csillagászati mérőrendszer legújabb tagja: a 80 cm tükörmérőjű csillagászati távcső a CSFK Piszkestetői Observatóriumában. Ugyanilyen távcső működik majd az SZTE Bajai Observatóriumában is. Ilyen jelentős műszerfejlesztés közel fél évszázada nem történt a hazai csillagászati kutatásokban. A projekt tudományos célja kevésbé ismert természetű asztrofizikai jelenségek felfedezése és kutatása. Ilyen jelenség lehet egy nagy energiájú csillagrobbanás (szupernóva), gammakitörés, két összeolvadó neutroncsillag vagy fekete lyuk. (Forrás: CSFK CSI, Vinkó J.)*

## IV.1. Naprendszerkutatás űrszondákkal

Az utóbbi harminc évben a Naprendszer távoli területeire jutottak el űrszondák, hogy a célpont körüli pályáról helyszíni méréseket végezzenek, és az időbeli változásokat is regisztráló komplex képet nyújtsanak a célégitestről, annak környezetéről és az ott zajló folyamatokról. E programok közül jelentős magyar részvétellel zajlott le a Cassini és a Rosetta küldetés. A Cassini szonda a Szaturnusz rendszerét kutatta, a Rosetta űrszonda pedig a világon elsőként állt pályára egy üstökös mag körül, és követte végig az üstökös aktív időszakát annak kezdetétől végéig.

A NASA 1997-ben indított Cassini szondája a Szaturnuszt, annak magnetoszféráját, gyűrűrendszerét, jeges holdjait vizsgálta 2004 és 2017 között. A minden eddiginél ambiciózusabb bolygókutató misszió eredményei megváltoztatták a további kutatások irányát. A Cassini fedélzetén magával vitte a Huygens leszállóegységet is, ami 2005-ben leszállt a Titanra. A Cassini 12 fedélzeti tudományos műszere közül a magyar kutatók (főként a Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársai) a magnetométer és a Cassini-plazmaspektrométer (CAPS) méréseiben vettek részt, mérnökeink e műszerekhez készítettek földi ellenőrző berendezéseket [A1]. A Szaturnusz magnetoszférájának mérete dinamikusan változik, a Nap felőli oldalon benyomódott, 15-25 Szaturnusz-sugár kiterjedésű, az ellenkező irányban megnyúlt. Egyenlítői régiójában jelentős mennyiségű plazma gyűlik össze egy korongszerű struktúrában. A plazma forrása az Enceladus jég hold déli sarki gejzirjeiből származó víz. A magnetoszférát kitöltő anyag nagy része a fagyott felszín alatt rejtőzö folyékony óceánból származik. A bolygó gyűrűi felett ritka ionoszféra van [A2]. A Cassini 126-szor közelítette meg a Titant, vizsgálta az ionoszféráját, a felszínét, és radarméréseket végzett, felfedezve a felszíni tavakat.



12.kép:

*A 67/P Churyumov–Gerasimenko üstökös magja a Rosetta szonda kamerájával 28 km távolságból készített felvételen. Ezen a szabálytalan alakú üstökös magon landolt a magyar közreműködéssel készült Philae egység, aminek műszereivel a felszín anyagának állapotát és kémiai összetételét vizsgálták. (Forrás: ESA/Rosetta/NAVCAM)*

Az ESA 2004-ben indított Rosetta űrszondája, fedélzetén a Philae leszállóegységgel, 2014-ben közelítette meg a 67P/Churyumov–Gerasimenko üstökösöt, amely körül sikeresen pályára állt. A keringő egység két éven át vizsgálta az üstökösöt, közben 2014-ben az üstökös felszínére bocsátotta a Philae leszállóegységet, amely a világon elsőként végzett vizsgálatokat egy üstökös mag felszínén. A leszállóegység működését irányító számítógépet és az energiaellátó rendszert magyarok fejlesztették. A Philae részben szintén magyar kutatók által készített műszerei rendkívül értékes adatokat gyűjtöttek közvetlenül a felszínről. A felszínen a jég kívül komplex szerves vegyületekben gazdag port is sikerült kimutatni. A mag belseje port és jeget tartalmaz, porózus szerkezetű. A keringőegység több mint két évet felölelő mérései nyomon követték az üstökös magnetoszférájának születését és fejlődését.

## IV.2. Az SDSS égfelmérés

A technológia fejlődése a 20. század végére tette lehetővé olyan műszerek megalkotását, amelyekkel az Univerzum nagy skálájú szerkezete tanulmányozható, és azon keresztül egyre pontosabban megérthető annak dinamikája. A precíziós kozmológia egyik úttörő észlelése a Sloan Digitális Égfelmérés (SDSS) az Univerzum első háromdimenziós térképét alkotta meg. Az SDSS keretében mintegy 300 millió galaxist fotóztak le öt színben, és 1 milliárdnak a színképét, és azon keresztül vöröseltolódását is meghatározták. A projekt egyik kulcsfontosságú eredménye, a galaxisok eloszlásából mérhető barionos akusztikus oszcillációk skálája a kozmológia egyik sarokköve a szupernóvák és a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás észlelései mellett [A3]. A számos új asztrofizikai és kozmológiai felfedezés mellett azért is jelentős az SDSS, mert úttörője volt az azóta szinte mindenütt előforduló tudományos „big data” projekteknek [A4]. Az SDSS adatbázisának kialakításában oroszánrészt vállaltak a magyar (főként az ELTE Fizikai Intézetében dolgozó) kutatók és annak eredményei nagyban hozzájárultak a kozmológia és az adatintenzív tudományok hazai fejlődéséhez.

## IV.3. Infravörös-űrcsillagászat

A modern asztrofizika, kozmogónia és kozmológia szempontjából legfontosabb megfigyelések az infravörös hullámhossztartományban történnek. Az elmúlt két évtized eredményei alapján az infravörös-űrcsillagászat a magyar csillagászat egyik pillérévé vált. Az első hazai eredmény az IRAS mesterséges hold infravörös-térképein egy 500 fényév átmérőjű óriás porbuborék felfedezése volt. 2002–2005-ben az ESA ISO űrtávcsöve mérései alapján létrehozott archívumhoz járultak hozzá magyar kutatók különlegesen pontos mérésértékeléssel és fontos eredményekkel a kialakuló csillagok változékonyságáról és az infravörös égbolt háttérfényességéről. 2009-ben egy magyar vezetéssel készült Nature-cikk adta hírül a NASA Spitzer-űrtávcsövének mérései alapján, hogy az EX Lupi fiatal csillag kitörése során először sikerült megfigyelni a csillagkörüli amorf szilikátszemcsék kristályosodását [A5]. A CSFK CSI-ben működő kutatócsoport fontos munkát vállalt az ESA Herschel szondájának küldetésében (2009–2013), többek között meghatározva a távoli háttérgalaxisok egybemosódásából eredő mérési bizonytalanságot. A Herschel egyik legfontosabb öröksége, a PACS műszer pontforrás-katalógusa is Magyarországon készült el, és jelentős magyar hozzájárulással térképezték fel a Tejútrendszer hideg csillagközi felhőmagjait is [A6]. A Herschel mérései alapján magyar vezetéssel meghatározták a Naprendszerben a Neptunuszon túli égitestek pontos méretét, felszíni tulajdonságait, és több esetben felfedezték kettősségüket vagy a körülöttük lévő porgyűrűt.

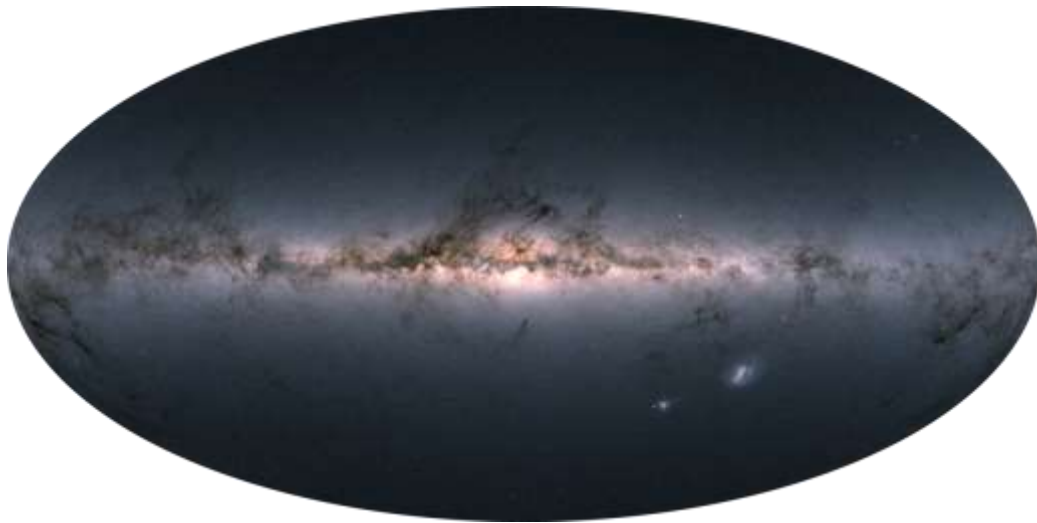
## IV.4. Űrfotometria

Az elmúlt másfél évtizedben az űrből végzett nagy pontosságú fényességmérés egyaránt áttörést hozott a távoli csillagok körül keringő (exo)bolygók felfedezésében és a csillagok fejlődésének és szerkezetének jobb megértésében. E tekintetben említést érdemelnek az európai CoRoT, valamint az amerikai Kepler/K2 és TESS űrtávcsövek, amelyek mindegyikének tudományos programjához jelentősen hozzájárult a hazai kutatóközösség (CSFK CSI, ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium) [A7]. Kiemelendő a klasszikus pulzáló és fedési változócsillagokkal foglalkozó nemzetközi munkacsoportok vezetése, új dinamikai jelenségek felfedezése, valamint ezen üreszközök innovatív használata naprendszerbeli objektumok vizsgálatára. Az űrfotometriának köszönhetően kiderült, hogy a csillagok többsége körül bolygók keringenek, és a parányi fényességváltozást okozó csillagrezgések segítségével nagyon pontosan feltérképezhető a csillagok belső szerkezete, és megállapítható a koruk. A

csillagregzéseket vizsgáló új tudományterület, a csillagszeizmológia egyik nemzetközi jelentőségű műhelye a CSFK CSI.

## IV.5. Űrasztrometria

Az égitestek helyzetét és annak változásait a Földön kívül végzett asztrometriai mérésekkel nagyságrendekkel pontosabban meg lehet határozni, mint földi távcsöves mérésekkel. Az első asztrometriai célú űreszköz, az ESA Hipparcos műholdja 1989–1993 között végezte úttörő méréseit. A Hipparcos programjában már volt magyar kezdeményezésű jóváhagyott projekt. A Hipparcos sikere hatására alkották meg az ugyancsak európai Gaia űrszondát, amelynek mérési pontossága 2-3 nagyságrenddel felülmúlja a Hipparcosét. A Gaia programját előkészítő és a mérési adatokat feldolgozó európai konzorciumban kezdettől fogva részt vesz a CSFK CSI néhány kutatója. A 2014 óta működő Gaia rendkívül pontosan méri minden, a 20,6 magnitúdónál fényesebb csillag helyzetét, mozgását és távolságát lehetővé téve a Tejútrendszer kialakulásának és fejlődésének jobb megértését. A Gaia-mérések 2018 óta elérhető második adathalmaza (Gaia DR2) 1,7 milliárd égi forrás asztrometriáját és fotometriáját tartalmazza, továbbá adatokat közöl a fényesebb források radiális sebességéről, asztrofizikai paramétereiről és fényességváltozásairól is. Sőt 1,3 milliárd forrásra parallaxis- és sajátmozgásértéket is tartalmaz, továbbá több mint félmillió csillagot változócsillagként azonosított. A magyar közreműködők fontos szerepet játszottak ez utóbbiak azonosításában és részletes vizsgálatában. A DR2 fontos mérföldkő a 21. század csillagászatában, amit jól mutat, hogy az adatbázist leíró szakcikk (hazai szerzőtársakkal) másfél év alatt több mint kétezer hivatkozást kapott [A8].



13.kép: A Gaia asztrometriai űrszonda működésének első két évében gyűjtött mérési adatok alapján összeállított kép a Tejútrendszeréről. Az ábra 1,7 milliárd csillag mérései alapján készült. A galaxisunk fősíkjához közeli csillagok alkotják a fényes vízszintes sávot. A fősíktól jobbra lefelé látható két feltűnő fényfolt a Tejútrendszer két legnagyobb kísérőgalaxisa, a Kis- és Nagy-Magellán-felhő. A Gaia jelenleg is folyó mérési programjának befejezése után pontos háromdimenziós térképünk lesz a Tejútrendszeréről és a közeli extragalaxisokról is. (Forrás: ESA/Gaia/DPAC, A. Moitinho / A. F. Silva / M. Barros / C. Barata, University of Lisbon, Portugal)

## IV.6. Gravitációs hullámok

A 21. század eddigi legjelentősebb kutatási eredménye a gravitációs hullámok közvetlen detektálása. Ez Einstein általános relativitáselméletének kísérleti igazolása, egyben – nem elektromágneses információ lévén – új csillagászati információforrás. Észlelésükkel lehetővé vált az ún. többcsatornás csillagászat művelése. Több évtizedes előkészítés és próbálkozás után a lézerinterferometrián alapuló detektorok érzékenységét 2015 őszére sikerült eléggé megnövelni a gravitációs hullámok kimutatásához. A hazai kutatók közül az ELTE TTK Fizikai Intézete, a Wigner FK és az SZTE TTK több munkatársa is közreműködött az e felfedezésekhez vezető kutatásokban. A LIGO Tudományos Kollaboráció és a Virgo Kollaboráció tagjaiként közvetlenül 2015-ben mutattak ki először fekete lyukak [A9], 2017-ben pedig neutroncsillag-kettős összeolvadása által létrehozott gravitációs hullámot [A10, A11]. Utóbbi forrását a 130 millió fényévre levő NGC 4993 galaxisban bekövetkezett kilonóva-robbanással sikerült azonosítani. Ez a megfigyelés eldöntötte, hogy a gravitációs hullám fénysebességgel terjed.

## A IV. fejezet hivatkozásai\*

### IV.1 fejezet

[A1] D.T. Young *et al.* (58 szerző, hazai társszerzők: **K. Szegő, S. Szalai**)  
*Cassini Plasma Spectrometer Investigation*,  
Space Science Reviews, **114**, 1 (2004)

[A2] D.T. Young *et al.* (43 szerző, hazai társszerzők: **K. Szegő, Z. Bebesi**)  
*Composition and Dynamics of Plasma in Saturn's Magnetosphere*,  
Science, **307**, 1262 (2005)

### IV.2 fejezet

[A3] D.G. York *et al.* (144 szerző, hazai társszerző: **I. Csabai**)  
*The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*,  
Astronomical Journal, **120**, 1579 (2000)

[A4] D.J. Eisenstein *et al.* (48 szerző, hazai társszerző: **I. Csabai**)  
*Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*,  
Astrophysical Journal, **633**, 560 (2005)

### IV.3 fejezet

[A5] A. Poglitsch *et al.* (83 szerző, hazai társszerző: **Cs. Kiss**)  
*The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACs) on the Herschel Space Observatory*,  
Astronomy & Astrophysics, **518**, L2 (2010)

[A6] P. Ábrahám *et al.* (11 szerző, hazai társszerzők: **A. Moór, L. Mosoni, N. Sipos**):  
*Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star*,  
Nature, **459**, 224 (2009)

### IV.4 fejezet

[A7] R.L. Gilliland *et al.* (35 szerző, hazai társszerzők: **L. Kiss, R. Szabó**):  
*Kepler Asteroseismology Program: Introduction and First Results*,  
Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **122**, 131 (2010)

### IV.5 fejezet

[A8] *Gaia Collaboration* (350 szerző, hazai társszerzők: **G. Marschalkó, G. Marton, L. Molnár, E. Plachy, L. Szabados, E. Szegedi-Elek**),  
*Gaia Data Release 2 – Summary of the contents and survey properties*.  
Astronomy and Astrophysics, **616**, A1 (2018)

---

\* *a magyar szerzők* neve vastagon szedve (*dőlt betűvel* szerepelnek azok a magyar szerzők, akik az adott publikációban külföldi affiliációval szerepelnek)

## IV.6 fejezet

[A9] B.P. Abbott *et al.*, (1011 szerző, magyar társszerzők: **D. Barta, P. Bojtos, G. Debreczeni, Z. Frei, L. Gergely, L. Gondán, P. Raffai, M. Tápay, M. Vasúth**)  
*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*,  
Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)

[A10] B.P. Abbott *et al.*, (1124 szerző, magyar társszerzők: **D. Barta, B. Bécsy, G. Dálya, Z. Frei, L. Gergely, P. Raffai, M. Tápai, M. Vasúth**)  
*GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*,  
Phys. Rev. Lett. **119**, 161101(2017)

[A11] B.P. Abbott *et al.*, (3542 szerző, magyar társszerzők: **D. Barta, B. Bécsy, G. Dálya, Z. Frei, L. Gergely, P. Raffai, M. Tápai, M. Vasúth, P. Veres, S. Frey**)  
*Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*,  
Astrophysical Journal Letter **848**, L12 (2017)