

A mikro és a giga szimbiózisa – Tíz éve működik a Gaia asztrometriai űrszonda

Szabados László

HUN-REN
Csillagászati és
Földtudományi
Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet,
Budapest

Az Európai Űrgynökség (ESA) Gaia küldetésének célja, hogy három dimenzióban feltérképezze galaxisunkat, a Tejútrendszert, és közben feltárja a galaxis összetételét, kialakulását és fejlődéstörténetét. A Gaia példátlan pontosságú pozíció- és radiálsebesség-méréseket végez a galaxisunkban és a közeli extragalaxisokban található több mint 1,8 milliárd csillag térbeli helyzetének és mozgásának megállapítására. Az űrszonda műszerei mindent megmérnek, aminek a fénye a detektoraira esik, így a még észlelhető leghalványabb kozmikus források fényessége majdnem 21 magnitúdó.

Az elérhető pozíciómérési pontosság persze függ a mérendő objektum fényességétől, de a fényes csillagokra néhány milliomod ívmásodperc is lehet. A címben szereplő mikro erre utal, a giga pedig a mért objektumok számára.

A 2013 decemberében indított űrszonda a Nap-Föld-rendszer L_2 -vel jelölt második Lagrange-pontja körül ún. halópályán kering, a Földtől kb. másfél millió kilométerre, és a Naptól 45° -os szögtávolságig képes megfigyelni. A tíz évvel ezelőtt, 2014 közepén kezdődött tudományos program tulajdonképpen folytatása a csillagok helyét és mozgását rendkívül pontosan meghatározó, ugyancsak az ESA által készített legelső asztrometriai űrszonda, a Hipparcos negyedszázaddal ezelőtti felmérésének. A Gaia megfigyelési stratégiája, a teljes égbolt sokszori letapogatása nemcsak azt teszi lehetővé, hogy közel kétmilliárd csillagot – galaxisunk, a Tejútrendszer csillagainak nagyjából 1%-át – térképezzen fel, hanem azt is, hogy exobolygókat, barna törpéket, távoli szupernóvákat, aktív galaxisokat, kvazárokat, valamint a Naprendszerünkben található kisbolygókat is észleljen, illetve újabbakat fedezzen fel (1. ábra).

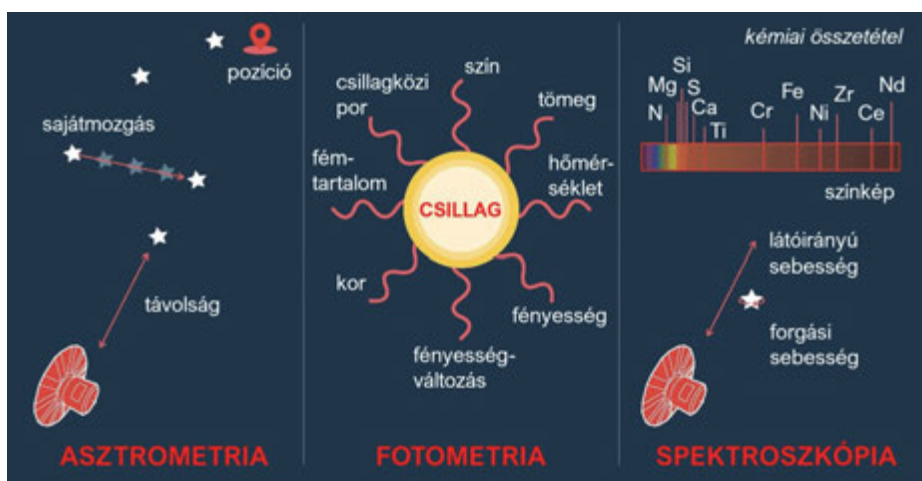
A földi légkörön kívül működő műszerekkel végzett asztrometriai mérések fontosságáról, előnyeiről, továbbá a Hipparcos eredményeiről, illetve a Hipparcos és a Gaia összehasonlításáról a Tisztelt Olvasó részletesebben tájékozódhat két 2020-ban megjelent cikkemből [1,2], magáról a Gaia űrszondáról,



1. ábra: A Gaia működésének tízéves évfordulója alkalmából készített logó. (Forrás: ESA Gaia)

felépítéséről, az általa végzett mérésekről és az adatok feldolgozásáról pedig a Marschalkó-Szabados szerzőpáros 2014-es tanulmányából [3].

Az 1989 és 1993 között működött Hipparcos utódjaként számon tartott Gaia sok tekintetben túltesz az elődjén: míg a Hipparcos „csak” valamivel több mint 100 000 csillagról végzett kb. 0,001 ívmásodperc pontosságú pozíciómérést, a Gaia mérési programján négy nagyságrenddel több objektum szerepel (nemcsak csillagok), és azok pozíciómeghatározási pontossága legalább százszor jobb, mint a Hipparcos által mért csillagoké. A sokszori pozíciómérésekből ki lehet számítani az adott forrás pontos koordinátáit, sajátmozgásának a két koordinátaírány menti komponensét, valamint a trigonometrikus parallaxisát, amiből megállapítható a távolsága. A Gaia esetében a térbeli mozgás harmadik komponense is meghatározható a látóirányú sebesség méréseiből. Ehhez persze színekpi információra is szükség van, de a Gaia műszerezettsége ezt is lehetővé teszi (2. ábra).



2. ábra: A Gaia méréseiből meghatározható asztrometriai és asztrofizikai adatok. (Forrás: ESA Gaia)

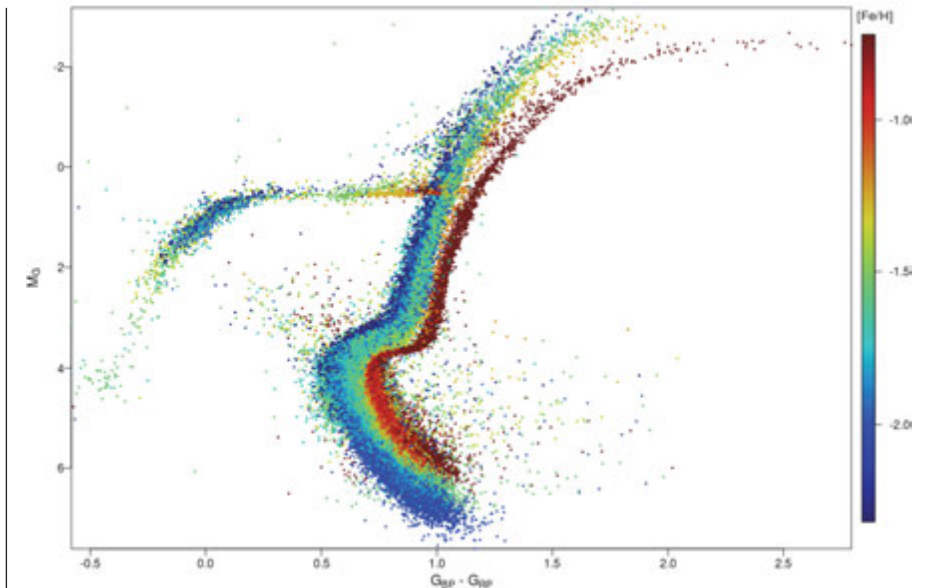
A Gaia a szögmérés mellett spektrofotometriai adatokat is szolgáltat, és az általa szűk színeképtartományban készített spektrumokból számos asztrofizikai információ is kinyerhető (2. ábra). A fényesség értékét a széles színeképtartományban kapott jel alapján G magnitúdóban határozzák meg, a színindexet pedig a vörös és a kék színeképtartomány alapján G_{RP} és G_{BP} magnitúdóban (red photometry, ill. blue photometry). A térbeli helyzet és mozgás mellett így megállapítható a csillagok hőmérséklete, fémtartalma, kora, esetleges fényességváltozása, és a látóirányú csillagközi fényelnyelés mértéke is.

A szonda indításakor 5 évig tartó küldetésre számítottak, és miután a Gaia kifogástalan működése során már 2019-ben teljesítette ezt az előirányzott időtartamot, az ESA a működés támogatását többször is meghosszabbította. A Gaia mérési programja várhatóan 2025 elején fejeződik be, a szonda helyzetének időnként szükséges korrigálására szolgáló segédtrakéták üzemanyagának elfogytával.

Tudományos célok

A Gaia asztrometriai űrszonda küldetésének egyik fő célja olyan adatok gyűjtése, amelyek lehetővé teszik Galaxisunk szerkezetének és fejlődésének tanulmányozását. A szonda az egész égboltot átvizsgálva feltérképezi a határmagnitúdónál fényesebb összes objektum helyzetét és mozgását mindhárom térbeli dimenzióban. Egy csillag háromdimenziós sebességét úgy határozzák meg, hogy az égbolton megfigyelt mozgását, az ún. sajátmozgást kombinálják a csillag mért spektrumából – a színképvonalak észlelt hullámhosszának a Doppler-effektus alapján – származtatott radiális sebességével és a trigonometrikus parallaxisból kapott távolsággal.

A galaxisbeli csillagkeletkezés története a csillagok jelenleg megfigyelt populációjából a csillagtípusok (szín és fényesség) szerinti eloszlásuk meghatározásával állapítható meg. Egy csillag színe a csillag felszíni hőmérsékletétől függ. A fényerősség (luminozitás, fényteltjesítmény) és a szín egyaránt változik a csillag akár több milliárd évig tartó élete során, ahogyan a csillag különböző fejlődési szakaszokon megy keresztül. A szín-fényesség vagy az azzal egyenértékű Hertzsprung–Russell-diagramon (HR-diagramon) ábrázolva a csillag helyét, az elárulja a csillagfejlődési állapotát, beleértve a korát is (3. ábra).



3. ábra: A gömbhalmazok egyesített Hertzsprung–Russell-diagramján szembevető a színindex és a luminozitás fémtartalomfüggése. A jobb oldali színskálán felfelé haladva nő a nehéz elemek (a csillagászatban „fémek”) gyakorisága [4]

A csillagok sebességének és helyzetének pontos ismerete lehetővé teszi a struktúrák azonosítását, és betekintést nyújt a gravitációs kölcsönhatások által vezérelt galaktikus dinamikába, beleértve a

kisebb kísérőgalaxisok Tejútrendszerbe olvadását is. Galaxisunk csillagkeletkezési története pedig a csillagok csillagtípusok szerinti jelenlegi eloszlása alapján állapítható meg.

A Gaia mérései olyan kérdések megválaszolásához nyújtanak majd segítséget, mint például:

- Milyen sorrendben alakultak ki a Tejútrendszer fő szerkezeti elemei (dudor, korong, haló)?
- Van-e sugárirányú életkori gradiens az idősebb csillagok eloszlásában?
- Viszonylag egyenletes vagy erősen epizodikus a csillagkeletkezés története?
- Vajon a nagy galaxisok sok kisebb rendszer egyesüléséből alakulnak-e ki, amelyekben már megindult a csillagkeletkezés?

Csillagok, csillagfejlődés

Bár a csillagfejlődés alapelvei jól ismertek, a csillagok fejlődésének és belső szerkezetének számos olyan aspektusa van, amelyekkel kapcsolatban a jelenlegi elméletek továbbfejlesztésre szorulnak. Egy csillag élete során a felszíni hőmérséklete és luminozitása annak megfelelően változik, ahogyan a csillag energiaforrása, a könnyű elemek fúziója a magban és az azt körülvevő héjakban halad előre. A csillagfejlődés során a HR-diagramon egy görbe vonal mentén halad a csillag.

A Gaia méréseiből a csillagok fényessége, felszíni hőmérséklete, tömege, a felszínére jellemző kémiai elemgyakoriság és a csillagközi anyag általi fényelnyelés mértéke egyaránt pontosan megállapítható.

A Gaia által vizsgált különböző típusú csillagok nagy mintájára vonatkozó adatok nagymértékben elősegítik a csillagok szerkezetének és fejlődésének megértését, és lehetővé teszik a csillagok belsejére vonatkozó elméleti modellek továbbfejlesztését is, például a következő területeken:

- a konvektív magok mérete (a mag mérete határozza meg a csillag energiatermelésének fenntartásához rendelkezésre álló nukleáris üzemanyag mennyiségét);
- a kémiai elemek diffúziója a csillag belsejében (az elemek diffúziója során a hélium a magba kerülhet, ami növeli a szénné alakítható hélium mennyiségét, és meghosszabbítja a csillag által a fejlődési szakaszban eltöltött időt);
- konvekció a külső rétegekben.

Fehér törpék

A kis tömegű – kezdetben legfeljebb 8 naptömegnyi anyagból álló – csillagok fehér törpeként végzik. Ebben az állapotban a csillag belsejében már nincs energiatermelés magfúzióval, mivel a hőmérséklet nem nő elég magasra ahhoz, hogy az egymást követő elemek fúziójának következő lépése beindulhasson. A csillagmag összeomlik, a csillag külső rétegei pedig ledobódnak, néhány évtizedig megfigyelhető planetáris ködöt létrehozva. A csillag gravitációs összeomlását már nem a sugárnyomás, hanem az elektronok elfajulási nyomása akadályozza meg, egy nagyon kompakt fehér törpét eredményezve. A mag kémiai összetétele a csillag kezdeti tömegétől függ, mivel ez határozza meg, hogy a csillag a mag végső összeomlása előtt az elemek fúziójának melyik szintjére juthat el. A legtöbb fehér törpe főleg teljesen ionizált szénből és oxigénből áll.

Mivel a fehér törpék már nem termelnek energiát, fejlődésük főként lehűléssel zajlik, amelynek során több tízmilliárd év nagyságrendű időszak alatt leadják maradék energiájukat, és fényességük folyamatosan csökken. A hűlés során a mag anyaga belülről kifelé kristályosodik, kompakt szerkezetet alkotva.

A Gaia fehér törpékre vonatkozó megfigyelései jelentősen előremozdítják e kompakt objektumok tanulmányozását:

- pontosítani lehet a tömeg és a sugár közötti kapcsolatot;
- az elméleti modellek és a kettős rendszerekben lévő fehér törpék megfigyelt tulajdonságainak összehasonlításával a Gaia mérési adataiból meg lehet határozni a csillag külső rétegeinek leválása előtti tömege és az így keletkező fehér törpe tömege közötti kapcsolatot;
- a Nap közelében lévő fehér törpék (a 10 parszeknél közelebbi csillagok ~5%-át teszik ki) megfigyelése lehetővé teszi a Nap környezete korának pontos meghatározását, a fehér törpék hűlési idejéből származtatva.

Változócsillagok

A Gaia fotometriai és asztrometriai műszerei a 320–1000 nm közötti hullámhossztartományban több sávban végeznek méréseket minden 20,8 magnitúdónál fényesebb forrásról. Egy-egy forrás észlelésének száma az égbolton elfoglalt helyétől függ, de az első öt évben átlagosan 70 fotometriai mérés készült egy objektumról, és ez a szám a megfigyelési program végére meg is duplázódhat. A mérések alapján azonosítani lehet a változó fényességű forrásokat. Ezek között vannak egészen rövid (másodperces) és hosszú (több éves) időskálán zajló fényességváltozások.

A korábban működött Hipparcos asztrometriai űrszonda fényességmérései alapján a programcsillagok közül minden tizedik változócsillagnak bizonyult. Ezt az arányt általánosítva a Gaia programjának befejeztével akár 200 millióra is nőhet az ismert változócsillagok száma. A változó fényű objektumok legkülönbözőbb típusai – amelyek a csillagfejlődés különböző fázisait képviselik – is alaposan vizsgálhatók lesznek a rendelkezésre álló adatok alapján.

A Gaia méréseiből azonosított változócsillagok teljes mintája lehetővé teszi e különleges – vagy talán nem is annyira különleges, viszont mindenképpen fontos – objektumok gyakoriságának meghatározását. Lényeges eredményként várható, hogy a pulzáló változócsillagok különféle típusaira érvényes periódus-luminozitás összefüggést sikerül pontosan kalibrálni. Ezek az összefüggések – különösen a cefeidákra vonatkozók – ugyanis a kozmikus távolságskála alappillérei. A fedési változócsillagok esetében a komponensek fizikai jellemzői és a pályaelemek meghatározása nyújt értékes asztrofizikai információt. Összességében azonban több tucat különféle típusú változócsillagra vonatkozóan bővülnek ismereteink.

Naprendszerbeli kisbolygók és földközeli objektumok

A Gaia által észlelt források között természetesen naprendszerbeli égitestek is vannak, legnagyobb számban kisbolygók. A Gaia előnye a naprendszerbeli kis égitestek keresésében a földi megfigyelé-

sekkel szemben az, hogy az egész égboltot átvizsgálja. A földi észlelések az ekliptika körüli keskeny sávra korlátozódnak, és elkerülik az ekliptikának a galaktikus fősíkot keresztező területeit is. Ezek a korlátozások megakadályozzák a nagy hajlásszögű pályákon keringő kis égitestek és a Tejútrendszer síkjában lévő égitestek észlelését, de a Gaia esetében ez nincs így. Az, hogy a Gaia a Földtől 1,5 millió km-re kering a Nap körül, lehetővé teszi a Földtől beljebb keringő kis égitestek felfedezését is. Ezt a régiót a nappali fény miatt a Földről nem lehet megfigyelni. Az egész ég feltérképezése pedig lehetővé teszi az ekliptikától távoli pályákon keringő objektumok felfedezését is. Mivel a Gaia képes halvány és gyorsan mozgó objektumok észlelésére, több ezer földközeli objektumot (NEO-t) is észlel. Ezek azok a kis égitestek, amelyeket a nagybolygók gravitációs hatása olyan pályára taszított, hogy a Föld szomszédságába kerülnek.

A Gaia megfigyeléseiből a kisbolygók pályáját korábban elérhetetlen pontossággal lehet meghatározni. Az óriási adatbázis alapján finomítható a kis égitestek osztályozása, és feltárható az aszteroidák, a NEO-k és a meteoritok közötti rokonság is. Emellett ezen égitestek fizikai jellemzőinek a Naptól való távolságtól való függése is vizsgálható. Az észlelt kis égitestek 10–20%-ának kísérője lehet, és a Gaia méréseiből ki lehet mutatni a kettősséget, sőt a kettősök pályája is meghatározható, ami a komponensek tömegének kiszámítását is lehetővé teszi.

Perturbációk az Oort-felhőben

Messze a külső bolygókon túl, a Naptól néhány ezer csillagászati egység (CSE) és 150 000 CSE (~2,4 fényév) közötti távolságban a Naprendszer egy nagy üstökösfelhő, az ún. Oort-felhő veszi körül. Ezt a felhőt közvetlenül nem figyelték meg, de létezésére a 200 évnél hosszabb keringési periódusú üstökösök megfigyelései utalnak. A modellek szerint ahhoz, hogy ma is létezzenek hosszú periódusú üstökösök, szükség van a pótlásukra, mivel különben a Naprendszer 4,5 milliárd éves élettartamánál jóval rövidebb idő alatt eltűntek volna. A hosszú periódusú üstökösök megfigyelt pályája alapján nincs kitüntetett irány, ahonnan ezek a kométák érkeznek, ezért a forrásuk eloszlása is izotróp: egy gömb alakú térség.

Az üstökőspályáknak azonban vannak nem véletlenszerű csoportosulásai, amelyek közelmúltbeli csillagátvonulások hatására jöhetnek létre. A közel kerülő vagy akár az Oort-felhőn is áthaladó csillagok az üstökösöket a Naprendszer belseje felé téríthetik. A Gaia méréseiből meg lehet állapítani, hogy az elmúlt évmilliók során mely csillagok haladtak el egészen közel a Naprendszerhez, illetve a közeljövőben mely csillagok hatnak az Oort-felhőbeli kis égitestekre. A Nap szomszédságában lévő csillagok eloszlásának és mozgásának pontos számbavétele lehetővé teszi az Oort-felhővel való közeli találkozások gyakoriságának meghatározását.

Eddig több mint 700 000 aszteroidát azonosítottak a Naprendszerben – bár az előrejelzések szerint ennél jóval több várható –, amelyek mindegyike a Naprendszer keletkezésekor, a bolygók kialakulása-kor megmaradt törmelék. A Gaia működése végéig várhatóan több mint 350 000 ilyen időkapcsolat fog megfigyelni, értékes információkat szolgáltatva a Naprendszer kialakulásával kapcsolatos nyomokat kereső csillagászok számára.

Az aszteroidákat a térképezési folyamat során azonosítják. Mivel ezek az égitestek sokkal közelebb vannak a Földhöz, mint a csillagok, a Gaia felvételein mozognak a csillagokkal ellentétben, és gyakori eset, hogy valamely területről készült egyik pillanatfelvételen jelen vannak, majd a következőn eltűnnek. Minden olyan objektum, amelyet megfigyelnek, de a feldolgozó szoftver nem találja az adott területről korábban készült képeken, elvileg nem csillag, hanem naprendszerbeli égitest, nagyrészt kisbolygó.

Amikor a Gaia egy korábban ismeretlen aszteroidát talál, lényeges, hogy gyorsan elkezdjék nyomon követni az égitest mozgását az észlelés validálása és a kisbolygó pályájának és fizikai jellemzőinek meghatározása érdekében. A gyors követés igénye miatt hozták létre a *Gaia Follow-Up Network for Solar System Objects* (Gaia-FUN-SSO) hálózatot, hogy minél hamarabb, még kezelhető keresési területen keressék az objektumot, hogy földfelszíni távcsövekkel megerősítsék a Gaia felfedezését.

Exobolygók

Korábban alig néhány exobolygót fedeztek fel földi asztrometriai megfigyelésekkel, az ESA Hipparcos műholdja, a NASA és az ESA Hubble-űrteleszkópja és nagy földi távcsövek által szolgáltatott asztrometriai információkat pedig a radiális sebesség módszerével felfedezett bolygórendszerek pályameghatározásának finomítására használták.

A viszonylag fényes csillagok esetében 10 milliomod ívmásodperc körüli asztrometriai pontossággal néhány tízezer exobolygó kimutatása várható a Naptól kb. 1500 fényév távolságig, a bolygó által a gazdacsillag mozgásában okozott imbolygás kimérése alapján.

Az újonnan észlelt exobolygók nagy mintája pedig lehetővé teszi, hogy a csillagászok megvizsgálják, hogyan függenek a bolygók jellemzői és gyakorisága a gazdacsillag tulajdonságaitól, ezzel is elősegítve saját Naprendszerünk kialakulásának és fejlődésének tisztázását.

A Gaia már és majdan elérhető adatai

A Gaia mérései nem válnak azonnal nyilvánossá. Hosszú és alapos feldolgozási folyamatot követően nagyjából kétfévente bocsátanak közre egy kellőképpen megbízhatónak ítélt gigantikus adathalmazt. Ahhoz, hogy a pozíciómérések során kapott szögkülönbségekből tudományos célokra is használható adatok legyenek, igencsak bonyolult és hosszadalmas feldolgozó munka szükséges. Ezt a tevékenységet a Gaia Adatfeldolgozó és -Elemző Konzorciumban (DPAC) közreműködő több száz kutató – köztük magyar csillagászok – és szoftverfejlesztő végzi.

Az első adatkibocsátás (*Gaia Data Release 1*, DR1) 2016 szeptemberében történt a Gaia első 14 hónapban végzett megfigyelései alapján. A Gaia DR2-t 2018 áprilisában tették közzé, 22 hónap mérései alapján. A harmadik adatközlés 34 hónapnyi mérési adatokon alapul, és két részre osztották: egy korai adatközlés (Gaia EDR3) dátuma 2020. december, a teljesebb Gaia DR3 adatközlése pedig 2022. június.

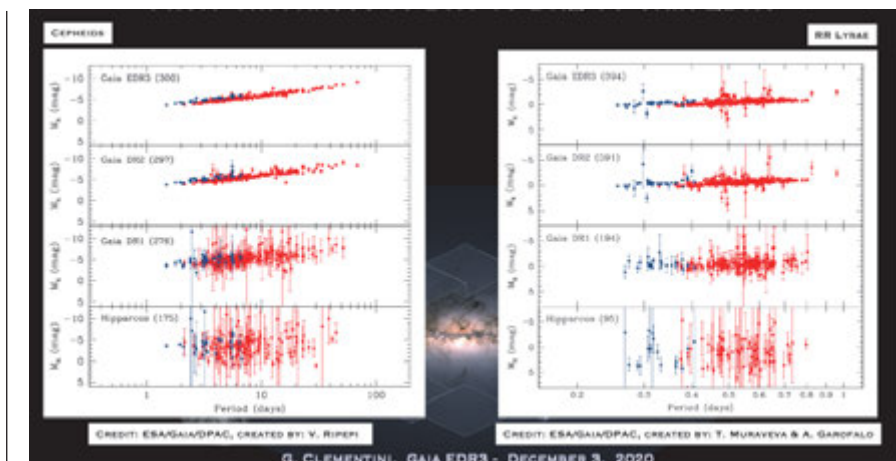
A nyilvánosságra hozott és a Gaia-archívumban (<https://gea.esac.esa.int/archive/>) elérhető adatok statisztikai összefoglalása az 1. táblázatban szerepel.

	<i>források a Gaia DR3-ban</i>	<i>források a Gaia DR2-ben</i>	<i>források a Gaia DR1-ben</i>
	1 811 709 771	1 692 919 135	1 142 679 769
referenciaepocha	J2016,0	J2015,5	J2015,0
az elemzett adatsor hossza (hónap)	34	22	14
legalább 5 asztrometriai paraméter	1 467 744 818	1 331 909 727	2 057 050
csak 2-paraméteres források (RA,D)	343 964 953	361 009 408	1 140 622 719
Gaia égi vonatkoztatási rendszerbeli (CRF) források száma	1 614 173	556 869	2 191
források száma <G> magnitúdóval	1 806 254 432	1 692 919 135	1 142 679 769
források száma G _{BP} fotometriával	1 542 033 472	1 381 964 755	-
források száma G _{RP} fotometriával	1 554 997 939	1 383 551 713	-
források radiális sebességgel	≈ 33 000 000	7 224 631	-
BP/RP színeképek	> 100 000 000	-	-
RVS színeképek	≈ 1 000 000	-	-
változó fényű objektumok	≈ 13 000 000	550 737	3 194
objektumok asztrofizikai jellemzőkkel	≈ 500 000 000	161 497 595	-
kettős és többes csillagok (pályaelemek)	néhány száz- ezer	-	-
galaxisok és kvazárok gazdagalaxisainak morfológiai jellemzése	néhány millió	-	-
naprendszerbeli objektumok (pályaelemek is)	≈ 150 000	14 099	-
Gaia Andromeda Fotometriai Felmérés (GAPS)	≈ 1 000 000	-	-

1. táblázat: Az eddigi adatközlések főbb jellemzői

Mivel a Gaia küldetés vezetői arra töreksznek, hogy nagyjából két évente újabb adathalmazt tegyenek nyilvánossá, amikor kiderült, hogy az első öt évnél valamivel hosszabb mérési időszakot (66 hónapnyi adatot) feldolgozó Gaia DR4 csak 2026-ban válik elérhetővé, az illetékesek úgy döntöttek, hogy egy részleges adatkibocsátást is közbeiktatnak: ez lett a Gaia célzott adatközlés (*Gaia Focused Data Release*), 2023 októberében. Minden egyes adatközlésben az előzőeknél pontosabb adatok kerülnek nyilvánosságra a vizsgált csillagokról és más égitestekről – a Naprendszerből az extragalaxisokig. Az adatok pontosságának fokozódó javulását jól szemlélteti a 4. ábra, amelyen a klasszikus cefeidákra,

illetve az RR Lyrae típusú változócsillagokra vonatkozó periódus–luminositás összefüggések láthatók. Szembeötlő a pontokhoz illeszkedő egyenes szórásának lényeges csökkenése az egyre nagyobb adat-tömeg feldolgozásának eredményeként.

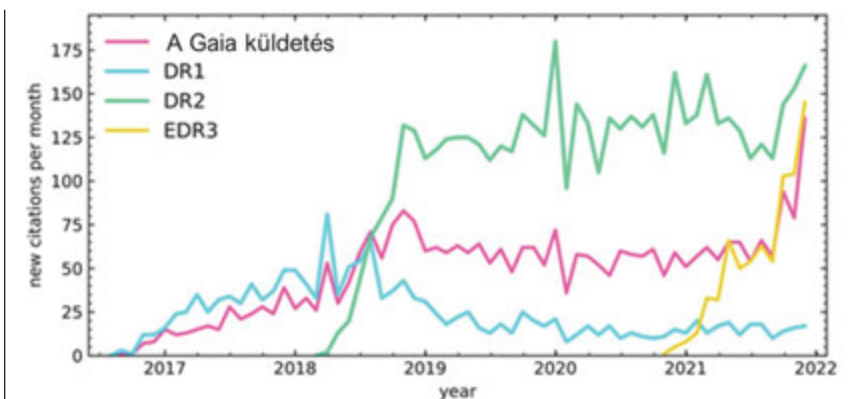


4. ábra: A klasszikus cefeidák (balra) és az RR Lyrae típusú változócsillagok (jobbra) periódusa és abszolút fényessége közötti összefüggések. Alulról felfelé a Hipparcos, a Gaia DR1, a Gaia DR2 és a Gaia EDR3 adatai alapján meghatározva. (Forrás: Gisella Clementini)

A Gaia végleges katalógusát 2030 körül fogják közzétenni, és ez a katalógus talán még évtizedekig központi szerepet játszik majd a csillagászat számos területén. Ezt a katalógust a Gaia összes mérése során kapott gigantikus adathalmaz összetett feldolgozási folyamata során állítják össze. A végleges katalógus közel kétmilliárd csillag teljes asztrometriai (égi koordináták, sajátmozgás és távolság) és fotometriai (fényesség és szín) adatait, valamint további információkat tartalmaz majd, beleértve a források osztályozását, valamint a változócsillagok, a több tagú csillagrendszerek és az exobolygók-nak otthont adó csillagok listáját. Több mint 150 millió csillag esetében a radiális sebességre vonatkozó idősor is elérhető lesz. A csillagokon kívül a naprendszerbeli égitestek és a távoli galaxisok mért adatai és jellemzői is szerepelnek majd. Ám erre még éveket kell várni, a tervek szerint ez a Gaia DR5 csak a 2030-as évek elejétől áll majd a csillagászközösség rendelkezésére.

Válogatás a Gaia eredményeiből

A Gaia mérései alapján született tudományos eredményeket lehetetlen röviden (de akár hosszan is) összefoglalni. Az űrszonda eredményességét jól mutatja az 5. ábra, amelyen a Gaia űrszondát és annak feladatait, illetve az egyes adatkibocsátásokat részletesen ismertető szakcikkre havonta megjelent hivatkozások száma látható. A Gaia méréseit használó kutatások eredményeit közlő szakcikknek száma az utóbbi néhány évben már ezres nagyságrendű.



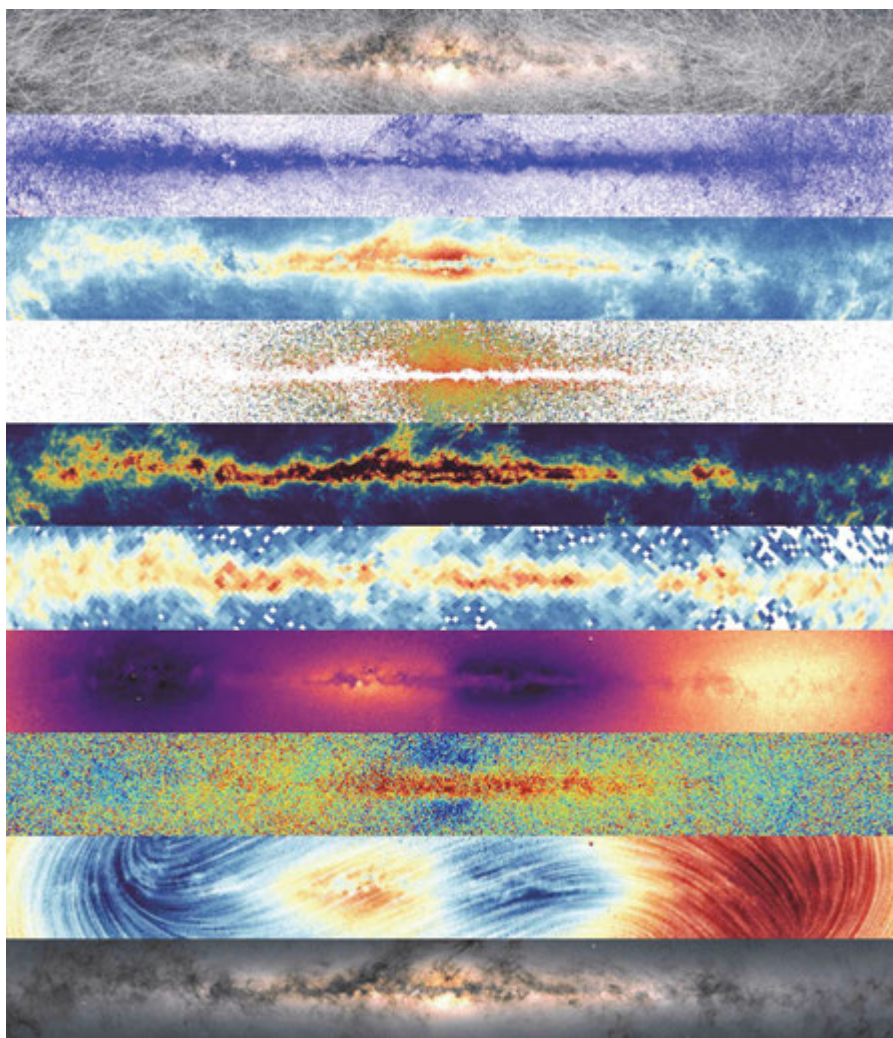
5. ábra: Havonkénti hivatkozások száma a Gaia küldetését összefoglaló közleményre, illetve az egyes adatközlések tartalmát leíró cikkekre [5]

Mivel a jelenleg szabadon elérhető adatok zöme még nem eléggé pontos – de majd az lesz a végleges Gaia-katalógusban –, az egyedi objektumokra vonatkozó használatuk során nem árt az óvatosság. Ezért is az a jellemző, hogy hasonló típusú objektumok csoportját, illetve egy konkrét égi tartományban levő nagy számú objektumot vizsgálva vonnak le következtetéseket a kutatók a Gaia adatai alapján. Ilyen kutatási eredmények szerepelnek például Bódi Attila és Kiss László 2019-es cikkében az RV Tauri típusú változócsillagok fizikai tulajdonságaival kapcsolatban [6], illetve Szilágyi Máté, Kun Mária és Ábrahám Péter (2021) tanulmányában a Cepheus fler csillagkeletkezési tartomány részletes vizsgálatáról [7].

Az eddig közzétett sok ezernyi szakcikkben szereplő eredmények közül talán a legnagyobb figyelmet az keltette, amely szerint a Tejútrendszer 8–10 milliárd évvel ezelőtt egy egész törpegalaxist kebelezett be. Erre a törpegalaxisra Gaia-Enceladus néven hivatkoznak a szakirodalomban. A csillagok mozgása és kémiai összetétele alapján az M2, M56, M75, M79 és még további három gömbhalmaz is egykor a Gaia-Enceladusból került a Tejútrendszerbe [8]. A Tejútrendszer fejlődését nagyban befolyásoló Gaia-Enceladuson kívül sok más közeli törpegalaxis gravitációja is hat galaxisunkra. Sok csillagáram törpegalaxisoknak a Tejútrendszerbe történt egykori behatolására utal.

A Gaia műszereivel még a Lokális csoport galaxisaiban levő – nem túl halvány – csillagok sajátmozgása is kimérhető. Így sikerült kimutatni az M31 (Andromeda-köd) és az M33 (Triangulum-köd) közötti gravitációs kölcsönhatást is. És ami igazán figyelemre méltó: amíg földi asztrometriai mérésekkel csak a Naprendszer közelében levő csillagok trigonometrikus parallaxisát lehet kimérni, a Gaia segítségével már más galaxisokban levő egyedi csillagok távolsága is közvetlenül megállapítható pusztán pozíciómérésekből!

Számos olyan szakcikk jelent meg, amelyben újabb csillaghalmazok felfedezését közlik a Gaia mérései alapján. Erről a témáról kiváló összefoglaló olvasható Cantat-Gaudin (2022) cikkében [5]. A Tejútrendszer minél jobb megismerésére irányuló kutatások sokszínűségét, témagazdagságát igazán jól a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: Montázs a Tejútrendszer különféle szempontok szerint végzett vizsgálatairól – a Gaia DR3-ban közzé tett adatok alapján, galaktikus koordináta-rendszerben. Fentről lefelé: a csillagok mozgása az elkövetkező 400 000 évben; a csillagok kora (a kék szín a fiatalabb, a vörös az idősebb csillagokat jelzi); a csillagközi por elnyelésének mértéke különböző irányokban a radiálissebesség-spektrométerrel kapott színeképek alapján; az eddig azonosított 134 000 RR Lyrae típusú változócsillag eloszlása és nehézelem-tartalma (ez utóbbi a fénygörbe alakjából meghatározva); az egyedi csillagok extinkciója; a csillagközi anyag diffúz sávjainak erőssége; az egyedi csillagok látóirányú sebessége; a csillagok nehézelem-gyakorisága, a vörösebb szín a fémgazdagságot jelöli; a csillagok háromdimenziós sebességeloszlása; a csillagok valódi színének eloszlása. (Forrás: Tineke Roegiers, ESA / Gaia / DPAC – CC BY-SA 3.0 IGO)

Magyar közreműködés a Gaia küldetésben

E cikk szerzője már a Hipparcos asztrometriai űrszonda tudományos programjában is részt vett az általa benyújtott kutatási program – cefeida típusú változócsillagok lehetséges kísérőinek kimutatása – témavezetőjeként. Bár a Hipparcos ezred ívmásodperces mérési pontossága még nem tette lehetővé a kísérőcsillagok asztrometriai kimutatását, a kettős cefeidákra kapott feltűnően sok – fizikailag értelmezhetetlen – negatív parallaxisérték jelezte, hogy a trigonometrikus parallaxisok kiszámítását kedvezőtlenül befolyásolta a kettős rendszerbeli pálya menti mozgás hatásának elhanyagolása.

A Gaia nagyságrendekkel pontosabb mérései e tekintetben sikert ígérnek, így kezdettől fogva részt veszünk e nagyszabású európai űrprogramban. Ehhez korábban az ESA PECS, majd PRODEX programja keretében anyagi támogatást is kaptunk. Eleinte csak a pulzáló változócsillagok adatainak feldolgozásával foglalkoztunk, majd a Gaia tényleges működésének beindulása után a *Gaia Science Alert* programhoz is csatlakoztunk. Ugyanis bizonyos objektumok Gaia által észlelt adatait soron kívül, azonnal nyilvánosságra hozzák, hogy megkönnyítsék a tágabb csillagászati közösség számára a késedelem nélküli nyomon követés megkezdését. Az újonnan felfedezett kisbolygókon kívül rendszeresen adnak ki tudományos riasztást a tudományos közösség számára az észlelt tranzienst eseményekről, például szupernóvák kitöréséről és más hirtelen felfényesedő vagy elhalványodó objektumokról. A fiatal csillagoknak a Gaia tudományos riasztása alapján történt hazai vizsgálatának eredményeit Nagy Zsófia és munkatársai (2022) tanulmánya [9] részletesen is bemutatja.

Jelenleg nagyjából 10 magyar közreműködője van a 400-nál is több szakembert foglalkoztató Gaia DPAC-nak. Az itthoniak a fényességváltozással foglalkozó koordinációs egység (*Coordination Unit 7*, CU7) keretében tevékenykednek.

Zárszó helyett

Kedvező hír, hogy már foglalkoznak a Gaia utódjának tervezésével is. Az az űrszonda a közeli infravörös hullámhossztartományban térképezi fel majd az eget, erre utal a neve is: *GaiaNIR* (ahol a NIR a közeli infravörös angol megfelelőjének rövidítése). Az optikainál hosszabb hullámhosszakon ugyanis azok a csillagok is észlelhetők, amelyek fényét a látóirányba eső csillagközi anyag elnyeli. Így a Tejútrendszer fősíkjához és centrumához egészen közeli csillagokról is elkészíthető az egyelőre még hiányzó térkép. Erre azonban még legalább két évtizedet kell várni.

A Gaia monumentalitását igazolják a 2024 tavaszára vonatkozó alábbi tények:

- már 3500 napja folynak a tudományos mérések;
- az égbolt folyamatos monitorozása során eddig 250 milliárd átvonulást észleltek;
- ez idáig 130 terabájtnyi mérési adat gyűlt össze a Gaia műszereivel.

A szonda indításának 2013. decemberi tizedik évfordulójára készített összefoglaló képen (7. ábra) további érdekes és tanulságos számadatok láthatók.

Lesz még miről írni a Gaia eredményessége kapcsán.



7. ábra: Képes összefoglaló a Gaia első évtizedének statisztikai adatairól. (Forrás: ESA, CC BY-SA 3.0 IGO)

Irodalomjegyzék

- [1] Szabados L. (2020): A csillagászat Gaia kora. *Magyar Tudomány*, 2020/7, 909
- [2] Szabados L. (2020): Asztrometria 21. századi módon. *Meteor csillagászati évkönyv 2021*, Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 216
- [3] Marschalkó G., Szabados L. (2014): Asztrometria – egy ősi tudomány újjászületése. *Európával a világűrben*, *Természet Világa* 2014/II. különszám, 31
- [4] Gaia Collaboration, Babusiaux C., van Leeuwen F., Barstow M.A. et al. (2018): Gaia Data Release 2. *Observational Hertzsprung–Russell diagrams*. *Astronomy & Astrophysics*, 616, A10
- [5] Cantat-Gaudin T. (2022): Milky Way Star Clusters and Gaia. *A Review of the Ongoing Revolution*. *Universe*, 8, 111
- [6] Bódi A., Kiss L.L. (2019): Physical Properties of Galactic RV Tauri Stars from Gaia DR2 Data. *Astrophysical Journal*, 872, 60
- [7] Szilágyi M., Kun M., Ábrahám P. (2021): The Gaia view of the Cepheus Flare. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 5164
- [8] Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H.H. et al. (2018): The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk. *Nature*, 563, 85
- [9] Nagy Zs., Ábrahám P., Kóspál Á., Szabados L., et al. (2022): Fiatal csillagok vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján. *Űrtan Évkönyv 2021*, Magyar Asztronautikai Társaság, Budapest, 63