

ŰRCSILLAGÁSZAT

ŰRASZTROMETRIA

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem
2023

Az asztrometria fontossága

Az égitestek helyzetének és mozgásának meghatározása. Korábbi neve pozíciós vagy **fundamentális** csillagászat (19. sz.).

Ósi tudomány. Kezdeti szerepe: navigáció, időmeghatározás.

Az asztrofizika kialakulása után háttérbe szorult, de a 20. század végére felértékelődött a szerepe:

- *A vonatkoztatási rendszer* pontos rögzítése;
- *Időmérés*: UTC a Föld forgásához kötődik;
- *Pozíciómeghatározás* (halvány objektumok azonosítása);
- *Kinematika, dinamika* (kozmikus rendszerek [kettős- és többes csillagok, csillaghalmazok, galaxisok] szerkezete, kis elemszámú rendszerek azonosítása, tömegeloszlás meghatározása egy rendszeren belül [sötét anyag kimutatása], a Naprendszer és a Tejútrendszer fejlődése);
- *Égi mechanika*: pl. mesterséges égitestek pályájának tervezéséhez;
- *Távolságmeghatározás*, ez az asztrofizika és a kozmológia alapja;
- *Exobolygók* közvetett detektálása;
- A gravitációs törvény *univerzalitásának* vizsgálata.

Csillagászati koordináta-rendszerek

Rögzítése:

- extragalaktikus (ICRS, International Coordinate Reference System)
- galaktikus
- dinamikus (naprendszerbeli égitestek ismert mozgása alapján)
- baricentrikus

A vonatkoztatási rendszer idővel romlik (degradálódik).

Különösen ügyelni kell rá: a koordinátákhoz mindig időadat (epocha) is tartozik.

A pozícióváltozás okai:

- precesszió:

$$\delta_T = \delta_E + (\theta \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \alpha_E) T$$

$$\theta = 50,290966''/\text{év}$$

$$\alpha_T = \alpha_E + [\theta(\cos \varepsilon + \sin \varepsilon \cdot \sin \alpha_E \cdot \operatorname{tg} \delta_T)] T$$

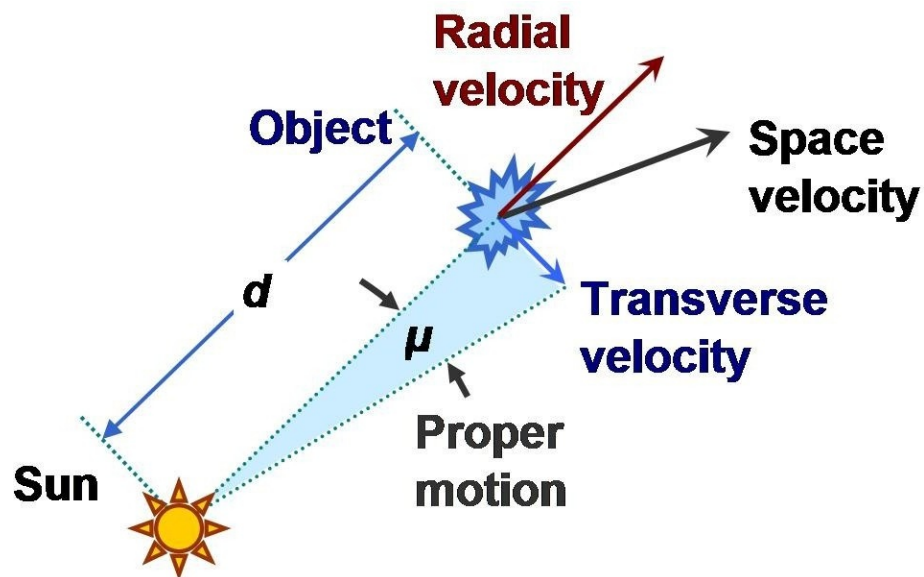
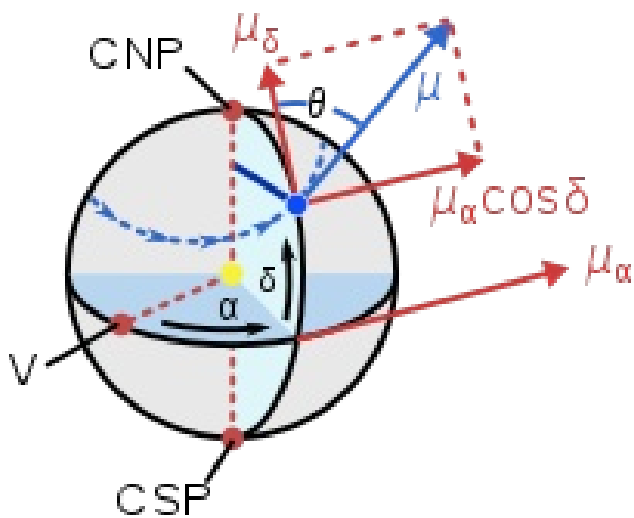
$$\varepsilon = 23^\circ 27' 8'';$$

- pólusingadozás;
- refrakció;
- sajátmozgás;
- parallaxis;
- kettőscsillagok;
- gravitációs lencse-hatás.

Csillagászati koordináta-rendszerek

Egy égitest térbeli helyét **6** adattal lehet jellemezni:

3 koordináta + a **3** koordinátairány menti elmozdulás mértéke



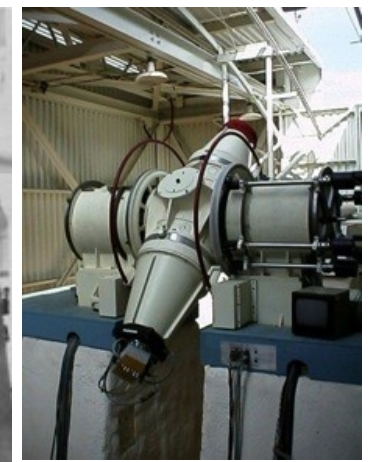
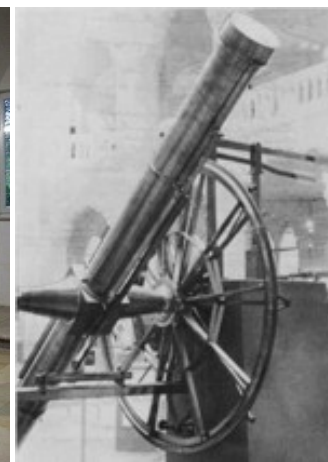
Történeti visszapillantás

Hipparkhosz, Ptolemaiosz és mások: az ekliptika jó alapsík a koordináta-rendszerhez; az égi egyenlítővel való metszés jó kezdőpont az alapsíkon.

Precessziós mozgás – Ptolemaiosz óta ismert (1 fok/évszázad); Flamsteed (17. sz.): $1^{\circ}/72$ év ($50''/\text{év}$); a mai érték: $50,296066''/\text{év}$.

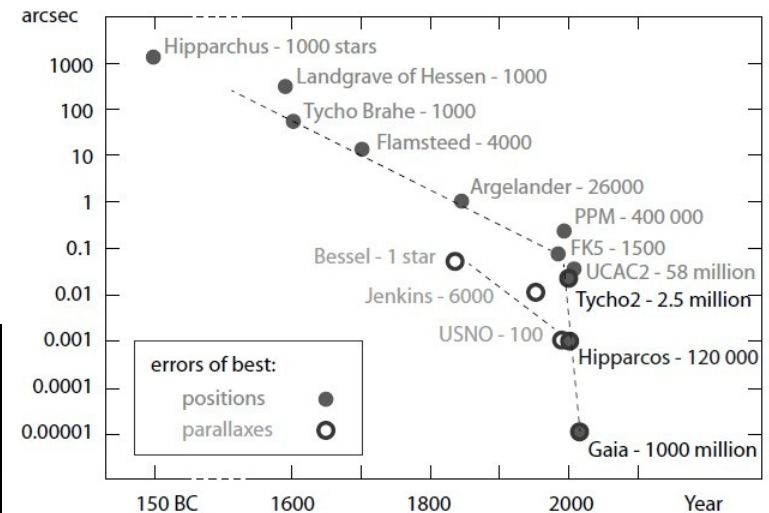
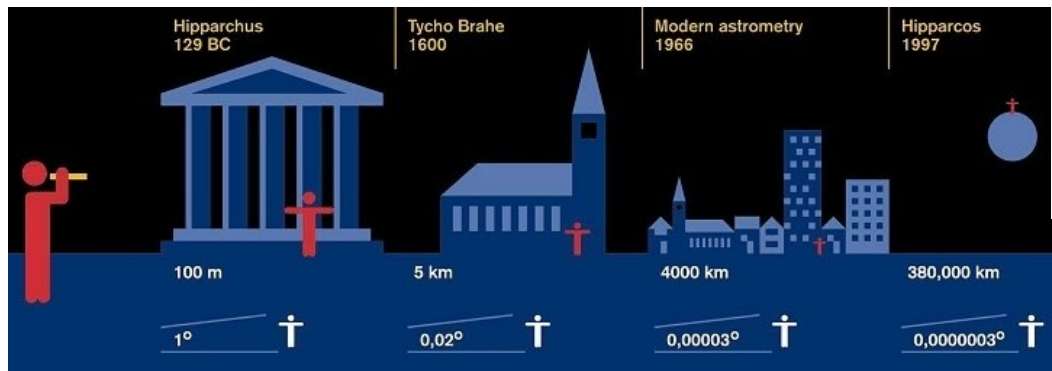
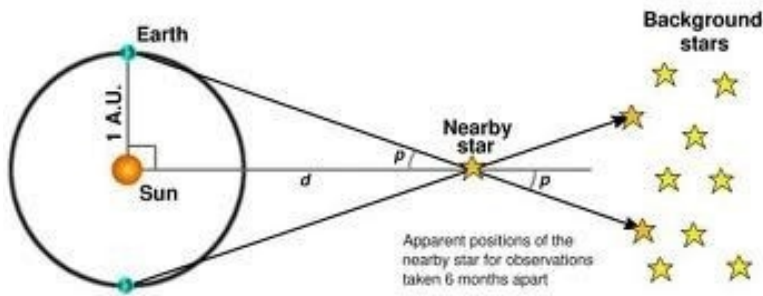
A tavaszpont ókori meghatározása: az újhold helye a tavaszi nap-éj egyenlőség idején (de a Hold gyorsan mozog).

Későbbi javulás: műszerek (kvadráns, osztott kör, távcső, mikrométer); a mérések feldolgozása, a refrakció figyelembevétele.



Történeti visszapillantás

Kopernikuszi rendszer: a Föld mozog, *parallaxis*nak lennie kell. A fényes csillagok parallaxisát keresték (minden csillag egyformán sugároz?). Tycho Brahe pontossága 1', Heveliusé 25'', Flamsteedé 10''. 1718 – Halley: sajátmozgás; 1728 – Bradley: aberráció; 1783 – Herschel: a Nap mozgásának apexe. Parallaxiskeresés nagy sajátmozgású csillagokra. 1838–1840 – parallaxis: Bessel (heliométer, 61 Cyg [5,2''/év], 0,348''), Henderson (osztott kör, α Cen [3,7''/év], 0,913''), Struve (mikrométer, Vega, 0,261'').



Történeti visszapillantás

Kettős és hármas csillagok vizuális pályája – W. Herschel katalógusa (1802):
a newtoni gravitációs törvény a Naprendszeren kívül is érvényes.

19. sz.: angol és német műszertechnika + franciák matematikai módszerei.

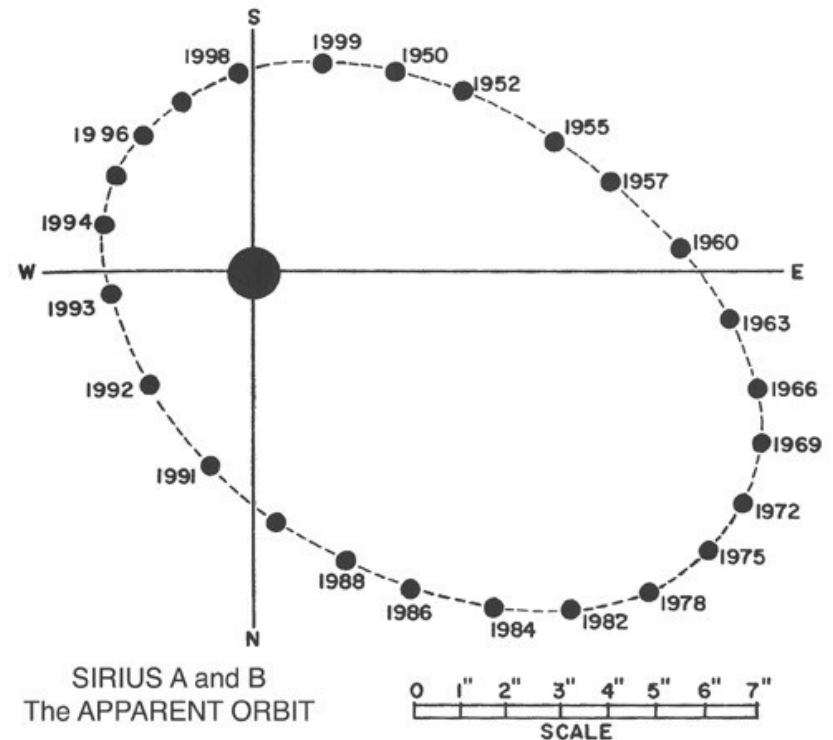
A 19. sz. közepén a fő obszervatóriumokban (Berlin, Bonn, Dorpat, Greenwich, Königsberg) asztrometriai munka folyt.

Az adatok archiválása és publikálása (hozzáférhetőség) mindvégig alapvető feladat.

Adams és LeVerrier a publikált meridiánmérések alapján számolta ki az Uránuszt zavaró bolygó helyét (1846, Galle, Neptunusz).

1844 – Bessel, Sirius B
(A. Clark, 1862).

1881 – Carte du Ciel
(fotografikus asztrometria,
de ez a felmérés befejezetlen maradt).



→ ASTROMETRY THROUGH THE AGES

* Hipparchus *
— 11 century BCE —



* Ulugh Beg *
— 1437 —



* Tycho Brahe *
— 1598 (1627) —



* John Flamsteed *
— 1725 —



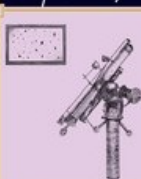
* Jérôme Lalande *
— 1801 —



* Friedrich Bessel * Otto Struve *
* Thomas Henderson *
— 1837–1840 —



* Jacobus Kapteyn *
— 1910 —



* Frank Schlesinger *
* Louise Freeland Jenkins *
* William van Altena *
— 1924 — 1952 — 1995 —



* Hipparcos *
— 1989–1993 (1997) —



* Gaia *
— launched 2013 —



A jelenlegi pontosság

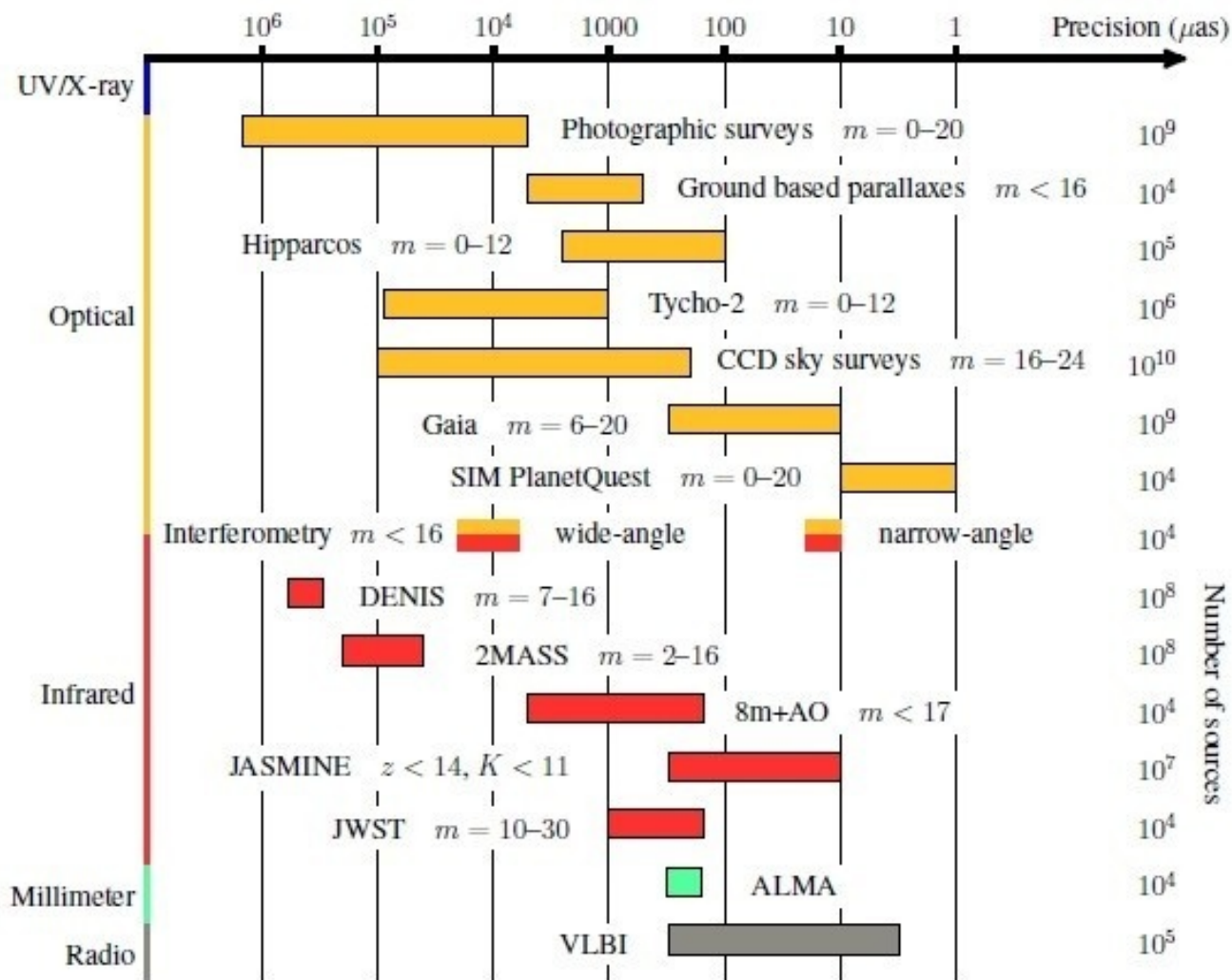


Figure 2. Graphical overview of astrometric surveys. The shading of the boxes and the right vertical axis serves to aid the eye in segregating the wavelength domains. Refer to the text for

Asztrometriai katalógusok

Catalogue	Instrument	Publ. <i>year</i>	Mean epoch <i>year</i>	Obs. period <i>years</i>	N <i>entries</i>	n <i>per star</i>	s_{star} s.e. of star <i>arcsec</i>	W weight
Ptolemy	Sextant	150	138		1025		1 deg.	
Ulugh Beg	Sextant	1665	1437	17	1018		1 deg.	
Wilhelm of Hesse	Quad	1594			1004		360	
Tycho Brahe	Many	1598	1586	20	1005		60	0.000,000,3
Hevelius	Quad+Sext	1690	1670		1564		20	0.000,003,9
Romer	MC	1735	1706	0.01	88	2.6	4	0.000,013
Flamsteed	Quad	1725	1700		2934		20	0.000,007
Lacaille	Quad	1763	1752	2	9766		6?	0.000,27
Bradley/Auwers	TI+Quad	1888	1760	12	3222		1.1	0.002,7
Lalande	Quad	1801	1795	40	50,000		3	0.006
Piazzi	AAC	1814	1802	21	7646		1.5	0.003,4
Lalande/Baily	compiled	1847			47,390			
Argelander	MC	1867	1856	22	33,811	2	0.9	0.042
Küstner	MC	1908	1899	10	10,663	2.4	0.34	0.092
USNO	MC	1920	1907	8	4526	10	(0.15)	0.20
USNO	MC	1952	1945	8	5216	6	(0.15)	0.23
Astrographic Cat.	Pgr.		1900	60	4,500,000	2	0.2	110
Stoy	MC	1968	1948	13	6800	2	0.43	0.037
GC	MC	1937	1900	175	33,342		0.15	
SAOC	Pgr.+MC	1965	1930	50	259,000		0.2	
Perth70	p.e. MC	1976	1970	5	24,900	4	0.15	1.1
FK5	MC	1988	1950	242	1535		0.04	
PPM N+S	Pgr.+MC	1993	1945	90	379,000	6	0.04	
CMC1-11	p.e. MC	1999	1991	14	176,591	6	0.07	36
Hipparcos	p.e.sat.	1997	1991	3	118,218	110	0.001	120,000
Tycho-2	p.e.sat.	2000	1991	3	2,539,913	130	0.06	700
USNO-B1.0	Pgr.	2002		50	1,000,000,000			
UCAC2	CCD	2003	2000	4	48,000,000	2	0.06	13,000
2MASS	HgCdTe	2003	2000	3	400,000,000		0.08	62,000
CMC14	CCD MC	2005	2002	6	95,000,000	2	0.07	19,000
GSC-II	Pgr.	2005		50	945,000,000			

Sajátmozgás-katalógusok

Table 2 Proper motion catalogues. The standard error, s , is a median value, if available. Mean epoch, observation period, number of catalogues, and the standard error are sometimes given as round numbers. The observations used for the Tycho-2 proper motions were obtained by Hipparcos, MCs and photography, and the catalogues after 2000 benefit greatly from Tycho-2 as reference catalogue. - Abbr.: mas/yr = milliarcsecond/year

Catalogue	Instrument	Publ. year	Mean epoch year	Obs. period years	N entries	n catalogues	s s.e. of star mas/yr	W weight	Spot. publ. mas
Halley		1718			3				
Mayer	MC+Quad	1775			80				
Mädler	Quad+MC	1856			3222				
Auwers' FC	Quad+MC	1879		117	539 Dec > 10	9	8?	8	
NFK	Quad+MC	1907		155	925		5?	40	
FK3	MC	1937	1900	190	1535	70	3	170	150
GC	Quad+MC	1937	1900	175	33,342	238	10	330	400
N30	MC	1952	1930	100	5268	60	5	210	150
SAOC	Pgr.+MC	1965	1930	50	259,000	10	15	1200	560
FK4	MC	1963	1920	213	1535	250	2	380	380
FK5	MC	1988	1950	242	1535	350	1.2	1100	62
PPM North	Pgr.+MC	1991	1931	90	182,000	12	4.2	10,300	270
PPM South	Pgr.+MC	1993	1962	100	197,000	14	3.0	22,000	110
PPM N+S					379,000		3.4	32,000	144
Hipparcos	p.e.sat.	1997	1991	3	118,218	1	0.9	120,000	6
Tycho-2	p.e.sat.++	2000	1991	100	2,539,913	145	2.5	400,000	64
SPM3	Pgr.	2004	1980	23	10,700,000	2	4.0	670,000	100
UCAC2	CCD++	2003	1990	100	48,000,000	146	6.0	1,300,000	80
USNO-B	Pgr.	2002	1975	50	1,000,000,000	2	7.0	20,000,000	275

→

→

Parallaxiskatalógusok

Table 3 Catalogues of trigonometric parallaxes.

Catalogue	Instrument	Publ. year	Obs. period years	N entries	s s.e. of star mas	W weight	Notes
Bessel	Heliameter	1838		1	60		
Henderson	Quad	1839		1	500		
Struve	Wire micr.	1840		1	100		
Peters	Visual	1850		20	?		
Oudemans	Visual+Pgr.	1889	60	50	?		
Bigourdan	Visual+Pgr.	1909		100	(50)	0.04	With one observation per star
- same -				200	(30)	0.2	With two or more obs. per star
Russell	Pgr.	1910		52	(40)	0.03	
Schlesinger	Pgr.	1935	35	7534	15		Includes spectroscopic par.
Jenkins	Pgr.	1952	50	5822	15	26	
Van Altena	Pgr.	1995	95	8112	10	81	
- same -				1649			Error of parallax < 17.5 %
- same -				940			Error of parallax < 10 %
→ Hipparcos	p.e.sat.	1997	3	118,218	1.0	120,000	
- same -				20,853			Error of parallax < 10 %
USNO	Pgr.+CCD	-2008	20	357	0.6	1000	C. Dahn, priv. comm. 2008
→ HST	CCD, satellite	-2008	18	31	0.24	500	F. Benedict, priv. comm. 2008

Fontosabb asztrometriai katalógusok

Table 2.3 Some of the major astrometric star catalogues.

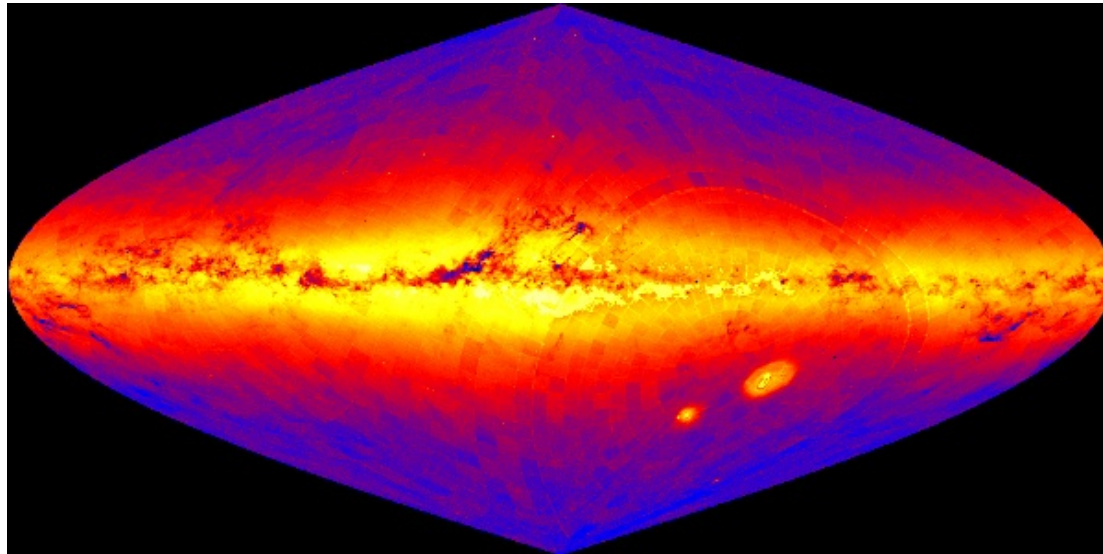
Abbreviation	Catalogue	Reference
AC	Astrographic Catalogue	see Section 2.4
AC 2000	Astrographic Catalogue on the Hipparcos system	Urban <i>et al.</i> (1998a)
AC 2000.2	AC 2000.2 Catalogue	Urban <i>et al.</i> (2001)
ACRS	Astrographic Catalogue Reference Stars	Corbin & Urban (1991)
ACT	ACT Reference Catalogue	Urban <i>et al.</i> (1998b)
AGK2	Zweiter Katalog der Astronomischen Gesellschaft	Schorr & Kohlschütter (1951–57)
AGK2 Version 2	Re-measured/re-reduced using Hipparcos and Tycho Catalogues	Zacharias <i>et al.</i> (2004b)
AGK3	Catalogue of Positions and Proper Motions North of $-2^{\circ}5$, Vols 1–8	Dieckvoss <i>et al.</i> (1975)
AGK3R	Catalogue of Reference Stars for the AGK3	Smith (1980)
AGK3RN	AGK3R with proper motions	Corbin (1978)
BD	Bonner Durchmusterung	Schönfeld (1886), Argelander (1903)
BPM	Bruce Proper Motion Survey	Luyten (1963)
BSC (HR)	Bright Star Catalogue (Harvard Revised)	Hoffleit & Jaschek (1982, 1991)
CMC	Carlsberg Meridian Catalogues	Carlsberg Consortium (1985–2006)
CD	Córdoba Durchmusterung	Thome (1892, 1894, 1900, 1914)
CF	Cape Catalogue of Faint Stars	Spencer-Jones & Jackson (1939)
CPC	Cape Photographic Catalogue for 1950.0	Jackson & Stoy (1954–68)
CPC2	Second Cape Photographic Catalogue	Nicholson <i>et al.</i> (1984)
CPC2 Version 2	CPC2 re-reduced using Hipparcos and Tycho Catalogues	Zacharias <i>et al.</i> (1999)
2CP50	Second Cape Catalogue for 1950.0	Stoy (1968)
CPD	Cape Photographic Durchmusterung	Gill & Kapteyn (1895–1900)
DM	Durchmusterung (BD, CD or CPD)	see BD, CD, CPD
FK4	Fourth Fundamental Catalogue	Fricke <i>et al.</i> (1963)
FK4 Sup	Preliminary Supplement to FK4	Fricke & Kopff (1963)
FK5	Fifth Fundamental Catalogue	Fricke <i>et al.</i> (1988)
FK5 Ext	FK5 Extension: new Fundamental Stars	Fricke <i>et al.</i> (1991)
GC	General Catalogue of 33 342 Stars for the Epoch 1950	Boss (1937)
GCTP	General Catalogue of Trigonometric (Stellar) Parallaxes	van Altena <i>et al.</i> (1995)
GSC	Guide Star Catalogue of the STScI	Lasker <i>et al.</i> (1990)

Fontosabb asztrometria katalógusok

HD	Henry Draper Catalogue	Cannon & Pickering (1918–49)
HDE	Henry Draper Extensions	Cannon (1925–36)
HIC	Hipparcos Input Catalogue	Turon <i>et al.</i> (1992)
HIP	Hipparcos Catalogue	ESA (1997)
IRS	International Reference Stars: AGK3R and SRS catalogues	Corbin & Warren (1995)
L	Luyten Catalogue	Luyten (1942)
LHS	Luyten Half-Second Catalogue	Luyten (1979)
Lowell	Lowell Proper Motion Survey	Giclas <i>et al.</i> (1959–78)
LP	Luyten Palomar Proper Motion Catalogue	Luyten (1963–87)
LSPM North	Lépine–Shara Proper Motion Catalogue North	Lépine & Shara (2005a)
LSPM South	Lépine–Shara Proper Motion Catalogue South	Lépine & Shara (2005b)
LTT	Luyten Two-Tenth Catalogue	Luyten (1957)
NLT	New Luyten Two-Tenth Catalogue	Luyten (1980a,b)
NPM	Lick Northern Proper Motion Programme	Hanson <i>et al.</i> (2004)
NPM Version 2	NPM re-reduced using Hipparcos and Tycho Catalogues	Hanson <i>et al.</i> (2004)
NPZT74	Northern PZT Stars Catalogue	Yasuda <i>et al.</i> (1982)
N30	Catalogue of 5268 Standard Stars, 1950.0, based on N30	Morgan (1952)
Perth 70	Catalogue of Positions of 24 900 Stars (also Perth 75, Perth 83)	Høg & von der Heide (1976)
PPM North	Positions and Proper Motions: stars north of $-2^{\circ}5$ declination	Röser & Bastian (1991)
PPM South	Positions and Proper Motions: stars south of $-2^{\circ}5$ declination	Röser & Bastian (1993)
PPM Bright	PPM Bright Stars Supplement	Bastian & Röser (1994)
SAO	Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalogue	SAO (1966)
SPM	Yale/San Juan Southern Proper Motion Catalogue	Girard <i>et al.</i> (2004)
SPM Version 3	SPM re-reduced using Hipparcos and Tycho Catalogues	Girard <i>et al.</i> (2004)
SRS	Southern Reference System Catalogue	Smith <i>et al.</i> (1990)
SSSC	Sydney Southern Star Catalogue	King & Lomb (1983)
TAC	Twin Astrographic Catalogue	Zacharias <i>et al.</i> (1996)
TAC Version 2	TAC re-reduced using Hipparcos and Tycho Catalogues	Zacharias & Zacharias (1999)
TYC	Tycho Catalogue	Høg <i>et al.</i> (1997)
TYC2	Tycho 2 Catalogue	Høg <i>et al.</i> (2000)
UCAC 1	US Naval Observatory CCD Astrograph Catalogue (UCAC 1)	Germain <i>et al.</i> (2000)
UCAC 2	US Naval Observatory CCD Astrograph Catalogue (UCAC 2)	Zacharias <i>et al.</i> (2004b)
USNO A	USNO A Catalogue	Monet (1998)
USNO B	USNO B Catalogue	Monet <i>et al.</i> (2003)
Yale	Yale Photographic Catalogues, Vols 1–32	Yale University (1926–83)

A katalógusoktól az égfelmérésekig

Hagyományos asztrometriai katalógusok: FK (Fundamental Katalog) sorozat.
Legutolsó az FK5. Csupán néhány ezer csillag asztrometriai adatai.
SAO (Smithsonian): az 1960-as évek közepén a teljes égre, fotolemezek
standard redukálásával. A sajátmozgás miatt romlik a használhatósága.
PPM (Position & Proper Motions): 375000 pozíció+sajátmozgás (régi adatokat
is figyelembe véve), J2000/FK5 rendszerében. Tipikus pontosság: $0,27''$,
 $0,42''$ /évszázad.
A CCD-k térhódításával nagy felületi sűrűségű katalógusokra van szükség.
Ezek lényegében égfelmérések.



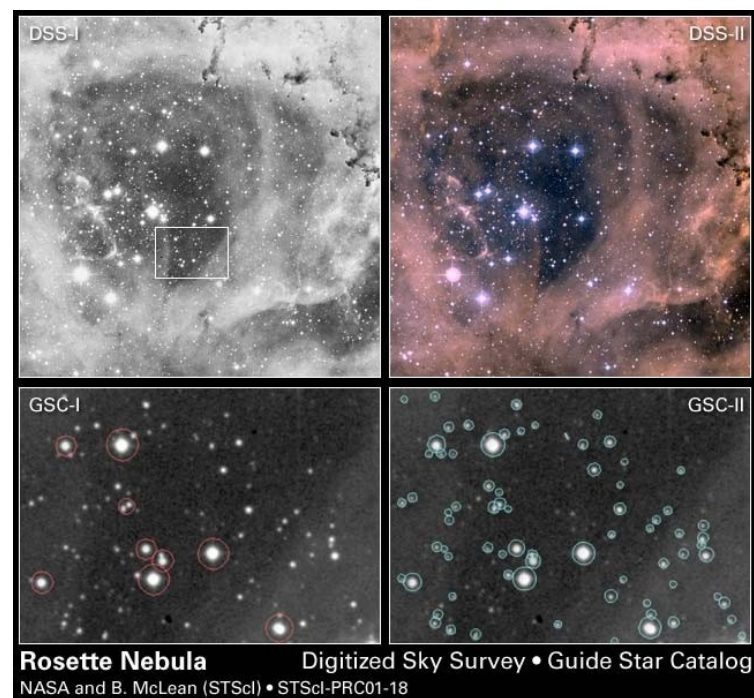
Asztrometria égfelmérések

2MASS (1997-2001): 300 millió pontforrás, 1 millió kiterjedt objektum, JHK sávban (1,25, 1,65 és 2,17 mikrométer), 17-15 magnitúdóig.

USNO-B1.0: 1 milliárd objektum, 3,6 milliárd megfigyelés (sok égboltfelmérés Schmidt-lemezei) alapján - pozíció, sajátmozgás, magnitúdó 5 sávban, 21 magnitúdóig; a pozícióhiba 0,2" lehet, fotometriai hiba 0,3 magnitúdó, a nem-csillagok kiválogatása 85%-os biztonságu (USNO-A2.0 félmilliárd forrás, 2 sáv, de már ICRF).

NOMAD (Naval Observatory Merged Astrometric Dataset): Hipparcos, Tycho, UCAC2, USNO-B1.0, 2MASS, a legjobb adatokat véve 1 milliárd objektumra (asztrometria VO).

GSC2.2 (a GSC II előzetes verziója): 456 millió objektum, a POSS fotólemezeinek digitalizálása alapján (2 epocha); HST, Gemini, VLT észleléseinek támogatása.

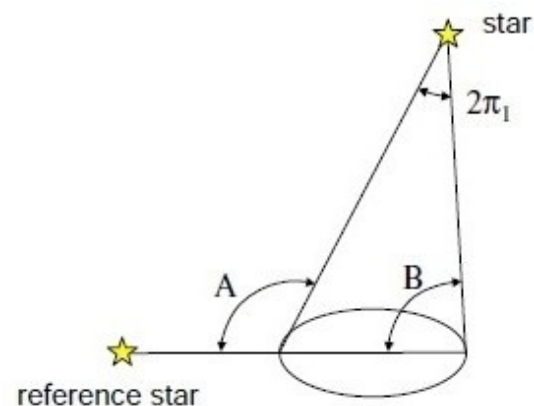
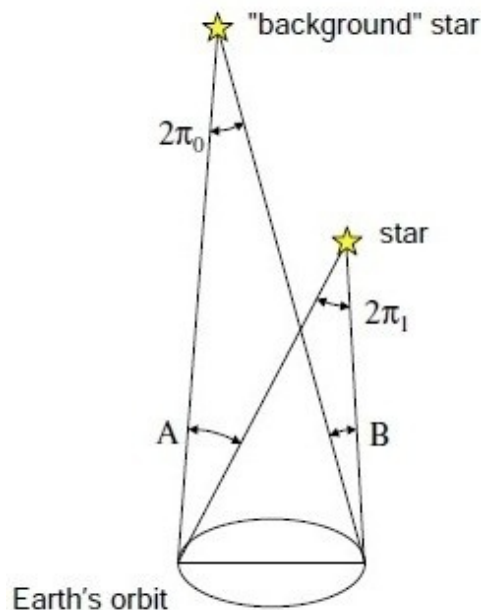


A földi pozíciómérés korlátai

Mindig a szomszédos „háttércsillagokhoz” viszonyítják a pozíciót, de azoknak is van parallaxisuk, és azok átlagértéke bizonytalan. **Abszolút pozíció** kell, a sajátmozgás ismeretével. Az **abszolút parallaxis** meghatározásához egészen más irányban látszó referenciacsillagokat kell választani. A földfelszínen ez lehetetlen (a légköri refrakció miatt).

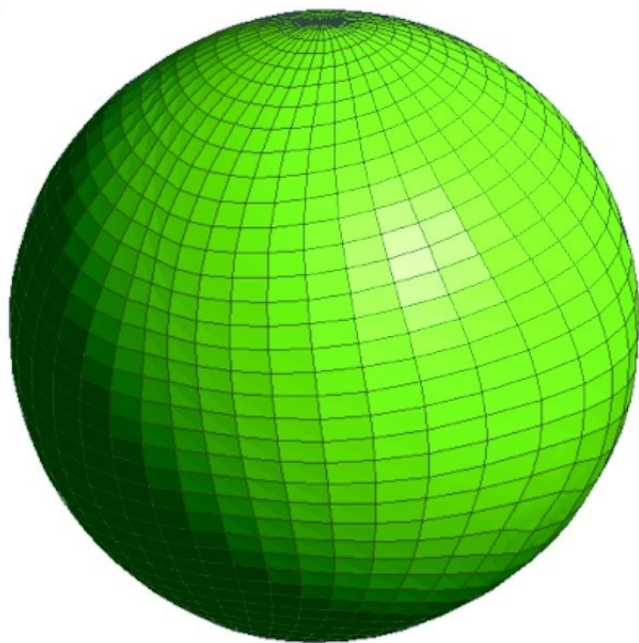
Két eltérő látóirány egyesítésével asztrometriai méréseket **űrszondák** fedélzetéről lehet végezni.

Vonatkoztatási rendszer:
az űrasztrometria előtti
utolsó a J2000, az FK5
katalógus 1535 fényes
csillaga alapján
(különböző észlelők
különböféle meridián-
körökkel mérték).

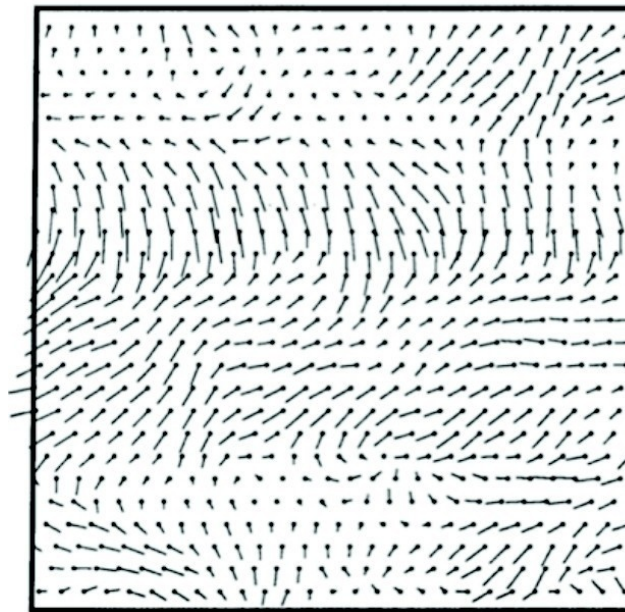


Szisztematikus hibák földi méréseknél

De: az FK5 koordinátáit a Hipparcos adataival összehasonlítva megengedhetetlen eltéréseket tapasztaltak (a déli félgömbön néhány tized ívmásodperceseket is). Az ezred-század ívmásodperc pontosságú rádiótérképeket így nem lehet egybevetni a HST 0,1" felbontású képeivel. A Hipparcos alapján új vonatkoztatási rendszert vezettek be: ICRS.

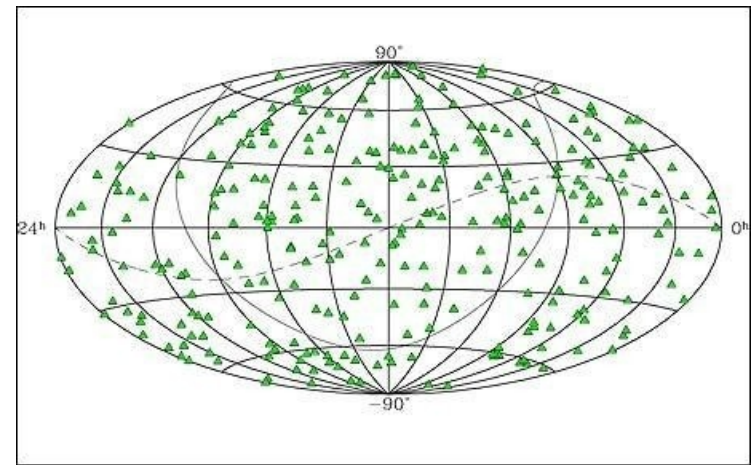
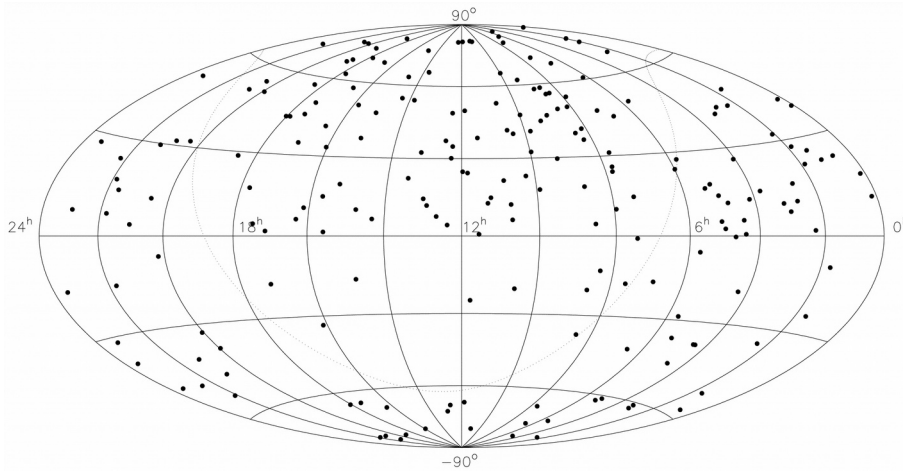
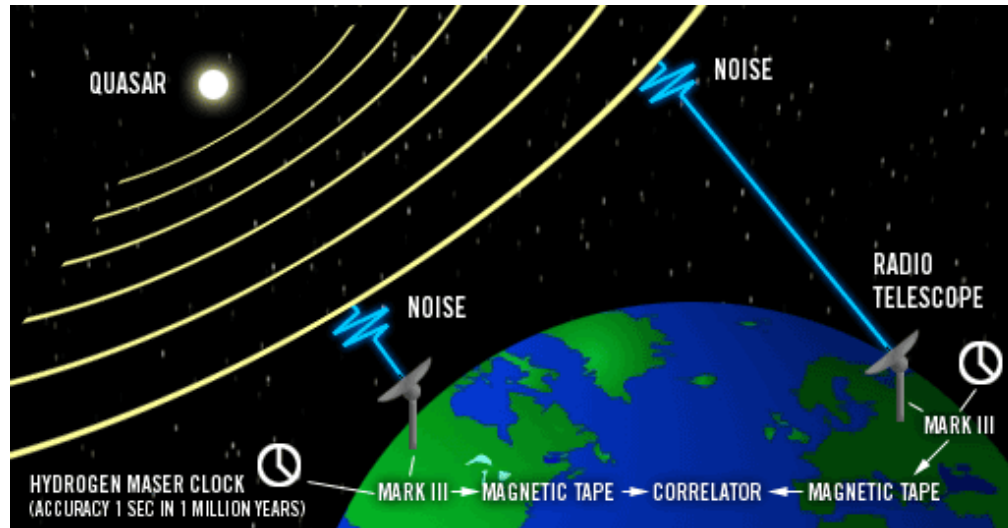


Forrás: Lennart Lindegren



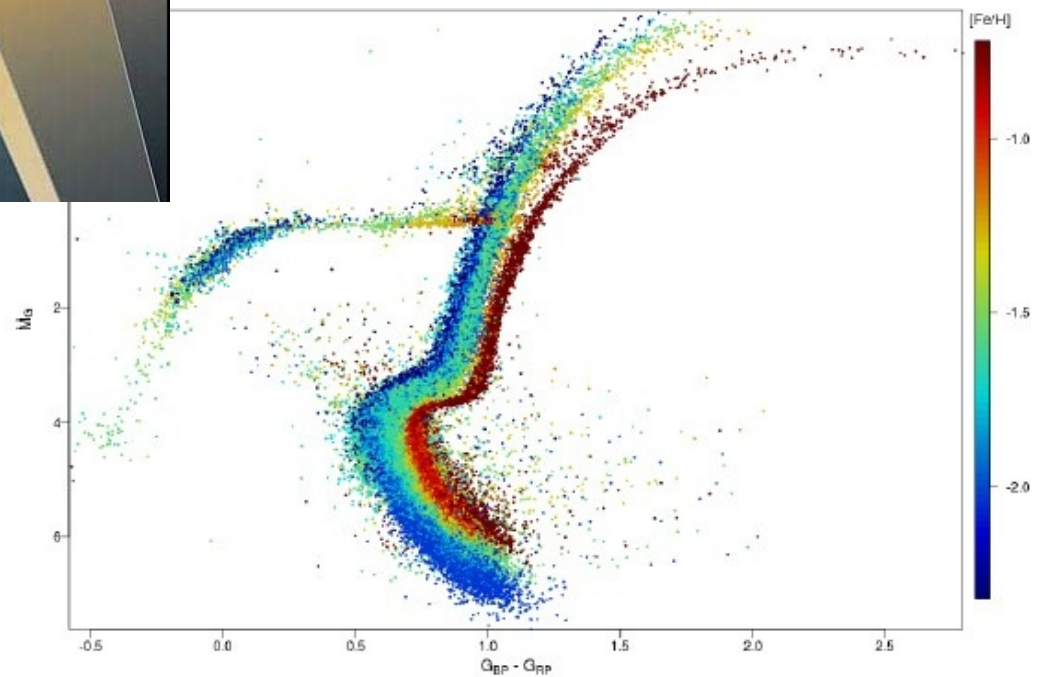
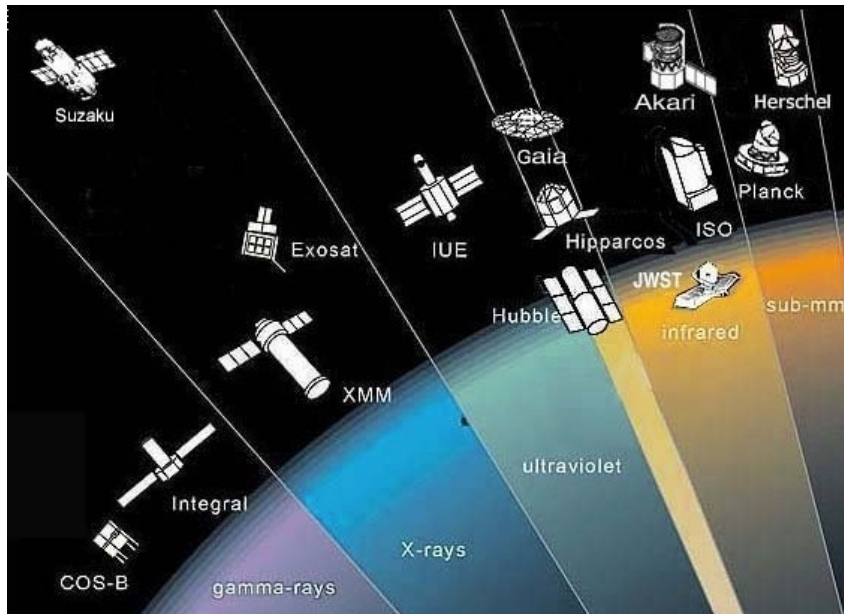
PPM vs HIP

Rádiócsillagászati asztrometria



ICRF (1997): 212 kvazár pozíciója alapján, ICRF2 (2009): 295 kvazár.
És már van ICRF3 is 2820 kvazár helyzete alapján (Gaia DR2, 2018, **jobbra**).

Az asztrometria mint űrtudomány



3. Composite HRD for 14 globular clusters, coloured according to metallicity (Table 3).

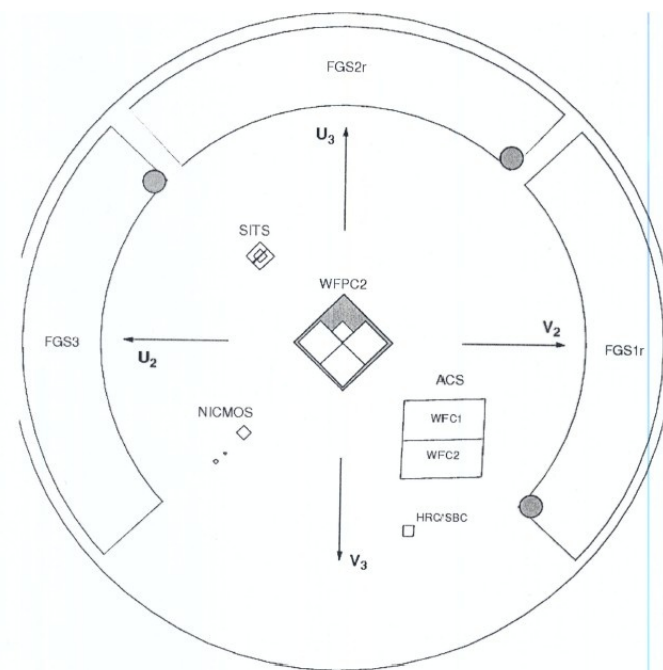
Asztrometria a Hubble-űrtávcsővel

A HST-ről külön előadás lesz!
„Segédműszerei” közé tartozik a három helyzetérzékelő (FGS, Fine Guidance Sensor): fehér fényben, 0,1" pontosságú vezetést lehetővé tevő interferométer.

Az irányzáshoz és követéshez 2 FGS elég, a redundáns 3. asztrometriára használható.

Az 1980-as évek technikája, de így is pontosabb a jelenlegi földfelszíni asztrometriánál. Előnyös: zsúfolt mezőnél és kis szeparációjú kettőscsillagok esetén (ameddig a földi optikai interferometria nem válik rutinszerűvé).

FGS3: 1-3 ezred ívmásodperc (mas) pontosságú mérés (kettőscsillagoknál $\Delta m=2$ fényességkülönbségnél 15 mas szeparáció esetén, $\Delta m=4$ fényességkülönbségnél 200 mas szeparáció esetén).



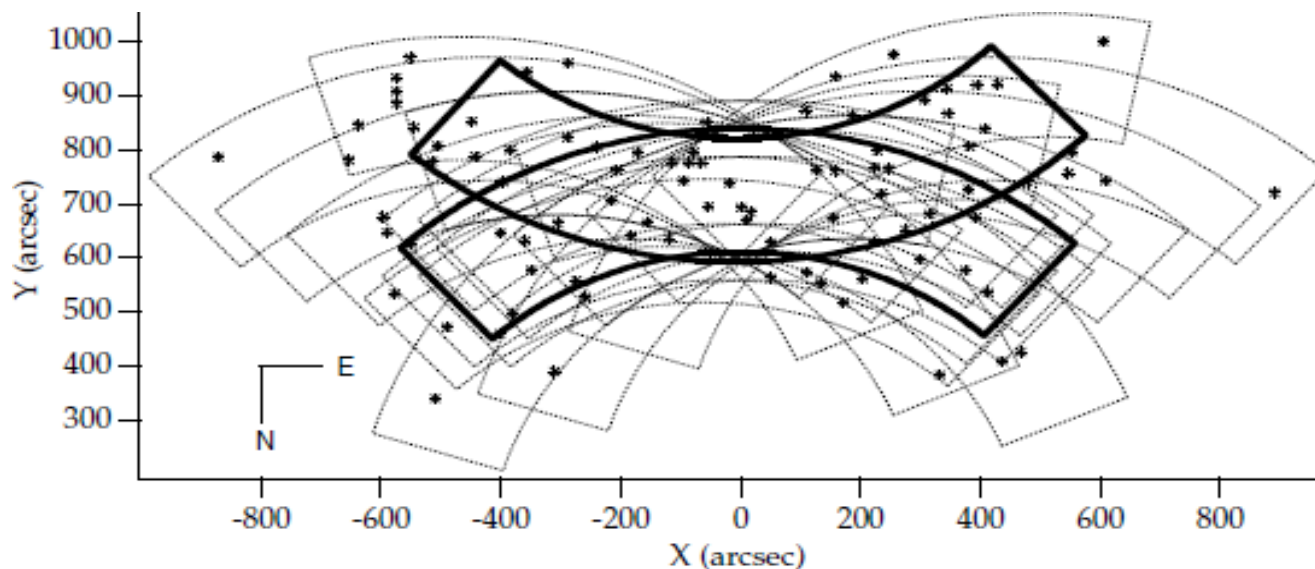
Asztrometria a Hubble-űrtávcsővel

Parallaxismérés: fél év elteltével 180 fokkal elfordul a látómező, a közös rész lencse alakú ($14' \cdot 3,5'$).

Nagy dinamikus tartomány: $4^m < V < 17^m$ (ebből 5 magnitúdónyi szürke szűrővel érhető el).

Példák pontos parallaxismeghatározásra a HST-vel:

- δ Cep + 9 további cefeida (a periódus-fényesség reláció nullpontjának kalibrálásához);
- RR Lyr (Nagy-Magellán-felhő távolságmodulusa: $m - M = 18,50$)
- ultrakompakt kettősök (pl. AM CVn): fehér törpe degenerált kísérővel, 5-60 perc keringési periódus, tömegmeghatározás



Asztrometria a Hubble-űrtávcsővel

További példák **pontos pozíciómérésre** a HST-vel.

QSO-k helyzete a Hipparcos vonatkoztatási rendszerének rögzítéséhez;

Gliese 748 = Wolf 1062: a pálya szögmérete olyan kicsi, hogy földfelszíni mérésnél az egész pályát elfedné a csillag képe.

Szaturnusz-holdak pozíciója (WFPC2-vel): 1996–2005 között 14 holdra 1036 pozíció időfüggő jelenségek vizsgálatára. Janus és Epimetheus pályacseréje, Prometheus és Pandora kaotikus kölcsönhatása. A Cassini-mérések ütemezését és analízisét is segítette.

A Nagy-Magellán-felhő sajátmozgása:

2 éves időszakra a MACHO által talált 21 kvazárhoz viszonyítva.

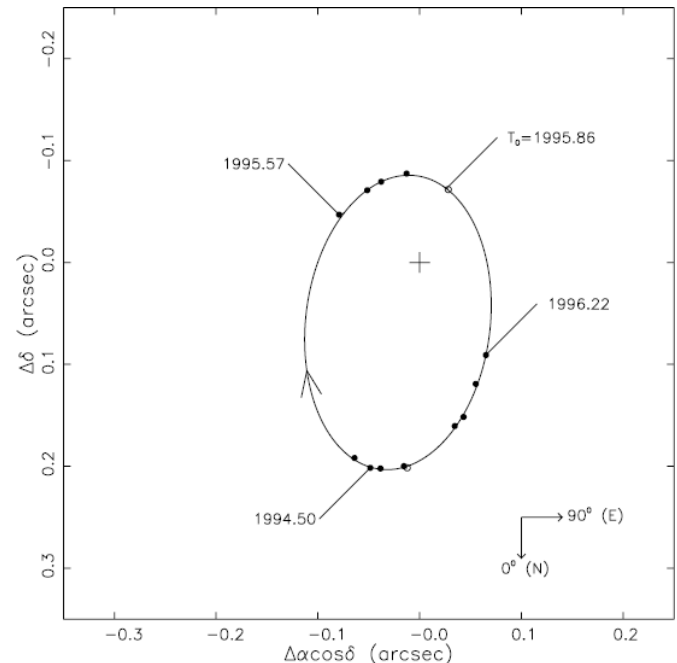
$\mu_W = -2,08 \pm 0,08$ mas/év,

$\mu_N = 0,44 \pm 0,01$ mas/év.

Majd 2007-ben rad. seb. alapján nagy térbeli sebességet (378 km/s) mértek (SMC-re: 302 km/s). A Magellán-felhők nem kötődnek a Tejútrendszerhez.

A Tejútrendszer centrumának környéke:

180000 csillag sajátmozgása $0,3''/\text{év}$ pontossággal (ACS WFC). A centrális részek kinematikája.

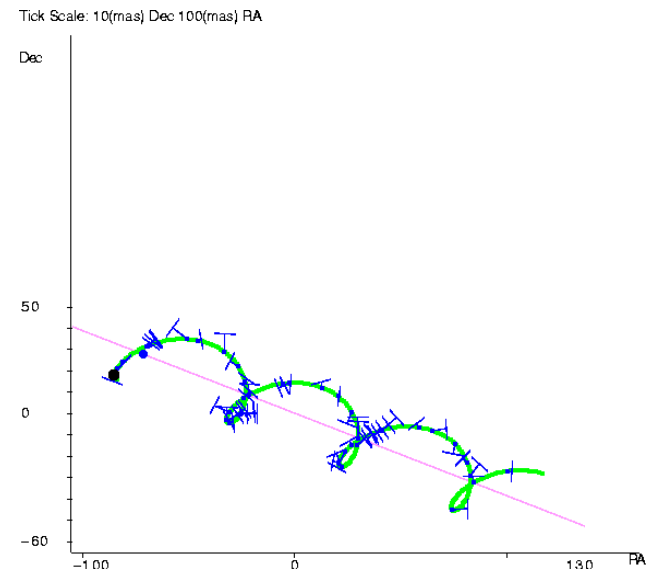
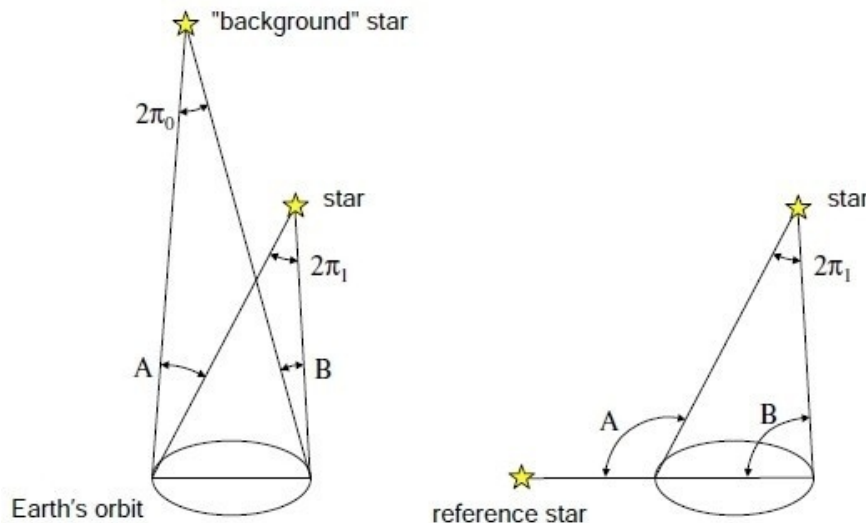


Asztrometria i űrtávcső szükségessége

Pierre Lacroute (1960-as évek): abszolút mérések a relatívak helyett; egy detektorba egyesíteni az ég két területének képét, különböző évszakokban megismételt mérésekkel. A két mező parallaktikus elmozdulásai így nem korrelálnak, és nem lép fel a nullapont kérdése. A felszínről ilyen mérés nem végezhető, mert a refrakció miatt nem állandó a két terület közötti szög. Az űrprojektet 1980-ban hagyták jóvá (lobbik harca után).

High Precision Parallax Collecting Satellite

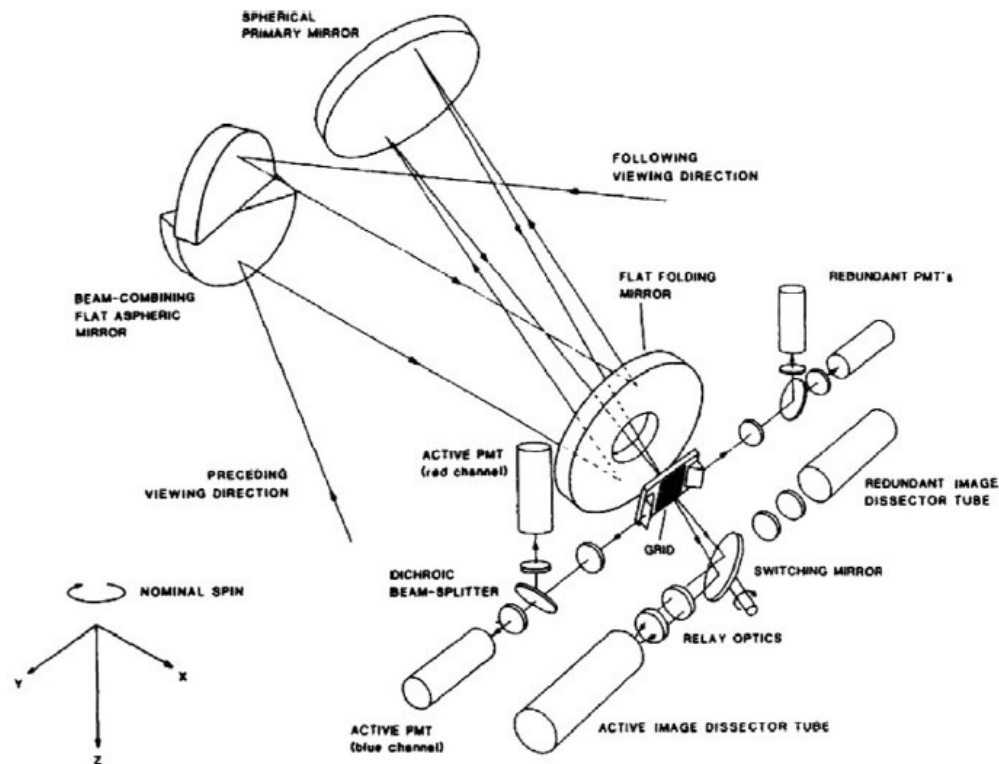
Helyesen Hipparcos a neve $\leftrightarrow$ Hipparkhosz (angolul Hipparchus). Legalább 2,5 éves mérési időszak kell a sajátmozgás és a parallaktikus elmozdulás szeparálásához.



Hipparcos

A programcsillagok egyenletes eloszlása kell a vonatkoztatási rendszer megvalósításához. Lényeges előrelépés a földi mérésekhez képest, ha a pontosság legalább $0,002''$ ($0,002''/\text{év}$).

Pontosra csiszolt optikák, rezgésmentes, állandó hőmérsékletű rendszer. Sugáregyesítő: a kettévágott tükör két fele $58/2$ fokos szöget bezárva, összeragasztva (Bessel [1838] heliométere).



Hipparcos

Az Európai Űrügynökség (ESA) asztrometriai célú mesterséges holdja, a Hipparcos az első asztrometriai űrszonda volt, fedélzetén 29 cm átmérőjű űrtávcsővel.

Detektor: fotoelektromos mérés részrendszerrel; a pontos áthaladási időt kell meghatározni, mint a meridiánkörnél. Itt a műhold forgása miatt mozognak a csillagok.

A képegyesítés miatt nagyon pontos relatív szögtávolság kapható a két mező csillagai között.

Helyzetellenőrzés: giroszkópok, csillagtérképező (hideg gáz kibocsátásával a forgási sebesség korrigálható).

A kapott vonatkoztatási rendszert nem a Föld forgása által definiált rendszerhez kötik, hanem extragalaktikus forrásokhoz. Néhány rádióforrás optikai megfelelőjét bevették a mérési programba. Ez tette lehetővé az ICRS megvalósítását.

Röviddel a felbocsátása előtt dolgozták ki a Tycho-programot is: a csillagtérképező, helyzetelemző rendszer adatai alapján Johnson V és B fotometriai adatok és B-V színindex is, továbbá kisebb pontosságú pozíciók 11 magnitúdóig tízszer több csillagra, tehát nagyobb csillagsűrűséggel (25 objektum/négyzetfok), mindegyik csillagra. A végső Tycho-katalógusban 2,5 millió csillag adatai vannak.

Hipparcos

Indítás: 1989. aug. 8., Kourou (Francia Guyana; ESA). Az IUE után a második geostacionárius csillagászati hold lett volna, de a perigeumot nem tudták kellően magasra emelni. Következmények: 1 helyett 3 földi állomás kellett az adatok vételéhez; perigeumban az észlelés 2 órán át szünetelt; a napelemeket a magnetoszféra rongálta; mérési szünet, ha a Föld (vagy a Hold) túl közel volt a látómezőhöz; a helyzetmeghatározás és az adatredukálás sokkal bonyolultabb lett, mint a GEO pálya esetén.

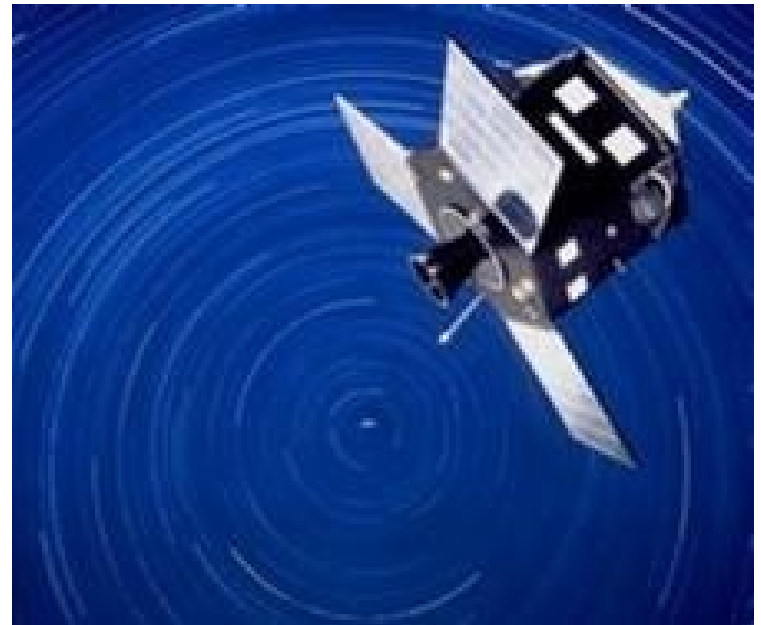
Ezek ellenére 3,5 éves sikeres működés.

Periódus: 0,42 nap (kb. 10 óra);

fél nagytengely: 24582 km,

perigeum: 6890 km (azaz 510 km magasan a felszín fölött).

Az adatfeldolgozáshoz a hold pozícióját 1,5 km pontosan, sebességét 0,2 m/s pontosan kellett ismerni.



Hipparcos

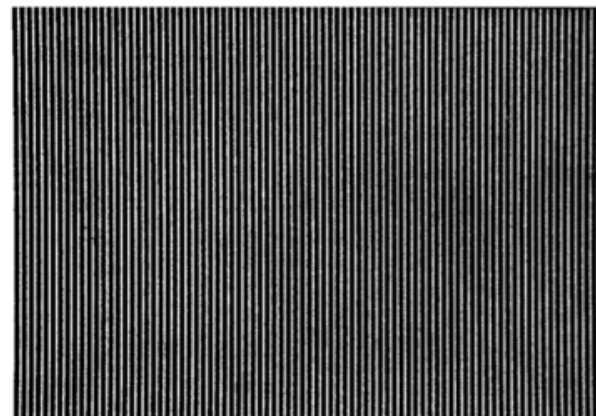
A Hipparcos műszere: 29 cm átmérőjű
Schmidt-távcső (Zerodur), $f = 140$ cm;
látómező: $0,9^\circ$, a fókuszbán a képskála
 $6,8 \mu\text{m}/''$.

Négyzetfokonként kb. 3 programcsillag volt.
Fő detektor: rács, 2688 vonás, $8,2 \mu\text{m}$
rácsállandóval ($1,2''$). Adatgyűjtési
frekvencia: 1200 Hz.

Színképtartomány: 375–750 nm
(*Hp* magnitúdó).

Csillagtérképező detektor (Tycho-projekt):
B és *V* magnitúdó (Johnson-rendszer).

Vonatkoztatási rendszere: J1991,25; $0,001''$
pontossággal (meridánkörrel: $0,04''$ – $0,1''$).
A kapott koordináták pontossága
50-100 év múlva csökken a jelenlegi
földfelszíni mérések szintjére. De a Gaia
adatai addigra mindezt túlszárnyalják.



Hipparcos – a programcsillagok

Hipparcos Input Catalog (HIC): kb. 118 000 (12^m -nél fényesebb) csillag, eleve $1,5''$ -es pontosságú koordinátákkal és elég pontos fotometriával (7,3 és 9 magnitúdó között teljes a minta. Ehhez az 52 000 csillaghoz tudományos projektek által javasolt csillagokból még 66 000 csillagot választottak). 1981-ben hirdették meg a pályázatot, 200 pályázat érkezett, nemcsak ESA-tagországo**k**ból ($\leftrightarrow$ ISO). 214 000 javasolt objektumból szelektáltak az égbolt egyenletes lefedésére is törekedve. A mérés elve az ábrán látható.

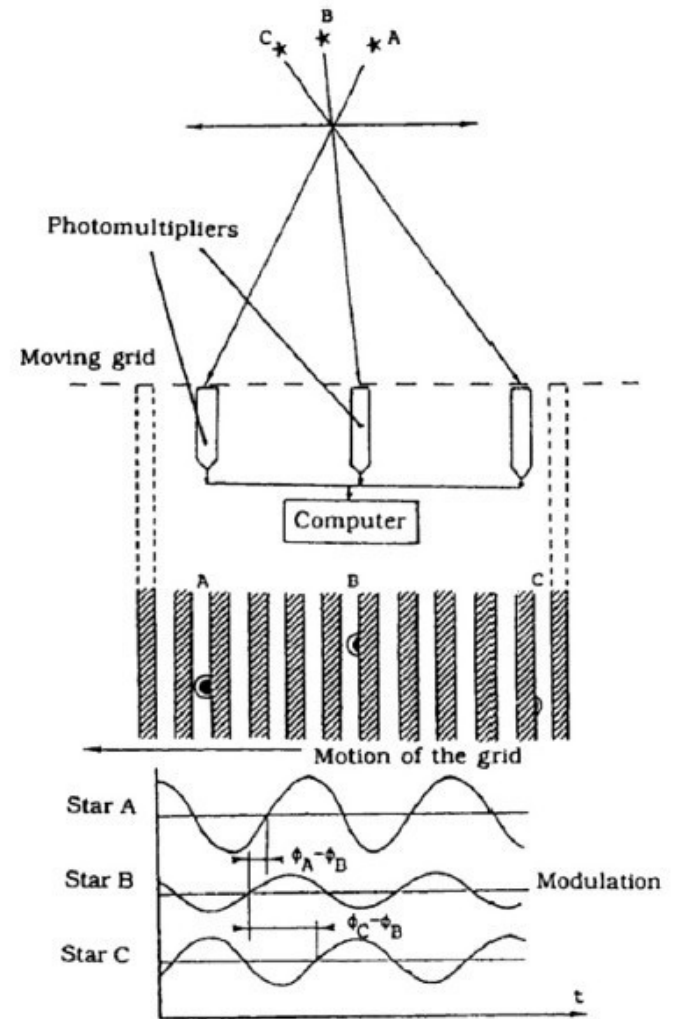
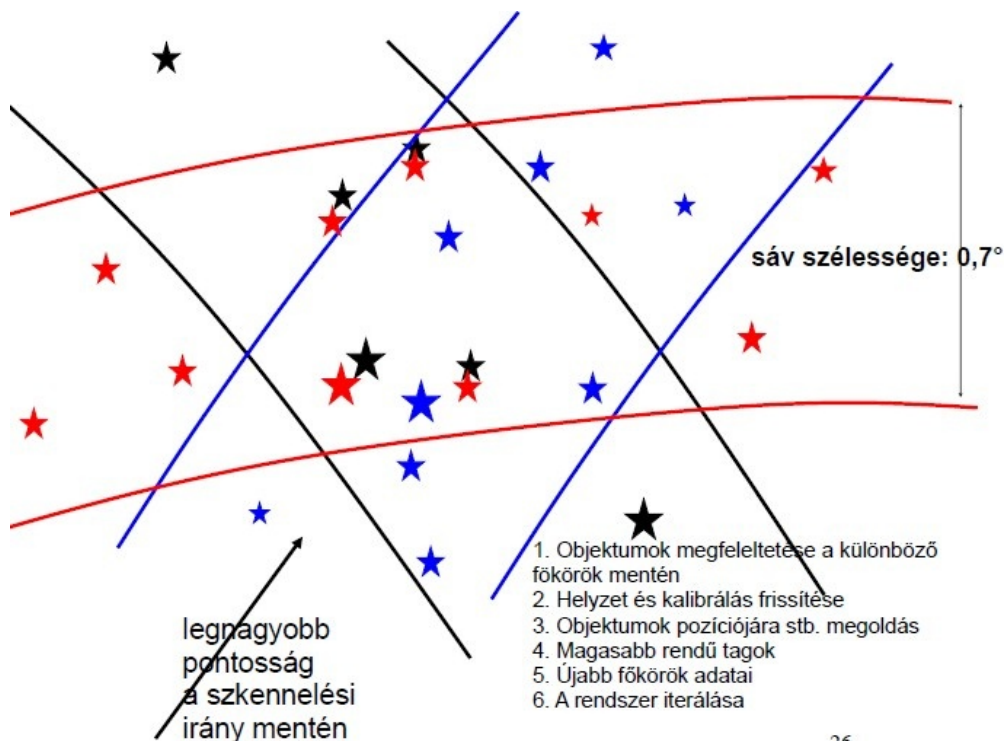


Fig. 3. Illustration of the measurement principle of the Multichannel Astrometric Photometer. A grid is moved across the focal plane during the observations, resulting in modulation of the light intensity produced from the stars in the field which is observed with various photomultipliers. The phases of the modulated light intensity can be converted to one-dimensional differential positions on the sky. This figure is reproduced with kind permission from the author and the publisher

A mérés + adatfeldolgozás elve



s_i i -edik csillag asztrometria paraméterei

a_j helyzetparaméterek j időpontra

c_k kalibrációs paraméterek
 g globális paraméterek

Adattovábbítás: 23 kbit/s
(Darmstadt – ESOC) fő

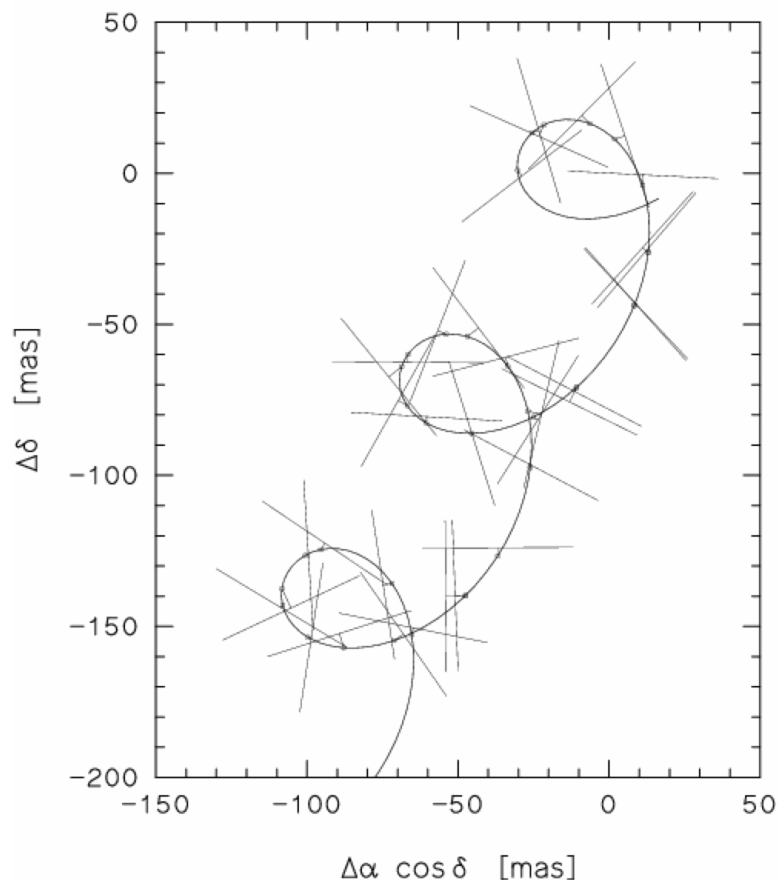
detektor adatai, B_T , V_T ;

másodlagos adatok:

giroszkópok, hőmérséklet, helyzet, gyorsítófűvókák

$$\frac{\partial t}{\partial s_i} \Delta s_i + \frac{\partial t}{\partial a_j} \Delta a_j + \frac{\partial t}{\partial c_k} \Delta c_k + \frac{\partial t}{\partial g} \Delta g \simeq t_{\text{obs}} - t_{\text{calc}}(s_i, a_j, c_k, g)$$

A mérés + adatfeldolgozás elve



Adatfeldolgozás:

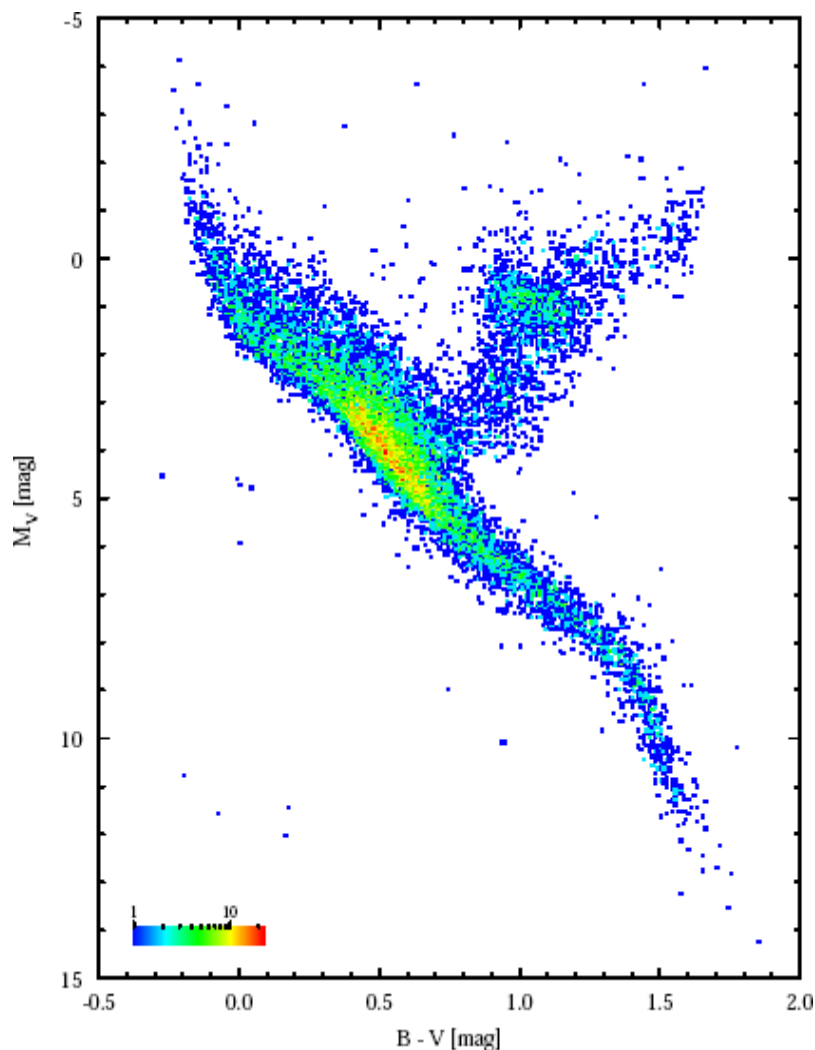
- főkörre redukálás,
- gömbi megoldás,
- ICRS-hez kötés,
- folyamatos feldolgozás.

Egymástól függetlenül dolgozó két konzorcium:

FAST (Fundamental Astronomy by Space Techniques),
NDAC (Northern Data Analysis Consortium).

A végeredmény teljes egyezése esetén fogadták el helyesnek a redukálást.

A Hipparcos eredményeiből



Pontosság:
kb. $0,001''$ a pozícióra,
illetve $0,001''/\text{év}$ a
sajátmozgásra.

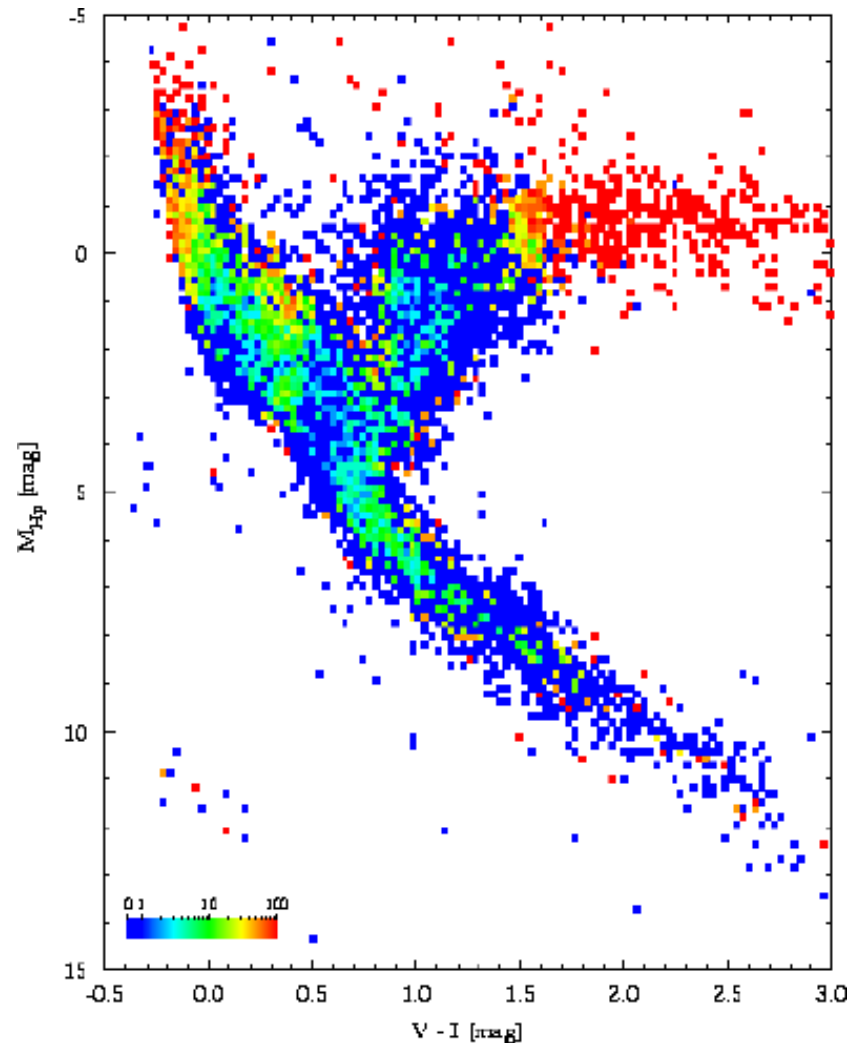
Tycho-2 katalógus
(2000): asztrometria és
kétszín-fotometria
2 539 913 csillagra,
11 magnitúdóig 99%-ban
teljes, sajátmozgásban
2,5 mas pontosság;
fotometriai pontosság:
0,01-0,1 magnitúdó között

A Hipparcos eredményeiből

Minél vörösebb, ill. nagyobb luminozitású egy csillag, annál gyakoribb a fényváltozása.

A 118218 csillag közül 11597 változó, azaz kb. 10%-uk!
A változócsillagok közül 5665 új (vagy fényváltozását korábban gyanították). Ezek közül 308 annyira fényes, hogy szerepel a Bright Star Catalog-ban (HR száma van).

Az 5665 új változócsillag közül 3157 került be a GCVS-be (a típus pontos ismerete alapvető). Lásd: IBVS 4659 (1999), 74th Special Name-list of Variable Stars.



Summary of the Hipparcos Scientific Mission

1997

Measurement period	1989.85–1993.21
Catalogue epoch	J1991.25
Reference system	ICRS
Coincidence with respect to ICRS (all 3 axes)	± 0.6 mas
Proper motion deviation from inertial (all 3 axes)	± 0.25 mas/yr
Estimated systematic errors in astrometry	< 0.1 mas

Hipparcos Catalogue:

Number of entries	118218
Entries with associated astrometry	117955
Entries with associated photometry	118204
Mean sky density	~ 3 per square degree
Limiting magnitude	$V \sim 12.4$ mag
Completeness	Up to $V = 7.3$ – 9.0 mag
Median precision of positions, J1991.25 ($H_p < 9$ mag)	0.77/0.64 mas
Median precision of parallaxes ($H_p < 9$ mag)	0.97 mas
Median precision of proper motions ($H_p < 9$ mag)	0.88/0.74 mas/yr
Distance determined to better than 10 per cent	20853
Distance determined to better than 20 per cent	49399
Inferred ratio of external errors to standard errors	~ 1.0 – 1.2
Median photometric precision (H_p , for $H_p < 9$ mag)	0.0015 mag
Average number of photometric observations per star	110
Number of entries variable or possibly variable	11597
Number of solved or suspected double/multiple systems	23882

Tycho Catalogue:

Number of entries (including 6301 HIP only)	1 058 332
Mean sky density	~ 25 per square degree
Limiting magnitude	$V_T \sim 11.5$ mag
Completeness	$V_T \sim 10.5$ mag
Median astrometric precision, J1991.25	25 mas
Mean number of photometric observations per star	130
Median photometric precision (all stars): B_T , V_T	0.07, 0.06 mag

A Hipparcos eredményeiből

Hipparcos Katalógus (1997): 5 asztrometriai paraméter a 118 000 csillagra;

Kettős és többes csillagok: $\Delta m < 3$, szeparáció $> 0,1$ ívmásodperc; 12 195 csillagot vizuális kettősnek (többesnek) észlelt. 235 rendszer pályáját határozták meg a pozíciómérésekből. További 6763 csillagnak van gyaníthatóan kísérője. A kettőscsillagok fizikai paraméterei a vizuális pálya alapján is meghatározhatók (pl. a közeli barna törpék tömege).

Változócsillagok száma: 11 597, és közülük jó néhány fényes csillag, noha az idősor nem is kedvező; az újak között 343 fedési kettős, 267 SPB, rengeteg mikrováltozó.

Fontos tény: az észlelt csillagok 10%-a változócsillag.

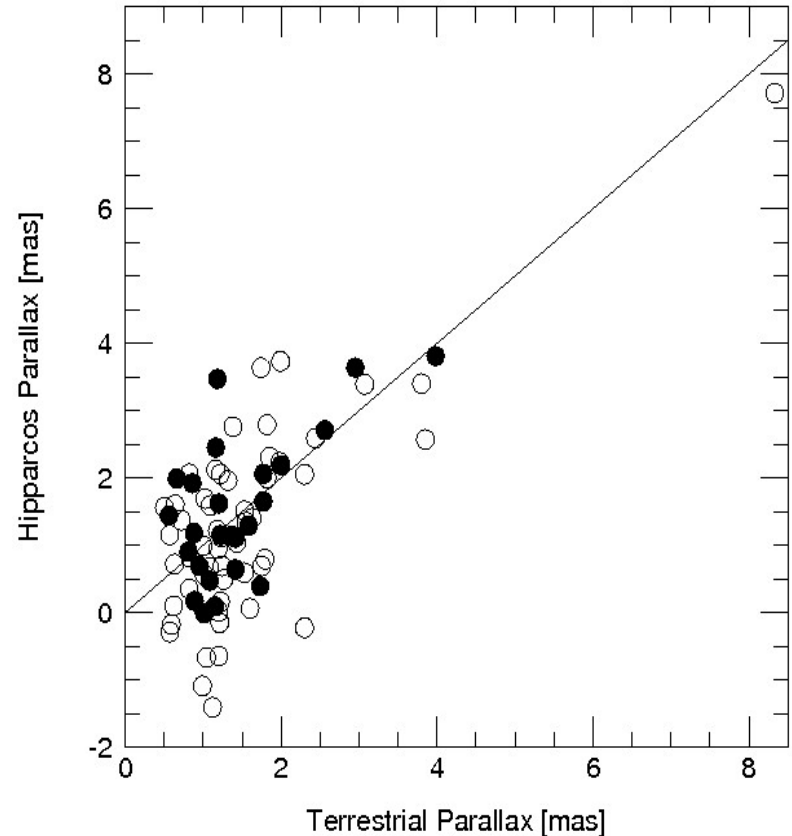
Közeli csillagok: a Gliese-katalógussal (Catalog of Nearby Stars, 1969, 25 pc-ig) összevetve 40% kívül esik a 25 pc-en, viszont másik 119 csillag 25 pc-en belül van. A 25 pc-en belül levő csillagok mellett 37 új kísérőt találtak, közte barna törpét is.

A Hipparcos eredményeiből

A különböző típusú csillagok
luminozitása, tömege és sugara
kiszámítható a távolság és
fényesség alapján: horizontális
ág, fehér törpék a HR-diagramon,
a pulzáló változócsillagok P-L
relációjának kalibrálása (cefeidák,
RR Lyr, δ Sct).

A cefeidák között előforduló
kettőscsillagokat még éppen nem
tudta felbontani, de a pálya menti
mozgás „bezavart” a parallaxis
meghatározása során – a sok
negatív parallaxis erre utal.

A Gaia jobb szögfelbontásával az
ilyen cefeidákat vizuális kettősnek
észlelheti.



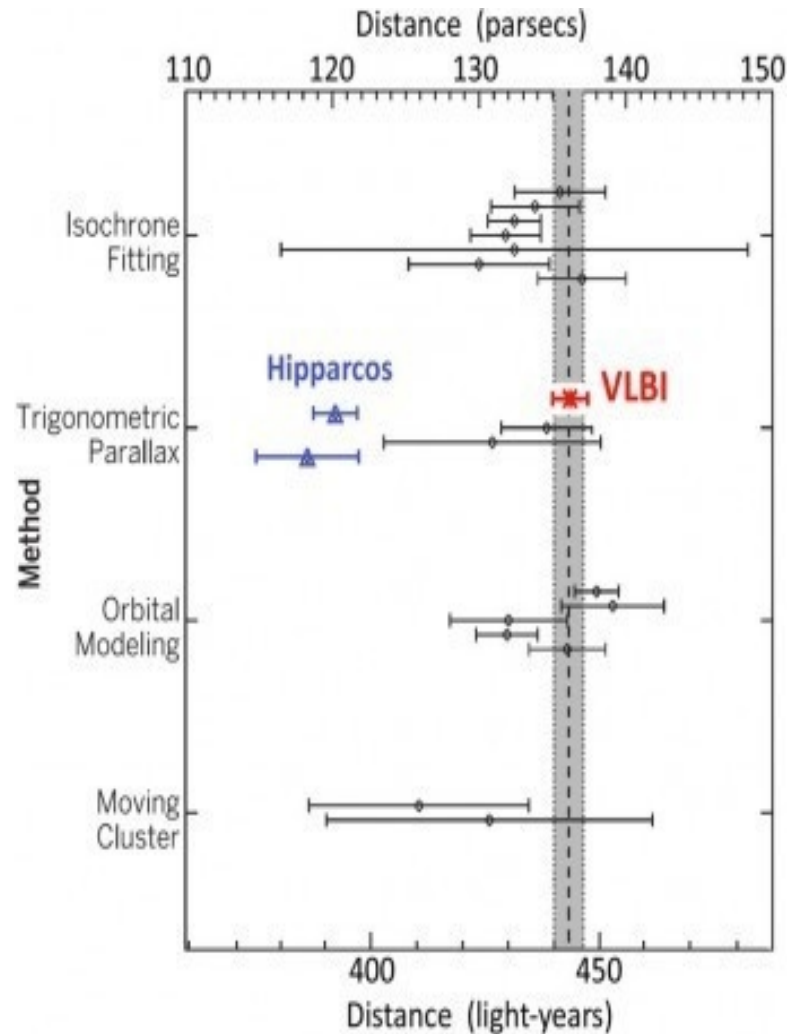
A Hipparcos eredményeiből

Csillaghalmazok: 200 halmaz tagjai voltak a Hipparcos Input Katalógusban.

A Plejádok 116 pc-re a földi 130-135 pc helyett. A fémesség és He-tartalom különbsége nem magyarázza az eltérést.

A mérésnél a két fő követelmény a stabilitás és a konnektivitás volt (bizonyos mezőpárok között ez utóbbi nem teljesült, az egyik mező dominált).

2007-ben újradukálták a teljes adattömeget. Ezt figyelembe véve: a zaj ötödére csökkent, ám az eredeti Hipparcos Katalógus megbízható maradt.

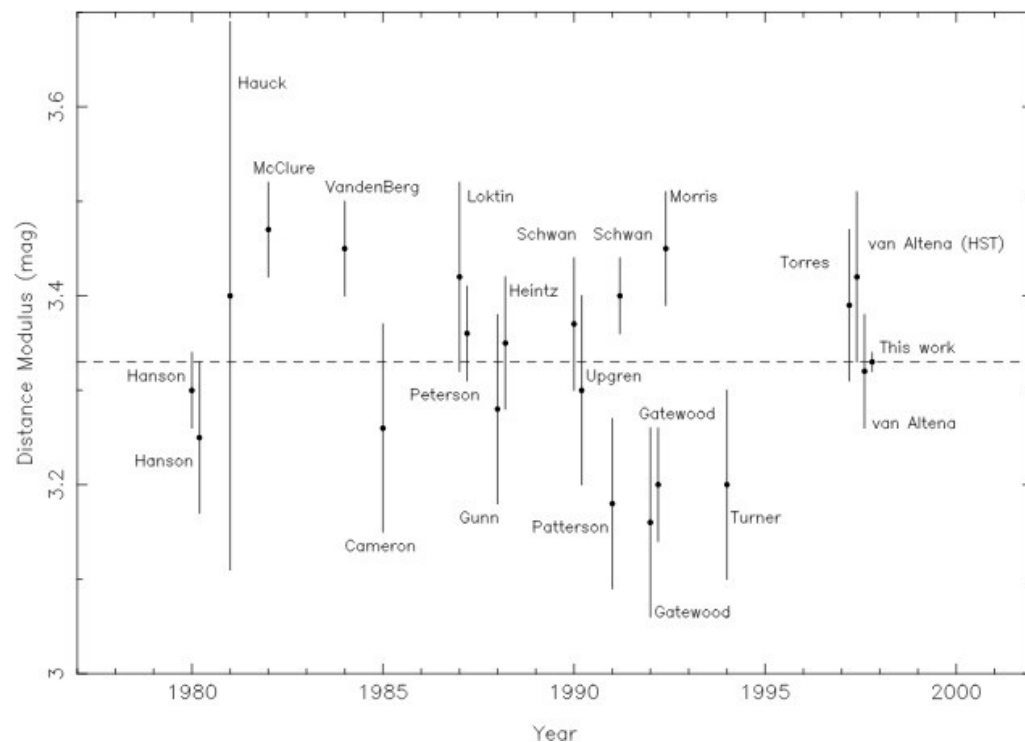
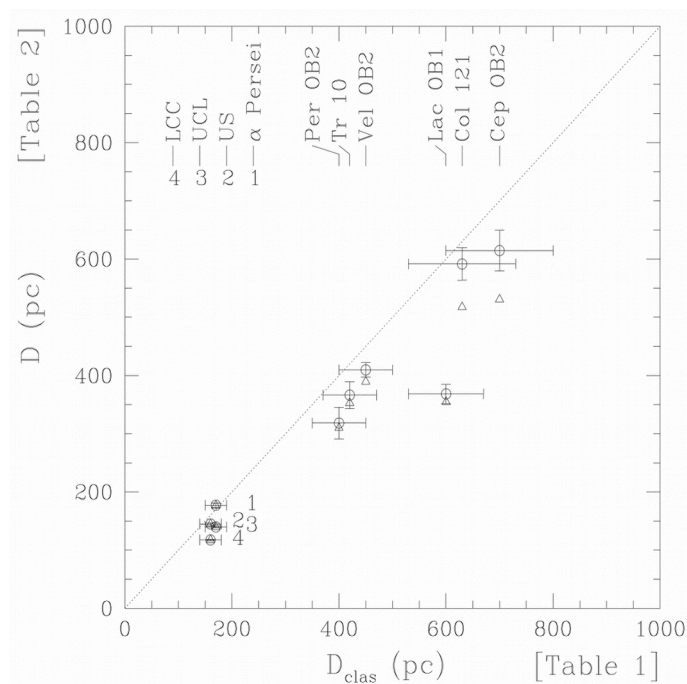


A Hipparcos eredményeiből

A Hyadok 3-dimenziós szerkezete (218 tag, közte 39 újonnan talált).

A halmaz közepének távolsága 151 ± 1 fényév (jobbba lent), sebessége $45,93 \pm 0,23$ km/s. A tömeg szerinti ülepedés is látszik a szerkezetből.

OB-asszociációk távolsága: szisztematikus eltérés a földi mérésekhez képest. Reális az effektus! (balra lent)

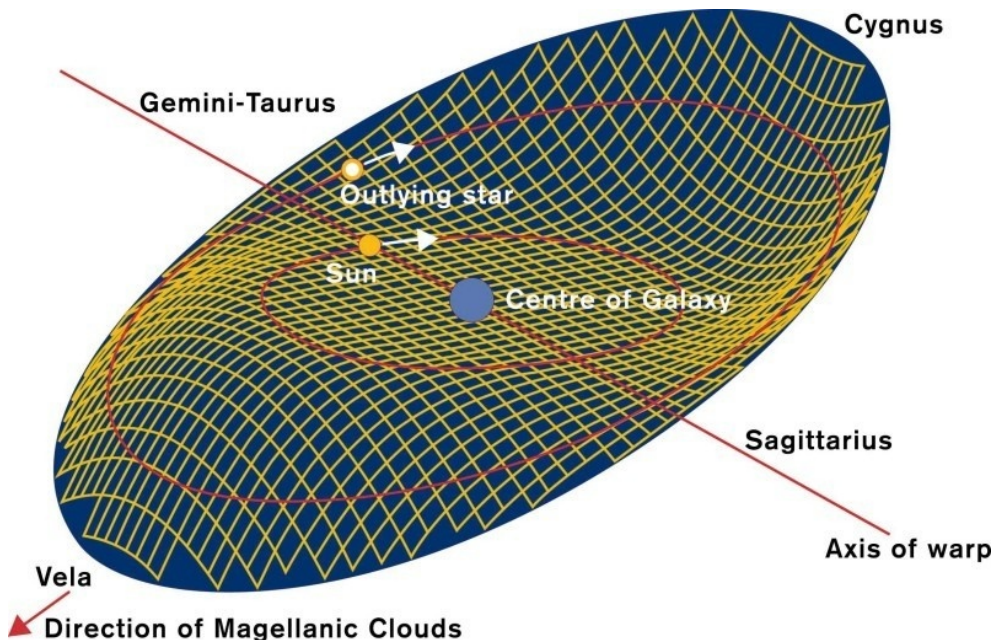


A Hipparcos eredményeiből

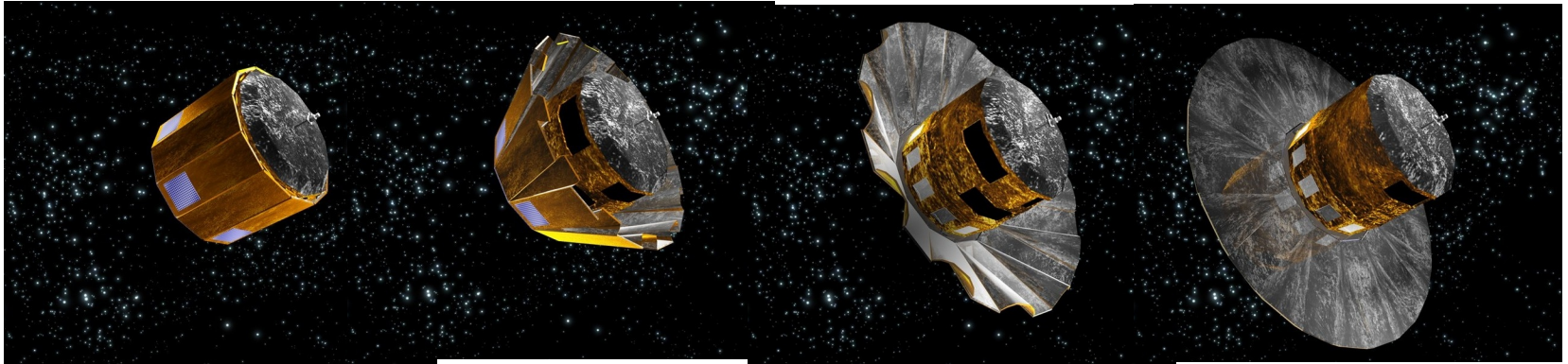
A Tejútrendszer korongja nem sík, és a küllős spirális jelleg is látszik az adatokból.

A Hipparcos pozícióadatait azonnal használták az ISO vezérléséhez.

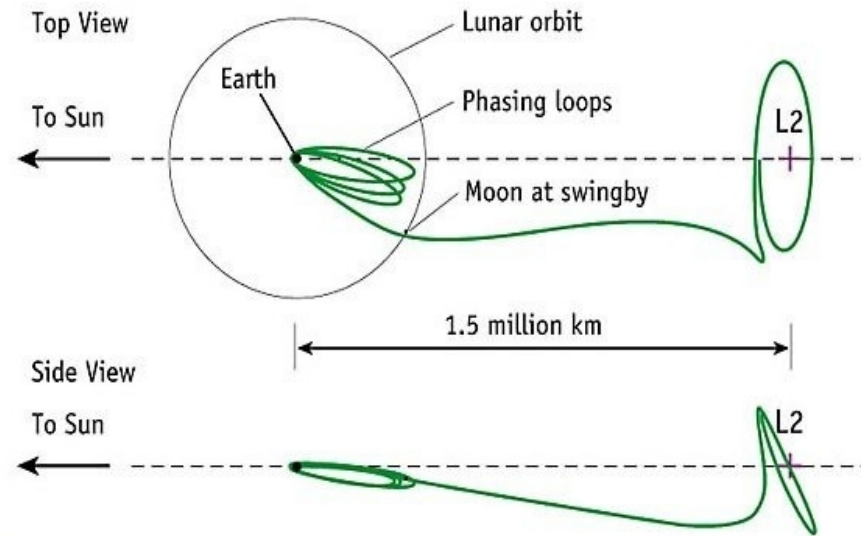
Az általános relativitáselmélet ellenőrzése a Nap melletti fényelhajlással (1,7 ívmásodperc lenne a napkorong pereménél). Még a Naptól 90 fokra is mérni tudták a hatást. (A jobbra példaként mutatott galaxis torzultabb a Tejútrendszerénél.)



A Gaia asztrometriai űrszonda - 2013-



2000-ben hagyta jóvá az ESA.
Eredetileg GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), de a megvalósított szondában a mérést nem interferometrikus módszerrel végzik. Ezért a végleges Neve nem GAIA, hanem **Gaia**.
Indítás: 2013. december 19. Kourou (az ESA indítóállomása)
Egy hónap alatt jutott az L2 pont körüli Lissajous-pályára.



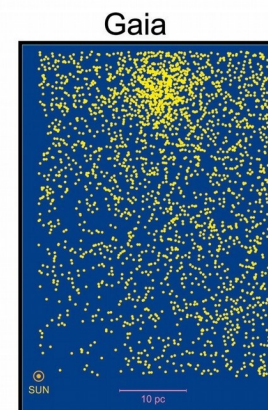
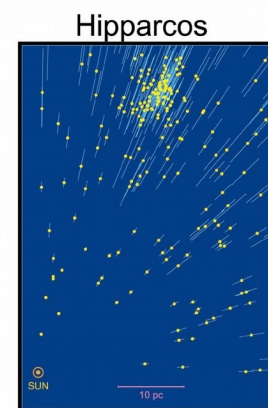
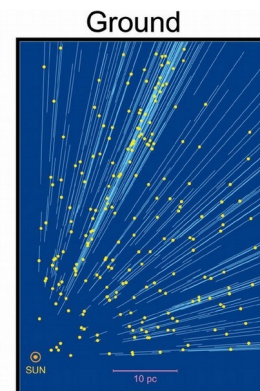
Hosszú út vezetett a Gaiához

- 1993: Original Gaia mission proposal
- October 2000: Adoption of the Gaia mission by ESA
- June 2001: European experts gather to prepare for Gaia
- March 2004: Gaia proceeds to phase B1
- June 2005: Establishment of a Data Analysis Coordination Committee
- May 2006: ESA selects prime contractor for Gaia
- June 2007: Science Programme Committee approves DPAC proposal for Gaia data processing
- June 2013: Gaia ready for launch
- November 2013: Multilateral agreements signed between ESA and funding agencies
- December 2013: Gaia lift-off
- February 2014: Gaia comes into focus
- July 2014: Start of routine operational phase for Gaia
- November 2015: First Gaia DPAC consortium meeting
- June 2016: 10 years of Gaia DPAC
- July 2016: Gaia's second anniversary
- September 2016: First Gaia Data Release ([more on the overview page](#))
- January 2017: Second Gaia DPAC consortium meeting
- April 2018: Gaia's surprising discoveries part 1 from Gaia DR1
- April 2018: Gaia's surprising discoveries part 2 from Gaia DR1
- April 2018: Gaia Data Release 2 ([more on the overview page](#))
- November 2018: Gaia mission extension
- October 2018: Third Gaia DPAC consortium meeting
- ... and there is much more yet to come!

A Hipparcos és a Gaia összehasonlítása

	Hipparcos	Gaia
Magnitúdóhatár	12	20 magnitúdó
Teljesség	7,3-9,0	20 magnitúdó
Fényes határ	0	6 magnitúdó
Objektumok száma	120 000	26 millió V = 15 m-ig, 250 millió V = 18 m-ig 1000 millió V = 20 m-ig
Effektív távolsághatár	1 kpc	50 kpc
Kvazárok	1 (3C 273)	500000
Galaxisok	nincs	1000000
Pontosság	0,001 ívmásodperc	7 mikroívmásodperc V = 10 m 10-25 mikroívmásodperc V = 15 m 300 mikroívmásodperc V = 20 m alacsony diszp. spektrum V = 20 m-ig
Fotometria	2-színfotometria (B és V)	
Radiális sebesség	nincs	15 km/s V=16-17 m-ig
Megfigyelési program	előre kiválasztva	teljes es torzítatlan

Az 1 mikroívmásodperces asztrometriai pontosság eléréséhez a Gaia szonda helyzetét kb. 8 mm-es pontossággal kell ismerni!
A Gaia esetében a táblázatban a tervezett adatok szerepelnek.



A Hipparcos és a Gaia összehasonlítása

Luminosity calibrations with Hipparcos and Gaia

	Hipparcos	Hipparcos 2	Gaia
$\sigma_{\pi}/\pi < 0.1 \%$	-	3	100 000 ★
$\sigma_{\pi}/\pi < 1 \%$	442 ★	719 ★	~ 11 x 10 ⁶ ★ up to 5-10 kpc (Mv<-5) up to 1-2 kpc (Mv<5)
$\sigma_{\pi}/\pi < 10 \%$	22 396 ★	30 579 ★	~ 150 x 10 ⁶ ★ up to 30-50 kpc (Mv<-5) up to 2-5 kpc (Mv<5)
Error on Mv	0.3 mag at 100 pc		0.1 mag at 10 kpc
Stellar pop.	mainly disk		all populations, even the rarest
HR diagram < 10 %	-4 to 13, -0.2 to 1.7		all mag and colours

A Hipparcos és a Gaia összehasonlítása

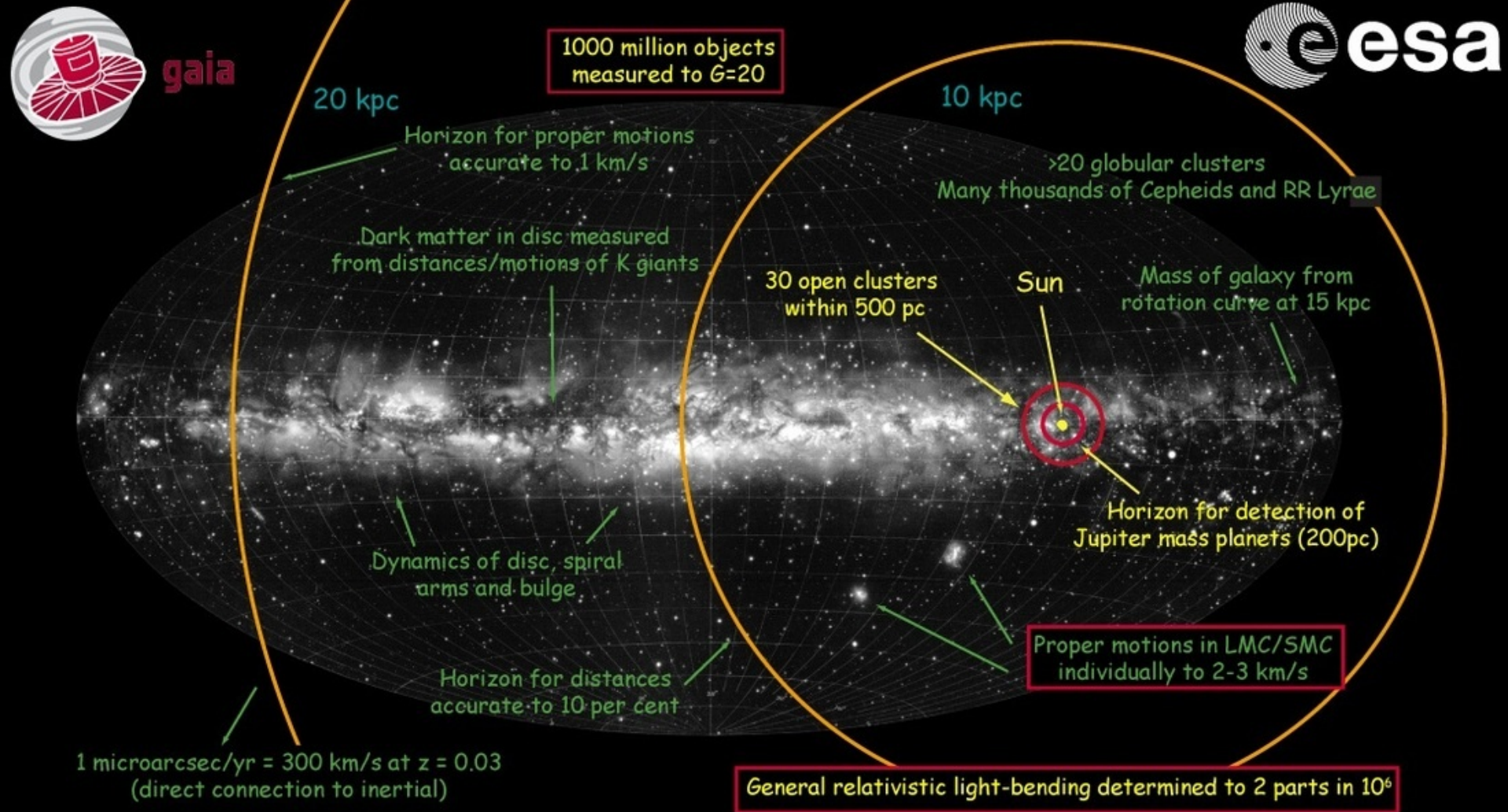
Pulsating variables from Hipparcos to Gaia

	Hipparcos	Gaia
Cepheids	273 (2 new) ~ 100 with $\sigma_{\pi} < 1$ mas P : 2 to 36 days	Census of galactic Cepheids with $G \leq 20$ ~ 9000 Cepheids (*) All periods, colours and metallicity Up to 5-8 kpc with $\sigma_{\pi}/\pi < 1\%$ All galactic with $\sigma_{\pi}/\pi < 10\%$
Pop II Cepheids	~ 30	~ 2000
in LMC	none	1000-2000 Cepheids with $\sigma_{\pi}/\pi \sim 80-100\%$ Mean distance expected to 7-8 % (**)
RR Lyrae	186 (9 new) only RR Lyr with good π	All galactic RR Lyrae: 70000 (***) All metallicity Up to 1.5 kpc with $\sigma_{\pi}/\pi < 1\%$, $\sigma_{\pi}/\pi < 10\%$ In globular clusters: mean $\sigma_{\pi}/\pi < 1\%$

Windmark et al. 2011 (*)

(**) Clementini 2010

(***) Eyer & Cuypers 2000



Szempontok a Gaia tervezésekor

teljes látómező:

- aktív terület: 0,75 négyzetfok
- CCD-k: 14 + 62 + 14 + 12
- 4500 x 1966 pixel (TDI)
- pixelméret = $10 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
= 59 mas x 177 mas

csillagterképező:

- mindent detektál 20^m-ig
- kozmikus sugárzást kihagy

asztrometria:

- detektálási zaj: ~6 e-

fotometria:

- spektrofotométer
- kék és vörös CCD-k

spektroszkópia:

- nagy felbontású színeképek
- vörös CCD-k

<http://www.cosmos.esa.int/web/gaia/science-performance>

	B1V	G2V	M6V
V-I _c [mag]	-0.22	0.75	3.85
Bright stars	5-14 μs (3 mag < V < 12 mag)	5-14 μs (3 mag < V < 12 mag)	5-14 μs (5 mag < V < 14 mag)
V = 15 mag	26 μs	24 μs	9 μs
V = 20 mag	600 μs	540 μs	130 μs

Astrometric Performance

Complete sky survey $0 < G < 20$

	B1V			G2V			M6V		
G [mag]	G	BP	RP	G	BP	RP	G	BP	RP
15	1	4	4	1	4	4	1	7	4
18	2	8	19	2	13	11	2	89	6
20	6	51	110	6	80	59	6	490	24

Photometric Performance: units=mmag

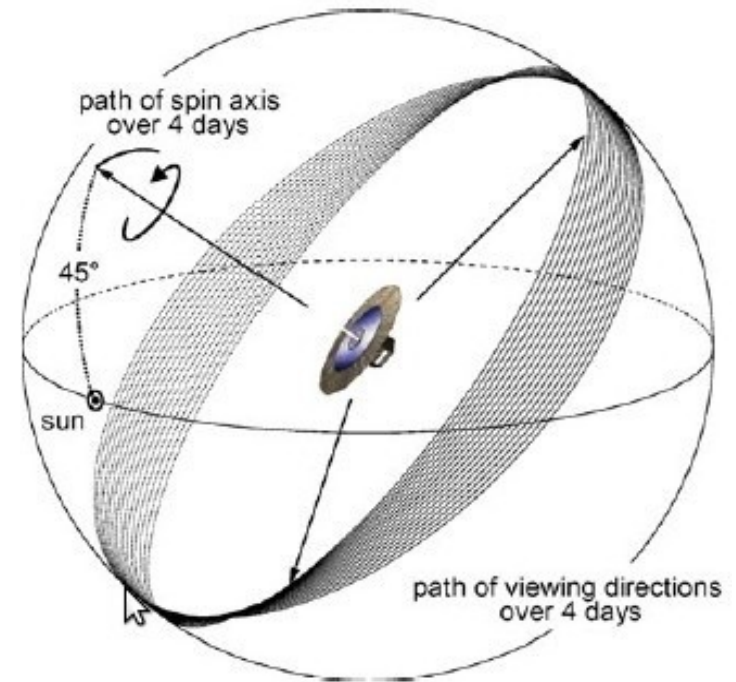
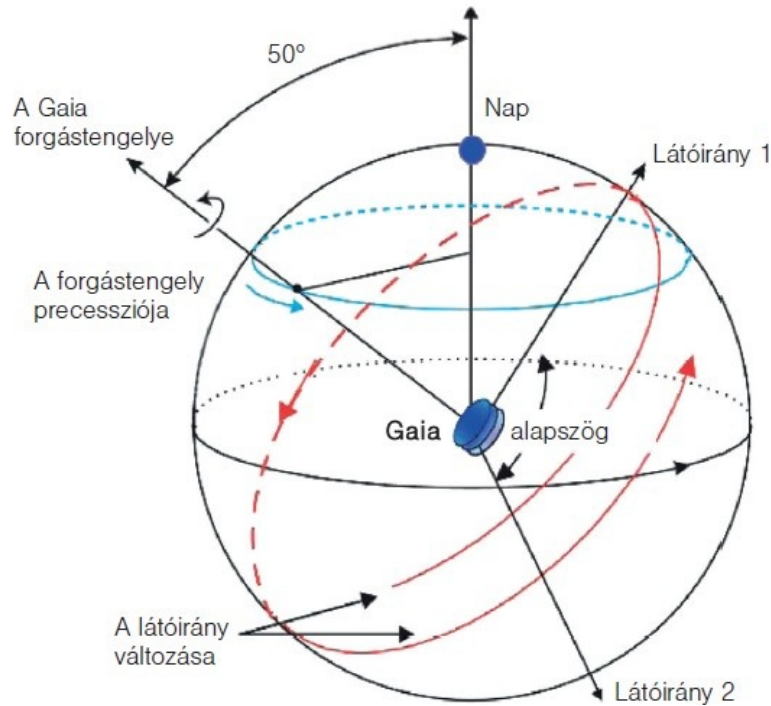
Spectral type	V [mag]	Radial-velocity error [km s ⁻¹]
B1V	7.5	1
	11.3	15
G2V	12.3	1
	15.2	15
K1III-MP (metal-poor)	12.8	1
	15.7	15

Spectroscopic Performance: 60 million RVs

Plus Spectro-Photometry,
astrophysical parameters, light curves, ...
for all 1+ billion sources

- Asztrometria ($V < 20$):
 - 20 magnitúdóig teljes (fedélzeti detektálás) $\Rightarrow 10^9$ csillag
 - pontosság: 10–25 milliomed ívmásodperc 15 magnitúdónál (Hipparcos: 1 ezred ívmásodperc 9 magnitúdónál)
 - szkennelés, két eltérő irányban
 - (a globális pontosságért az észlelési idő optimális kihasználásával)
 - globális asztrometriai redukálás (mint a Hipparcos esetében)
- Fotometria ($V < 20$):
 - asztrofizikai diagnosztika (alacsony diszperziós színeképből) + szín
 $\Rightarrow \Delta T_{\text{eff}} \sim 200 \text{ K}$, $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ 0,2 dex, extinkció
- Radiális sebesség ($V < 16\text{--}17$):
 - alkalmazása:
 - térbeli mozgás harmadik komponense
 - dinamika, populációs vizsgálatok, kettőscsillagok
 - színekép: kémiai összetétel, rotáció
 - mérési elv: rés nélküli spektroszkópia a Ca triplet körül (847–874 nm)

A Gaia mérési módszere



- főtükrök mérete: $1,45 \times 0,5$ m
- alapszög a két mérési irány között: $106,5$ fok
- $60''/\text{s}$ forgási sebesség
- $2 \times 0,45$ négyzetfok látómező

A Gaia mérési módszere

A szonda forgása során főkörök mentén szkenneli az eget mindkét teleszkóp.

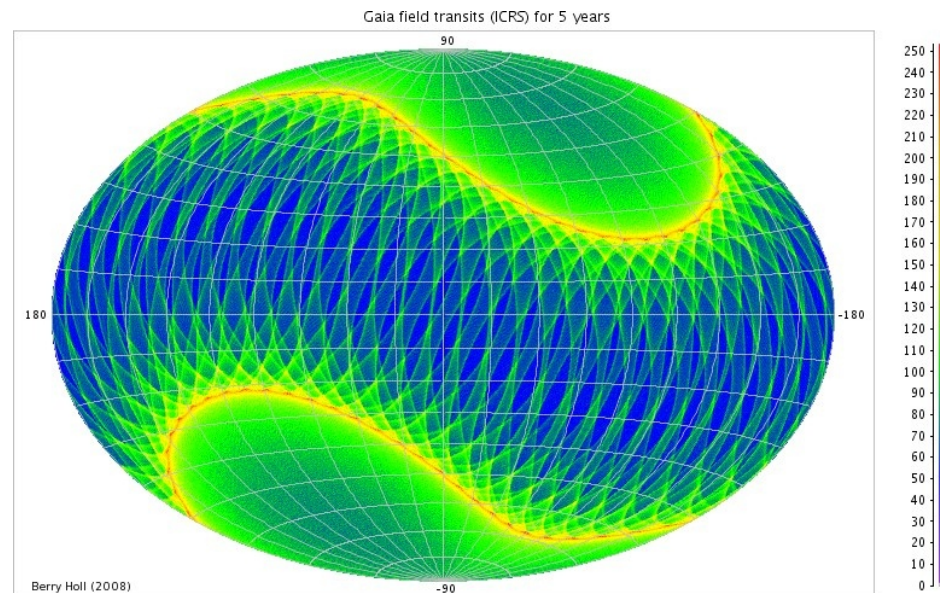
A jelek 3 műszerbe jutnak:

- asztrometria (helyzet és mozgás)
- fotometria (két sávban)
- spektroszkópia (radiális sebesség, kémiai összetétel)

Az asztrometriai pozícióból számítható a parallaxis és a sajátmozgás.

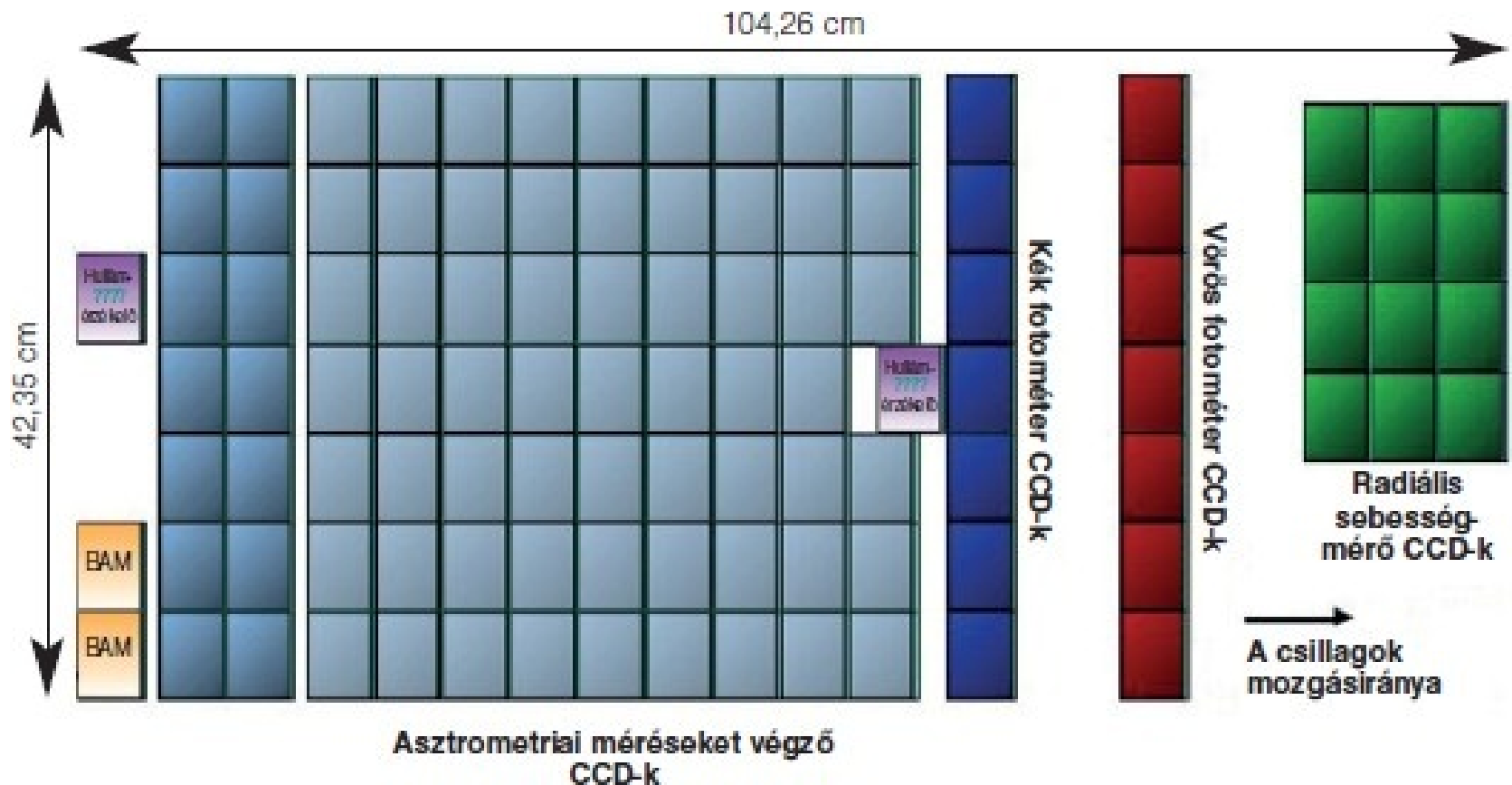
A 330–1050 nm közötti sávban végzett fényességmérésből G magnitúdó, két sávban (330–680 nm, 630–1050 nm) külön fényességmérés (G_{BP} , G_{RP}), ebből hőmérséklet.

A radiálissebesség-spektrométer a legfényesebb 150 millió csillagot méri, ebből a térbeli mozgás 3. komponensét állapítják meg.



A Gaia asztrometriai űrszonda

Eredeti terv: 5 év mérés, már meghosszabbítva 2020 végéig, majd 2022 végéig, és ígéret van további hosszabbításra. 50 Gb/nap adat (össz: 1 Pb). Az ábra a detektort mutatja a fókusz síkban.



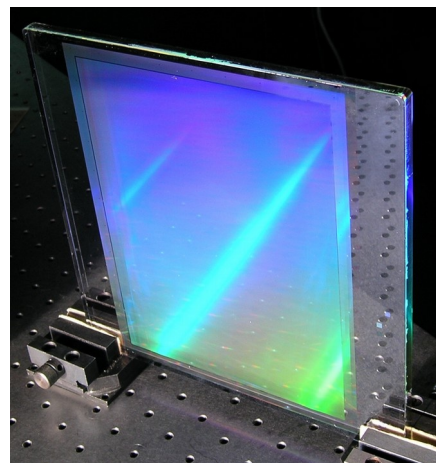
A Gaia asztrometriai űrszonda



esa

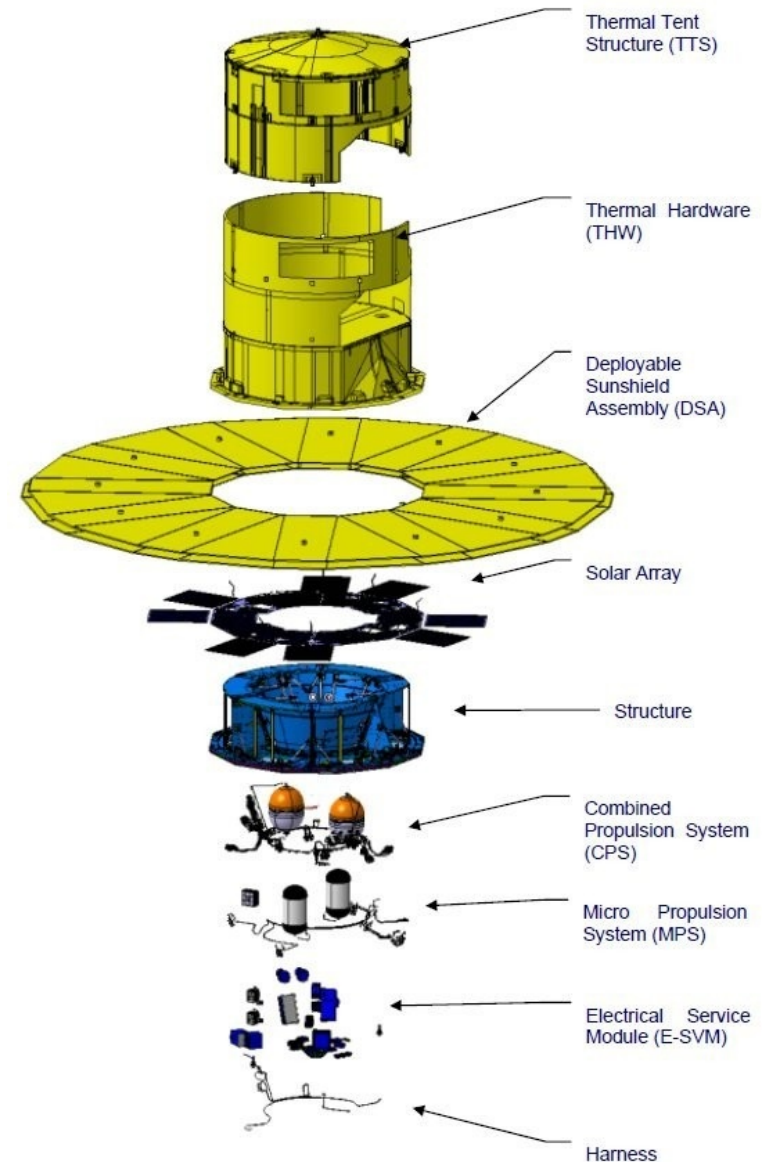
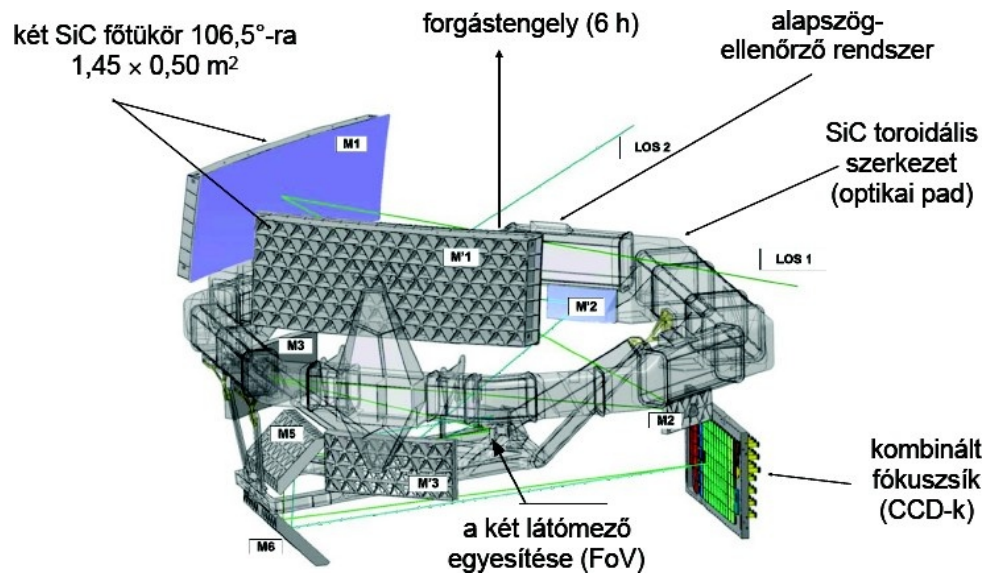
EADS
ASTRIUM

SAFRAN
Sagem



ESA, S. Corvaja 2013

A Gaia asztrometriai űrszonda



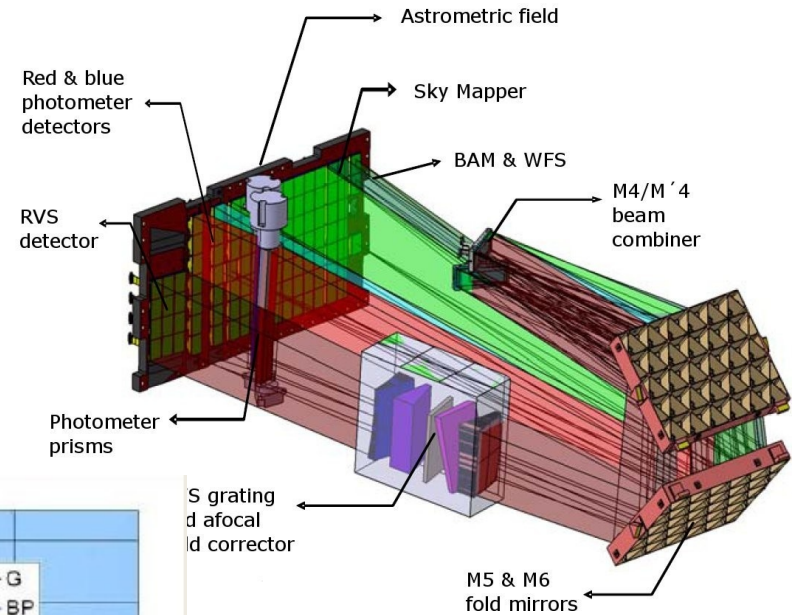
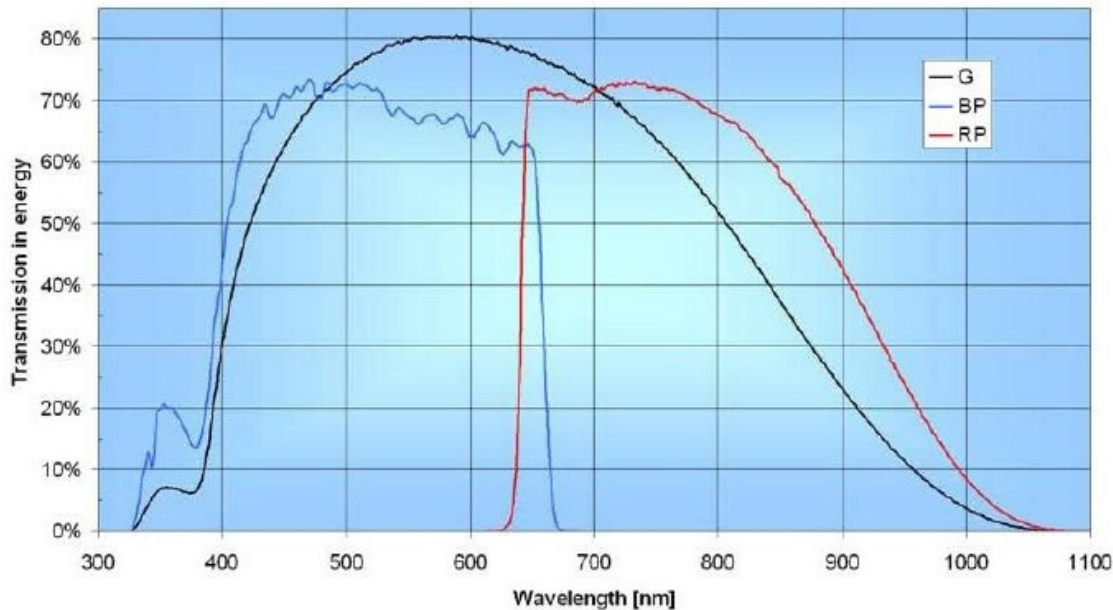
Fotometria a Gaiával

Fotometria:

G-sáv (330–1050 nm)
asztrometriához; G magnitúdó

BP (330–680 nm),
RP (640–1050 nm)

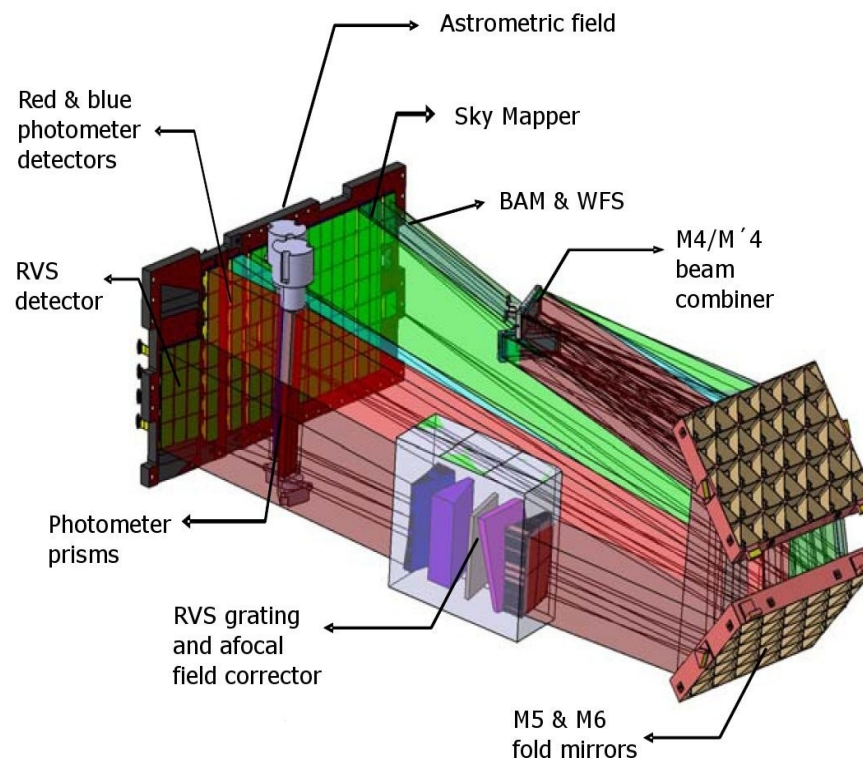
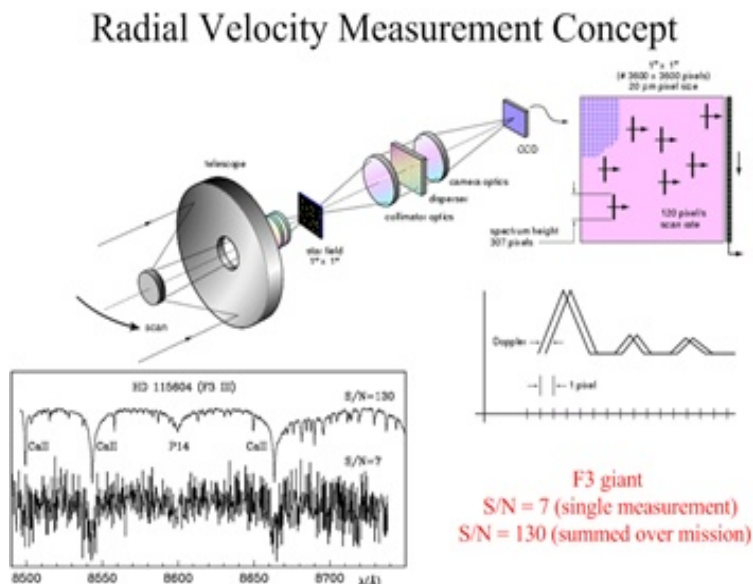
spektrofotometria; G_{BP} és G_{RP}
fényesség



A radiális sebesség mérése a Gaiával

Látóirányú sebesség: 16,2 magnitúdóig, rés nélküli spektroszkópiával
845–872 nm között (a Ca-triplet környékén), $\Delta\lambda/\lambda = 11500$

- a térbeli mozgás 3. komponense
- perspektivikus gyorsulás
- dinamika
- kettősség
- populációs vizsgálatok
- kémiai összetétel és rotáció is.



A Gaia misszió elején várt eredmények

- Csillagok luminozításának meghatározása:
 - 2 kpc-en belül 10 millió csillagra 1% hibával;
 - 5 kpc-en belül 150 millió csillagra 10% hibával;
- Ritka csillagtípusok és gyors csillagfejlődési epizódok észlelése;
- Minden távolságindikátor parallaxisának kalibrálása;
- Pontos HR-diagram a Tejútrendszer egészére;
- Pontos tömegfüggvény és luminozitási függvény a Naphoz közeli fehér törpékre (kb. 200000) és barna törpékre (kb. 50000);
- Csillagkeletkezési tartományok (fősorozat előtti csillagok) kezdeti tömegfüggvénye és luminozitási függvénye;
- A fényváltozás detektálása és jellemzése a HRD egészére.
- A Tejútrendszer 3-dimenziós térképe (a sötét anyag eloszlása is);
- A csillagászati vonatkoztatási rendszer pontosítása (kvazárok segítségével, kb. félmillió kvazár észlelése);
- Exobolygók fotometriai és asztrometriai kimutatása (kb. 10000);
- A Földet veszélyesen megközelítő kisbolygók észlelése;

A 6-dimenziós térkép alapján

A csillagok luminozitásának meghatározása alapján:

- Minden csillagpopuláció térbeli és sebességeloszlása;
- A Tejútrendszer korongjának és halójának szerkezete és dinamikája (kialakulásuk története is), a sötét anyag eloszlása galaxisunkban;
- Szilárd és egységes megfigyelési alapok a csillagok szerkezetére és fejlődésére vonatkozó elméletekhez;
- Felmérés több százezer kis égitestről (a Naprendszerben) és kb. 20 000 exobolygóról;
- Más projektek támogatása adatszolgáltatással (pl. VLT, JWST);
- Távolságstandardok kalibrálása a Magellán-felhőkig;
- Tranziens objektumok detektálása + riasztás azonnali továbbészlelésre (Gaia Science Alert System, kb. 20 000 objektum);
- Kvazárok (kb. 500 000) detektálása, gravitációs lencsék szerkezete.

Egyéb kutatások a Gaiával

Naprendszer

- 20 magnitúdóig minden mozgó objektum kimutatása;
- Kb. 100 000 új kisbolygó felfedezése; Átmérő 1000 kisbolygóra, tömeg 100-ra;
- Pályák pontosítása: a jelenlegieknél kb. 30-szor pontosabb pályaelemek;
- A Föld, a Vénusz és a Mars esetleges trójai kísérőinek kimutatása;
- Kb. 300 Kuiper-objektum detektálása;
- NEO-k: az 1 km-nél nagyobb méretűek közül kb. 1600 kisbolygó pályája keresztezi a Földét, de eddig alig ezer ismert.

Általános relativitáselmélet

- A gravitációs fényelhajlás pontos kimérése (a napkorongnál az elhajlás értéke kb. 1,75 ívmásodperc). A szonda forgástengelyét úgy állították be, hogy a Jupiterhez közeli csillagok fényének elhajlását is mérni tudják.

1 Pbyte adat alapján a végső katalógus elkészültét 2025 körülre tervezték.

A Gaia eddigi eredményei

Részeredmények vannak, de egyedi forrásokra még nem elég pontosak, objektumok csoportjaira, statisztikus vizsgálatokra viszont kiválóan alkalmasak.

A Gaia és az ESA illetékes vezetőinek szándéka szerint kb. kétévente nagy mennyiségű adathoz biztosítanak hozzáférést az addig feldolgozott adattömegből. Csak olyan adatok válhatnak publikussá, amelyek a Gaia vezetői szerint megbízhatóak. A közölt adatok az idő előrehaladtával egyre pontosabbak.

Az eddigi adatkibocsátások:

Gaia DR1: 2016. szeptember, az első 14 hónapi mérések alapján

Gaia DR2: 2018. április, az első 22 hónap mérései alapján

Gaia EDR3: 2020. december, 34 hónap mérései alapján

Gaia DR3: 2022. június, az EDR3 adatai további adatokkal bővítve.

Az eddig publikussá vált adatok elérhetősége a ***Gaia-archívumban***:

<https://gea.esac.esa.int/archive>

A Gaia-adatok feldolgozása

DPAC:

Data Processing and Analysis
Consortium:

Kb. 450 tag 20 európai
országból + 4 másik
földrészről (2018-ban);

Szervezeti egységei az
adattfeldolgozó központok
(DPC) és a koordinációs
egységek (CU):

CU1 System Architecture

CU2 Data Simulations

CU3 Core Processing

CU4 Object Processing

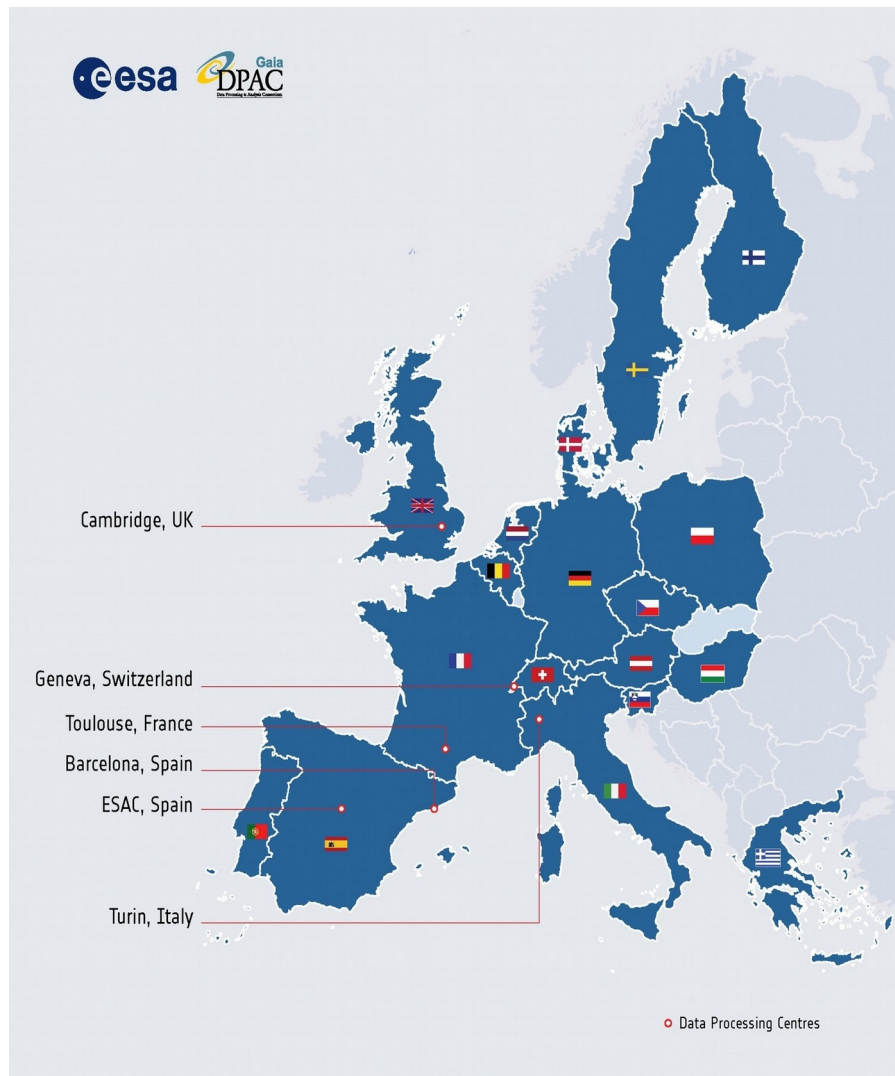
CU5 Photometric Processing

CU6 Spectroscopic Processing

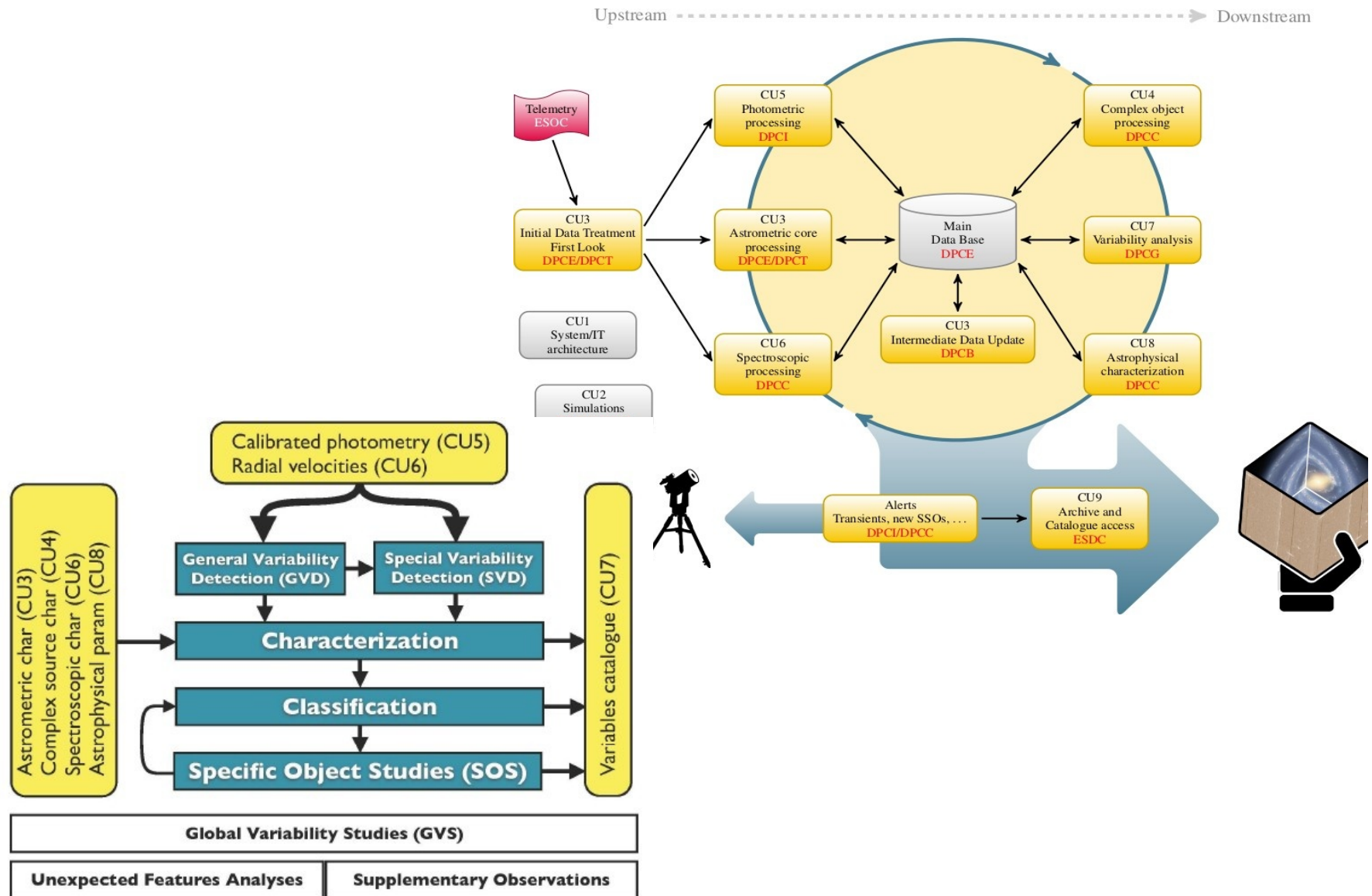
CU7 Variability Processing

CU8 Astrophysical Parameters

CU9 Catalogue Access

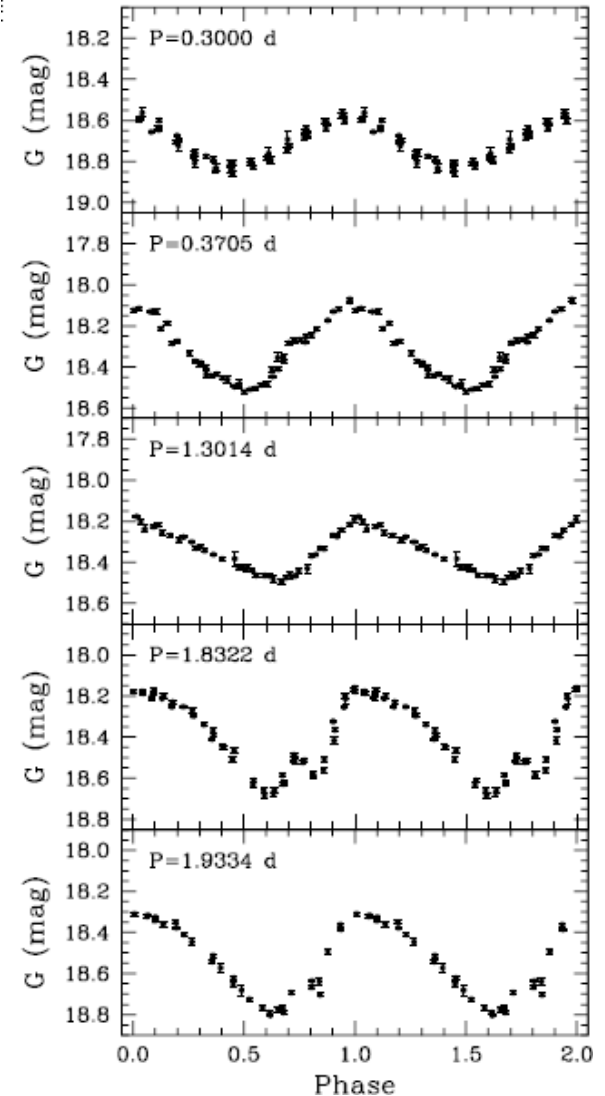
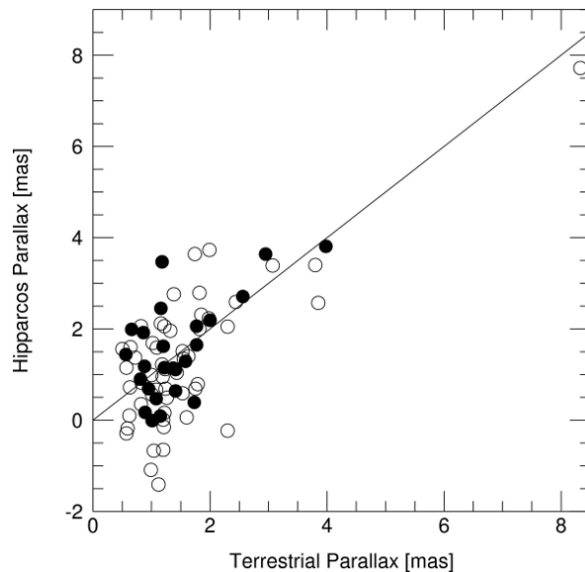


A Gaia-adatok feldolgozása



Magyar részvétel a Gaia projektben

A Hipparcostól egyenes út vezetett a Gaiához. Részvételünk eleinte csak a CU7 Variability Processing koordinációs egységben. Az adat-mintavételezést asztrometriai célok vezérelték, a változócsillagászat számára nem ideális az idősor (kivétel a mérések első hónapja, a SEP kampány – jobbra).



Magyar részvétel a Gaia projektben

Újabban a **Gaia Science Alert** kampányaiban is részt veszünk fiatal csillagok riasztás utáni földi fotometriai követésével. Az ábra a Gaia20fgx fiatal változócsillag fénygörbéjét mutatja a kitörést követő és megelőző időszakról (Nagy et al., 2022). A Gaia-riasztás időpontját a nyíl jelzi.

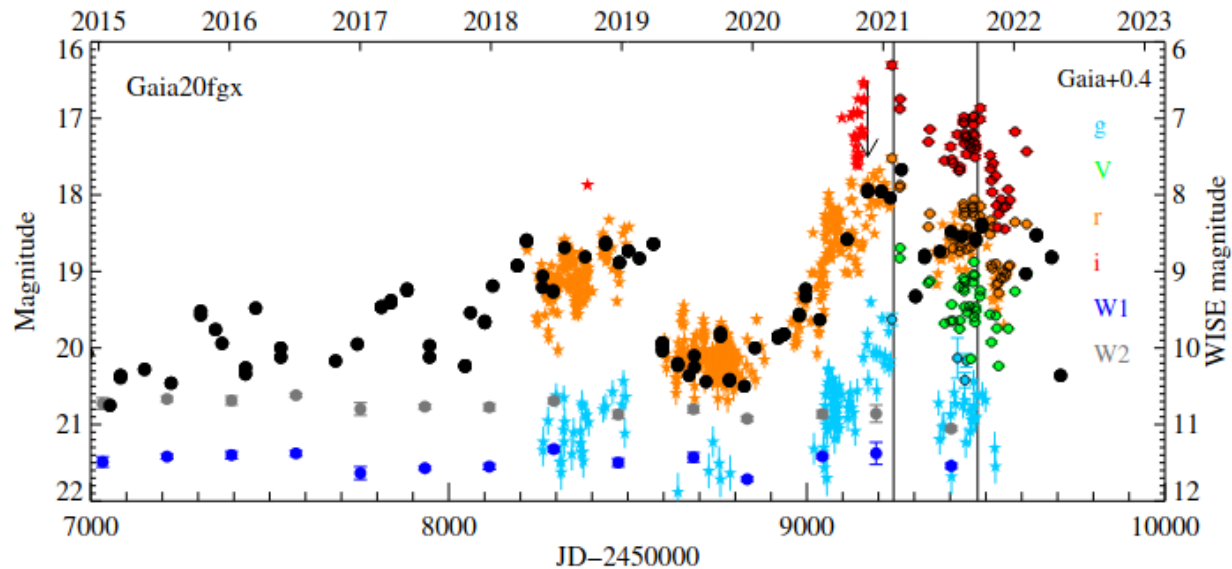


Figure 3. Light curves of Gaia20bwa and Gaia20fgx. The *Gaia* G data are shown with black dots, the ZTF *g*, *r*, and *i* data with light blue, orange, and red asterisks, the WISE W1 and W2 band data with blue and grey dots. The red, orange, and green dots are *i*, *r*, and *V* data measured with the RC80 or the Mt. Suhora telescope, as shown in Appendix A. The vertical lines show the epochs of the TNG and GTC spectra. The arrows show the epochs of the *Gaia* alerts.

A Gaia Photometric Science Alert

A *Gaia Science Alert* fontos kiegészítő program: fotometriai és spektrális észlelések földfelszíni távcsövekkel. A tranziens felfedezése után internetes riasztás átlagosan 2-3 napon belül. Központja Cambridge-ben van.

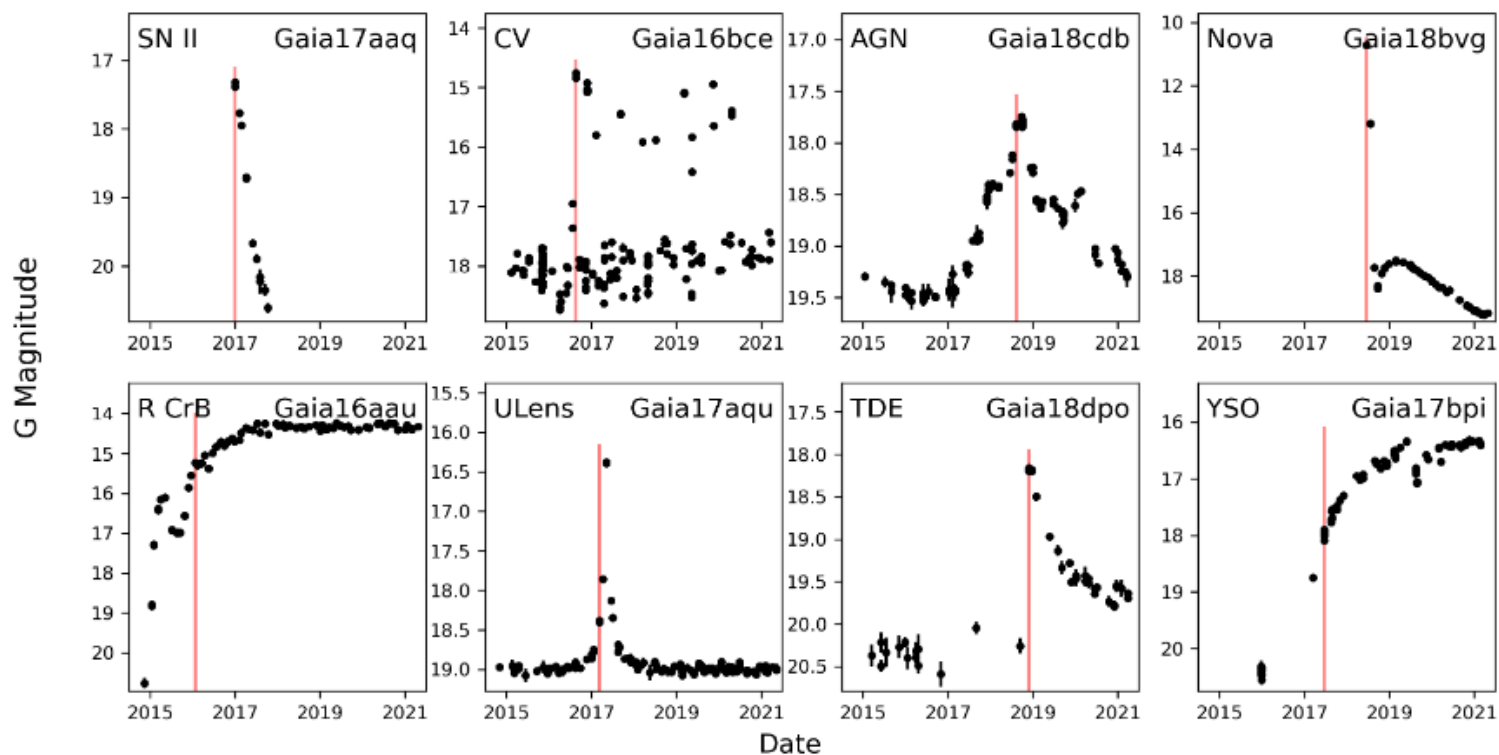


Fig. 12. *Gaia* lightcurves for 8 alerts spanning a range of classes. **Top Row:** type II supernova, cataclysmic variable, active galactic nucleus, nova. **Bottom row:** R CrB star, microlensing event, tidal disruption event, young stellar object. The red vertical line illustrates the alerting transit for the event. The y-axis gives the *Gaia* magnitude, and the shared x-axis spans mid-2015 to mid-2021.

A Gaia Science Alert

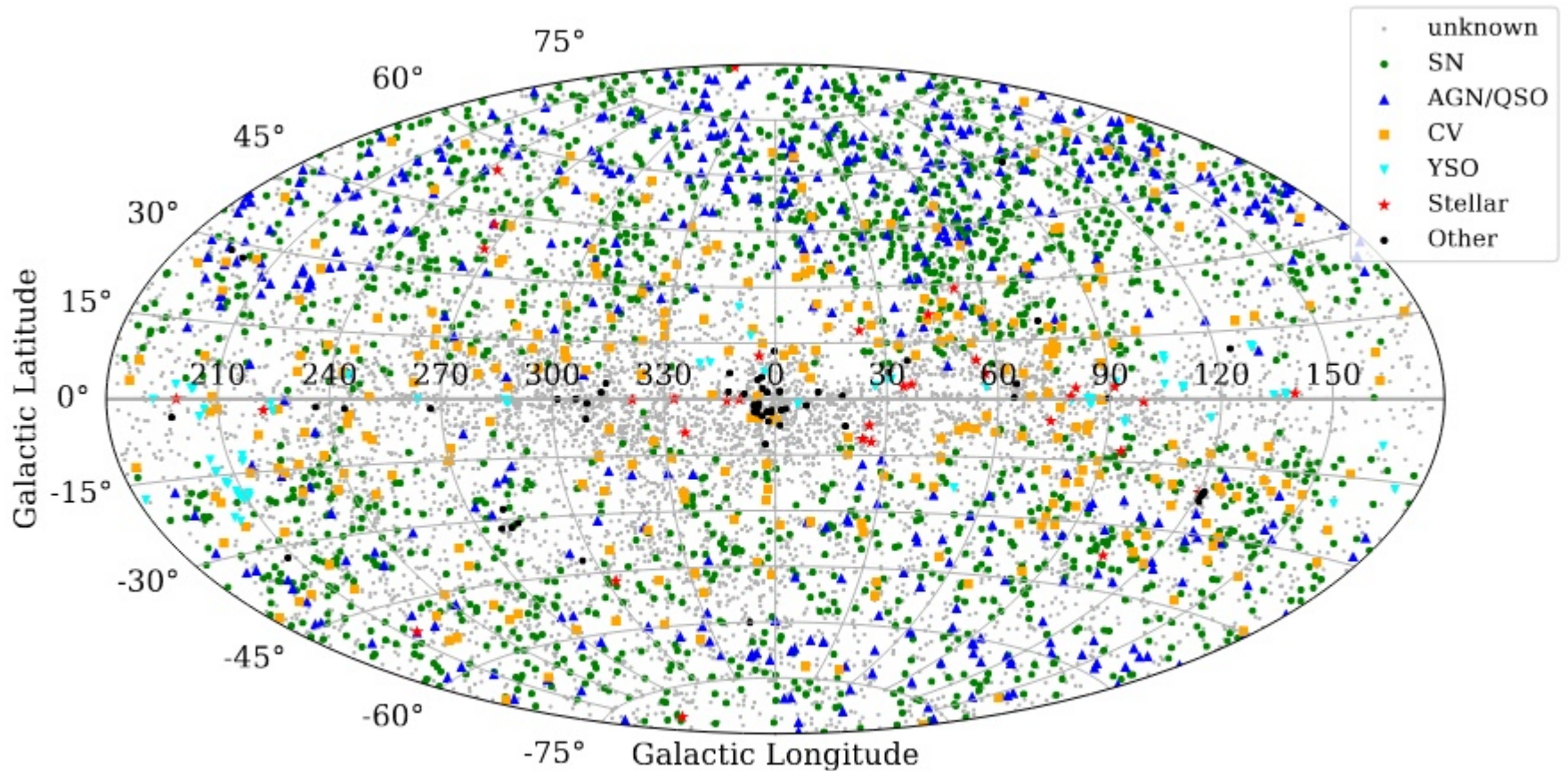


Fig. 1. Alerts detected by *Gaia* up to the end of 2019, plotted in Galactic coordinates. Alerts with unknown identifications are shown in grey, and spectroscopically confirmed alerts are highlighted in colour. The category 'other' includes microlensing events, galactic novae and X-ray binaries.

A Gaia Science Alert

A Gaia Science Alert szoftverét folyamatosan fejlesztik. Így egyre több tranziens fényesedést vagy halványodást tudnak felismerni.

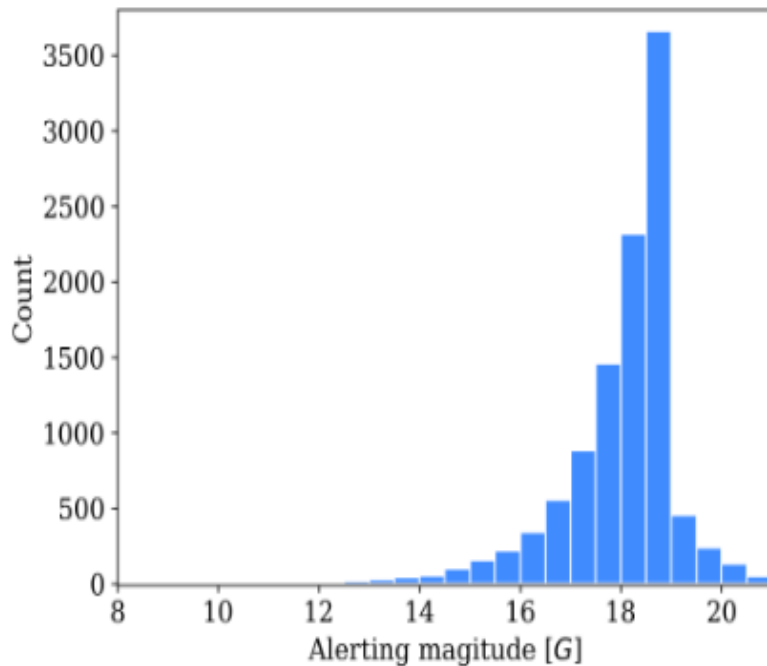


Fig. 9. Histogram showing the number of published alerts as a function of the alerting magnitude, covering the start of operations (September 2014) until the end of 2019.

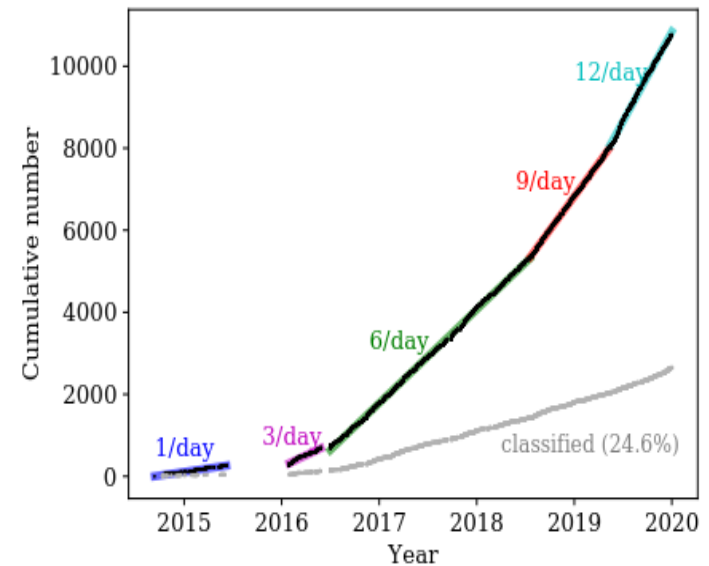


Fig. 10. Cumulative number of alerts detected as a function of publication date. Changes in the alert rate correspond to changes and improvements to AlertPipe, as described in this paper, which allowed us to identify alerts more reliably. Grey line shows the cumulative number of classified alerts, reaching almost 25 per cent of all alerts by the end of 2019 (see Section 3.2). Figure includes alerts published from the start of operations until the end of December 2019.

A Gaia Science Alert

A Gaia16aax aktív galaxismag fénygörbéje (**jobbra lent**). A riasztás idejét a nyíl jelzi. A galaxis vöröseltolódása $z=0,25$, a központi fekete lyuk tömege 600 millió naptömeg. A tömegbefogási ráta változhatott hirtelen. Három év alatt tért vissza a nyugalmi szintre.

A Gaia14aaa szupernóva spektruma (**balra lent**). A színeképvonalak létéből és erősségéből meghatározható a szupernóva típusa: SN Ia.

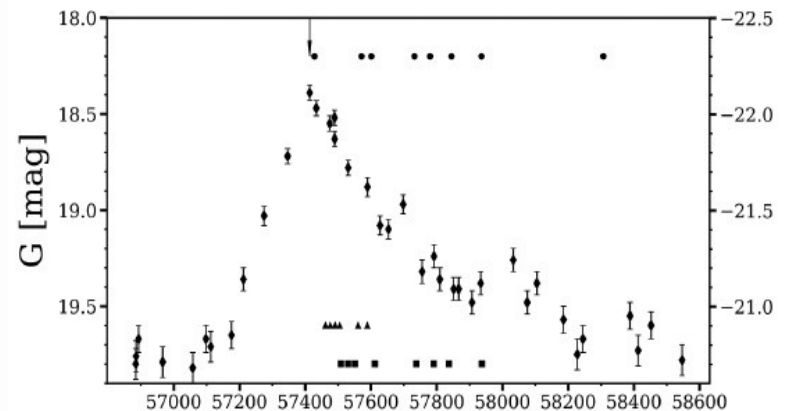
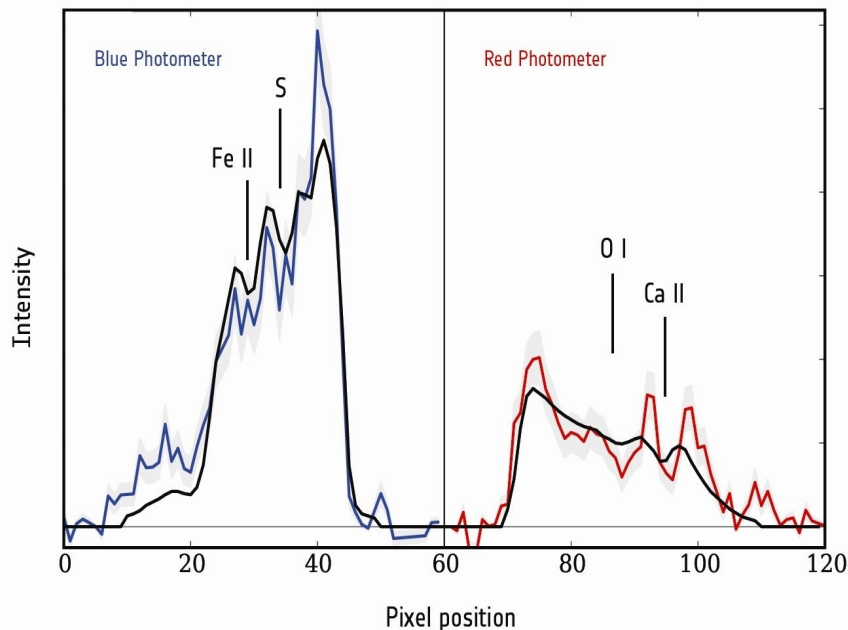


Figure 1. Light curve from the *Gaia* satellite for Gaia16aax. The arrow indicates the date the transient was alerted on. Magnitudes are in the *Gaia* G broad-band filter (Jordi et al. 2010). The black circles at the top indicate the epochs at which an optical spectrum was taken. The black triangles and squares at the bottom show the epochs at which optical and NIR images were taken, respectively. The two y-axes are apparent (left axis) and absolute (right axis) magnitudes.

A Gaia „hétköznapijai”

Problémák: leállások, meteorrajok (pl. Geminidák), dekontamináció

- Az alapszög stabilitása nem éri el a tervezettet (de mérni tudják a pillanatnyi értéket – BAM [Basic Angle Monitor]);
- Szórt fény zavar (jégrétegen törő napfény) + a tükörrre fagy a pára (néha melegítik).

Próbamérések: a déli ekliptikai pólus (SEP) irányában végezték egy hónapig.

Table 1. *Gaia* DR2 mission events relevant for the photometric calibration process.

Event	OBMT range [rev]		Duration [rev]
	start	stop	
Decontamination	1316.492	1324.101	7.609
Refocussing	1443.950	1443.975	0.025
Decontamination	2330.616	2338.962	8.346
Refocussing	2574.644	2574.728	0.084

A Gaia adatközlései – DR1

2014 nyarán egy hónapig a Gaia a déli ekliptikai pólus (SEP) környékét mérte. A fő mérési program kezdete: 2014. szept. A működés során a mérési határokat kissé módosították: $G = 20 \rightarrow 20,8$ magnitúdó (1 milliárd helyett 1,8 milliárd objektum); RVS 16,2 magnitúdóig.

A *Gaia* Data Release 1 (DR1) 2016. szeptember 14. óta érhető el
Az első 14 hónapban végzett mérések alapján J2015,0 epochára:

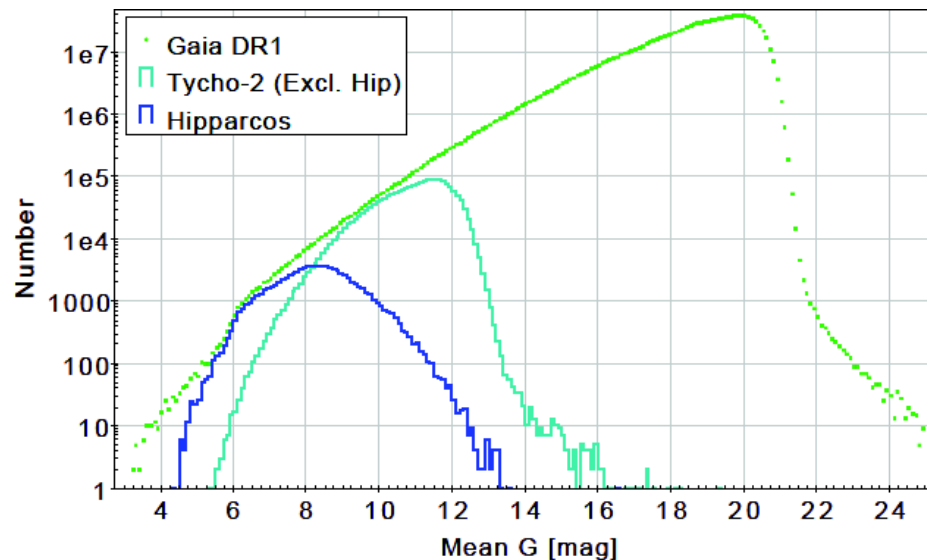


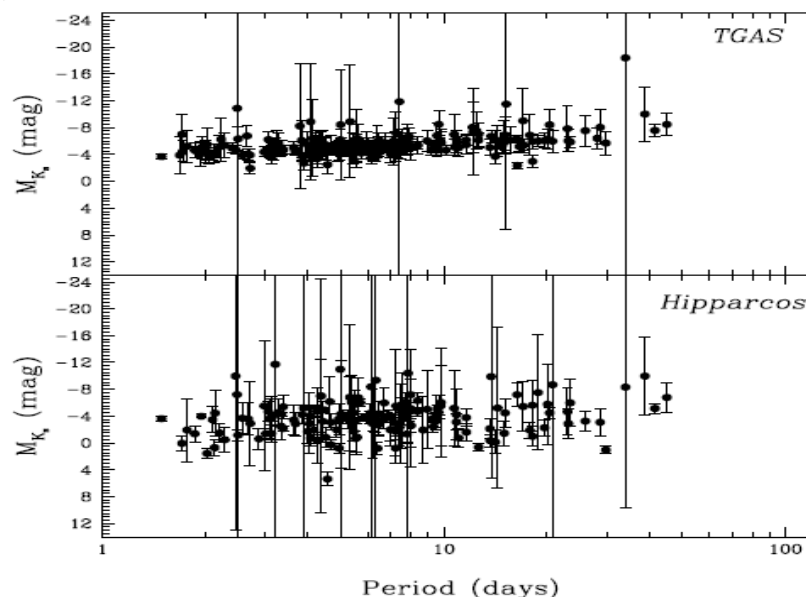
Fig. 1. Distribution of the mean values of G for all *Gaia* DR1 sources shown as histograms with 0.1 mag wide bins. The distributions for the HIPPARCOS and *Tycho*-2 (excluding the HIPPARCOS stars) subsets are also shown. Note the lack of bright sources at $G \lesssim 7$.

A Gaia adatközlései – DR1

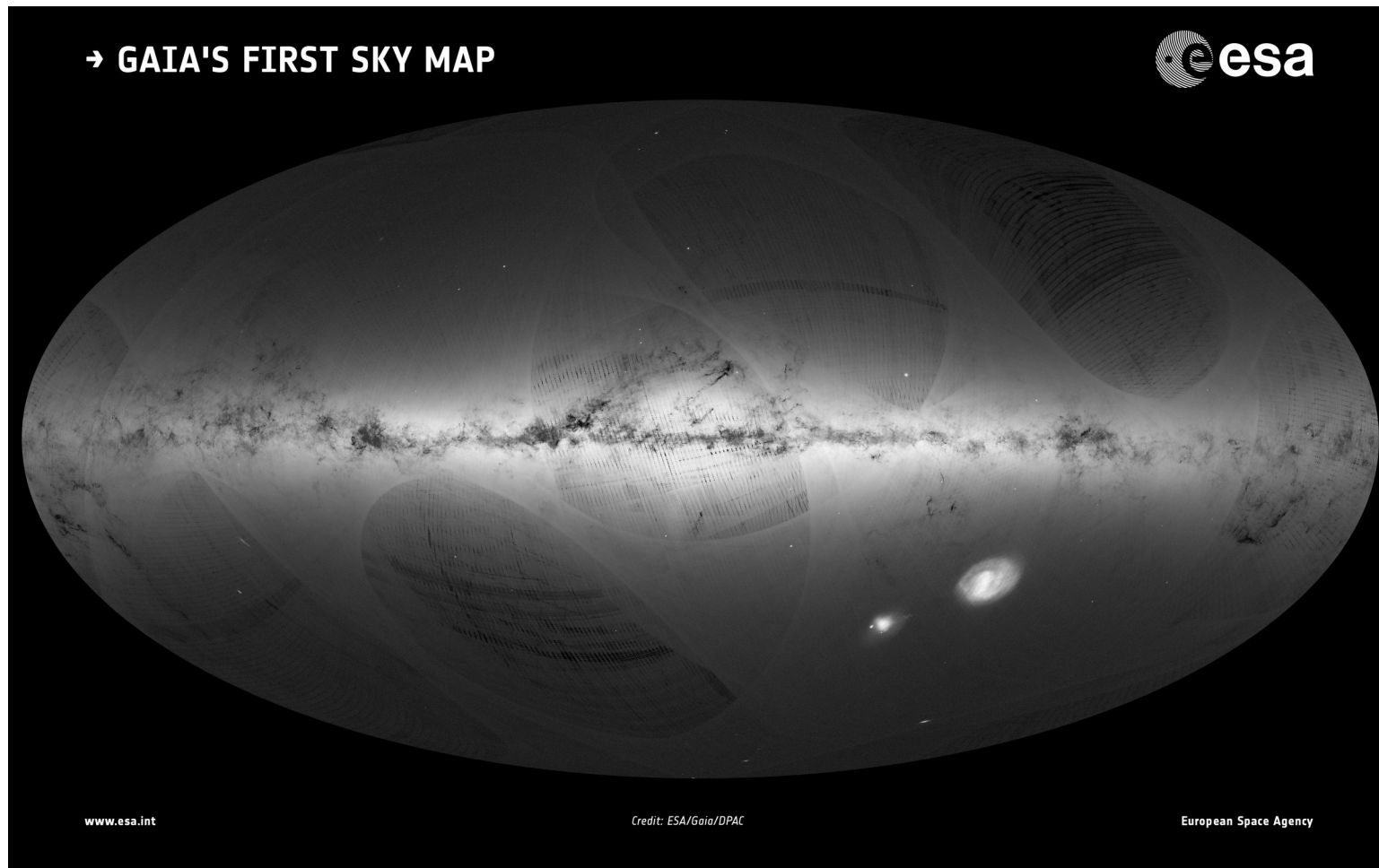
A Gaia DR1 adattartalma:

- 1,1 milliárd csillagra égi pozíciók és G magnitúdó;
- 2 millió csillagra 5 asztrometriai adat (pozíciók, sajátmozgás és parallaxis) a TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution) alapján, 0,8-1 mas pontossággal
- átlagos G magnitúdó ezekre a csillagokra;
- a déli ekliptikai pólus környéki 3000 cefeida és RRL csillag fénygörbéje;
- több mint 2000 kvazár pozíciója és G magnitúdója, az égi vonatkoztatási rendszer megállapításához.

A parallaxisértékek már pontosabbak, mint a Hipparcos teljes mérési sorozata után meghatározott parallaxisok.
Jobbra: a cefeidák P-L relációja a TGAS alapján, illetve a Hipparcos méréseiből

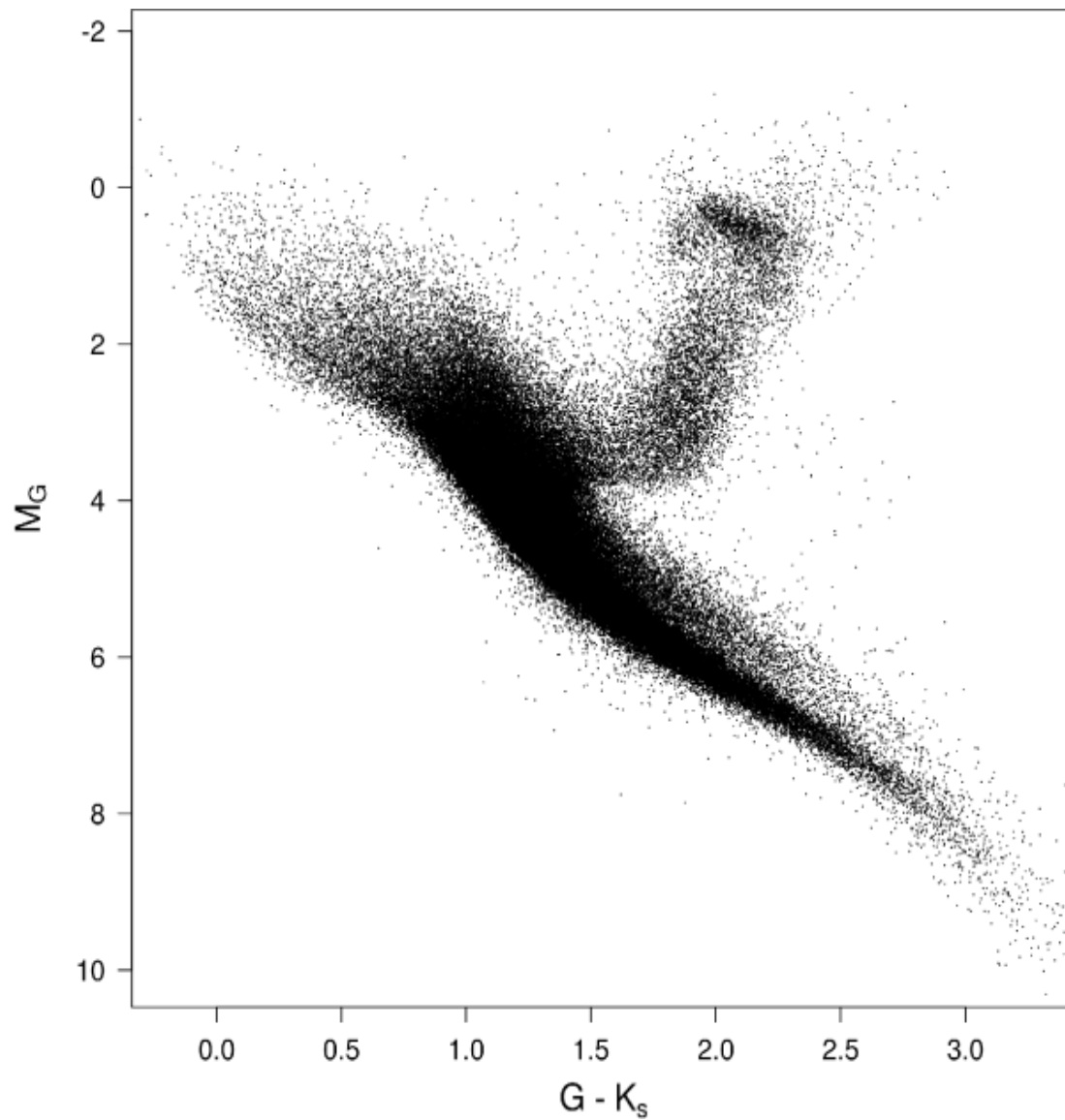


A Gaia DR1 Tejút-térképe

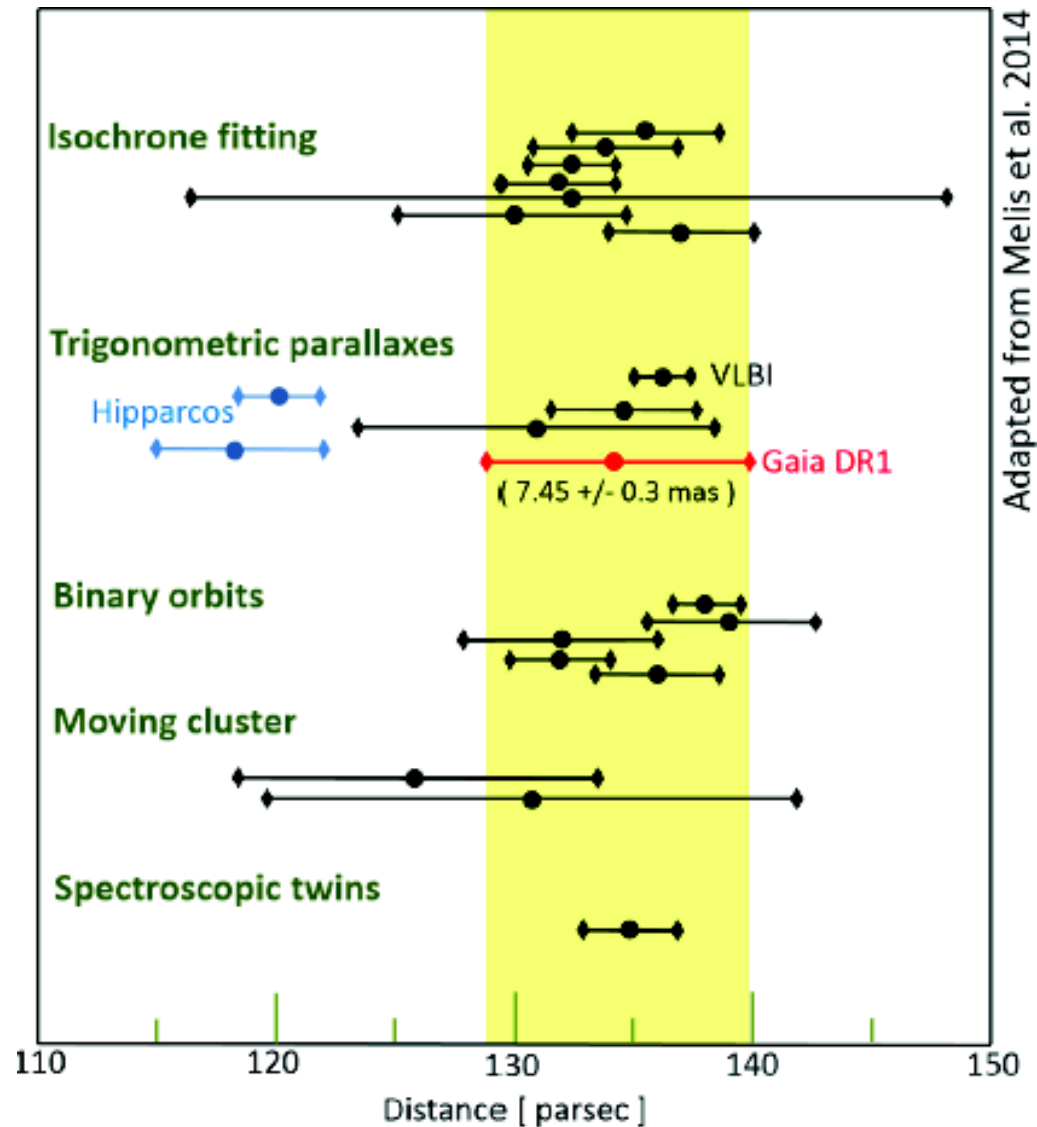


Forrás: ESA/Gaia/DPAC, A. Moitinho & M. Barros, Lisszaboni Egyetem

HR-diagram a Gaia DR1 alapján



A Plejádok ott van, ahol lennie kell



A Gaia DR2

Közzététel: 2018. április 25. A Gaia működésének első 22 hónapjában kapott mérések alapján J2015,5 epochára vonatkozóan:

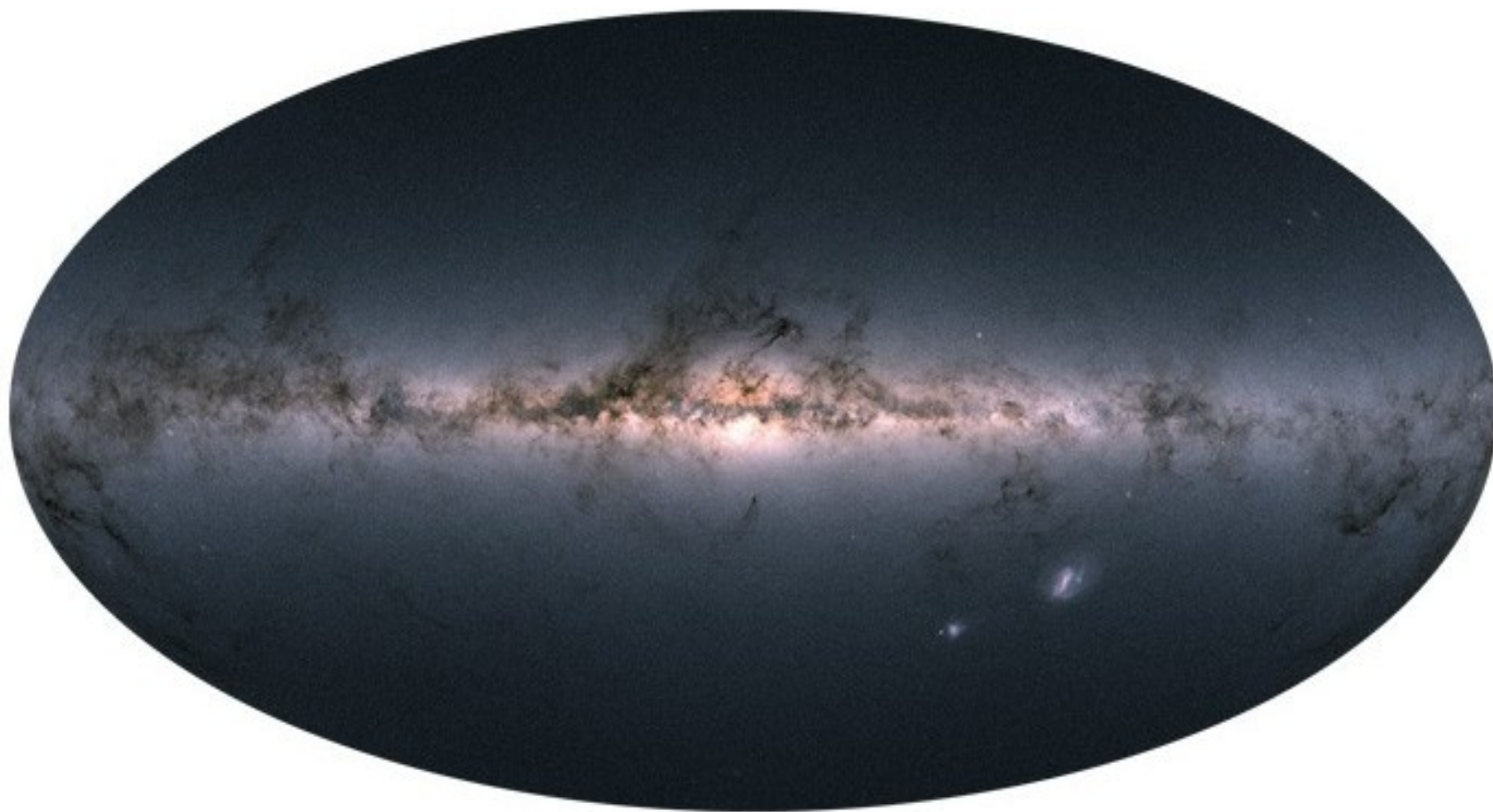
- 1,7 milliárd csillagra égi pozíció és G magnitúdó;
- több mint 1,3 milliárd csillagra parallaxis, sajátmozgás, G_{BP} és G_{RP} ;
- több mint 7 millió csillagra átlagos radiális sebesség;
- 161 millió csillagra felszíni hőmérséklet, 88 millió csillagra extinkció és vörösödés, 77 millió csillagra a sugár és a luminozitás értéke is;
- félmillió változócsillag fénygörbéje és típusba sorolása;
- 14 ezer naprendszerbeli kisbolygó aktuális helyzete az elvégzett 1,5 millió mérés idején;
- félmillió kvazár helyzete és G magnitúdója az égi vonatkoztatási rendszer rögzítésére kizárólag optikai mérésekből.



A Gaia DR2

Data product or source type	Typical uncertainty
Five-parameter astrometry (position & parallax)	0.02–0.04 mas at $G < 15$ 0.1 mas at $G = 17$ 0.7 mas at $G = 20$ 2 mas at $G = 21$
Five-parameter astrometry (proper motion)	0.07 mas yr ⁻¹ at $G < 15$ 0.2 mas yr ⁻¹ at $G = 17$ 1.2 mas yr ⁻¹ at $G = 20$ 3 mas yr ⁻¹ at $G = 21$
Two-parameter astrometry (position only)	1–4 mas
Systematic astrometric errors (averaged over the sky)	< 0.1 mas
<i>Gaia</i> -CRF2 alignment with ICRF	0.02 mas at $G = 19$
<i>Gaia</i> -CRF2 rotation with respect to ICRF	< 0.02 mas yr ⁻¹ at $G = 19$
<i>Gaia</i> -CRF2 alignment with ICRF	0.3 mas at $G < 12$
<i>Gaia</i> -CRF2 rotation with respect to ICRF	< 0.15 mas yr ⁻¹ at $G < 12$
Mean G -band photometry	0.3 mmag at $G < 13$ 2 mmag at $G = 17$ 10 mmag at $G = 20$
Mean G_{BP} - and G_{RP} -band photometry	2 mmag at $G < 13$ 10 mmag at $G = 17$ 200 mmag at $G = 20$
Median radial velocity over 22 months	0.3 km s ⁻¹ at $G_{RVS} < 8$ 0.6 km s ⁻¹ at $G_{RVS} = 10$ 1.8 km s ⁻¹ at $G_{RVS} = 11.75$
Systematic radial velocity errors	< 0.1 km s ⁻¹ at $G_{RVS} < 9$ 0.5 km s ⁻¹ at $G_{RVS} = 11.75$
Effective temperature T_{eff}	324 K
Extinction A_G	0.46 mag
Colour excess $E(G_{BP} - G_{RP})$	0.23 mag
Radius	10%
Luminosity	15%
Solar system object epoch astrometry	1 mas (in scan direction)

A Gaia DR2 Tejút-térképe



A Gaia DR2 minden adata elérhető itt:

<http://archives.esac.esa.int/gaia> vagy <http://cdsweb.u-strasbg.fr/gaia>

A Gaia DR2 mint sűrű katalógus

Table 3. Properties of *Gaia* DR2 and external catalogues.

Catalogue	N Sources	PosErr _{max} ^a (arcsec)	Effective resolution (arcsec)	Δ Epoch _{max} (yr)	SysErr _{max} ^b (arcsec)	Survey type ^c
<i>Gaia</i> DR2	1 692 919 135	0.1	0.4 ^d			
Pan-STARRS1 DR1	2 264 263 282	1.0	~1.1	18.02	0.18	Dense
GSC 2.3	945 592 683	1.6	~2 ^f	62.79	0.63	Dense
PPMXL	910 468 688	1.342 ^e	~2 ^f	15.5	0.155	Dense
SDSS DR9	469 029 929	10.0	~0.7 ^f	16.79	0.17	Dense
URAT-1	228 276 482	0.429	~2.5 ^f	3.189	0.03	Dense
2MASS PSC	470 992 970	1.21	~2.5	17.29	0.173	Dense
allWISE	747 634 026	35.944	6.1, 6.8, 7.4, 12.0 ^g	5.47	0.055	Dense
APASS DR9	61 176 401	2.359	~5	3.5	0.035	Dense
HIPPARCOS2	117 955	0.1684	~0.3	24.25	0.2425	Sparse
<i>Tycho</i> -2	2 539 913	0.254	~0.8	24.275	0.2475	Sparse
RAVE 5	457 555 ^h	0.6 ⁱ	3.5 ^j	15.5 ⁱ	0.155	Sparse

A Gaia DR2 eredményeiből

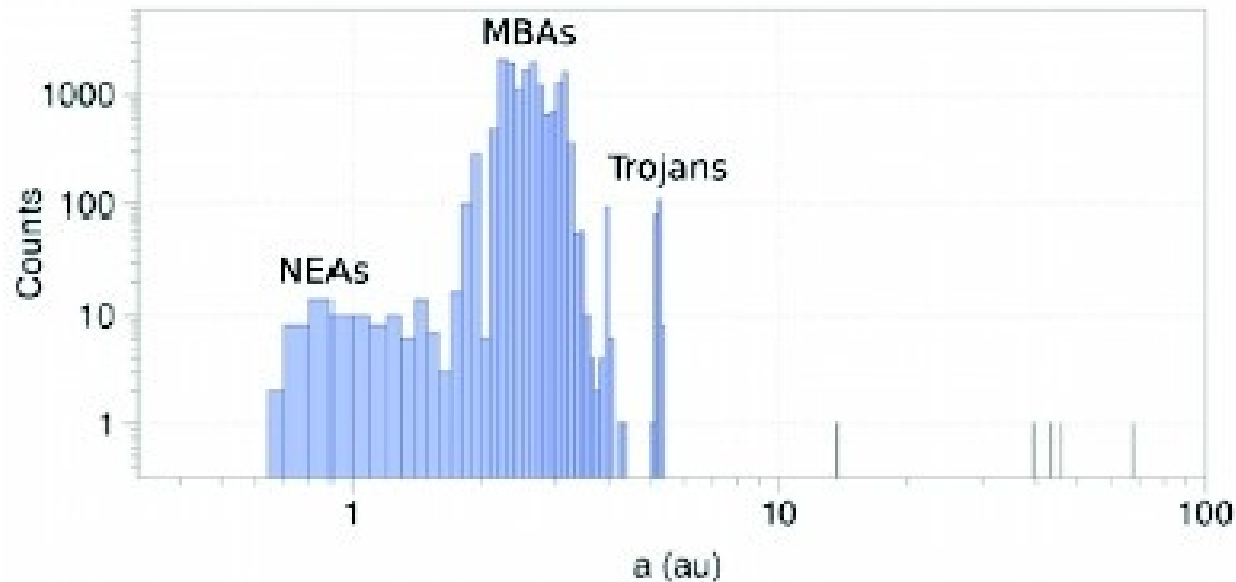
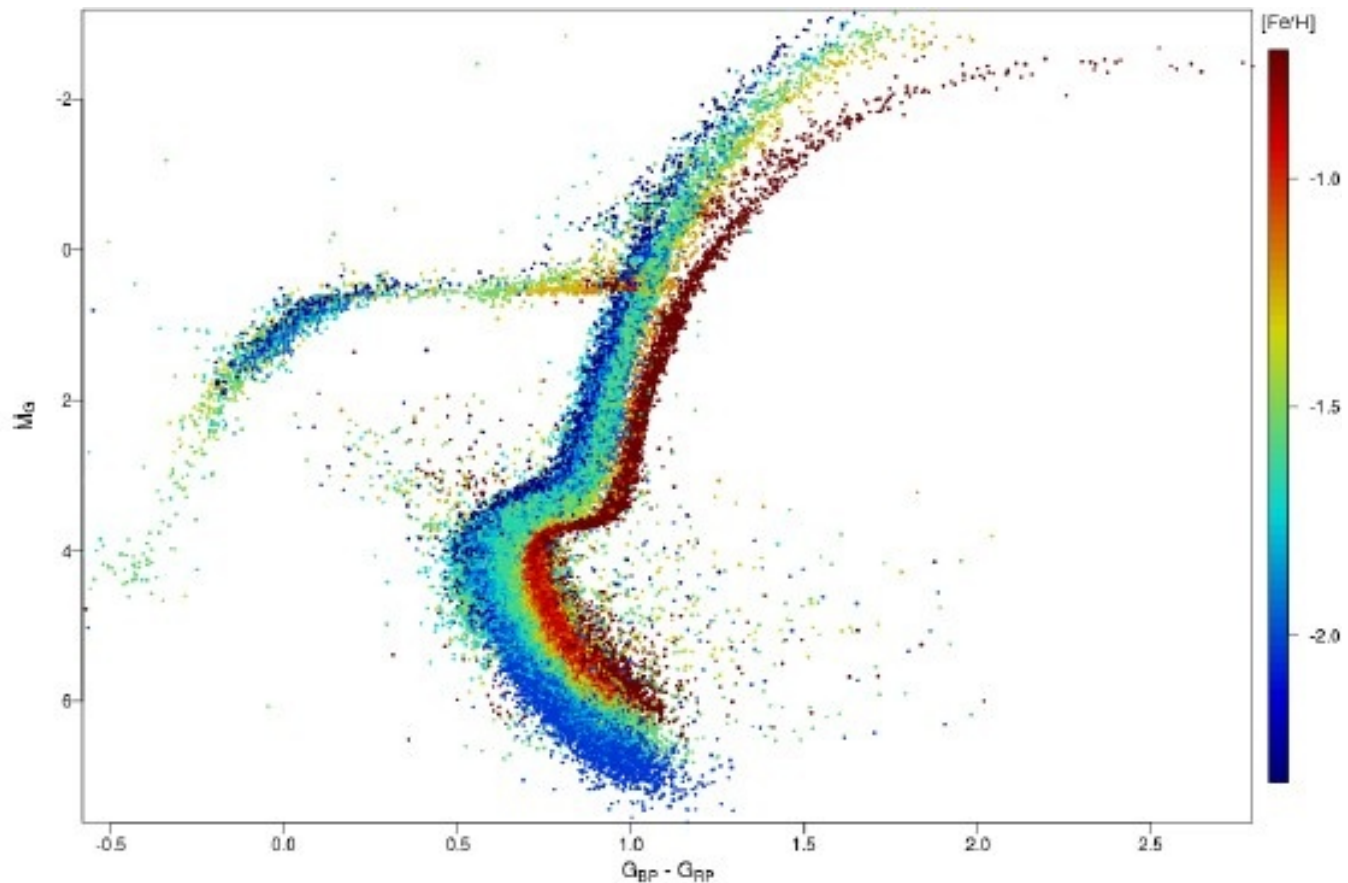


Fig. 1. Distribution of the semi-major axes of the 14 125 SSOs contained in the final input selection. Not all the bodies shown in this figure are included in *Gaia* DR2: 26 objects were filtered out for different reasons (see Sect. 3.2 and 5).

Spoto et al. (2018): A Naprendszer kis égitesteinek gyors mozgása miatt egyelőre kevés kisbolygó pályaelemeit pontosították.

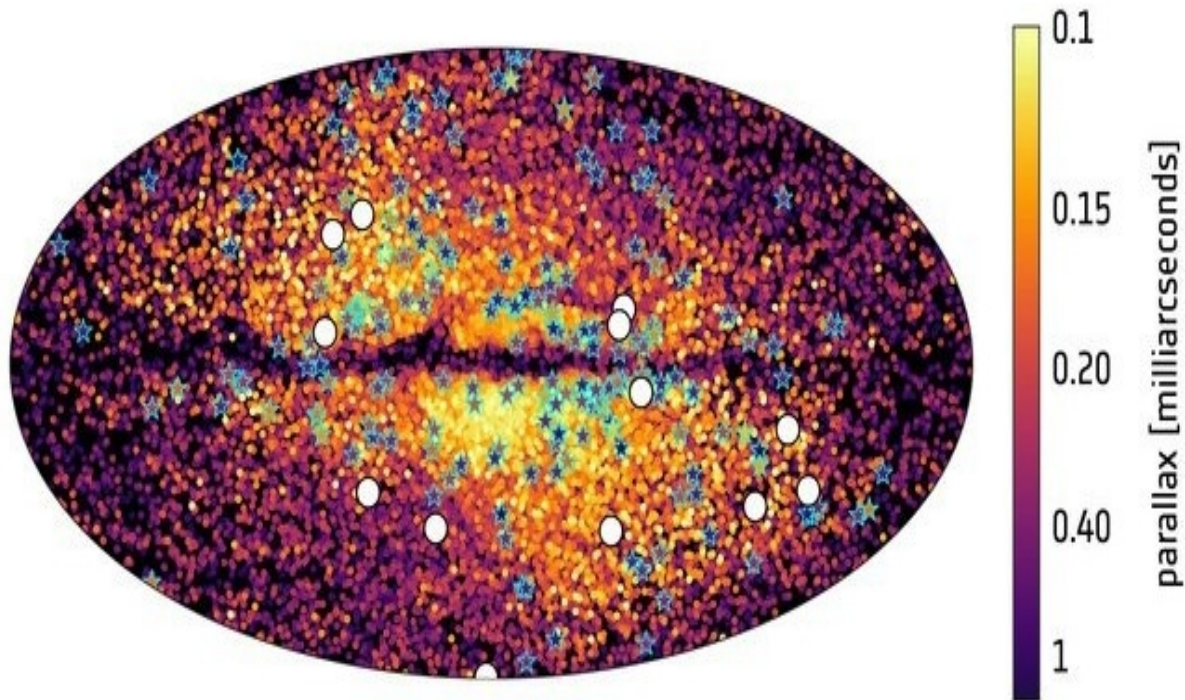
A Gaia DR2 eredményeiből



3. Composite HRD for 14 globular clusters, coloured according to metallicity (Table 3).

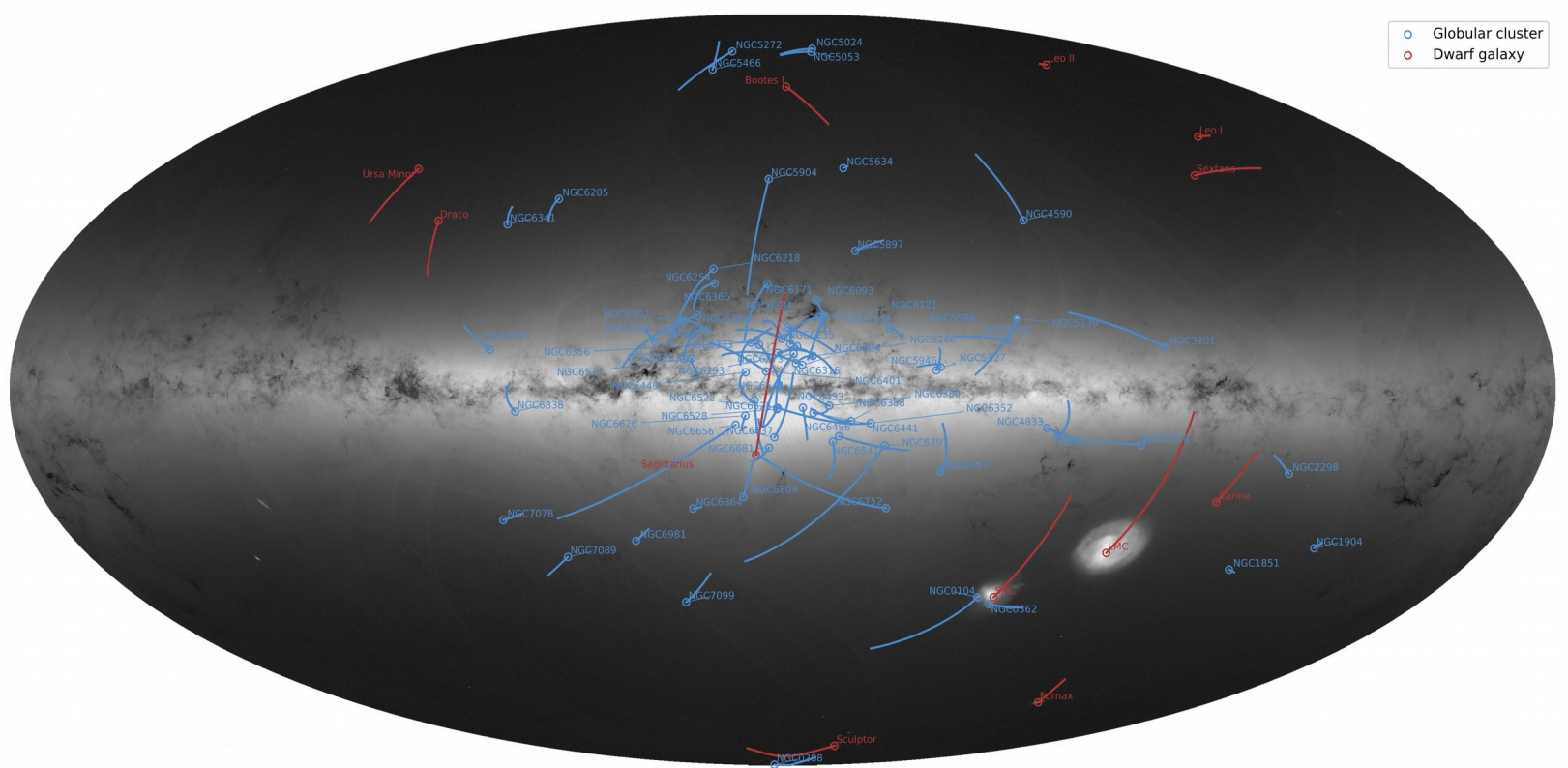
Babusiaux et al. (2018): A gömbhalmazok egyesített HR-diagramján szembetűnő a színindex és a luminozitás fémtartalomfüggése.

A Gaia DR2 eredményeiből



Helmi et al. (2018) és ESA/Gaia/DPAC: A Tejútrendszer 10 milliárd éve egy törpegalaxist kebelezett be (Gaia-Enceladus). Látható nyomai néhány gömbhalmaz és sok csillag kinematikájában is megmutatkoznak. A sebességtérben Gaia-virslí a neve az egykori törpegalaxis maradványának.

A Gaia DR2 eredményeiből



Helmi et al. (2018) és ESA/Gaia/DPAC (kép: M. Breddels):
A Tejútrendszert kísérő törpegalaxisok és néhány gömbhalmaz
sajátmozgása (erősen felnagyítva).

A Gaia DR2 eredményeiből

D. W. Evans et al.: Gaia Data Release 2

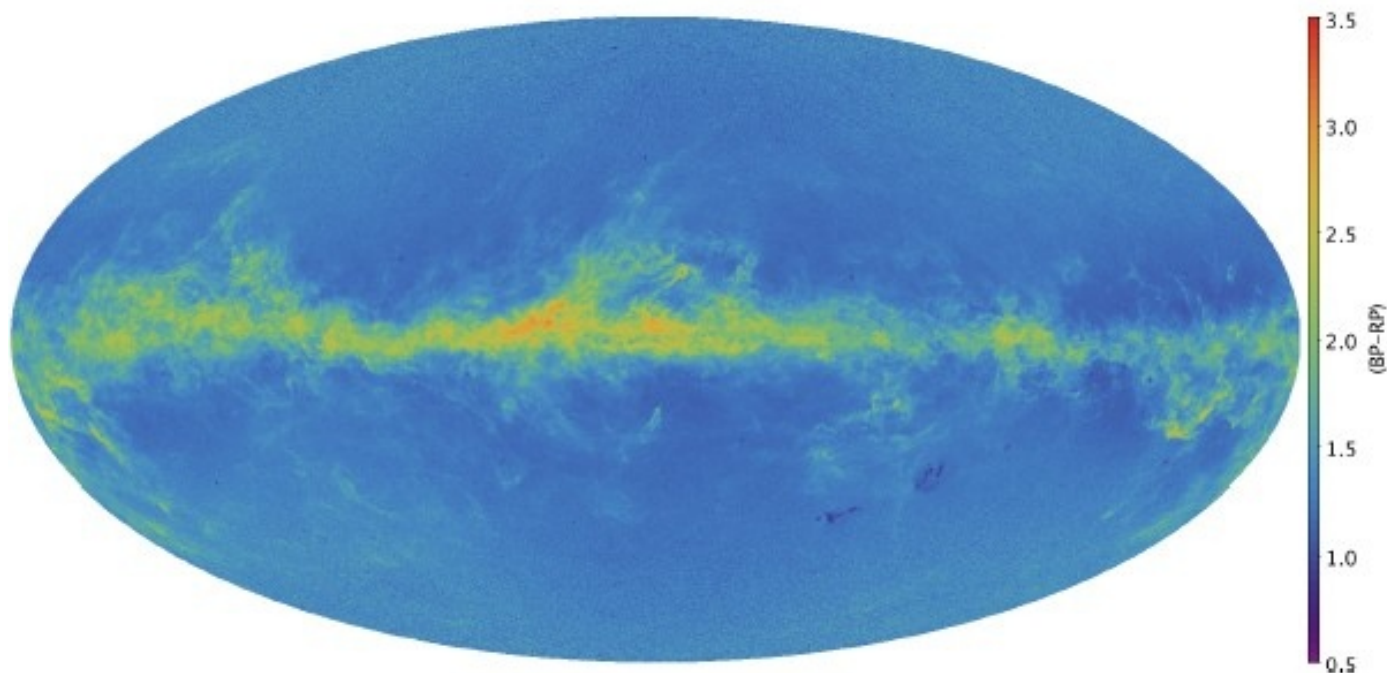
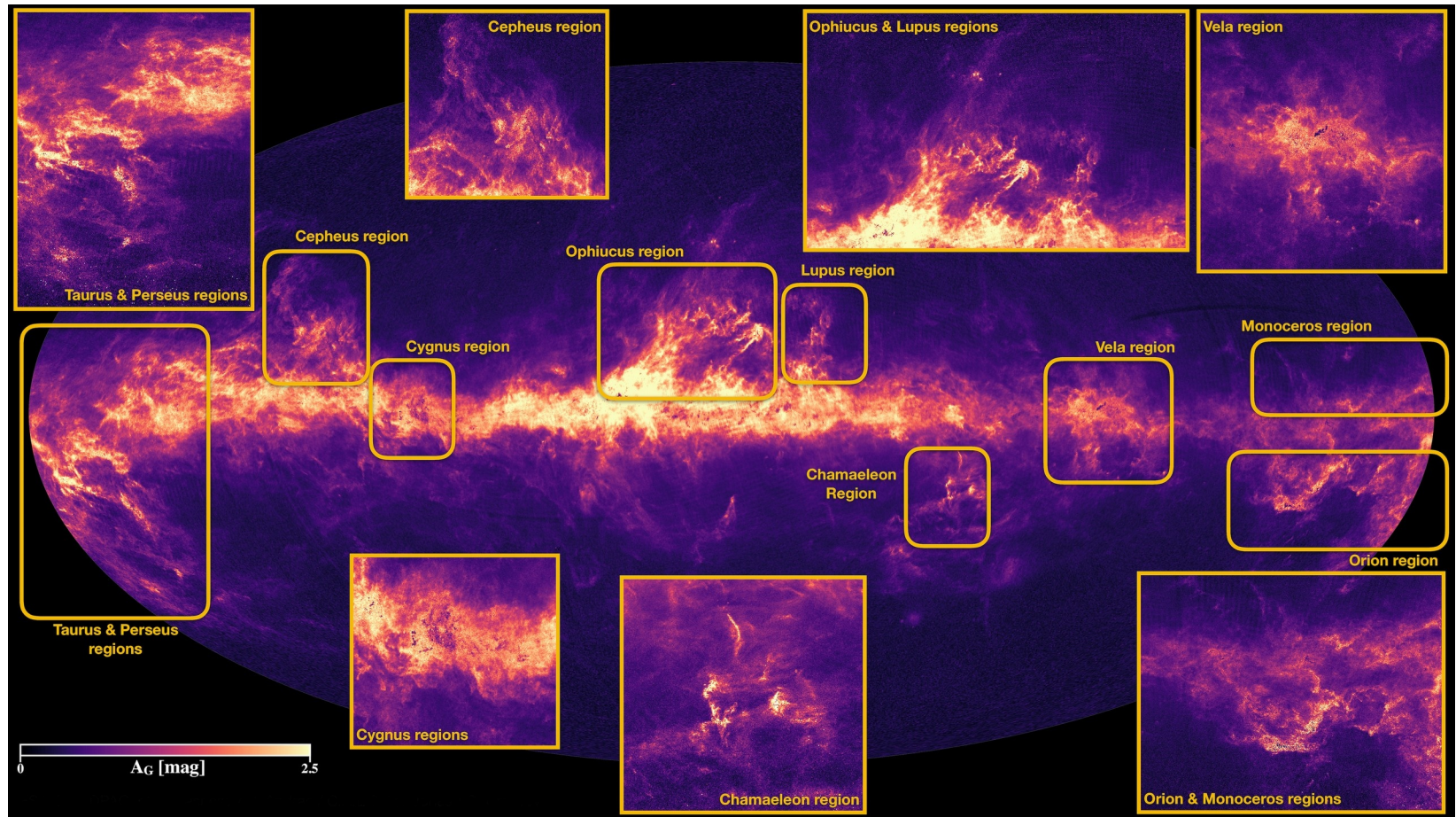


Fig. 1. Colour distribution as a function of sky position in Galactic coordinates. The pixelisation scheme adopted is HEALPix level 8, implying a pixel size of approximately 190 square arcmin or 0.05 square degree. Each pixel represents the median colour ($G_{BP}-G_{RP}$) of all sources with $G < 19$ in that pixel.

Evans et al. (2018): A $G_{BP} - G_{RP}$ színindex eloszlása galaktikus koordináta-rendszerben ábrázolva

A Gaia DR2 eredményeiből



A tejútrendszerbeli extinkció (M. Fouesneau, R. Andrae, C. A. L. Bailer-Jones, O. Creevey ábrája)

A Gaia DR2 eredményeiből

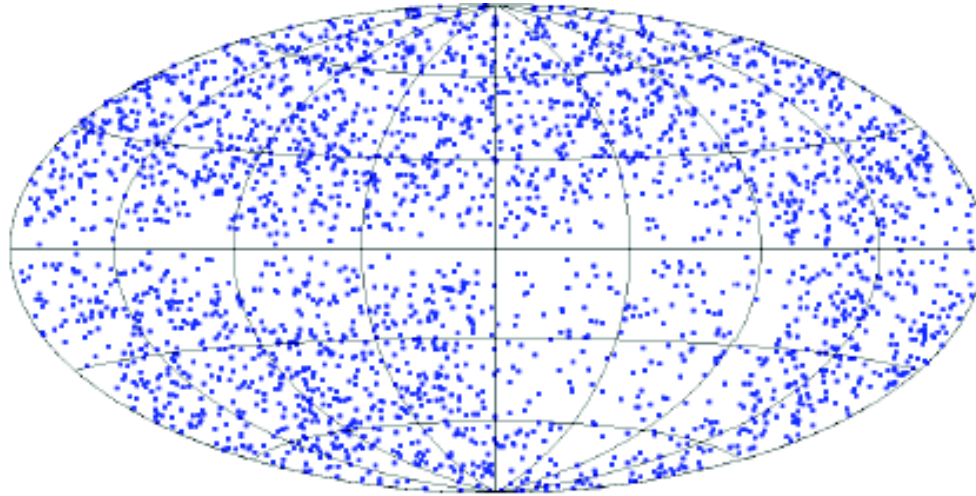


Fig. 13. Sky distribution of the 2820 *Gaia* sources identified as most probable optical counterparts of quasars in the ICRF3-prototype. Hammer-Aitoff projection in Galactic coordinates with origin at the centre of the map and longitude increasing from right to left.

Mignard et al. (2018):
Az ICRF3 vonatkoztatási
rendszer már 2820 távoli
(„mozdulatlan”) kvazárhoz
van rögzítve.

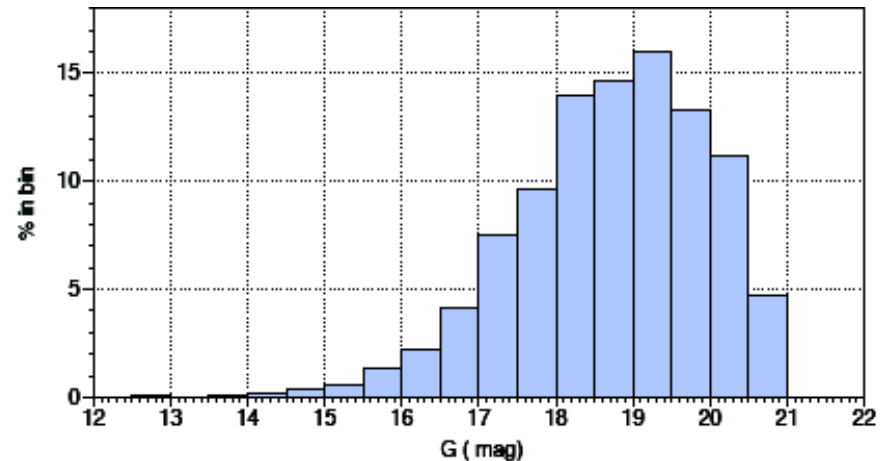


Fig. 14. Magnitude distribution of the 2820 *Gaia* sources identified as likely optical counterparts of quasars in the ICRF3-prototype.

A Gaia DR2 eredményeiből

M. Cropper et al.: *Gaia* RVS

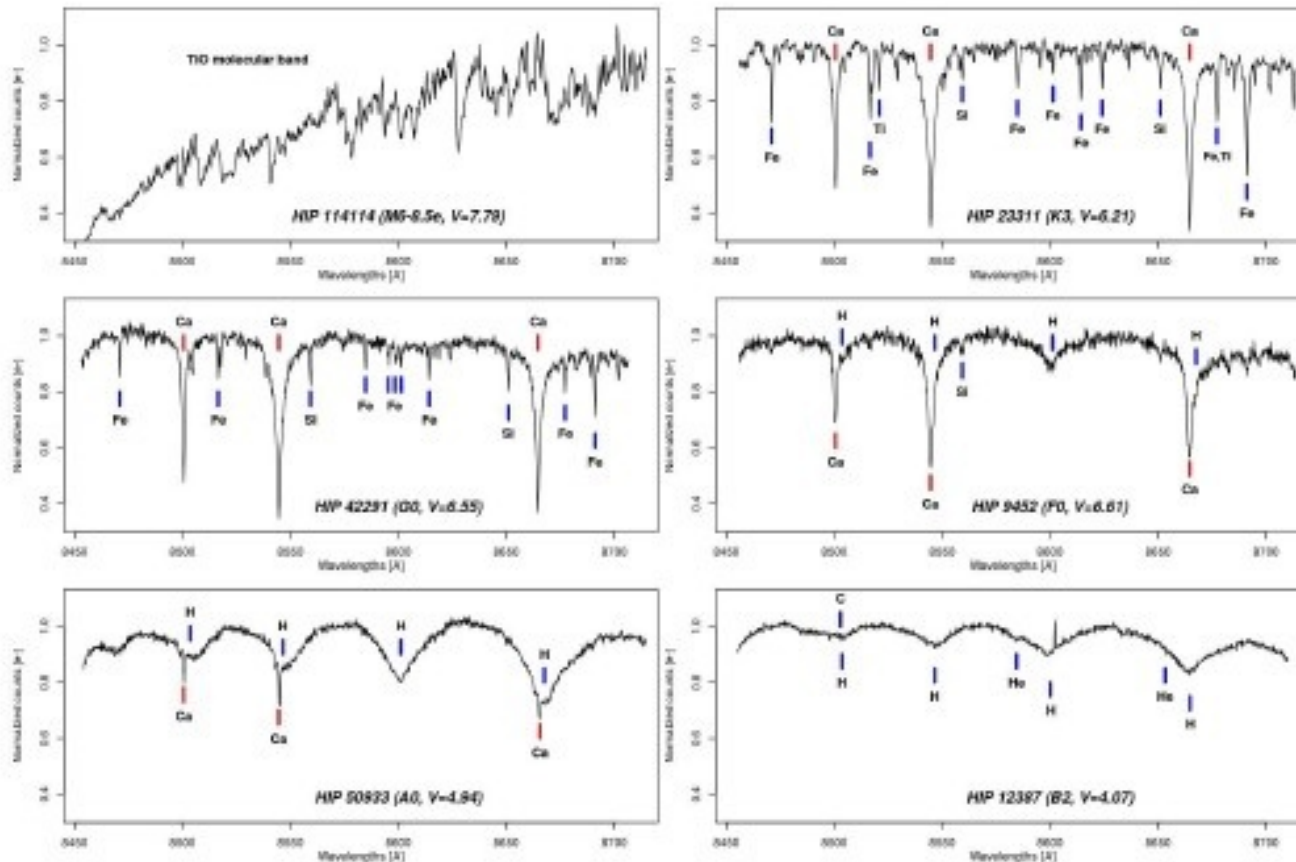
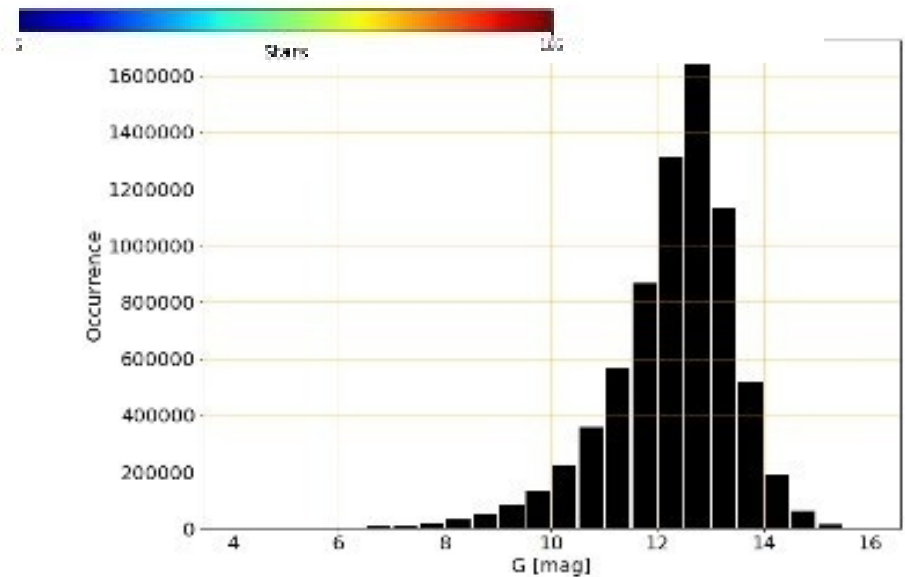
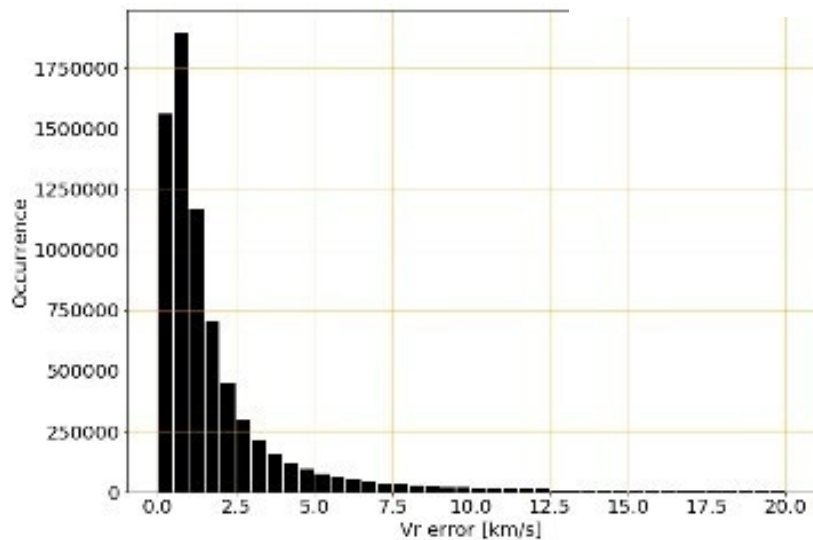
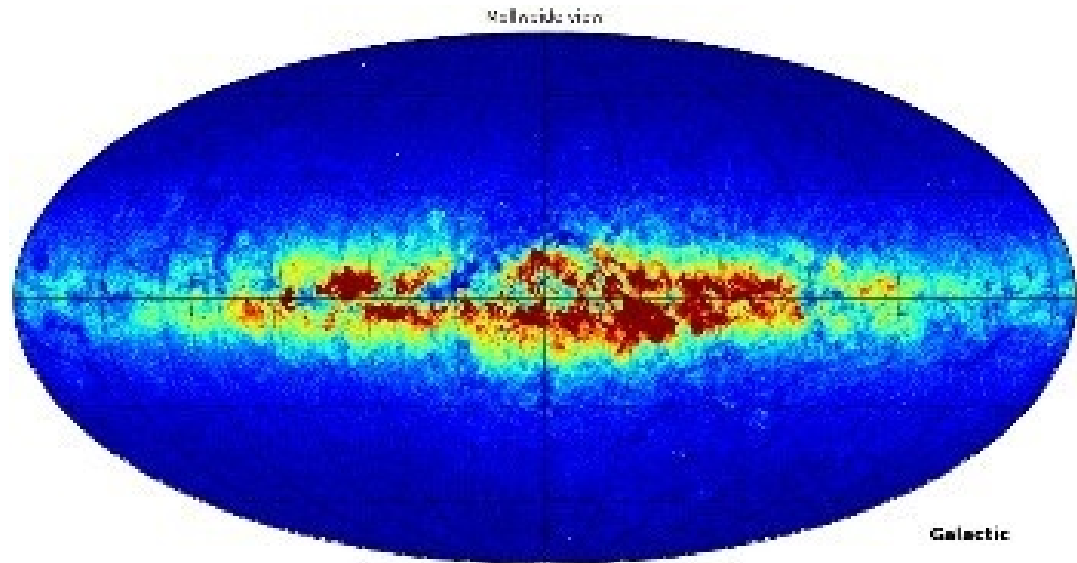


Fig. 17. RVS spectra of 6 *Hipparcos* stars from spectral type B2 to M6, with an identification of the major spectral lines in the RVS bandpass. In addition, although not evident in these spectra, diffuse interstellar bands are recorded at 862nm.

Cropper et al. (2018): Különféle típusú csillagok Gaia RVS spektrumai

A Gaia DR2 eredményeiből

Katz et al. (2019):
Radiális sebességek
a Gaia-spektrumokból



A Gaia DR2 eredményeiből

Classification (vari_classifier_result)			Specific Object Studies (SOS)		
	best_class_name	Total		Total	Table name
8 882	δ Scuti & SX Phoenicis	8 882			
228 904	RR Lyrae stars	195 780	88 120	107 660	140 784 vari_rrlyrae
11 438	Cepheids	8 550	1 863	6 687	9 575 vari_cepheid
151 761	Long period variables	150 757	62 144	88 613	89 617 vari_long_period_variable
3 018	Short timescale variables				3 018 vari_short_timescale
147 535	Rotation modul. (BY Dra) stars				147 535 vari_rotation_modulation
+			+		
551 538	(550 737 unique source_id)	363 969			390 529 (390 449 unique source_id)

Fig. 3: Accounting of the 550 737 unique variable sources published in DR2. All have an entry in the *Gaia* archive `gaia_source` and `vari_time_series_statistics` tables. Their distributions in the additional variability tables is shown. The classification output types are mutually exclusive so that their sum matches the total number of entries in the published `vari_classifier_result` table. Eighty sources appear in more than one SOS table (not illustrated), which is detailed in Sect. 4.5. The overlap between similar-type classification and SOS is detailed in a Venn-like fashion showing the counts in the three possible subsets. A few hundred sources have different assigned types in classification and SOS tables (not illustrated), as explained in Sect. 4.6, hence the difference on the left between the total type count and the unique `source_id` count. No SOS module treated δ Scuti & SX Phoenicis stars.

Holl et al. (2018): **550 737 változócsillag** a Gaia fotometriája alapján, közte 11 438 cefeida és 228 904 RR Lyrae típusú csillag. A Hipparcos annak idején 273 cefeidát mért (közte 2 újonnan felfedezettet), RR Lyrae típusú csillag pedig 186 volt a mintájában (közte 9 új).

A Gaia DR2 eredményeiből

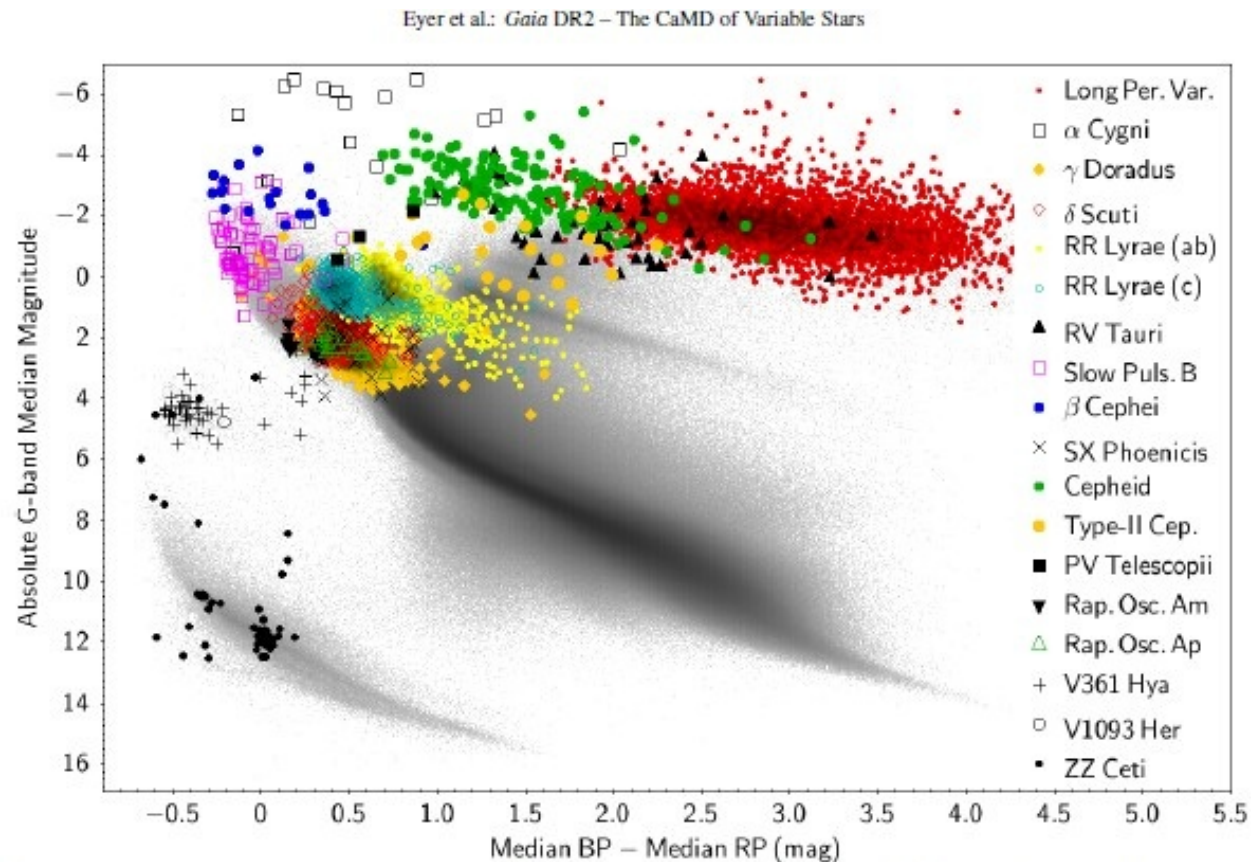


Fig. 2. Known pulsating variable stars retrieved from published catalogues are placed in the observational CaMD, with symbols and colours representing types as shown in the legend (see [A.1] for the references from literature per type). All stars satisfy the selection criteria described in

Eyer et al. (2019): minden típusra bemutatja a HR (szín – abszolút fényesség) diagramon való elhelyezkedést...

A Gaia DR2 eredményeiből

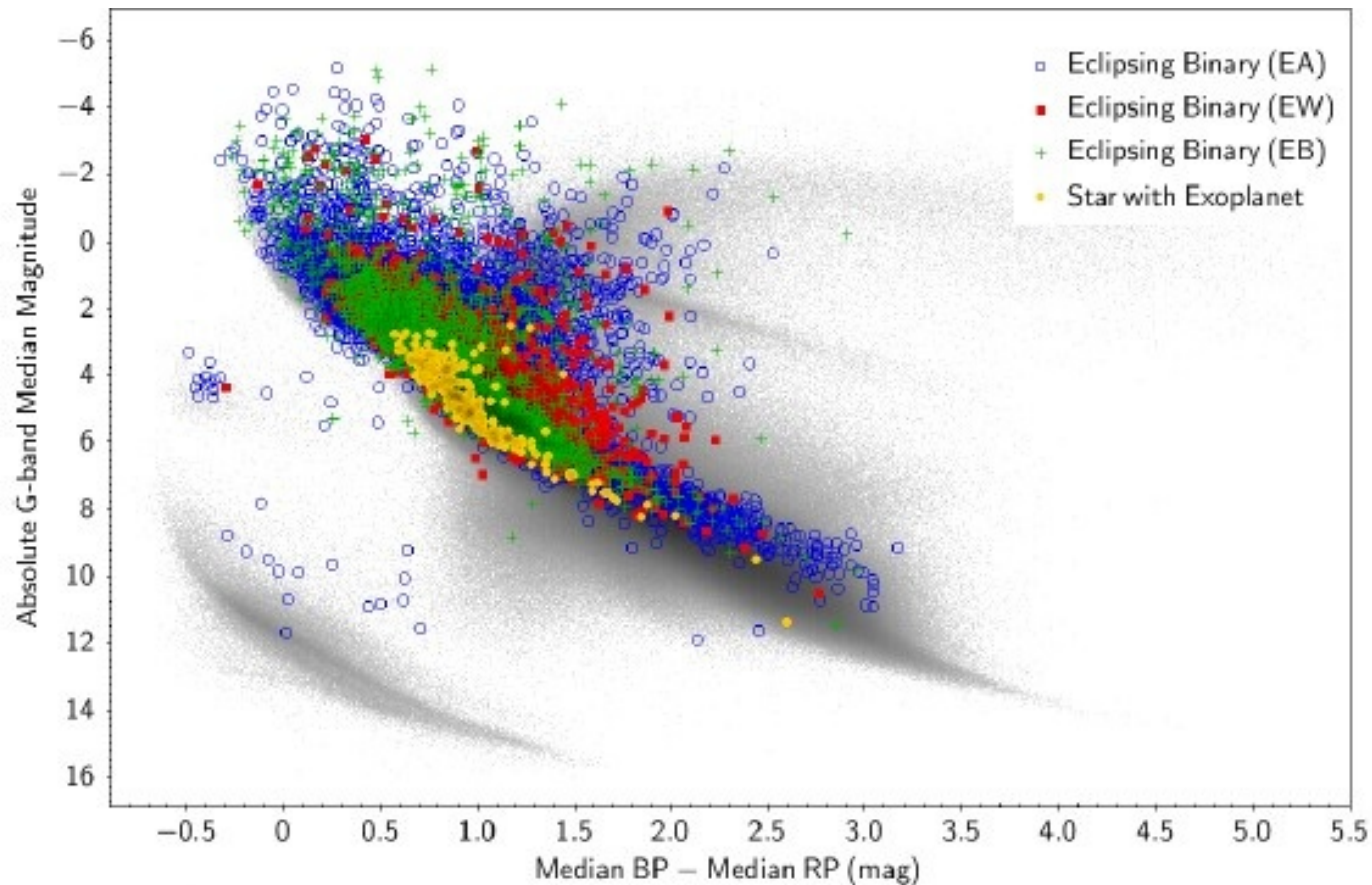
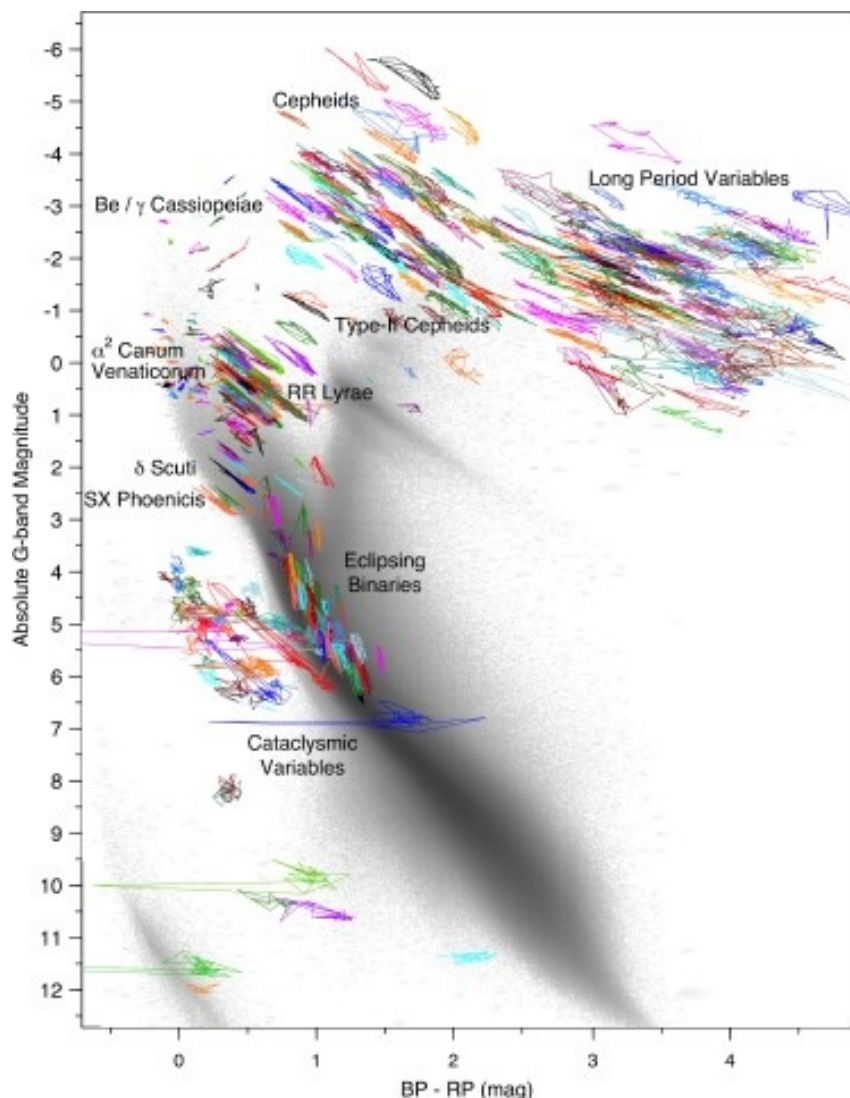


fig. 4. Same as Fig. 2 but for eclipsing binaries (of types EA, EB, EW) and known host-stars exhibiting exoplanet transits. As expected, eclipsing binaries can be anywhere in the CaMD, that explains why they are a main source of contamination for instance of pulsating stars.

Itt például a fedési változócsillagokra

A Gaia DR2 eredményeiből



És a HR-diagramon való mozgás is nyomon követhető a Gaia fotometriai mérései alapján. (Eyer et al., 2019)

Az M15 gömbhalmaz csillagainak fényváltozása (fent) (R. Vanderbei, ESA/Gaia/DPAC)

A Gaia DR2 eredményeiből

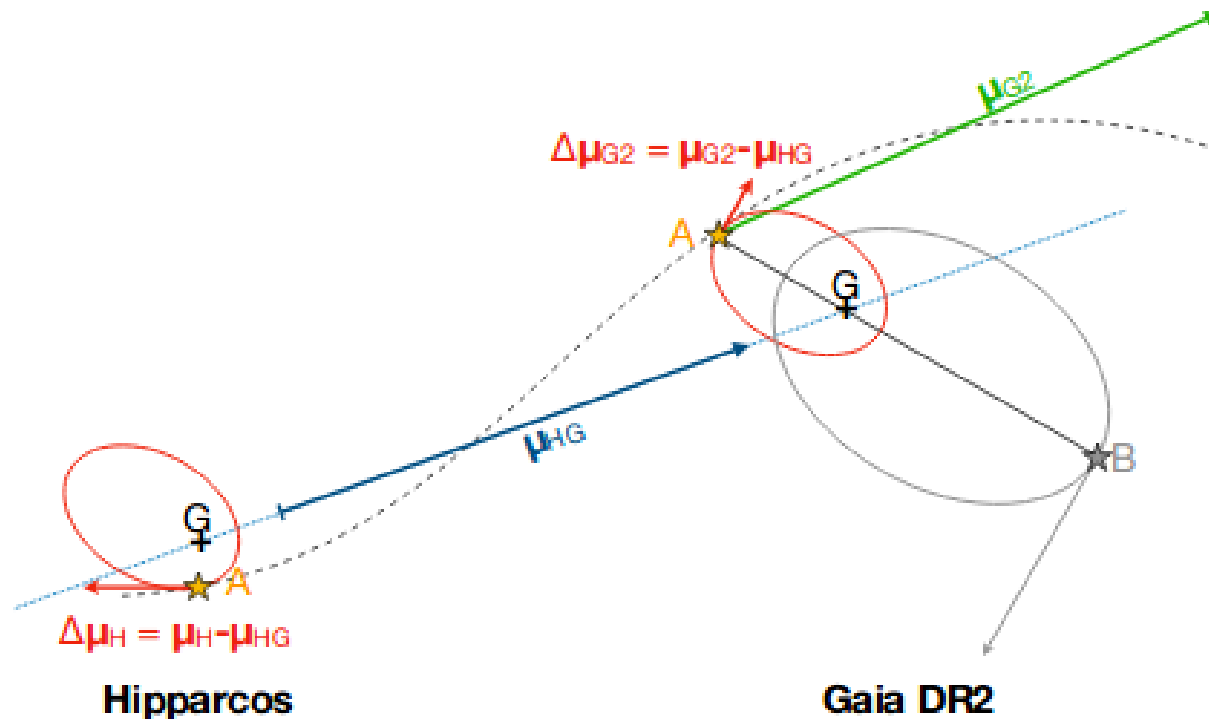
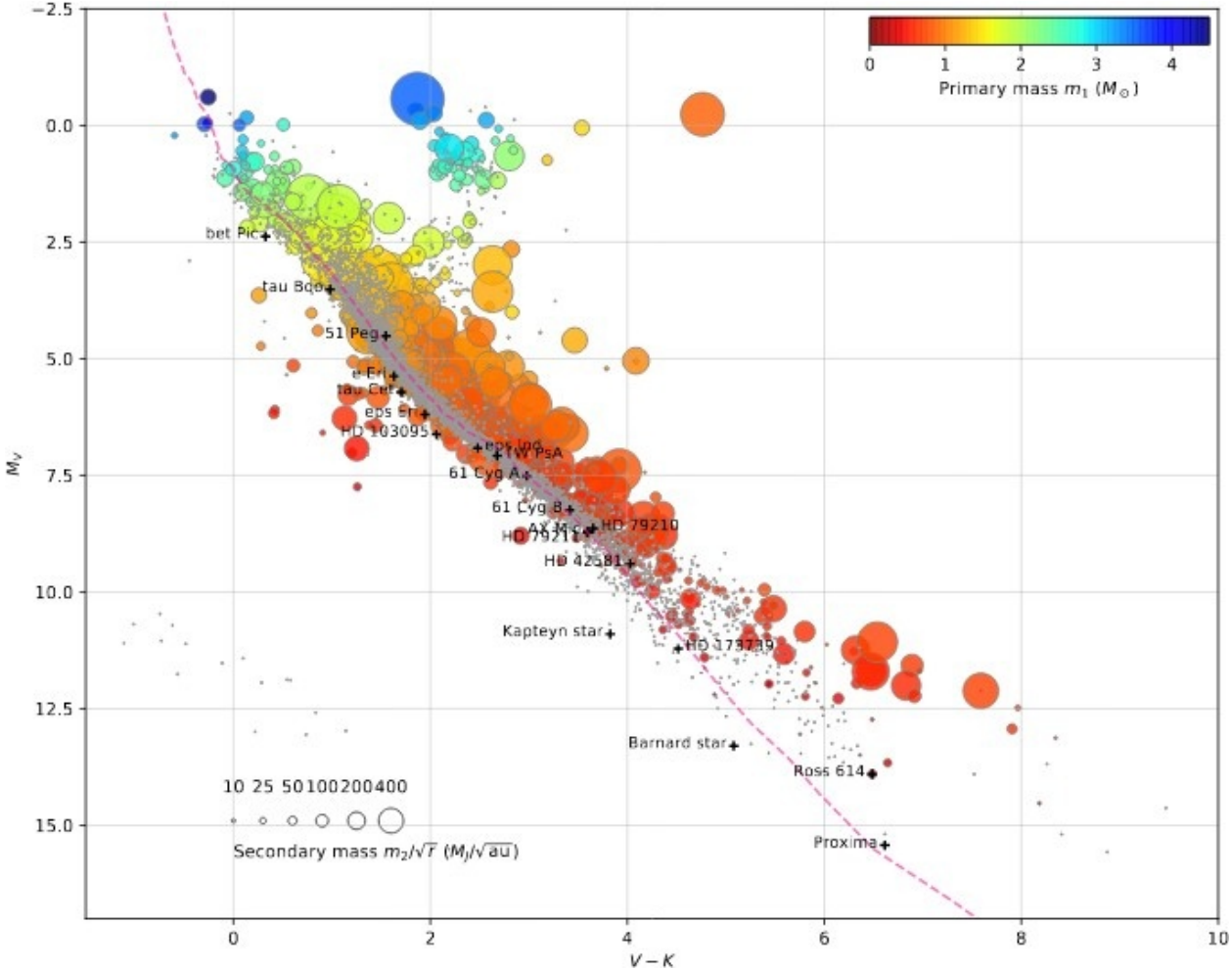


Fig. 1. Principle of the proper motion anomaly $\Delta\mu_{H/G2}$ determination. We assume in the figure that the secondary object B has a negligible photometric contribution, and that the photocenter of the system is at the position of star A.

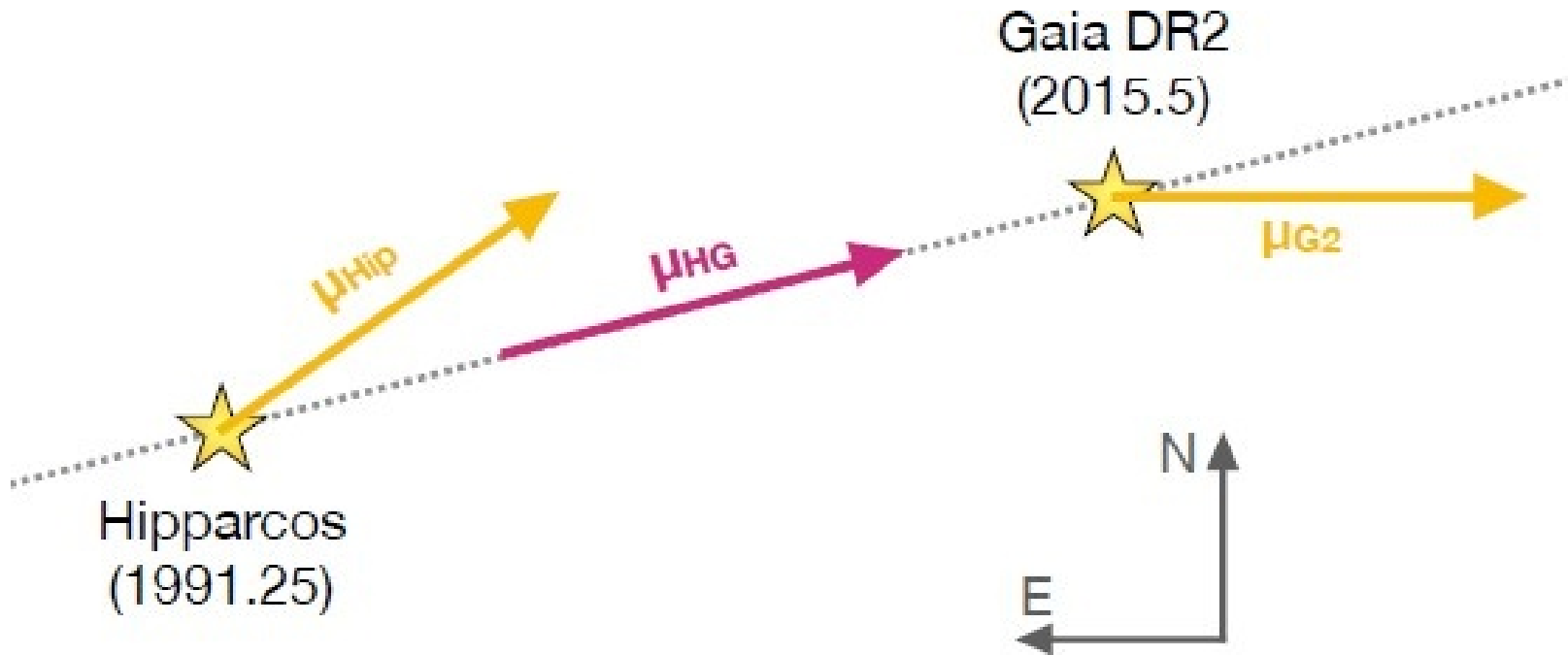
A csillagok kettősségére (pálya menti mozgására) lehet következtetni a sajátmozgás időbeli változásából (Kervella et al., 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből



Az 50 pc-nél közelebbi 6741 csillag 30%-a mellett eddig ismeretlen kísérő lehet (Kervella et al., 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből



Ugyanilyen vizsgálat cefeidákra és RR Lyrae típusú változócsillagokra a kettősség közvetett kimutatására (Kervella et al., 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből

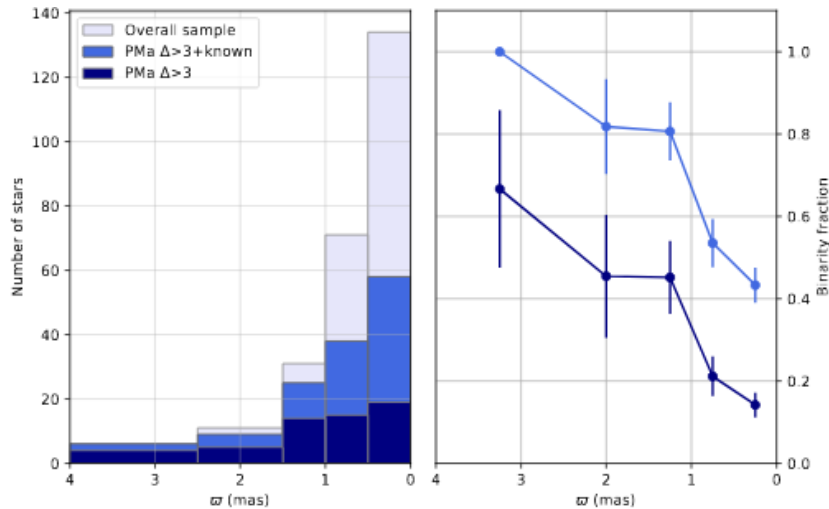


Fig. 4. *Left:* Histogram of the Cepheids that show a proper motion anomaly ($\Delta > 3$, dark blue), with the additional stars classified as binaries in the database maintained by Szabados (2003b) (medium blue) and the overall sample (light blue) as a function of parallax. *Right:* Binary fraction as a function of parallax. The error bars represent the binomial proportion 68% confidence interval.

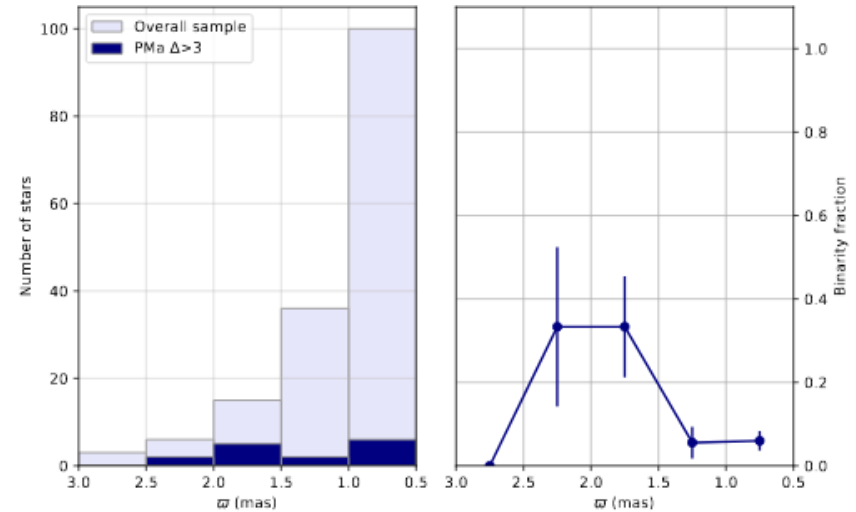
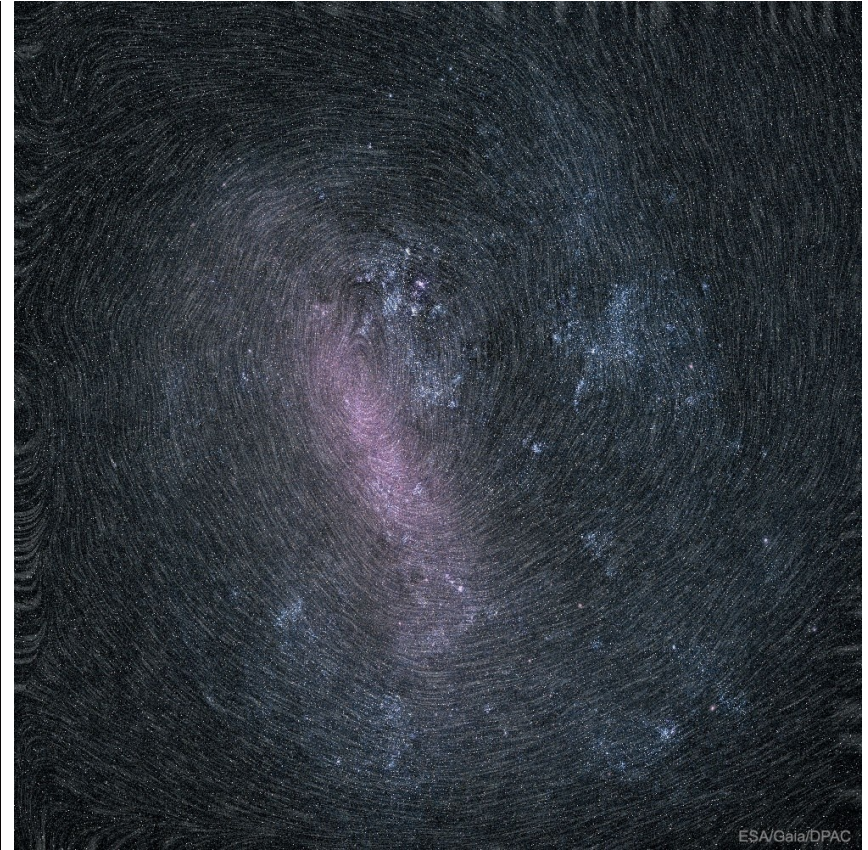
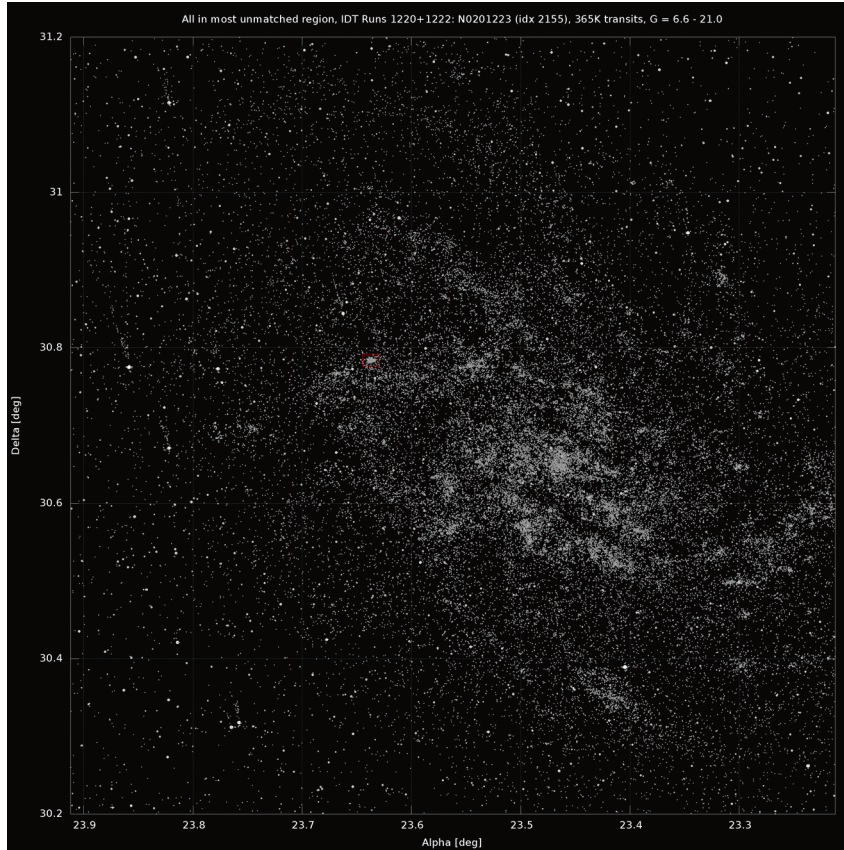


Fig. 6. *Left:* Histogram of the RR Lyrae with detected proper motion anomalies ($\Delta > 3$) as a function of parallax. *Right:* Binary fraction as a function of parallax. The error bars represent the binomial proportion 58% confidence interval.

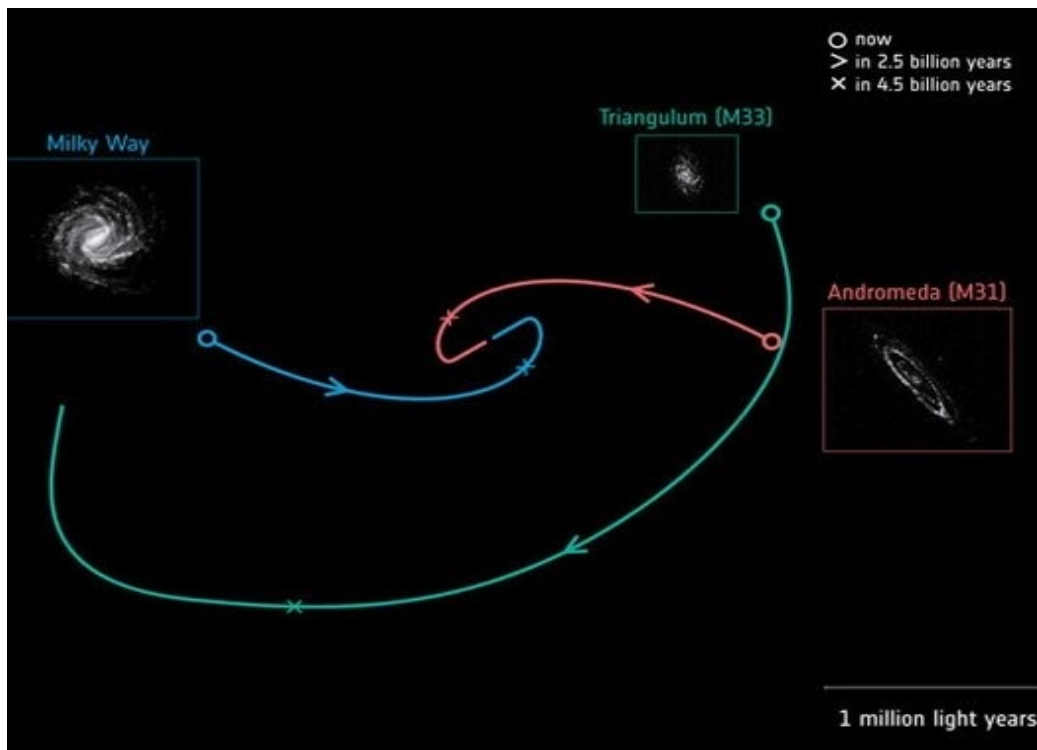
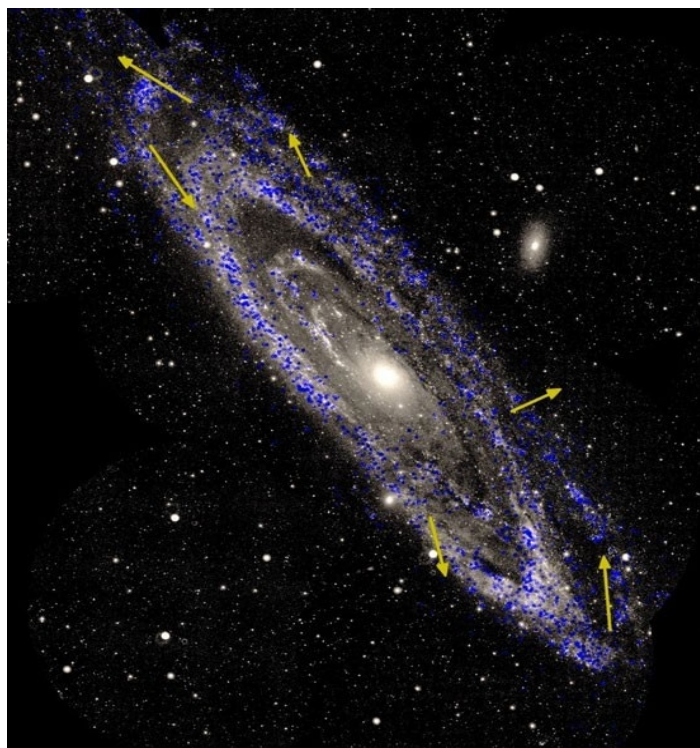
A cefeidák szinte mindegyike kettős rendszer tagja, és végre az RRL-csillagok között is található kettőscsillagok (Kervella et al., 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből



Túl a Tejútrendszeren
M33 – ESA/Gaia/DPAC/IEEC-UB a Nagy-Magellán-felhő rotációja

A Gaia DR2 eredményeiből

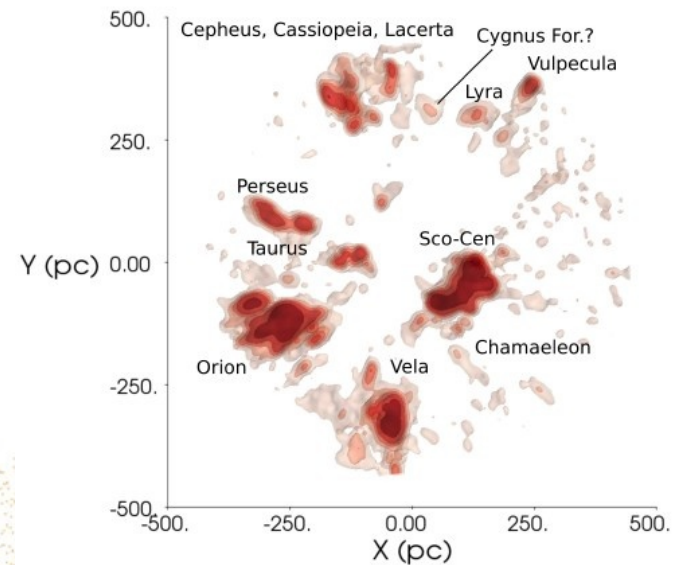
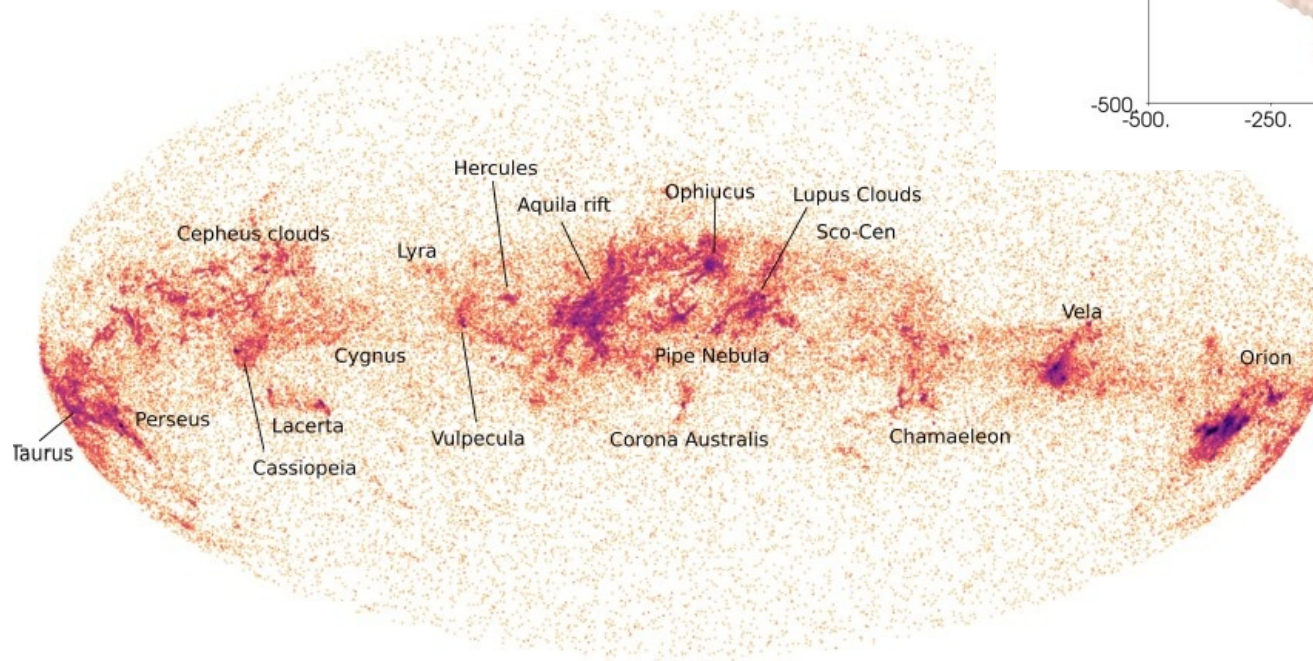


Van der Marel et al. (2019)

Az Andromeda-köd 110 km/s sebességgel közeledik a Tejútrendszerhez.
Az oldalirányú mozgás a HST (2012) alapján 17 km/s, de a HST+Gaia DR2 (2019) alapján 50 km/s. Ütközés helyett koccanás lesz 4,5 milliárd év múlva.

A Gaia DR2 eredményeiből

Zari et al. (2019): a főszorozat előtti csillagok eloszlása



A Gaia DR2 eredményeiből

YSO candidates in the Gaia DR2 using machine learning methods 9

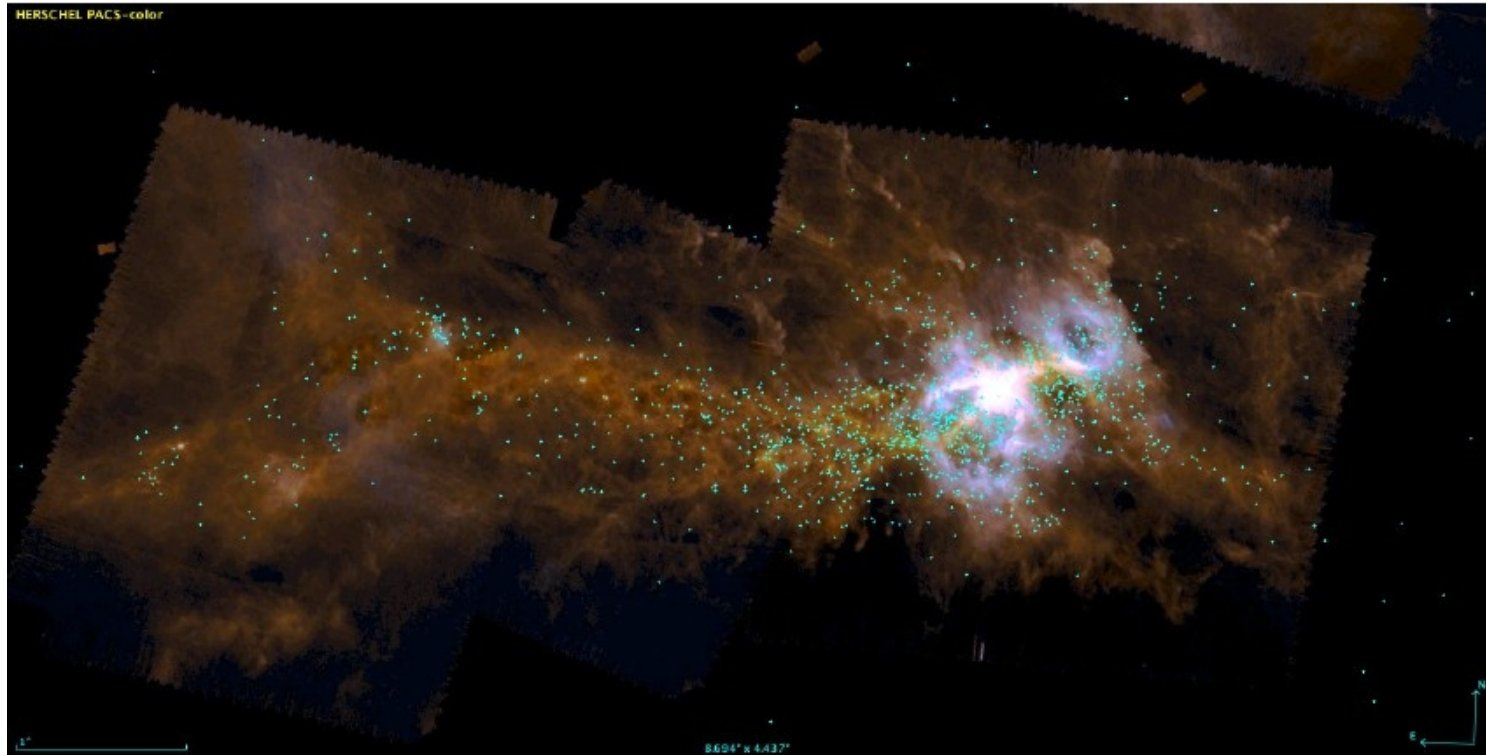
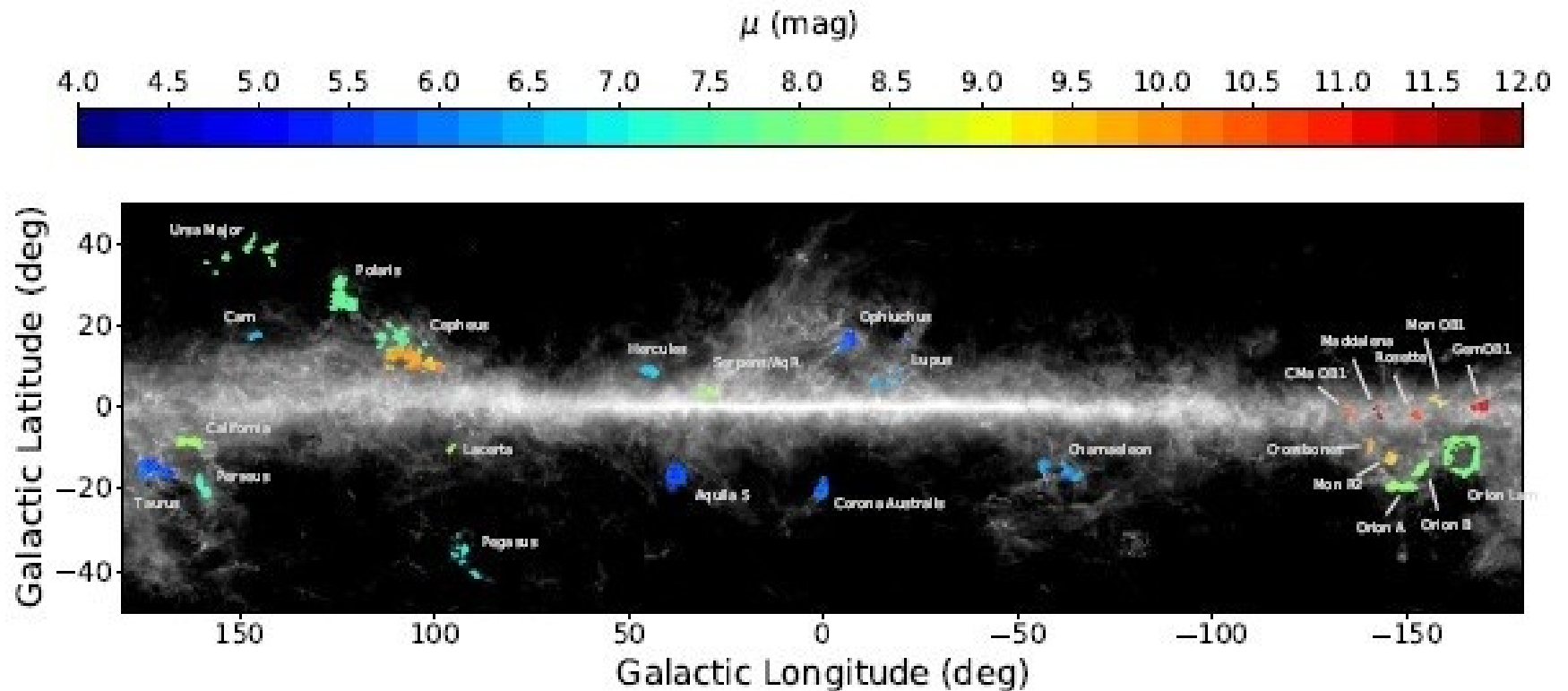


Figure 5. YSO candidates in Orion A overlaid on a false-color Herschel/PACS image, using galactic frame. 1 263 YSO candidates are

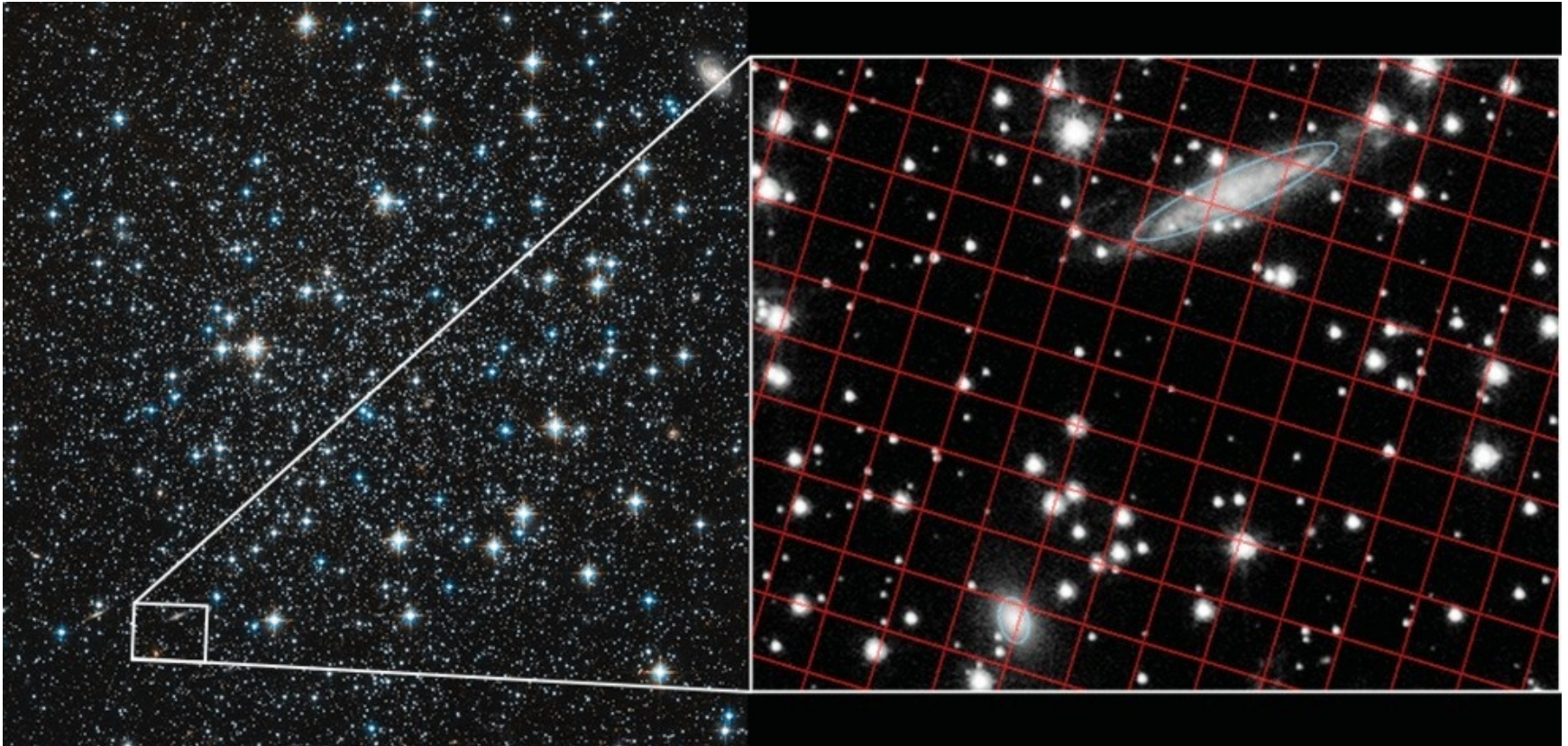
Fiatal csillagok azonosítása és eloszlása (Marton et al., 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből



Tejútrendszerbeli molekulafelhők távolságmodulusa (Zucker et al., 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből



A Tejútrendszer csillagainak szisztematikus mozgásából a sötét anyag mennyisége és a Tejútrendszer össztömege 1,5 billió naptömeg.
A képen az NGC 5466. (NASA, ESA, S. T. Sohn & J. DePasquale, 2019)

A Gaia DR2 eredményeiből

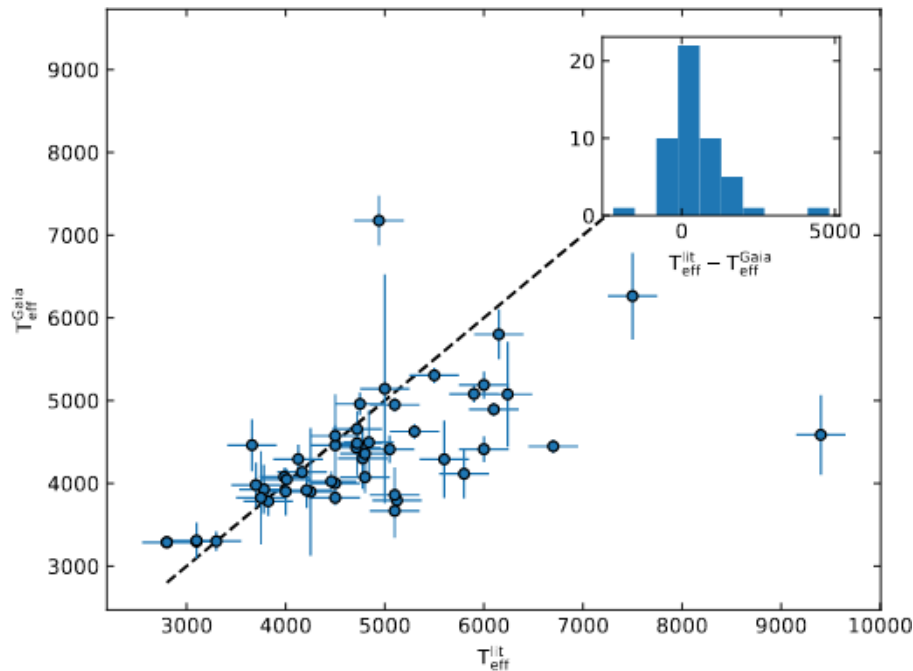
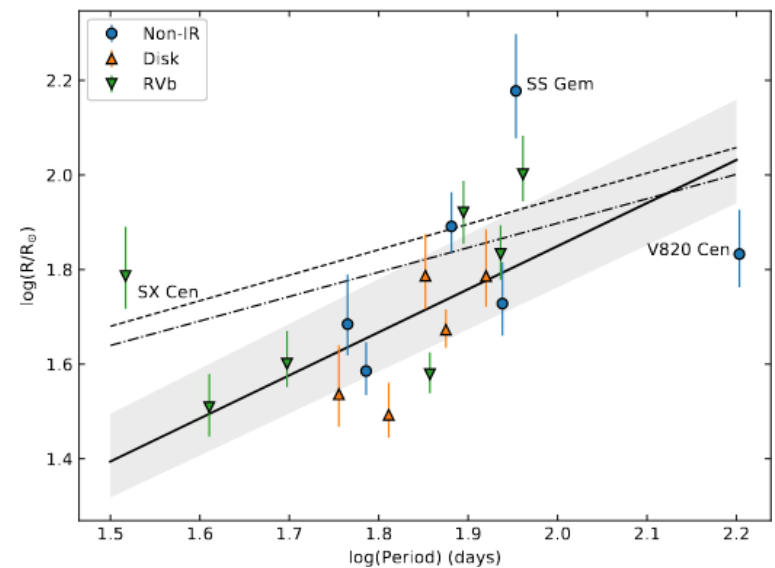
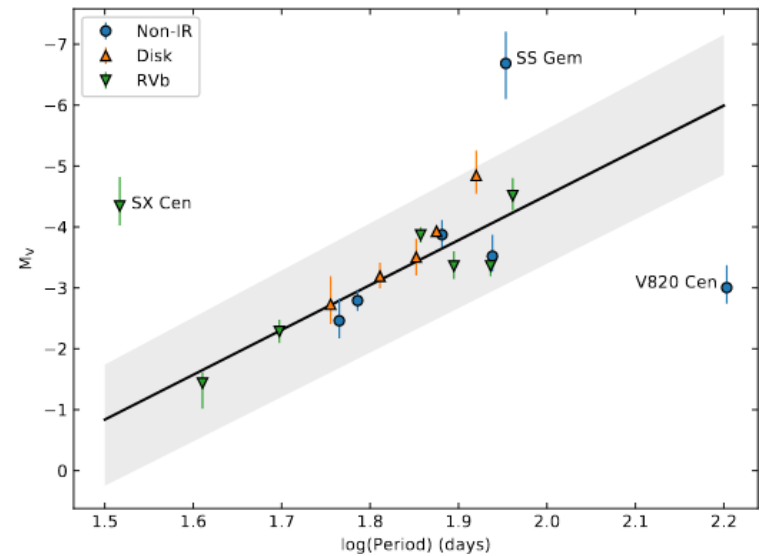


Figure 1. A comparison of effective temperatures obtained from Gaia and those derived using spectroscopy. The black dashed line shows the 1:1 relation. The increasing deviation is clearly visible

Az RV Tauri típusú csillagokra:
instabilitási sáv, P-L reláció,
P-R reláció (Bódi & Kiss, 2019)



A Gaia DR3

A koronavírus-járvány lassította az adatfeldolgozást, emiatt a harmadik adatközlést két részre bontották, hogy a kétévenkénti adatbázis-bővítés megmaradjon: EDR3 (early DR3) és DR3.

Gaia EDR3 (early release): 2020. december, tartalma:

- teljes asztrometria és fotometria 1,8 milliárd csillagra az első 34 hónap mérései alapján

Gaia DR3: 2021. június, a Gaia EDR3 adatain túl:

- radiális sebességek (az eddig elérhetőnél halványabb csillagokra is)
- BP/RP/RVS spektrumok
- naprendszerbeli objektumok adatai (a lehető legnagyobb mintára)
- változócsillagászati információk, a hosszabb mérési időszak miatt a korábbinál nagyobb mintára, több mint 10 millió változócsillag, 20-nál több típusba sorolva
- asztrofizikai információk (a színek alapján)
- a kettős és többes csillagokra külön asztrometriai információ
- kiterjedt forrásokra morfológia (1,9 millió galaxis, 1,6 millió QSO).
- az Andromeda-galaxis körüli 5 fokos sugarú körben levő forrásokról részletes fotometriai felmérés

A Gaia DR3

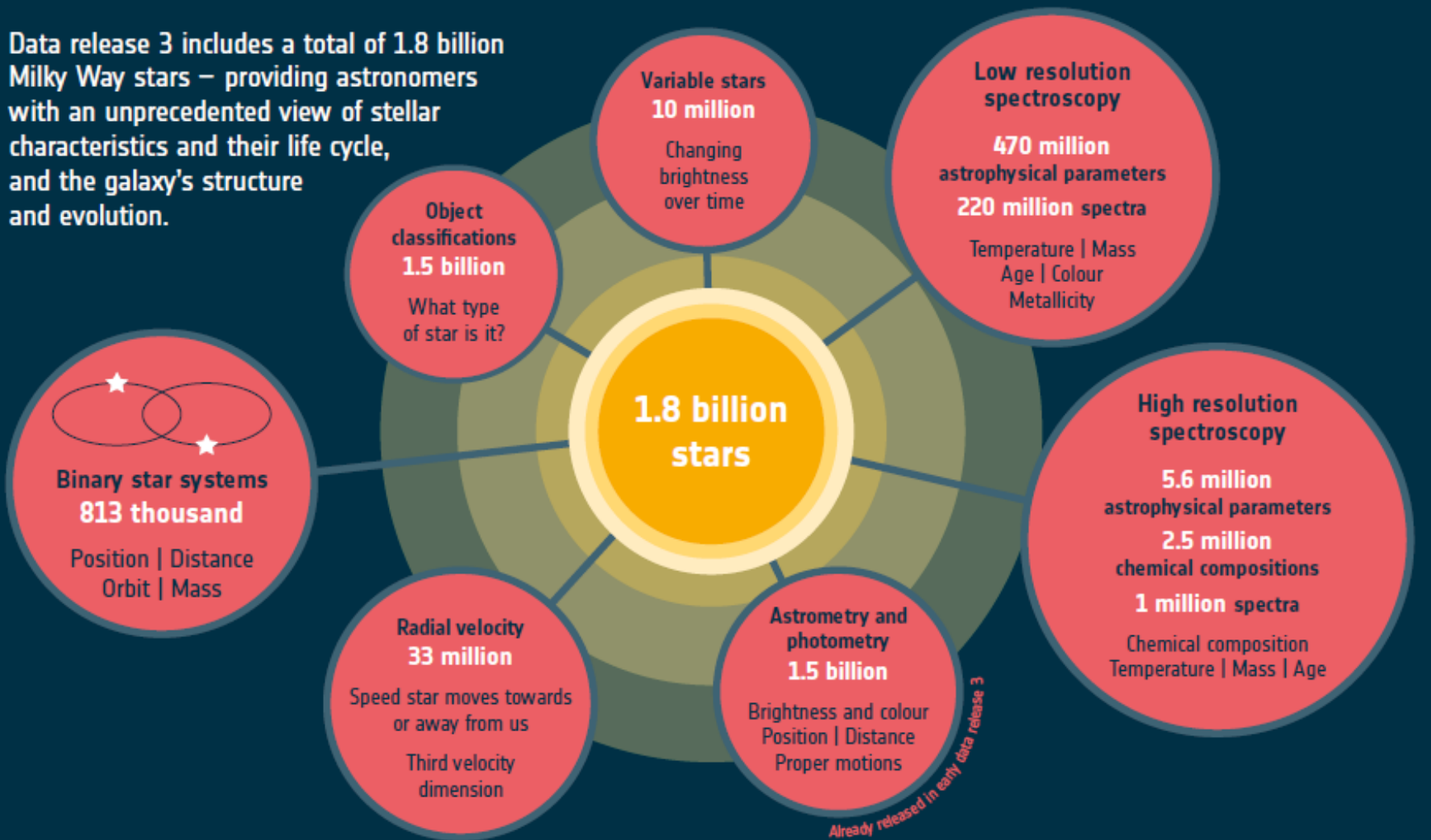
- Largest ever low resolution spectroscopy survey
- Largest ever radial velocity survey
- Largest ever collection of astrophysical data for stars in the Milky Way
- For many classes of variable stars: largest survey ever
- Binary star survey that surpasses all the work on binary stars from the past two centuries
- Highest accuracy survey of asteroids combining their compositions with their orbits
- First space-based all-sky survey of quasars and of the shape of galaxies in the local Universe
- Andromeda Galaxy photometric survey

A Gaia DR3

MILKY WAY STARS



Data release 3 includes a total of 1.8 billion Milky Way stars – providing astronomers with an unprecedented view of stellar characteristics and their life cycle, and the galaxy's structure and evolution.



A Gaia DR3

These nine performance verification papers are titled:

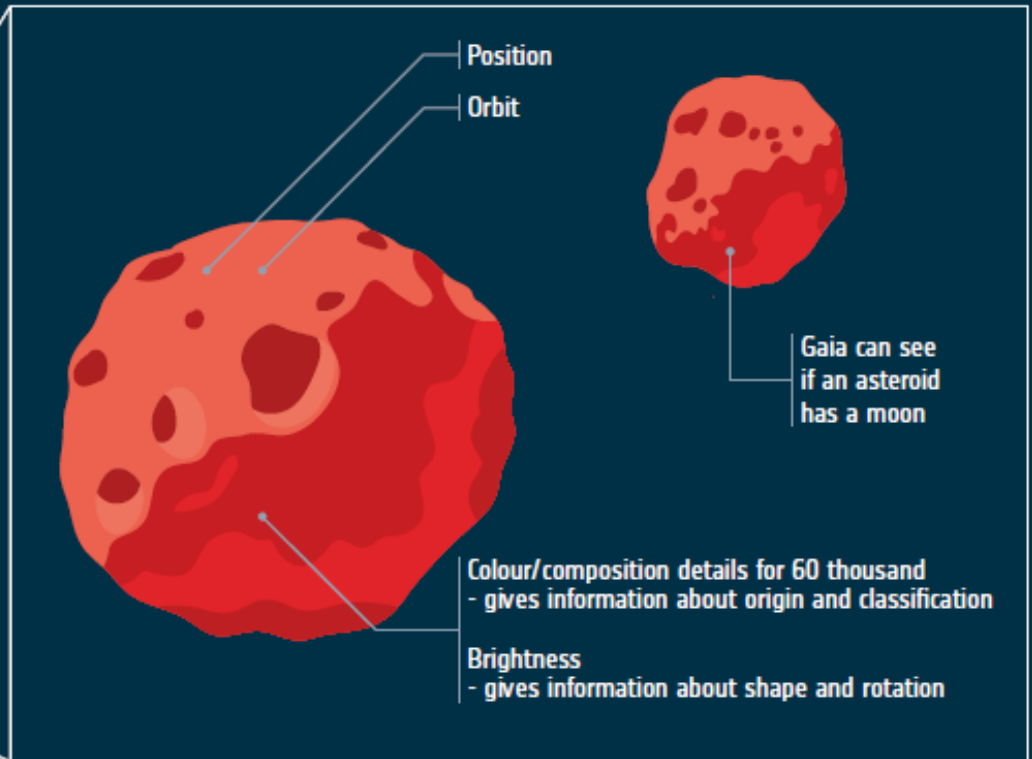
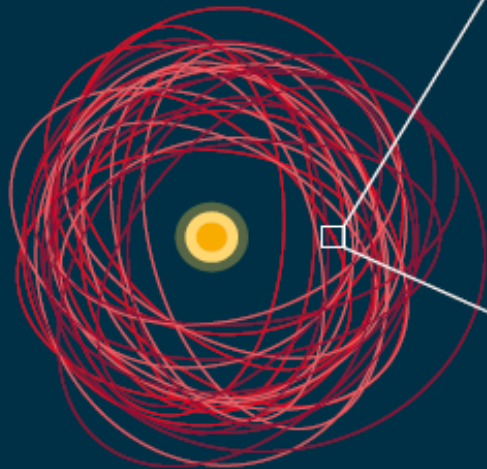
- Mapping the asymmetric disc of the Milky Way
- Pulsations in main-sequence OBAF stars as observed by Gaia
- Reflectance spectra of Solar System small bodies
- The galaxy in your preferred colours. Synthetic photometry from Gaia low-resolution spectra
- Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure
- The extragalactic content
- Chemical cartography of the Milky Way
- Golden sample of astrophysical parameters
- Exploring and mapping the diffuse interstellar bands at 862 nm

A Gaia DR3

SOLAR SYSTEM



ESA's Gaia data release 3 is providing vital information about the Solar System's asteroid population, which is essential to investigate the origin of our Solar System.



156 thousand asteroids

Near-Earth asteroids | Main belt asteroids
Mars crossers | Jupiter trojans
Centaurs | Trans-Neptunian Objects

Additionally, Gaia observed:



31 moons of Mars, Jupiter,
Saturn, Uranus and Neptune

A Gaia DR3

OUTSIDE OUR GALAXY



Unlike other missions that target specific objects, ESA's Gaia is a survey mission. This means that while surveying the entire sky multiple times, it is bound to see objects outside the Milky Way as well, such as quasars and other galaxies. Gaia's data release 3 provides astronomers with details on a few million extragalactic objects.

1.9 million quasars

Supermassive black holes accreting matter

Redshift | Brightness | Colour

Host galaxy detected for 60 thousand quasars



2.9 million galaxies

Brightness | Colour

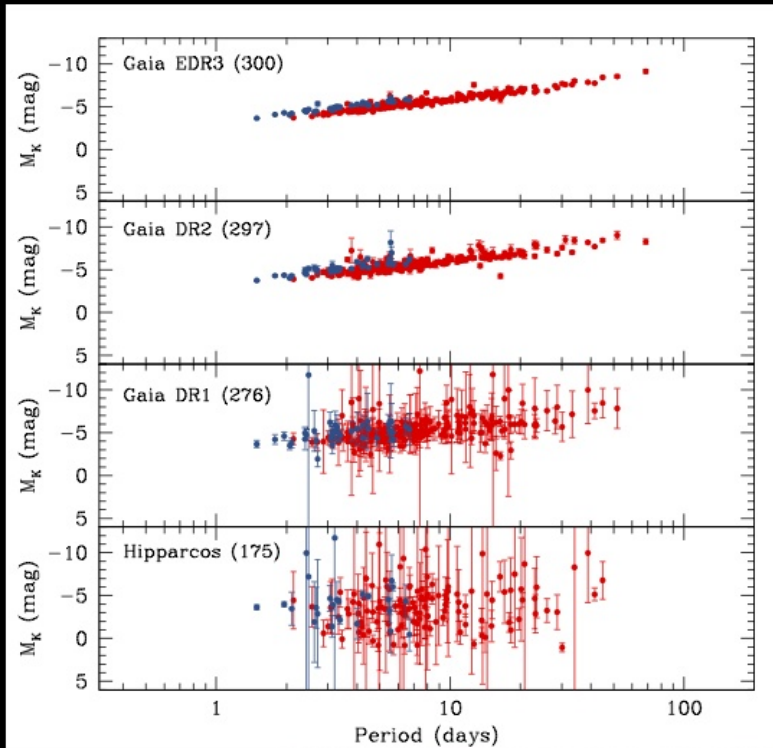
Star formation history | Shape



A helyzet idővel egyre jobb...

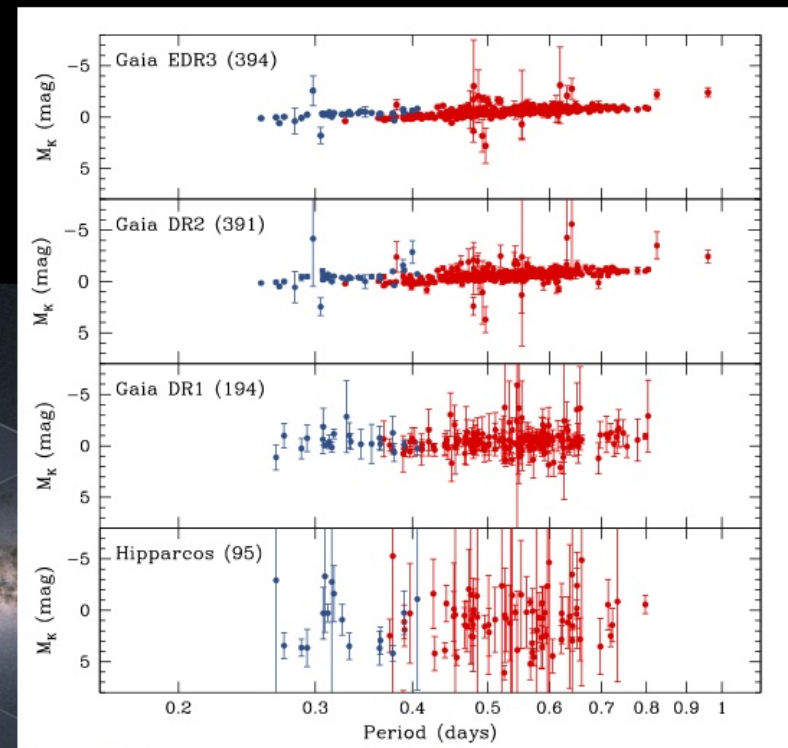
CEPHEIDS AND RR LYRAE AS STANDARD CANDLES FROM HIPPARCOS TO DR1 TO DR2 TO GAIA EDR3

CEPHEIDS



CREDIT: ESA/GAIA/DPAC, CREATED BY: V. RIPEPI

RR LYRAE

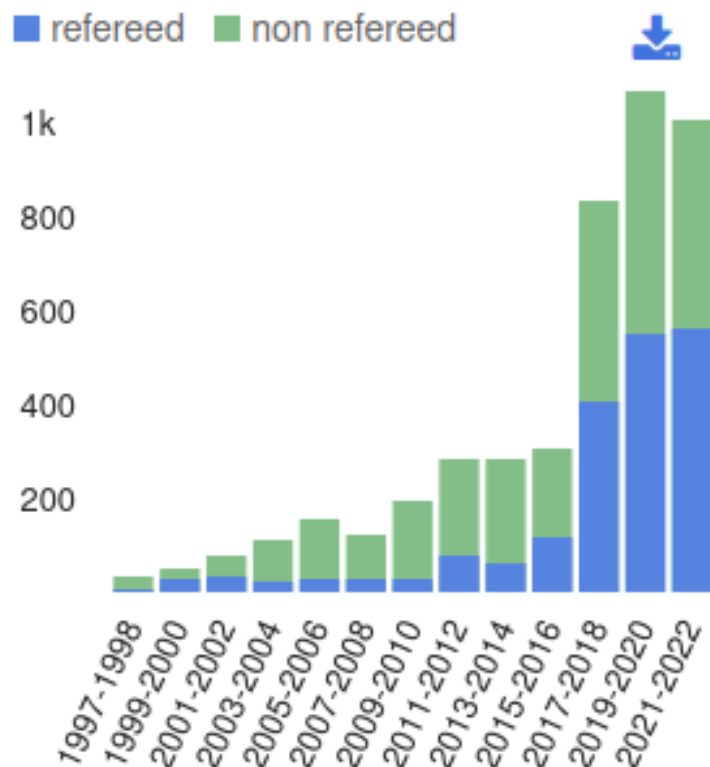


CREDIT: ESA/GAIA/DPAC, CREATED BY: T. MURAVEVA & A. GAROFALO

G. CLEMENTINI, GAIA EDR3 - DECEMBER 3, 2020

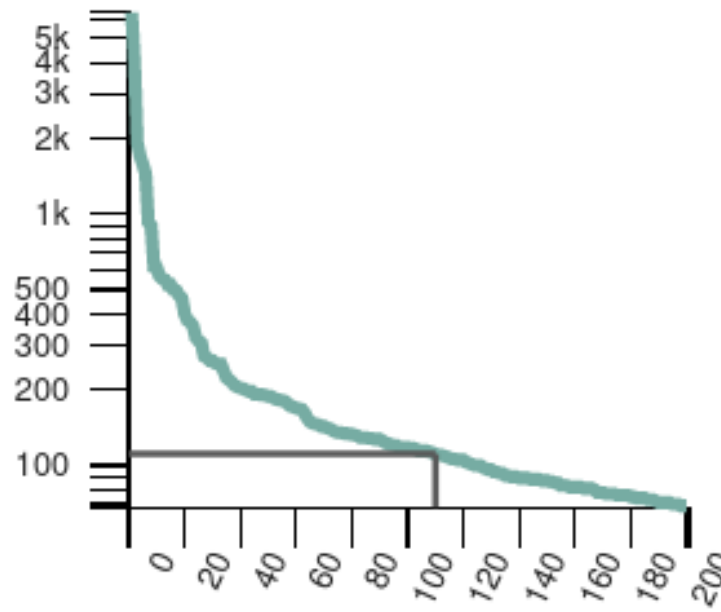
Remek példák: a cefeidák és az RR Lyrae csillagok P-L relációja a Hipparcostól a Gaia DR3-ig.

A Gaia hatása a csillagászatra



H-Index for results: 110

Y-axis: linear ☐ log ☒



A Gaiáról szóló és Gaia-adatokat feldolgozó és használó cikkek száma (balra), illetve a 200 legidézettebb cikkekre történt hivatkozások számának eloszlása 2022 végéig (jobbra). Addig **110 TB** mérési adat érkezett 215 billió tranzitról.

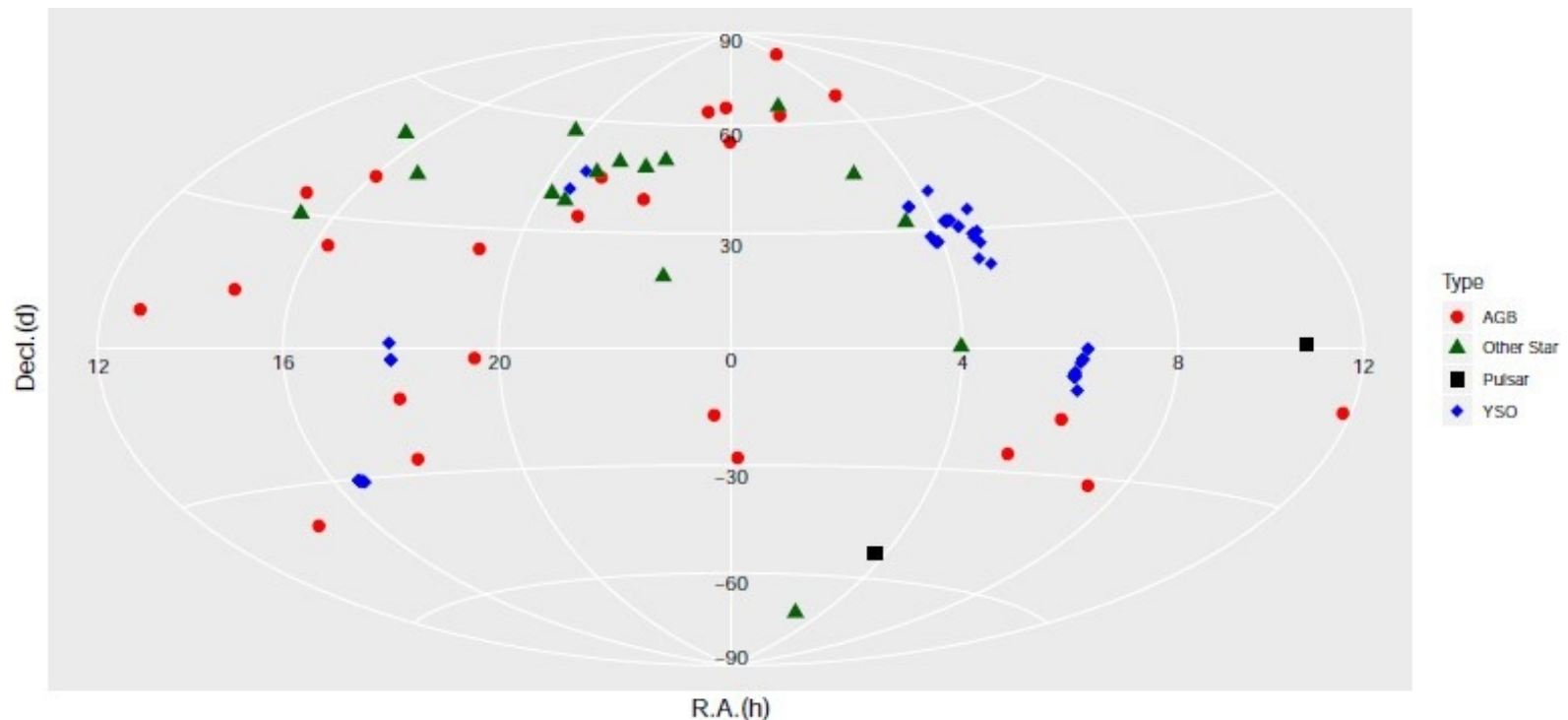
Azért nem árt az óvatosság...

VLBI-vel mért parallaxisokkal összevetve a Gaia DR2-ben közölt parallaxisokban $-0,075 \pm 0,029$ milliívmásodperc szisztematikus hibát találtak. Mások szerint 0,054 mas adandó hozzá a Gaia-parallaxisokhoz.

Sűrűn elhelyezkedő csillagok esetében a radiális sebesség hamis lehet (7,2 millió közül 70365 csillag, ez kb. 1%).

A G magnitúdó a fényességtől függően minimális korrekcióra szorul.

Lásd: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2-known-issues>



Azért nem árt az óvatosság...

- Recommended GoF indicator for *Gaia* DR2 astrometry
- Not given directly in the *Gaia* Archive
- Can be computed from the quantities:

$$\chi^2 = \text{astrometric_chi2_al}$$

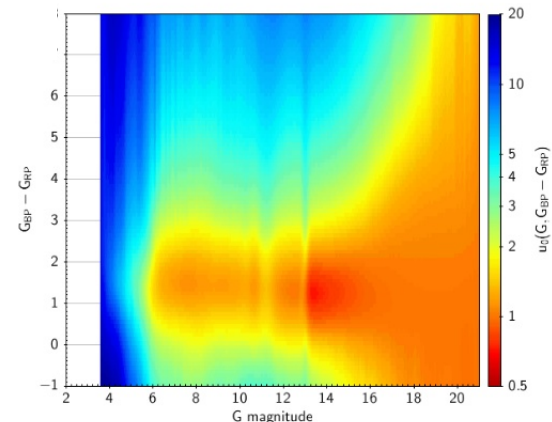
$$N = \text{astrometric_n_good_obs_al}$$

$$G = \text{phot_g_mean_mag}$$

$$C = \text{bp_rp} \quad (\text{if available})$$

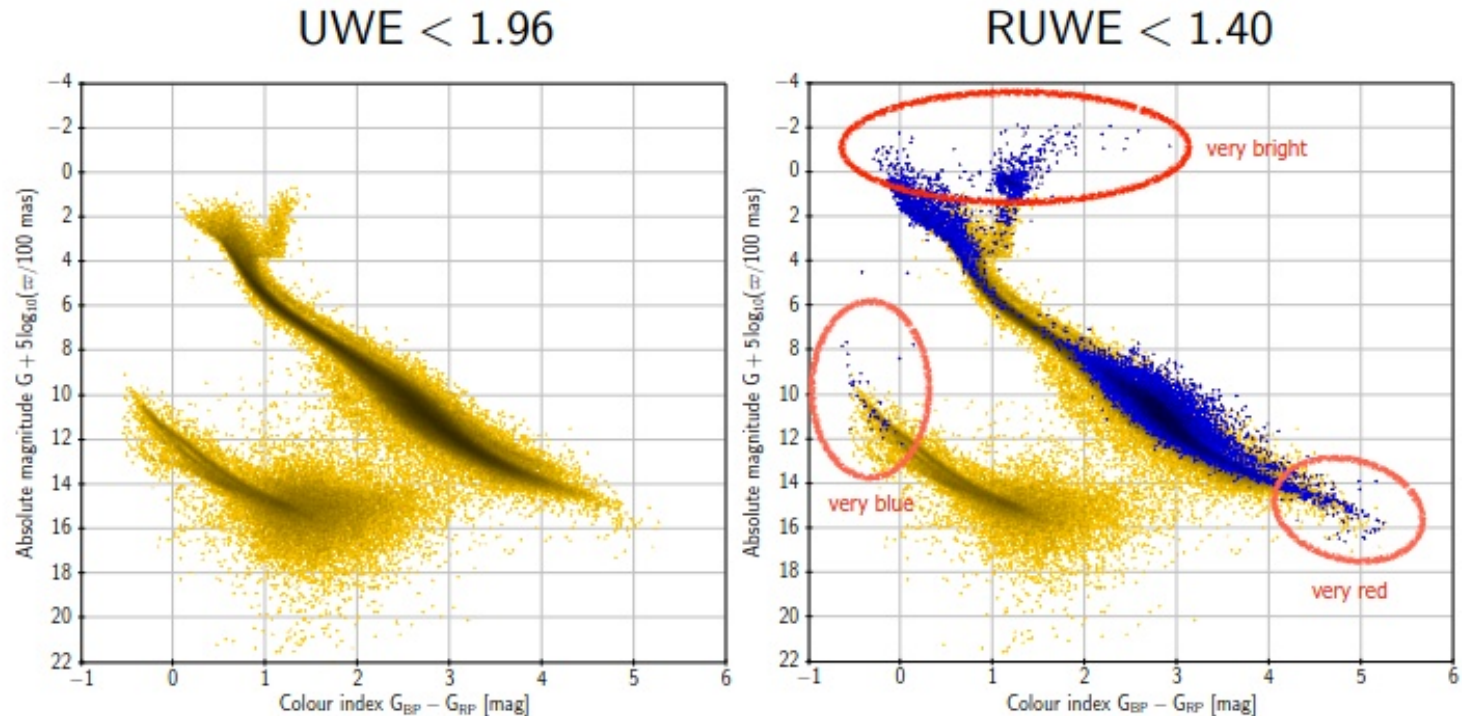
- Unit weight error $\text{UWE} = \sqrt{\chi^2 / (N - 5)}$
- Renormalised unit weight error $\text{RUWE} = \text{UWE} / u_0(G, C)$
- $u_0(G, C)$ is an empirical normalisation factor, provided as a lookup table on the ESA *Gaia* DR2 **Known issues** page

Normalisation factor $u_0(G, C)$



This is essentially the “typical” UWE for a given magnitude and colour

UWE és RUWE



Limits chosen to retain the same number of sources

Filtering by RUWE gives a cleaner HRD

Blue dots are sources missing in the left diagram

Jöhet a Gaia DR4 – és a folytatás

A tervezett 5 éves mérési sorozat 2019 nyarán véget ért, de a Gaia előbb 2020 végéig, majd 2022 végéig megkapta az ESA támogatását, és ígéret van a mérések 2025-ig történő támogatására.

A végső Gaia-katalógus ezért 2027-nél korábban nem várható.

Az adatközlések eddig is késtek a tervezetthez képest, de a Gaia DPAC csak biztos(nak tűnő) adatokat hajlandó nyilvánosságra hozni.

Gaia DR4: 66 hónap mérési alapján, legkorábban 2025 végén:

- teljes asztrometria, fotometria és radiális sebesség-katalógus
- minden változócsillag adatai
- többes csillagok megoldása (komponensek, pályaelemek)
- asztrofizikai paraméterek csillagokra, galaxisokra, kvazárokra
- exobolygók listája
- minden forrásra epocha- és tranzitadatok

Gaia DR5: a Gaia minden mérési adata és az azokból lezármasztott mennyiségek

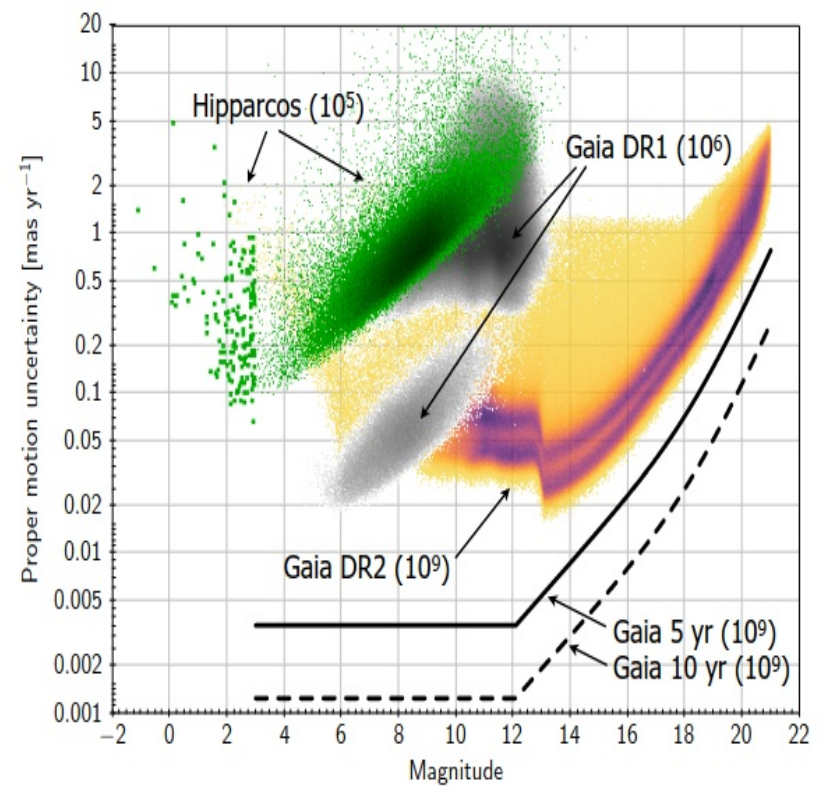
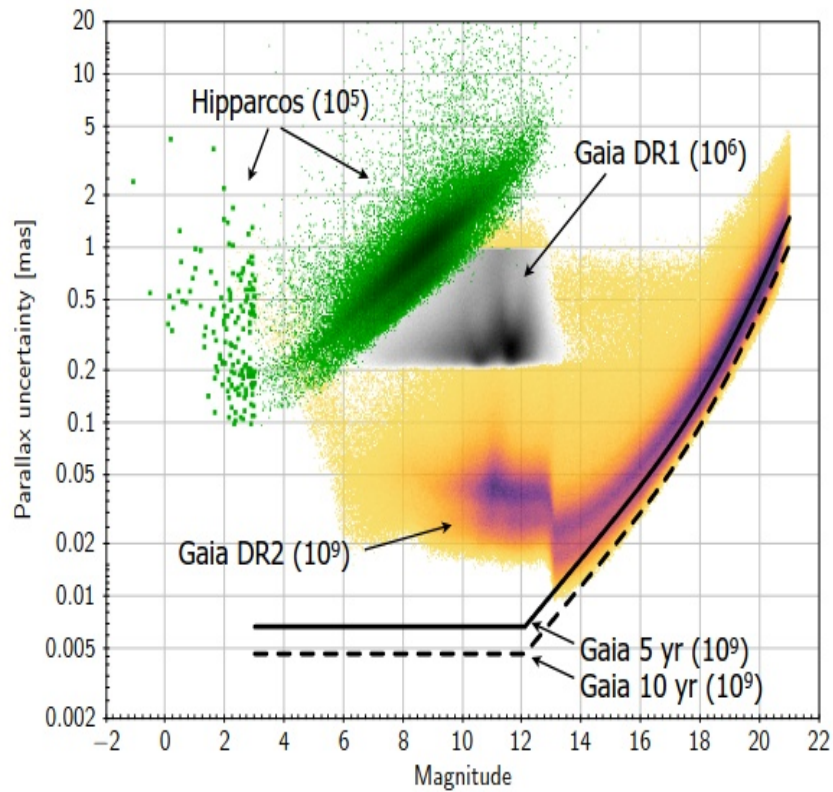
Jöhet a Gaia DR4 – és a folytatás

Mivel a Gaia DR4 időben még messze van, 2023 IV. negyedévére is terveznek egy adatközlést, ennek neve: Gaia Focused Product Release (Gaia FPR).

A Gaia FPR várható tartalma:

- naprendszerbeli objektumok frissebb asztrometriája
- nagy forrássűrűségű mező (egyelőre csak az ω Centauri gömbhalmaz) asztrometriája és fotometriája (a DR4-ben más ilyen régiók is lesznek)
- kvazárok környezetének analízise gravitációs lencsék kereséséhez
- hosszú periódusú változócsillagok (LPV) radiális sebességének adatai epochára bontva
- diffúz intersztelláris sávok (DIB) az RVS színeképek alapján

A várható végső pontosság



Más asztrometriai űrprojektek

Project	Agency	Magnitude range	Number of stars	Typical accuracy (at mag.)	Observation mode (# FOV)	Status
Hipparcos	ESA	< 12	0.1 M	1000 μ as (9)	Scanning (2)	1989–1993
Tycho		< 11.5	2.5 M	7000 μ as (9)		
AIST-Struve	Russia	< 15	> 4 M	1000 μ as (14)	Scanning (4)	Not developed
Roemer	ESA	< 18	400 M	140 μ as (14)	Scanning (2)	Superseded
Roemer+		< 20	1000 M	35 μ as (14)	Scanning (2)	Part of Gaia
GAIA (*)		< 15	50 M	6 μ as (14)	Scanning (3)	Now Gaia
Gaia	Germany	6–20	1000 M	15 μ as (14)	Scanning (2)	Launch 2013
DIVA (*)		< 15	35 M	900 μ as (13)	Scanning (2)	Cancelled 2003
FAME	USA	5–15	40 M	50 μ as (9)	Scanning (2)	Cancelled 2002

HST FGS: $3 < V < 17$ magn., 0,2 ezred " (mas) parallaxis, sajátmozgás;
 struktúra/kettősség: 8 mas; vizuális kettősök pályája 12 mas

DIVA (tervezett indítás: 2006, de 2003-ban törölték)

FAME (2004, de 2002-ben törölték)

SIM (Space Interferometry Mission, 2015, de 2010-ben törölték)

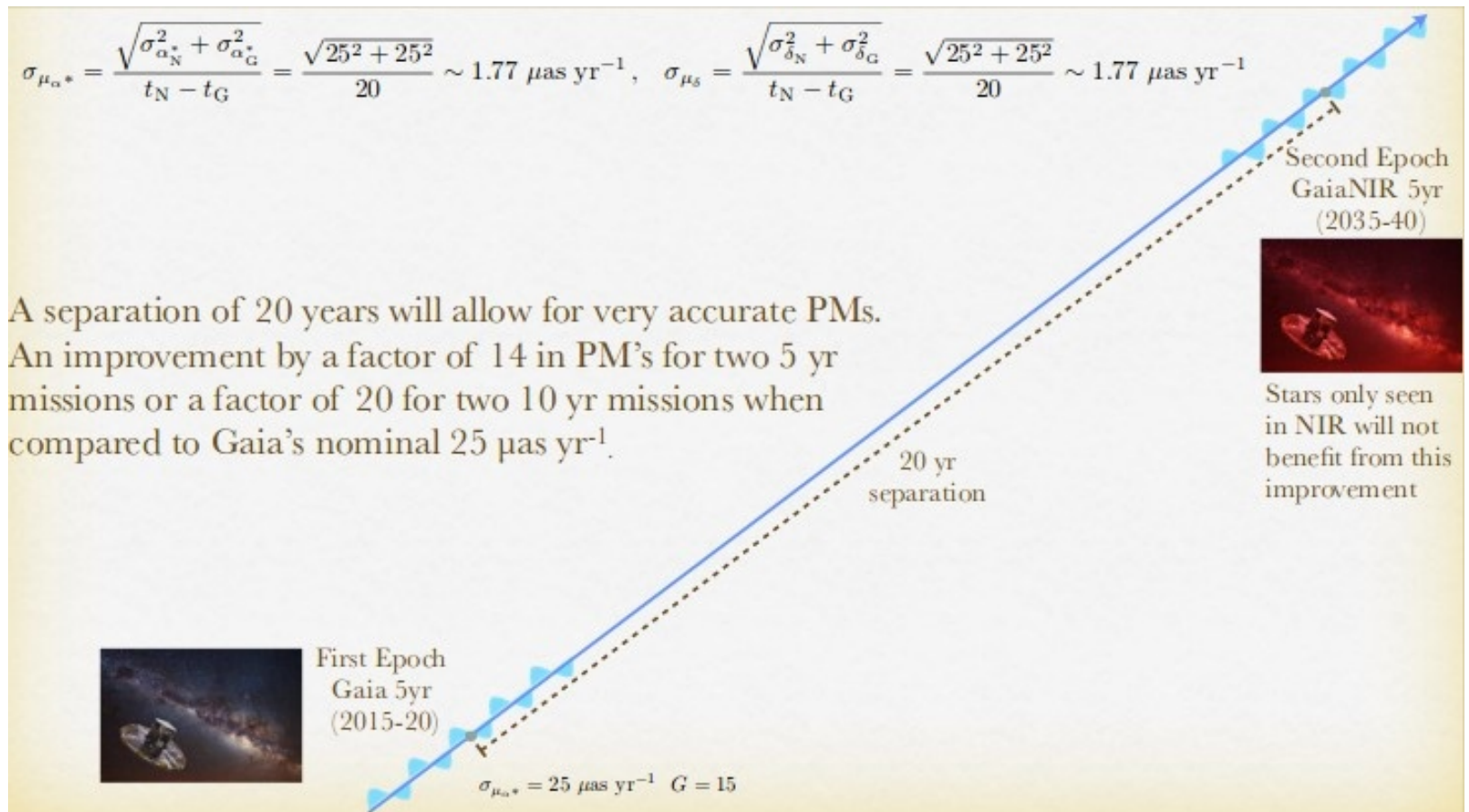
JASMINE (Japan Astrometric Satellite for **IN**frared Exploration): 900 nm-en,
 3 lépésben:

Nano-JASMINE (indítás 2011 helyett még mindig nem!, 5 cm, 35 kg, 3 mas)

Small-JASMINE (2023 ???, 30 cm, 400 kg, 10 mas néhány négyzetfokról)

JASMINE (még nem hagyták jóvá, 80 cm, 1500 kg, 10 mas 200 négyzetfokról)

Tervezett asztrometriai űrprojekt



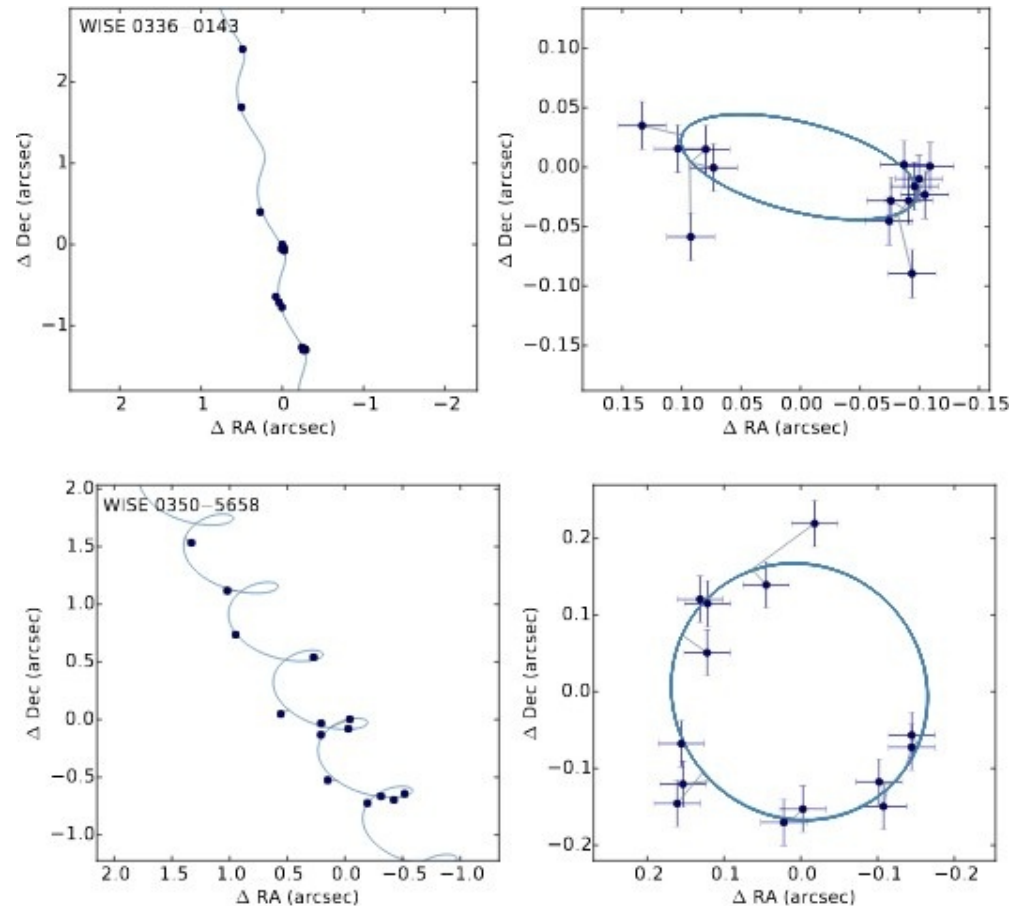
GaiaNIR: közeli infravörösben észlelő asztrometriai űrszonda, az optikaiban nem látható térségek feltérképezésére. Bő másfél évtized múlva.

Már létezik infravörös-űrasztrometria

A Spitzer infravörös-űrobszervatórium IRAC kamerájával 22 késői T és korai Y színképű csillag környezetéről 4,5 mikrométeres hullámhosszon készített képeket elemezték.

A 2-7 év közötti időszakot lefedő képek asztrometriai kimérése alapján a parallaxist és a sajátmozgást is meghatározták.

A kapott távolságból megállapított luminozítás meglepően széles intervallumot fog át.



Még egy érdekesség

OGLE-2005-SMC-001 mikrolencse-jelenség egyidejű földi és Spitzer-mérése során parallaxismeghatározást is végeztek. De a lencséző objektum kettőscsillag volt, az analízist elbonyolítva.

