

# ŰRCSILLAGÁSZAT ŰRASZTROMETRIA

Összeállította: Szabados László

Szegedi Tudományegyetem  
2019

# Az asztrometria fontossága

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

Ősi tudomány. Kezdeti szerepe: navigáció, időmegtározás.

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

- *Vonatkoztatási rendszer* pontos rögzítése;
- *Időmérés*: UTC a Föld forgásához kötődik;
- *Pozíciómeghatározás* (halvány objektumok azonosítása);
- *Kinematika, dinamika* ( kozmikus rendszerek [kettős- és többszörös 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* - 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).

Amire különösen ügyelni kell: a koordinátákhoz mindig időadat (epocha) is tartozik.

A pozícióváltozás okai:

- precesszió:

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

$$\theta = 50,290966''/\text{év}$$

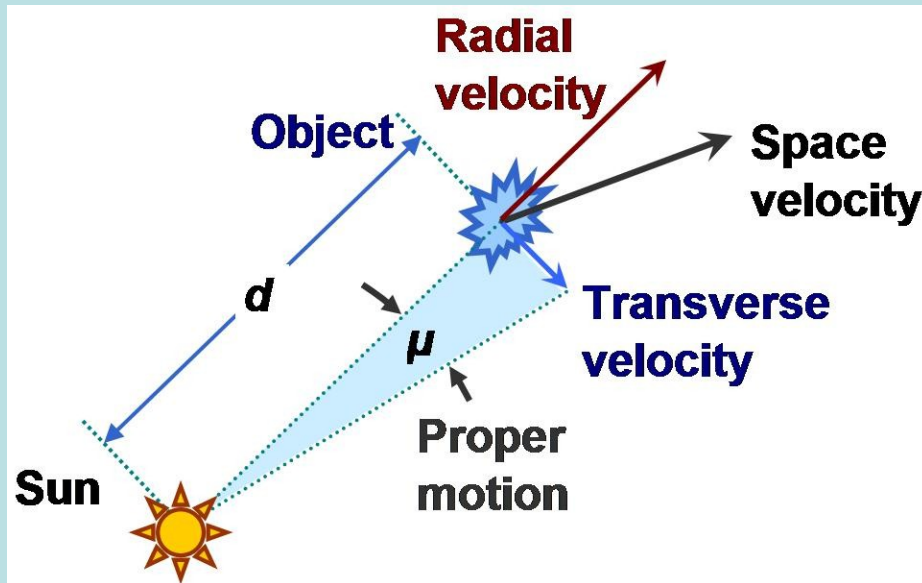
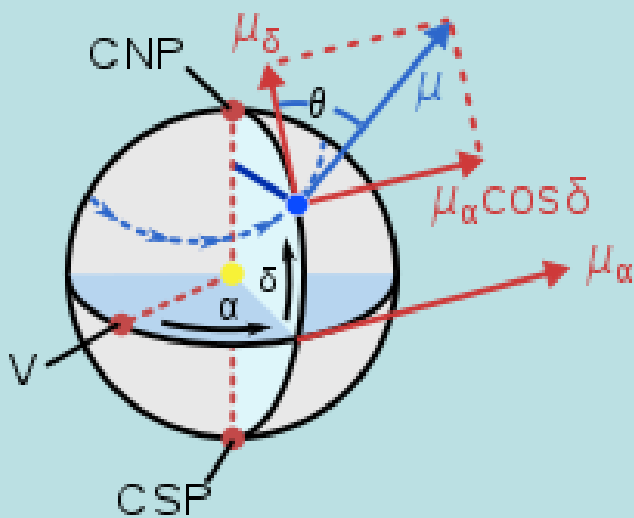
$$\alpha_T = \alpha_E + [\theta(\cos \varepsilon + \sin \varepsilon \cdot \sin \alpha_E \cdot \operatorname{tg} \delta_T)] T \quad \varepsilon = 23^\circ 27' 8'';$$

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

# Csillagászati koordináta-rendszerek

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

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



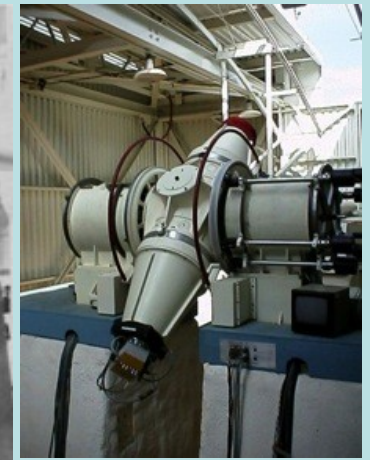
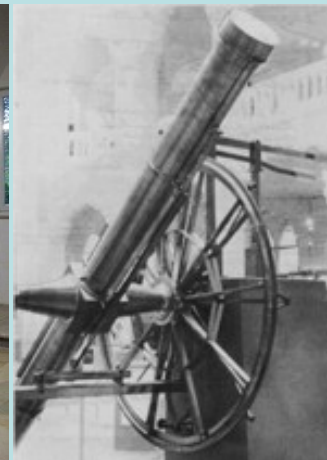
# Történeti visszapillantás

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 ( $1^\circ$ /évszázad); Flamsteed (17. sz.):  $1^\circ/72$  év ( $50''$ /év); mai érték:  $50,296066''$ /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

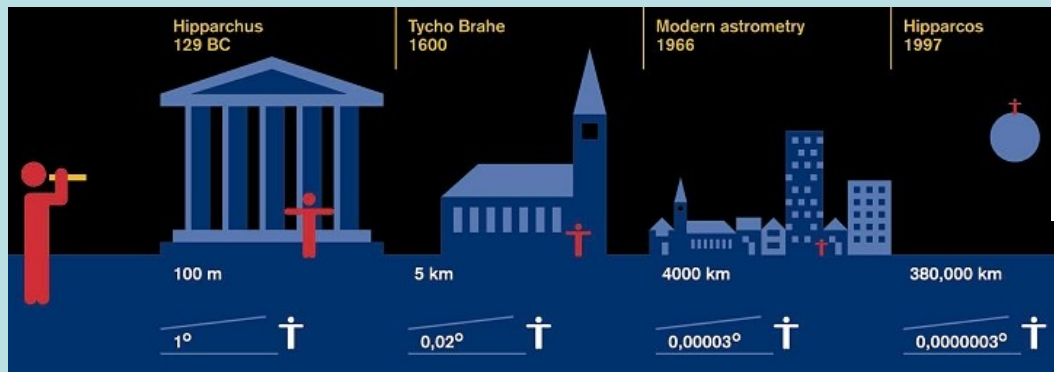
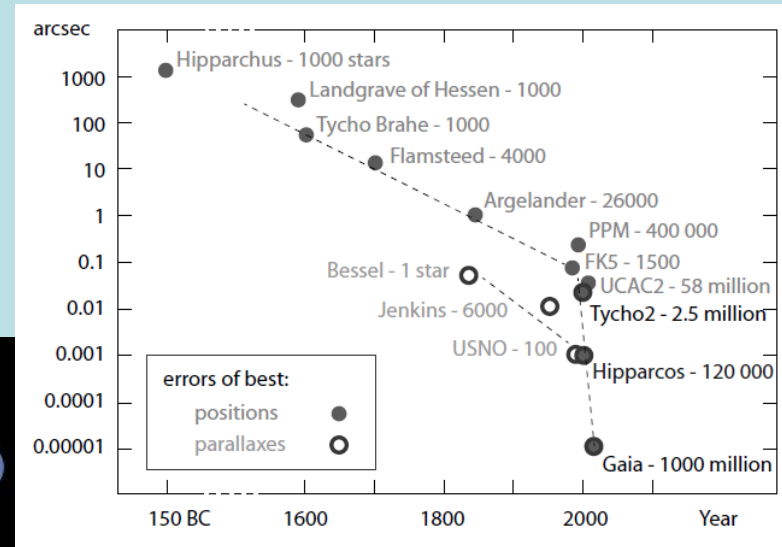
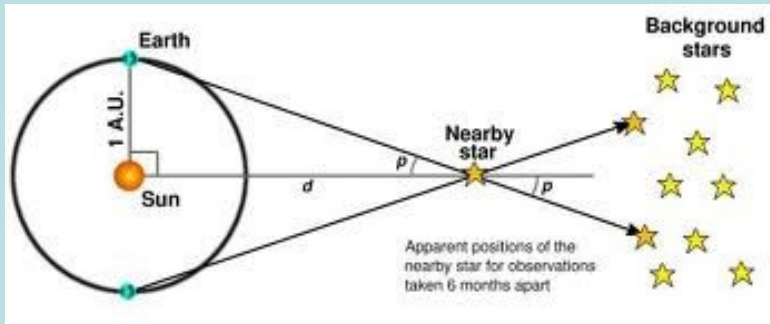
Kopernikuszi rendszer: a Föld mozog, *parallaxis*nak lennie kell. A fényes csillagok parallaxisát keresték (minden csillag egyformán sugároz?).

Tycho Brahe pontossága 1', Heveliusé 25", Flamsteedé 10".

1718 – Halley, sajátmozgás; 1728 – Bradley, aberráció; 1783 – Herschel, apex (sajátmozgások alapján). Parallaxiskeresés nagy sajátmozgású csillagokra.

1838–1840 – parallaxis: Bessel (heliométer, 61 Cyg [5,2"/év], 0,348"),

Henderson (osztott kör,  $\alpha$  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.

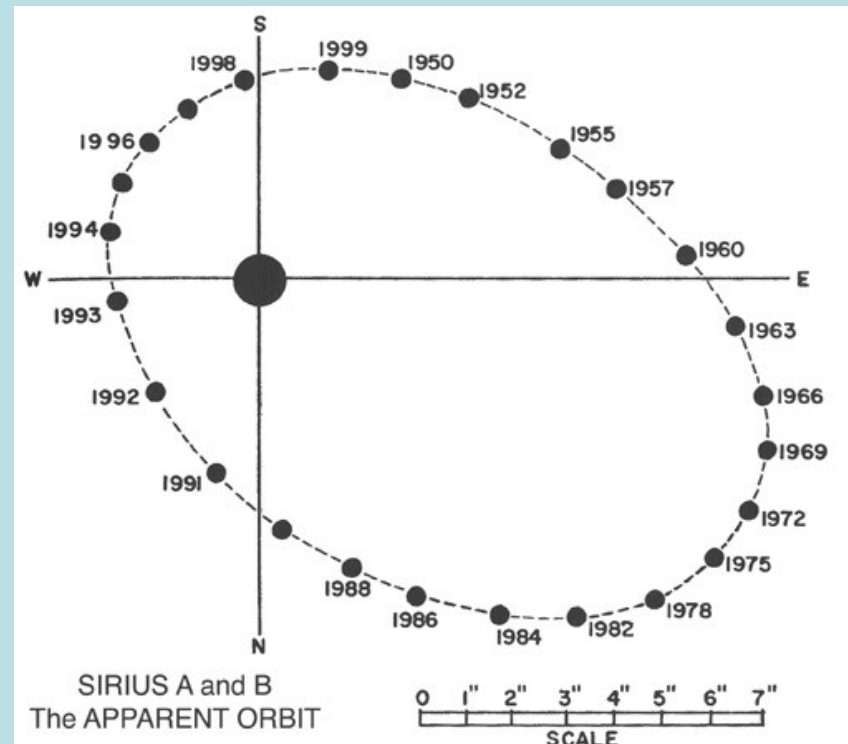
A 19. sz. közepén a fő obszervatóriumokban (Berlin, Bonn, Dorpat, Greenwich, Königsberg) asztrometriai munka folyt.

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 \*  
— II century BCE —



\* Ulugh Beg \*  
— 1437 —



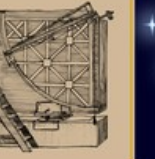
\* Tycho Brahe \*  
— 1598 (1627) —



\* 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) —

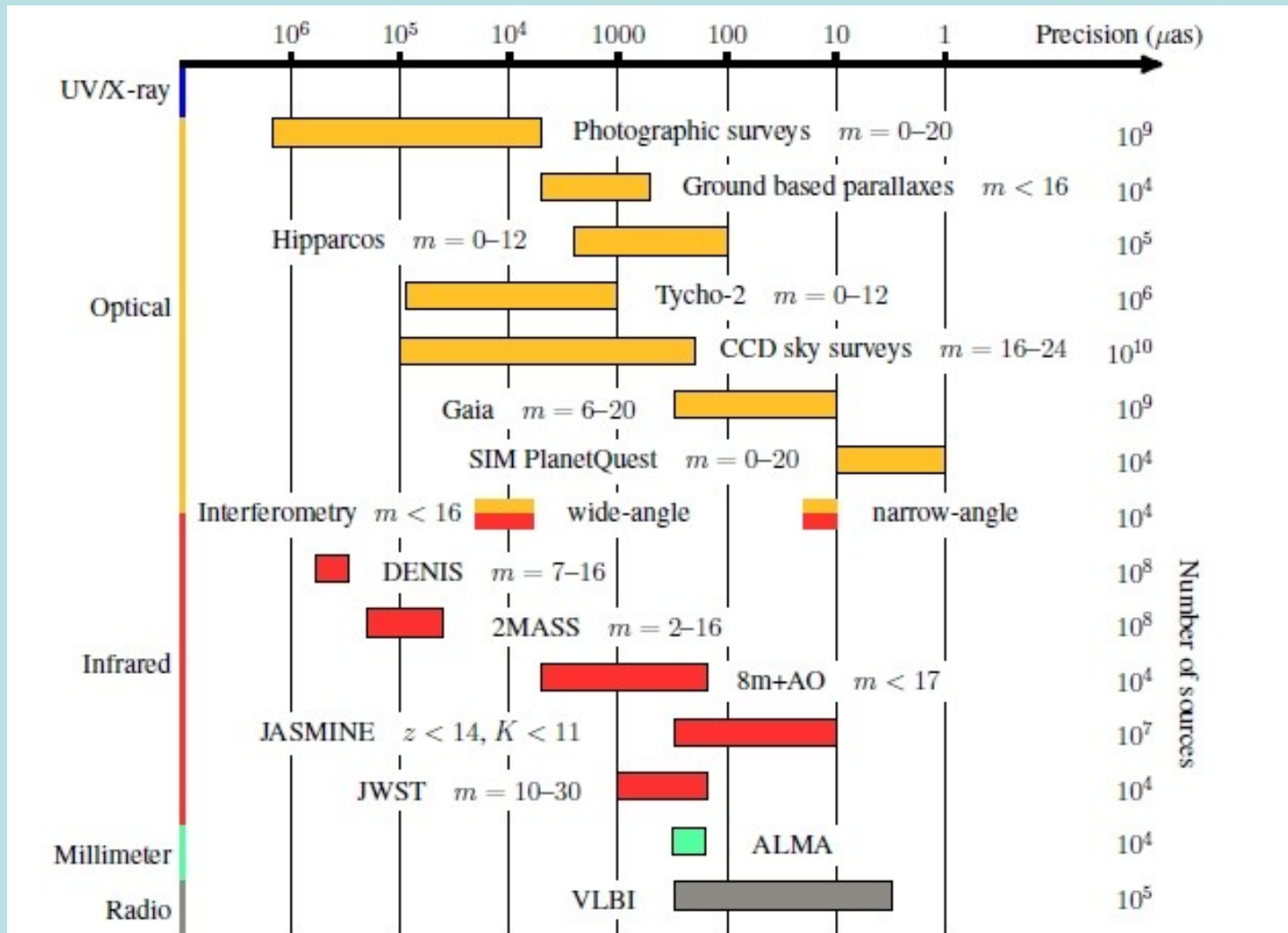


\* Gaia \*  
— launched 2013 —





# A pontosság „napjainkban”



**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>	$s_{\text{star}}$ 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. <i>year</i>	Obs. period <i>years</i>	N <i>entries</i>	s s.e. of star <i>mas</i>	W weight	Notes
Bessel	Heliumeter	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 asztrometriai 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)
NLTT	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)

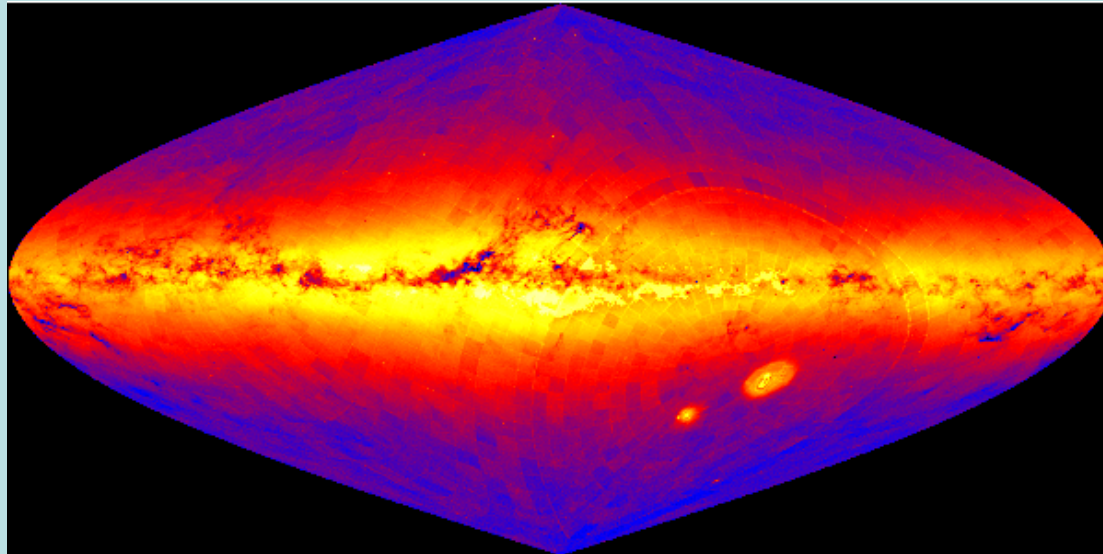
# A katalógusoktól az égfelmérésekig

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.



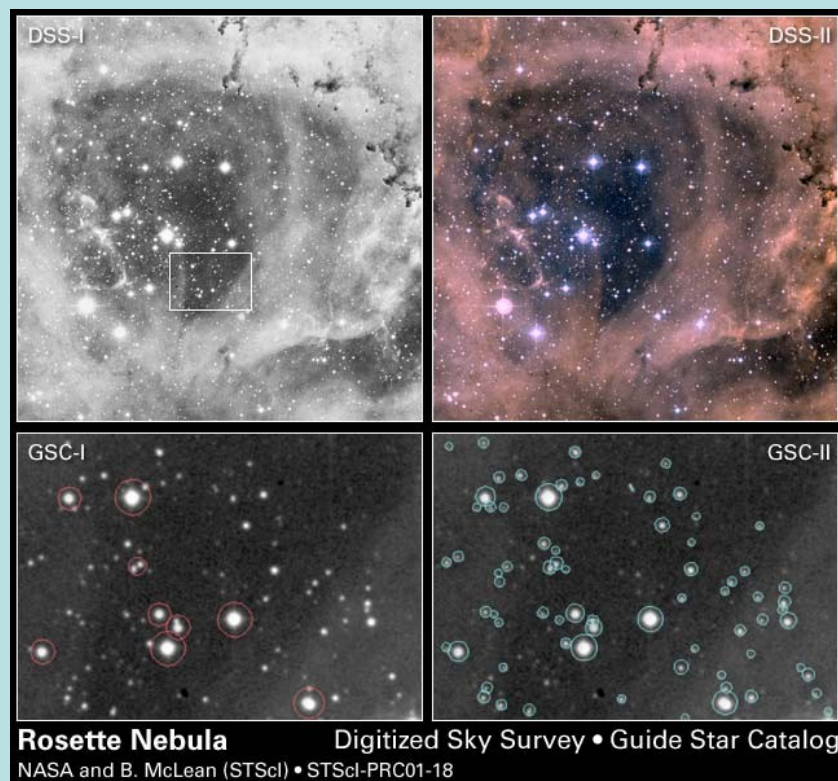
# Asztrometriai égfelmérések

**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 (asztrometriai VO).

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



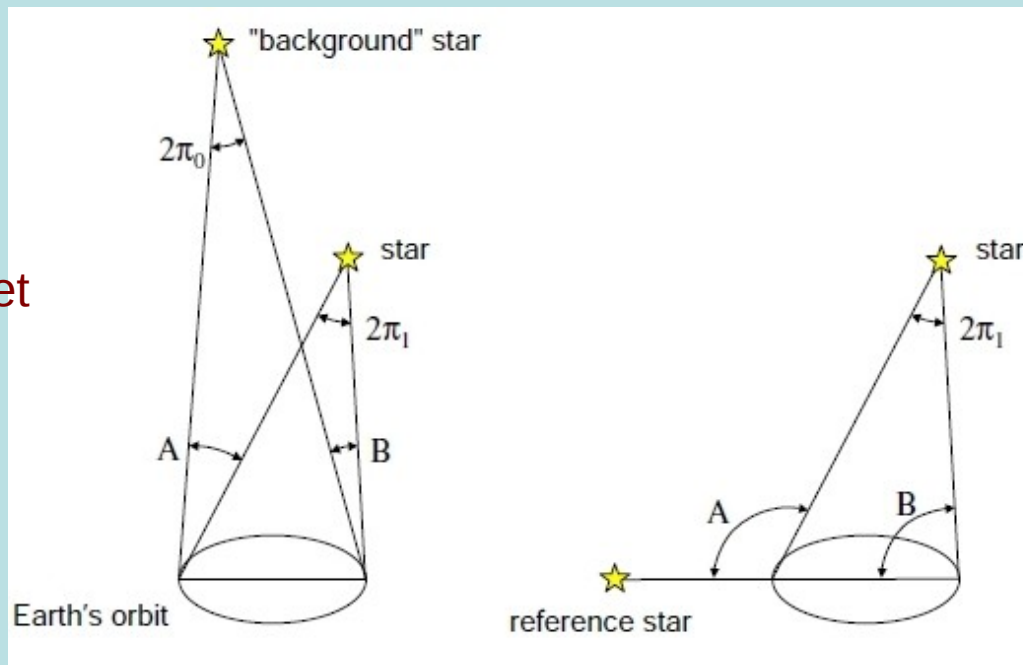


# A földi pozíciómérés korlátai

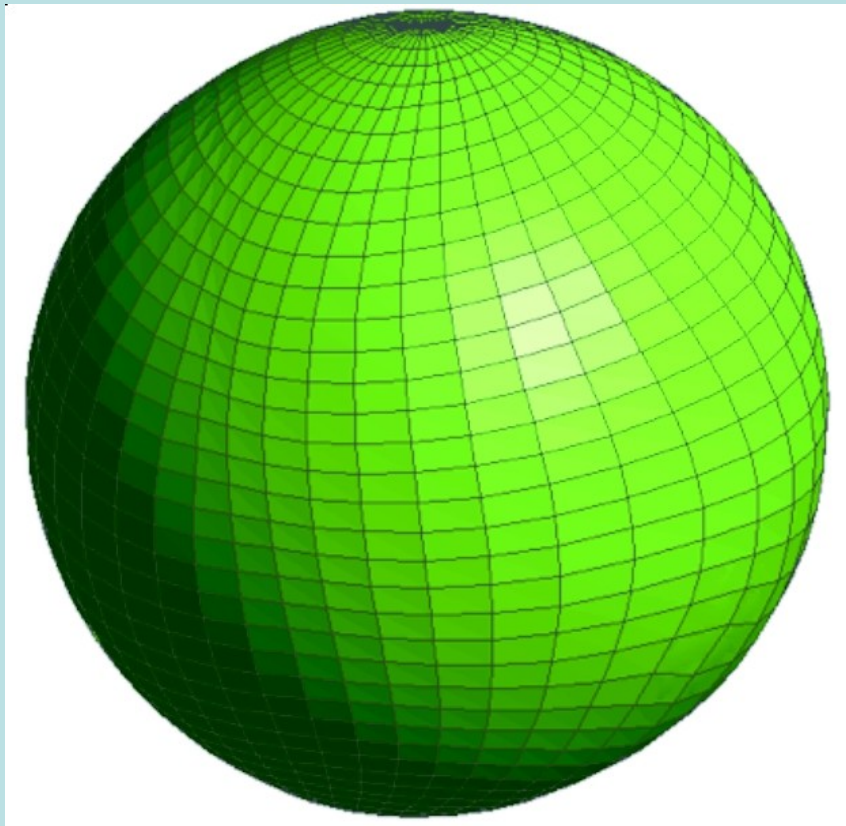
Mindig a szomszédos „háttércsillagokhoz” viszonyítják a pozíciót, de azoknak is van parallaxisuk, és azok átlagértéke bizonytalan. **Abszolút pozíció** kell, a sajátmozgás ismeretével. Az **abszolút parallaxis** meghatározásához egészen más irányban látszó referenciacsillagokat kell választani. A földfelszínen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

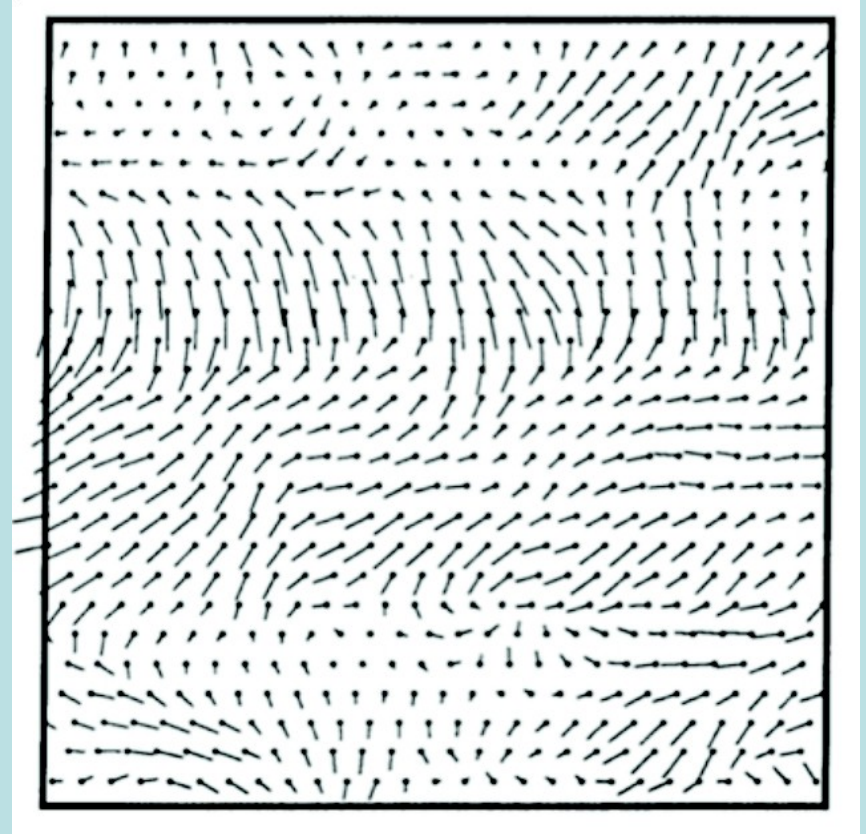
De: az FK5 koordinátáit a Hipparcos adataival összehasonlítva megengedhetetlen eltéréseket tapasztaltak (a déli félgömbön néhány tized ívmásodperceseket is). A  $0,001''$ - $0,01''$  pontosságú rádiótérképeket így nem lehet egybevetni a HST  $0,1''$  felbontású képeivel. A Hipparcos alapján új vonatkoztatási rendszert vezettek be: **ICRS**.



# Szisztematikus hibák következménye

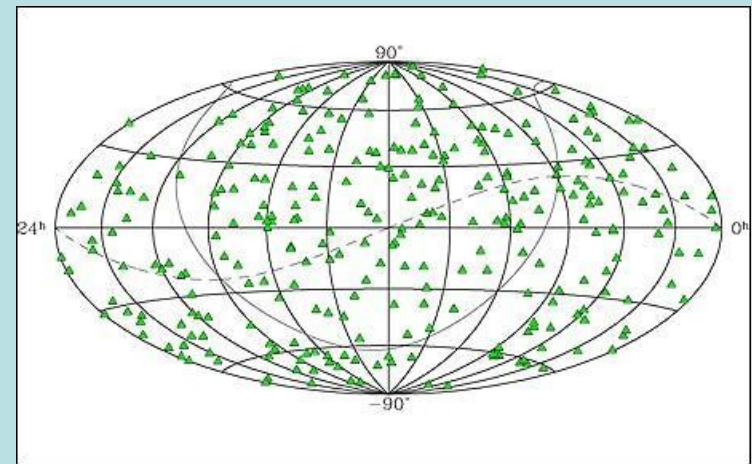
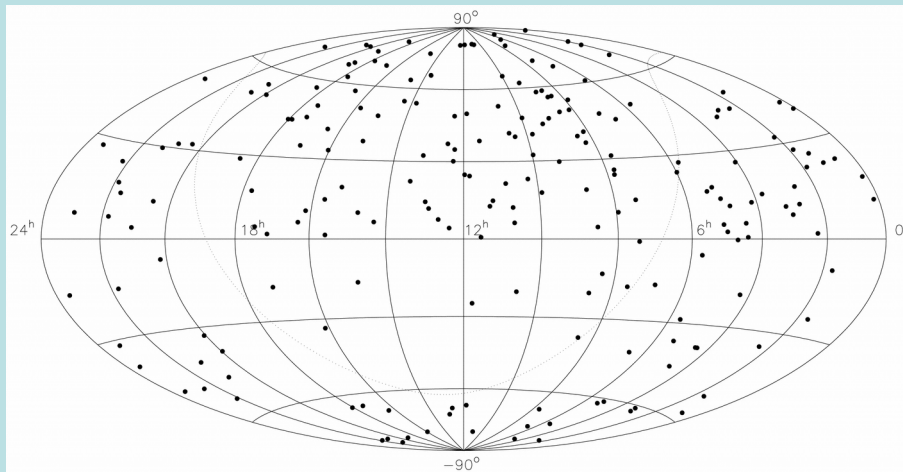
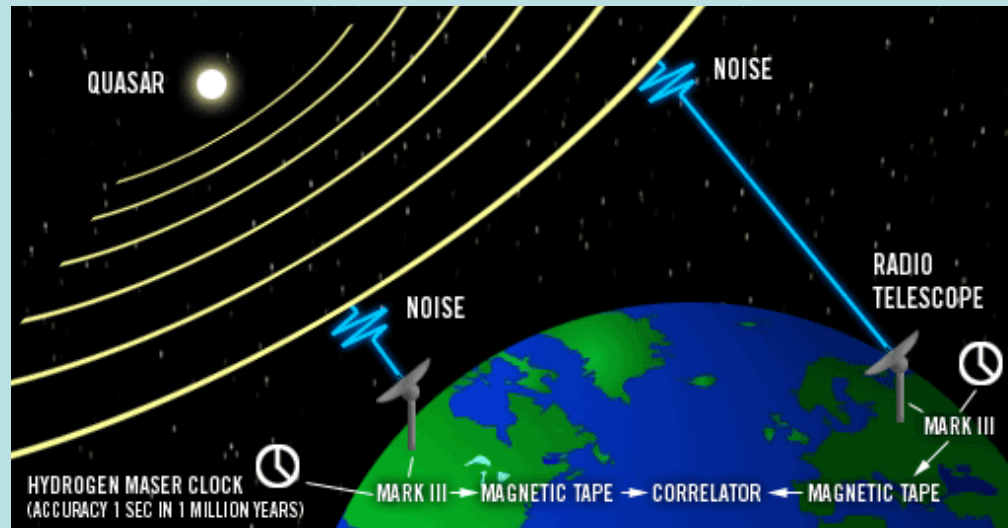


*Forrás: Lennart Lindegren*



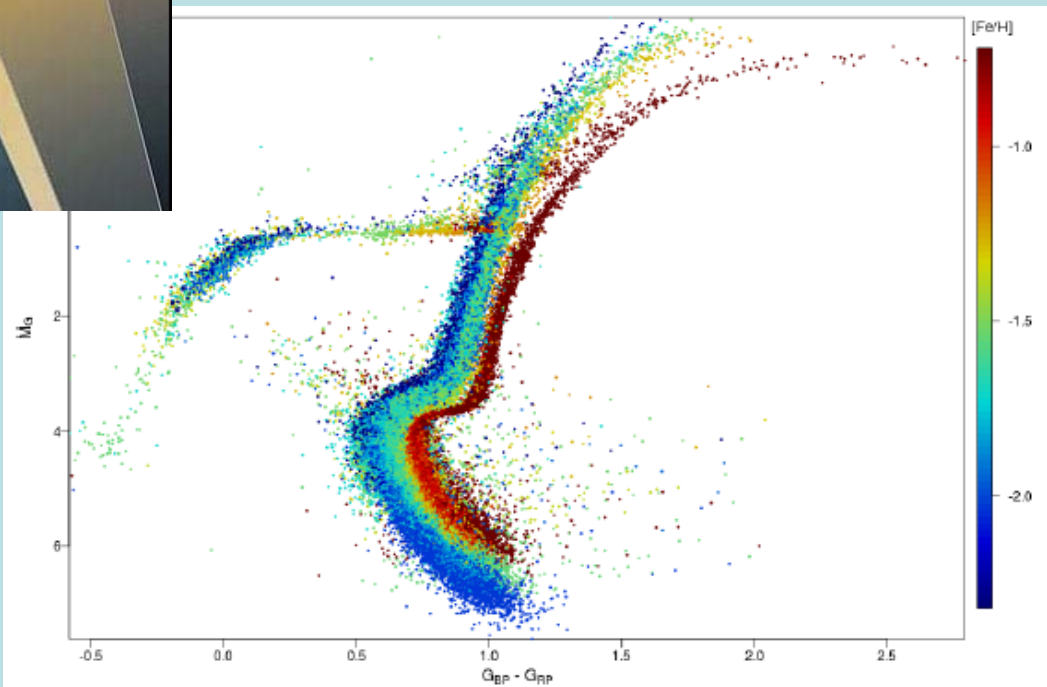
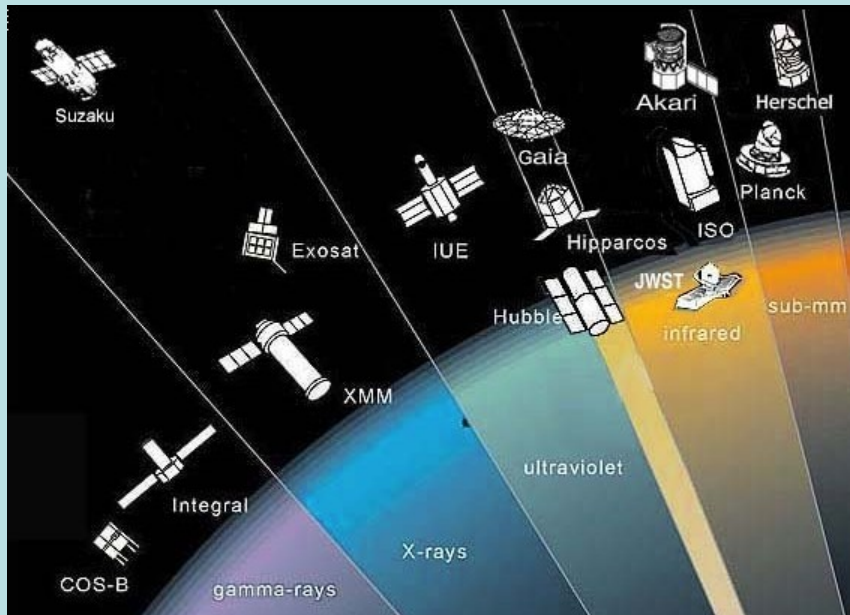
*PPM vs HIP*

# Rádiócsillagászati asztrometria



ICRF (1997): 212 kvazár pozíciója alapján - ICRF2 (2009): 295 kvazár (138 közös).  
És már van ICRF3 is (Gaia DR2, 2018).

# 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!

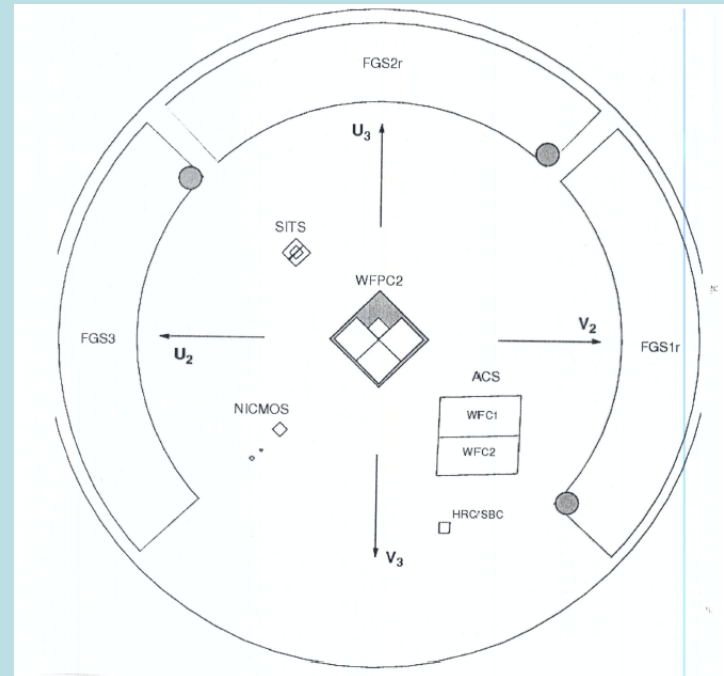
„Segédműszerei” közé tartozik a 3 helyzetérzékelő (FGS, Fine Guidance Sensor): fehér fényben, 0,1” pontosságú vezetést lehetővé tevő interferométer.

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 a zsúfolt mezőnél és a kis szeparációjú kettőscsillagoknál (ameddig a földi optikai interferometria nem válik rutinszerűvé).

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



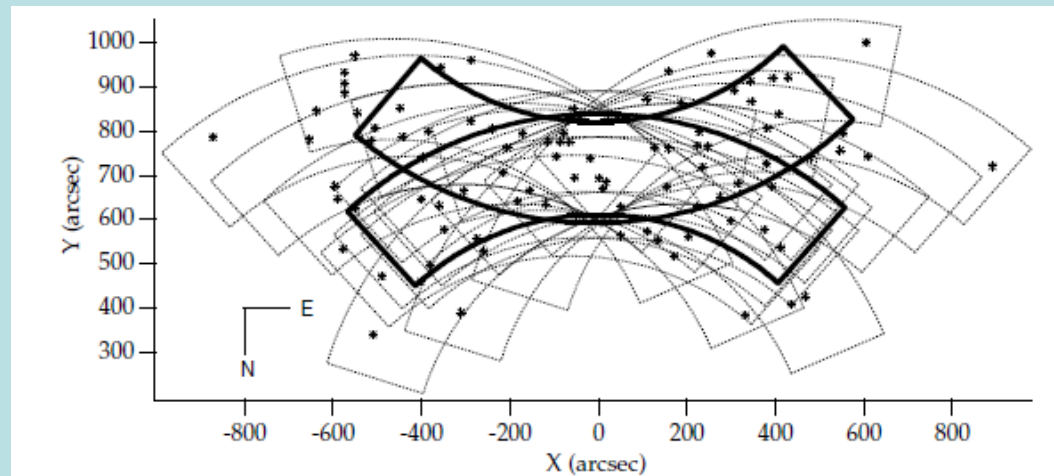
# Asztrometria a Hubble-űrtávcsővel

**Parallaxismérés:** fél év elteltével „fejjel lefelé” fordul 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:

- $\delta$  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 segíti. Sőt a Cassini több hold helyzetét mérte rendszeresen, amiből meghatározták az Atlas, Prometheus, Pandora, Janus, Epimetheus sűrűségét és librációját.

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 pedig 302 km/s).

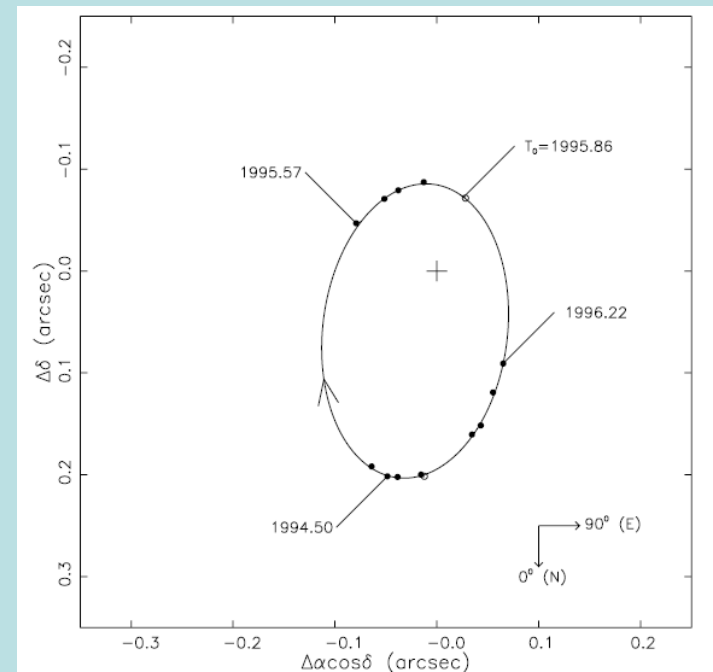
A Magellán-felhők nem kötődnek a Tejútrendszerhez.

A Tejútrendszer centrumának környéke:

180000 csillag sajátmozgása

0,3"/év pontossággal (ACS WFC).

A centrális részek kinematikája.



# A Hipparcos szükségessége

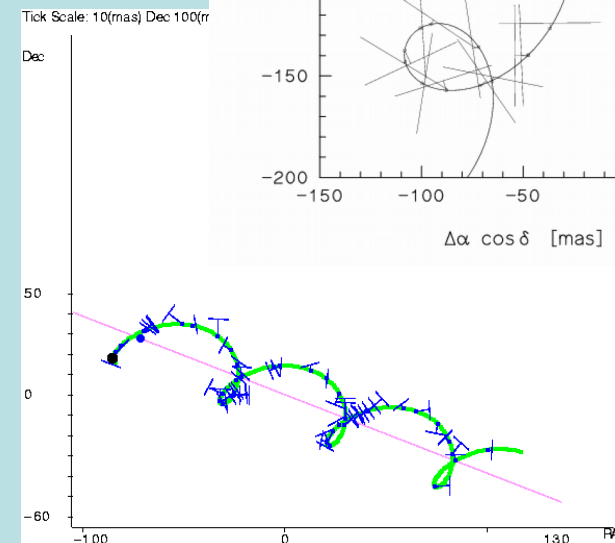
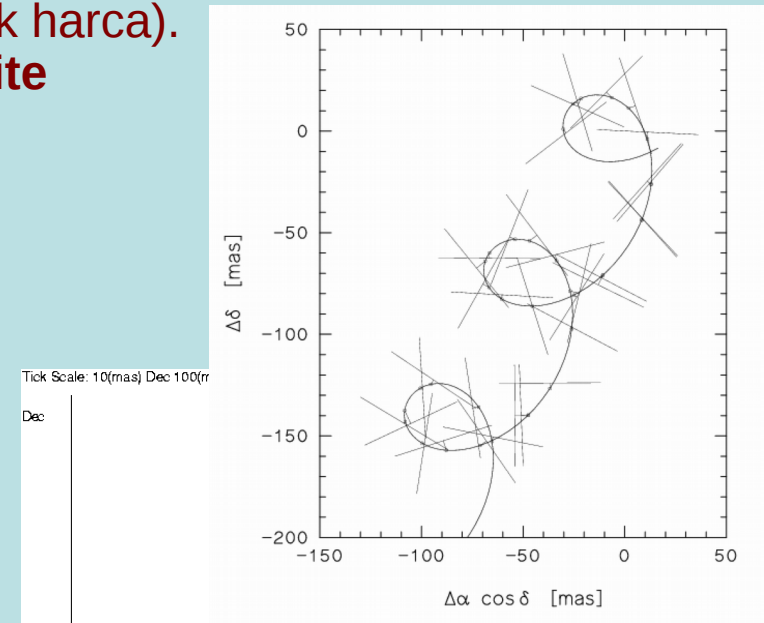
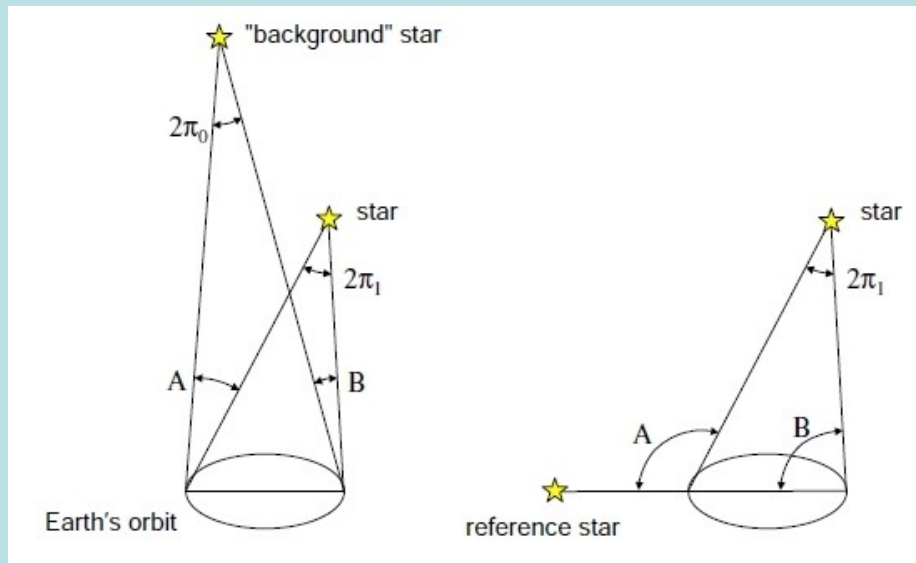
P. Lacroute (1960-as évek): abszolút mérések a relatívak helyett; egy detektorba egyesíteni az ég két területének képét, különböző évszakokban megismételt mérésekkel. A két mező parallaktikus elmozdulásai így nem korrelálnak, és nem lép fel a 0-pont kérdése. A felszínről ilyen mérés nem végezhető, mert a refrakció miatt nem állandó a két terület közötti szög.

Az űrprojektet 1980-ban hagyták jóvá (lobbik harca).

**High Precision Parallax Collecting Satellite**

Hipparcos ↔ Hipparkhosz.

Legalább 2,5 éves mérési időszak kell a sajátmozgás és a parallaktikus elmozdulás szeparálásához.



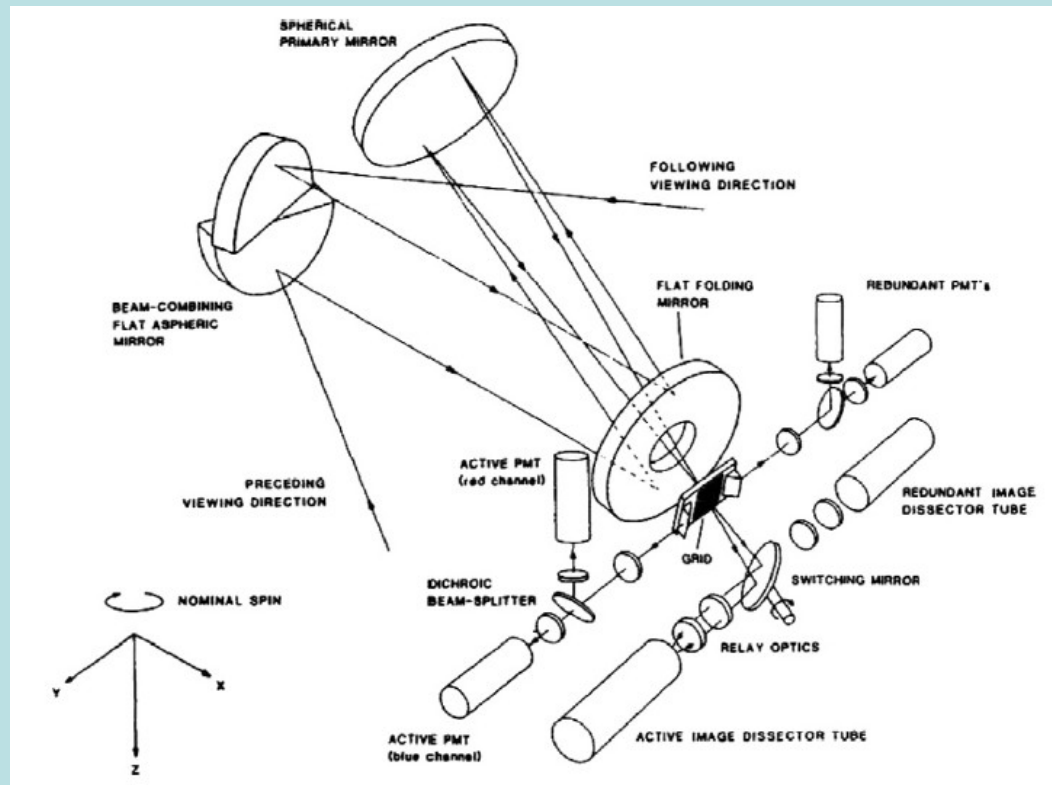


# Hipparcos

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, fedélzetén 29 cm átmérőjű űrtávcsővel. A Hipparcos az első asztrometriai űrszonda volt. Helytelen a Hipparchos írásmód.

Detektor: fotoelektromos mérés résrendszerrel; 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 (Fr. Guiana; 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 napelemek 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.

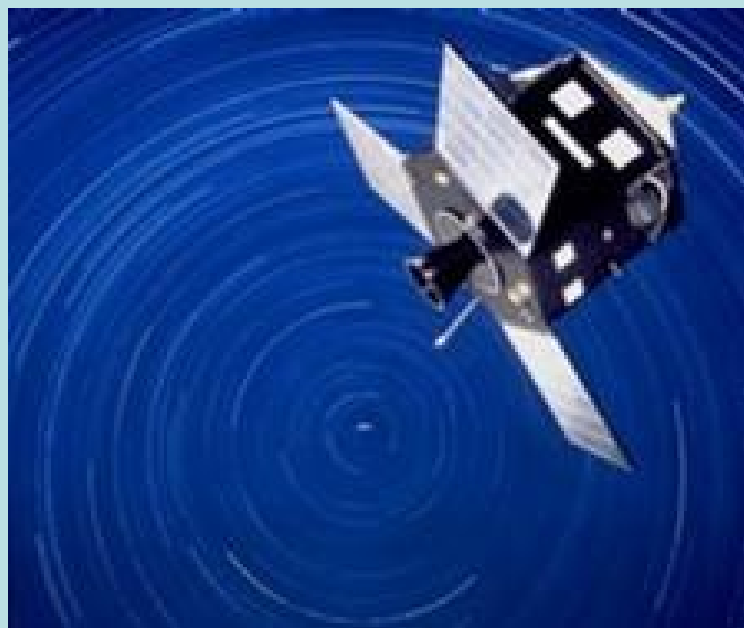
Ezek ellenére 3,5 éves sikeres működés.

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

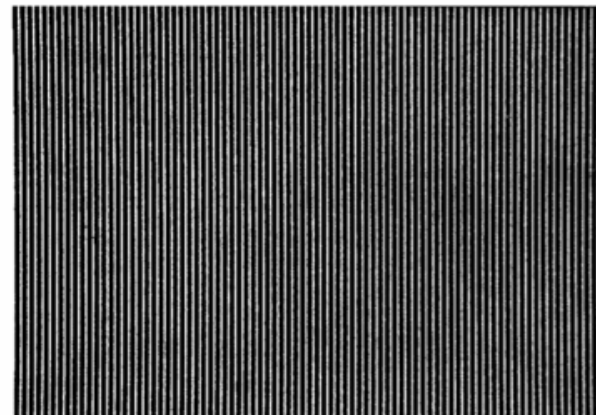
A Hipparcos műszere: 29 cm átmérőjű Schmidt-távcső (Zerodur),  $f = 140$  cm; látómező:  $0,9^\circ$ , a fókuszban a képskála  $6,8 \mu\text{m}/''$ .

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 addigra már a Gaia adatai mindezt túlszárnyalják.



# Hipparcos – a mérés elve

Hipparcos Input Catalog (HIC): kb. 118000 (12<sup>m</sup>-nál fényesebb) csillag, eleve 1,5"-es pontosságú koordinátákkal és elég pontos fotometriával (7,3 és 9 magnitúdó között teljes a minta. Ehhez az 52000 csillaghoz tudományos projektek által javasolt csillagokból még 66000 csillagot választottak).

1981-ben hirdették meg a pályázatot, 200 pályázat érkezett, nemcsak ESA-tagországokból ( $\leftrightarrow$ ISO). 214000 javasolt objektumból szelektáltak az égbolt egyenletes lefedésére is törekedve.

A mérés elve az ábrán látható.

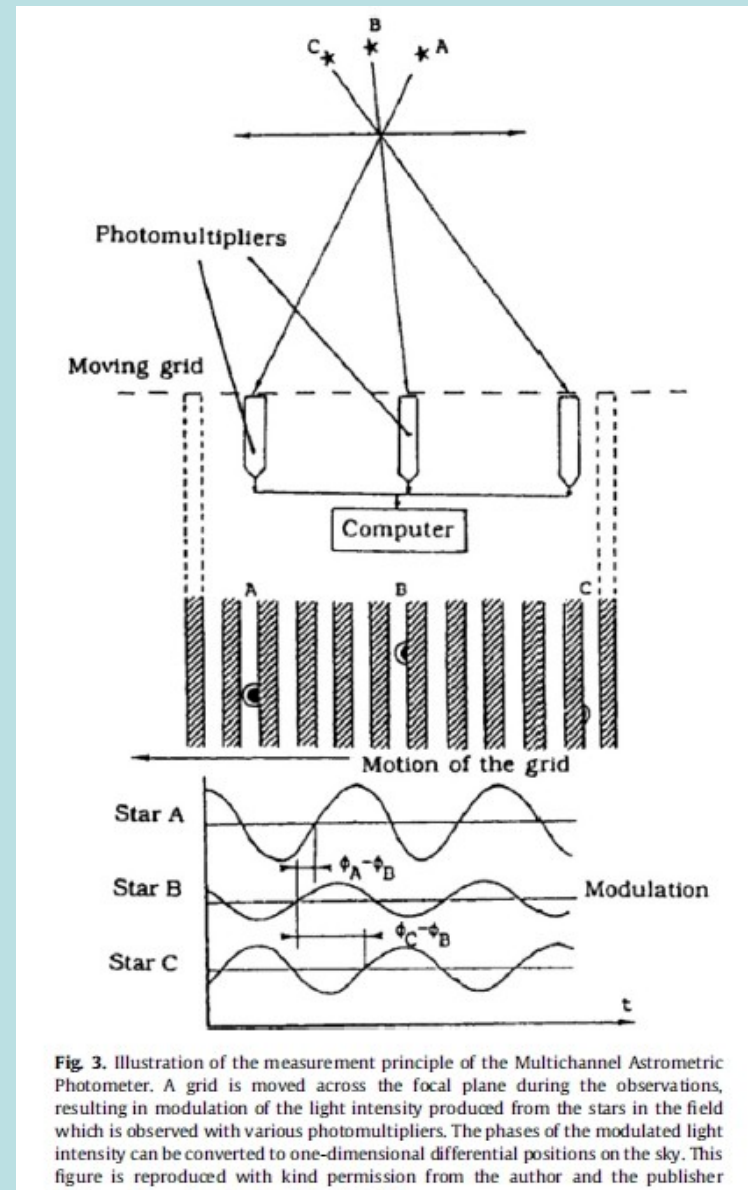
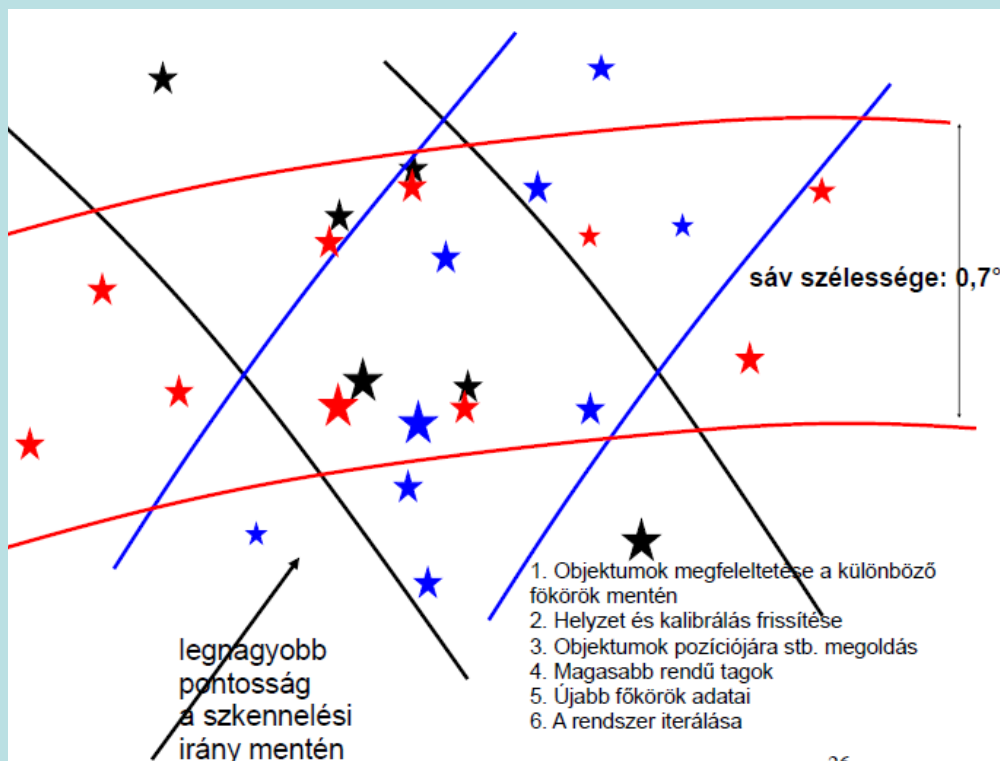


Fig. 3. Illustration of the measurement principle of the Multichannel Astrometric Photometer. A grid is moved across the focal plane during the observations, resulting in modulation of the light intensity produced from the stars in the field which is observed with various photomultipliers. The phases 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

# Az adatfeldolgozás elve



$s_i$   $i$ -edik csillag asztrometriai paraméterei

$a_j$  helyzetparaméterek  $j$  időpontra

$c_k$  kalibrációs paraméterek

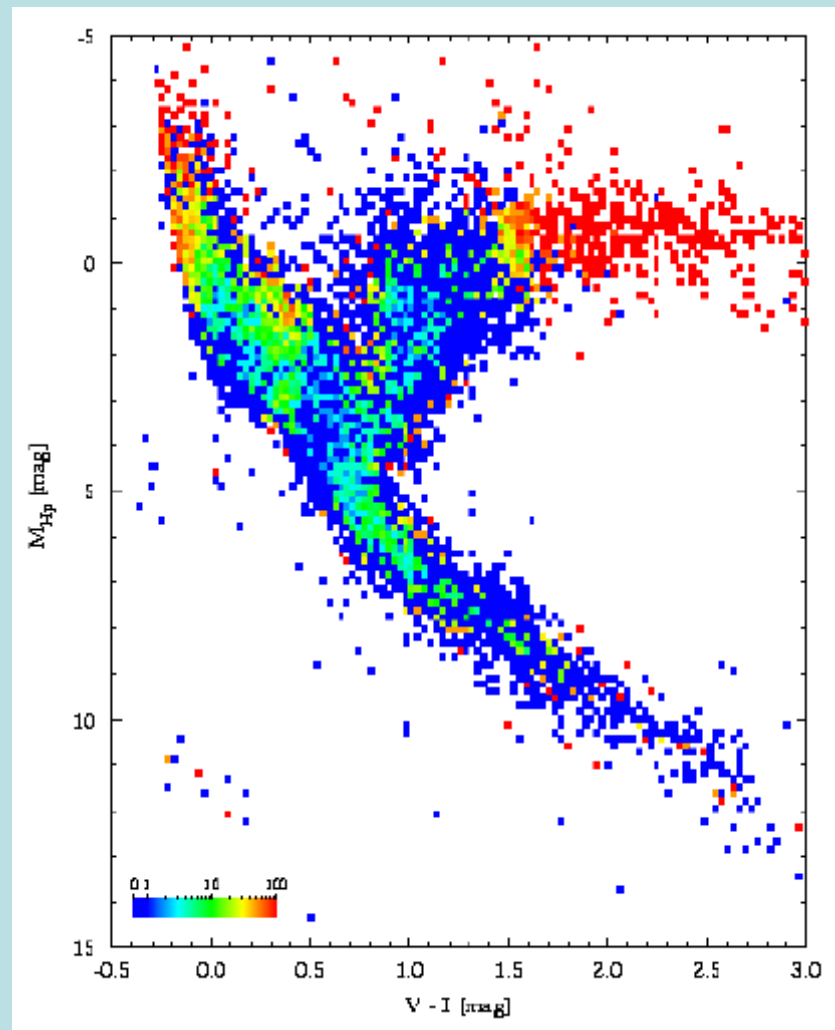
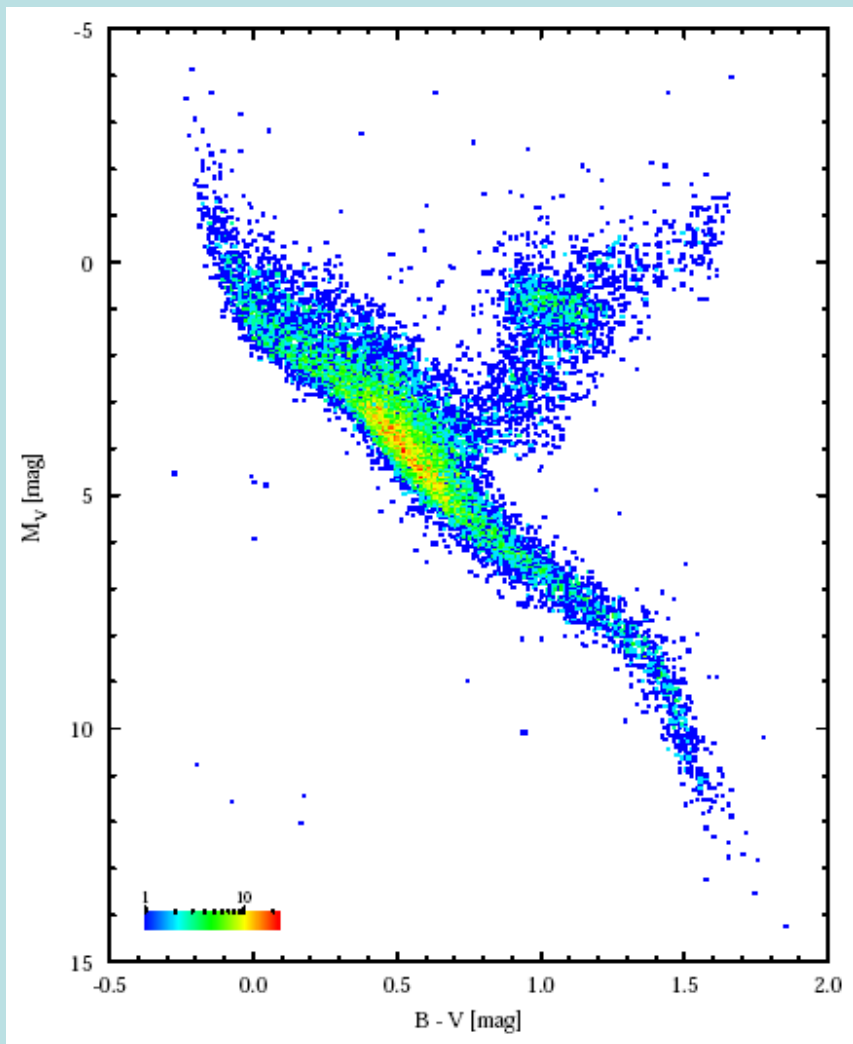
$g$  globális paraméterek

Adattovábbítás: 23 kbit/s (Darmstadt – ESOC) fő detektor adatai,  $B_T$ ,  $V_T$ ; másodlagos adatok: giroszkópok, hőmérséklet, helyzet, gyorsítófűvókák

Adatfeldolgozás: főkére 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 kellett.

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

# A Hipparcos eredményeiből



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

## Summary of the Hipparcos Scientific Mission

Measurement period	1989.85–1993.21
Catalogue epoch	J1991.25
Reference system	ICRS
Coincidence with respect to ICRS (all 3 axes)	$\pm 0.6$ mas
Proper motion deviation from inertial (all 3 axes)	$\pm 0.25$ 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	$\sim 3$ 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	$\sim 1.0$ – $1.2$
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	$\sim 25$ 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

1997

Tycho-2 Katalógus  
(2000): asztrometria és  
kétszín-fotometria  
2539913 csillagra,  
11 magnitúdóig  
99%-ban teljes,  
sajátmozgásban  
2,5 mas pontosság  
fotometriai pontosság:  
0,01-0,1 magnitúdó  
között



# A Hipparcos eredményeiből

**Hipparcos Katalógus (1997):** 5 asztrometriai paraméter a 118000 csillagra;

**Kettős és többszörös csillagok:**  $\Delta m < 3$ , szeparáció  $> 0,1$  ívmásodperc (23882 rendszer pályameghatározással);

**Változócsillagok** száma: 11597, ebből 8237 új, köztük 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 119 más csillag 25 pc-en belül van.

A 25 pc-en belül levő csillagok mellett 37 új kísérőt találtak, közte barna törpét is.

**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,  $\delta$  Sct).

A kettőscsillagok fizikai paraméterei a vizuális pálya alapján is meghatározhatók (pl. a közeli barna törpék tömege).

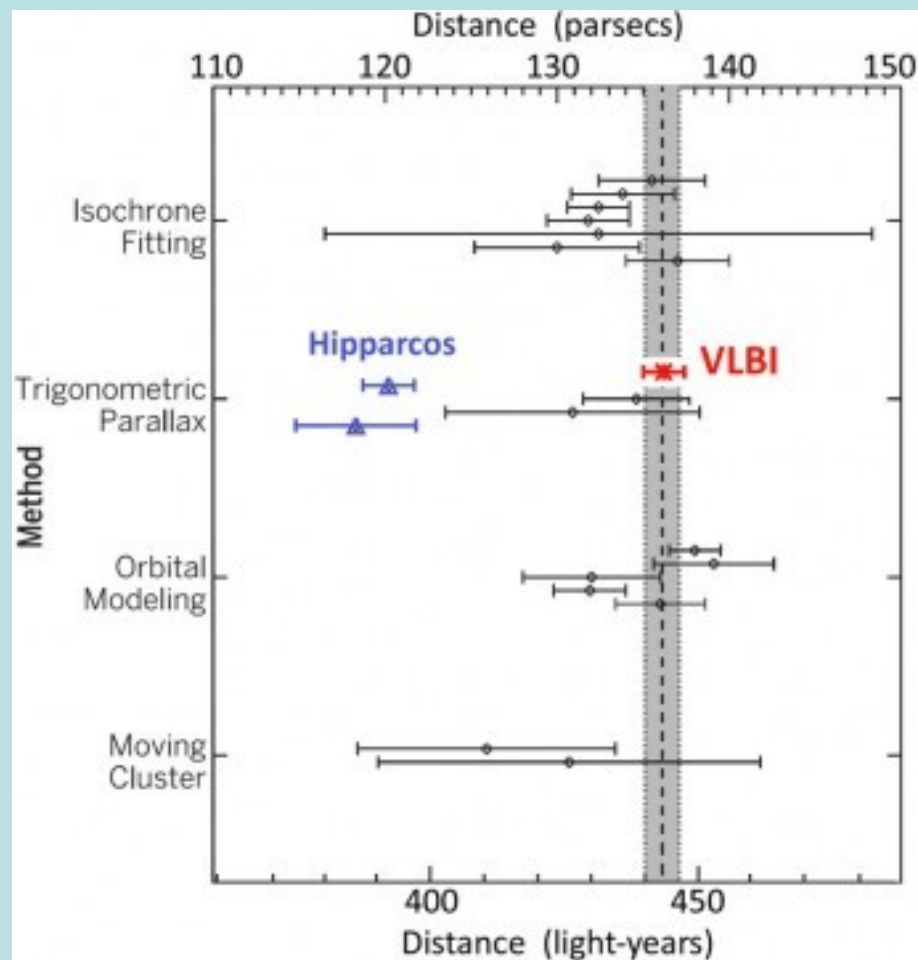
# A Hipparcos eredményeiből

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).

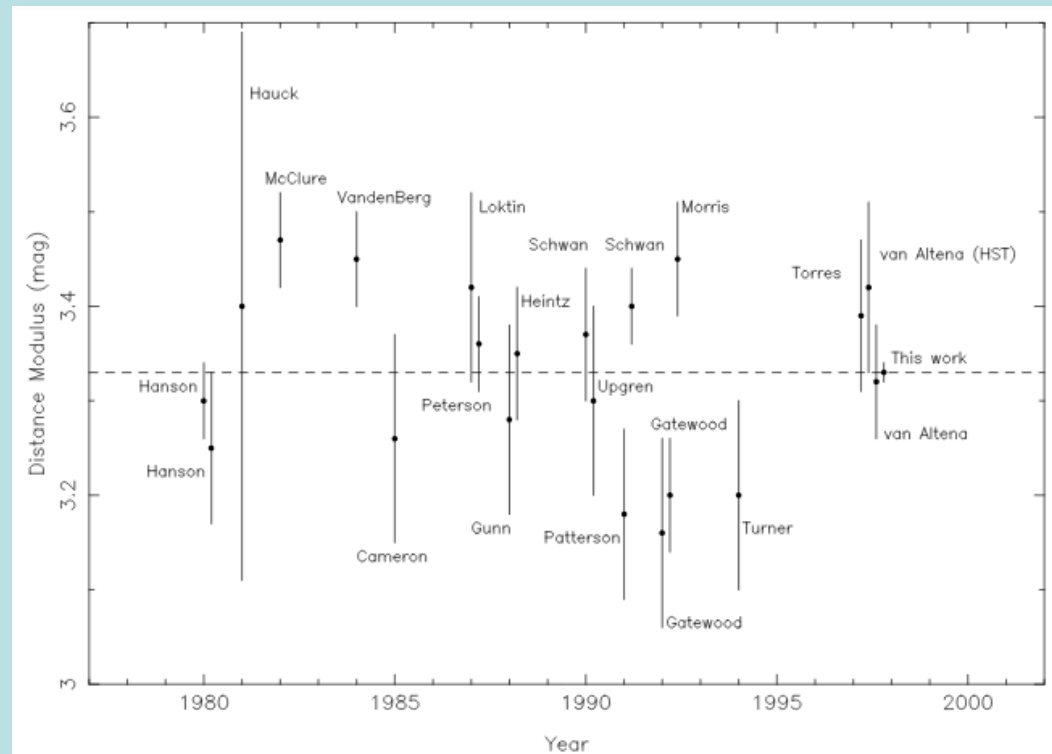
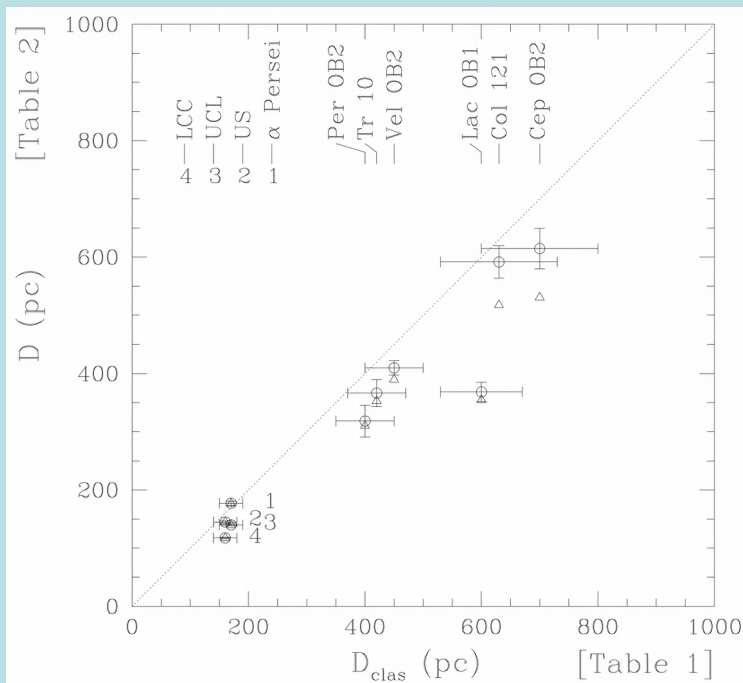
**2007-ben** újraredukálták a teljes adattömeget. Ezt figyelembe véve: a zaj ötödére csökkent, ám az eredeti Hipparcos Katalógus megbízható maradt.



# A Hipparcos eredményeiből

A Hyadok 3-dimenziós szerkezete (218 tag, közte 39 újonnan talált). A halmaz közepének távolsága  $151 \pm 1$  fényév, 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!

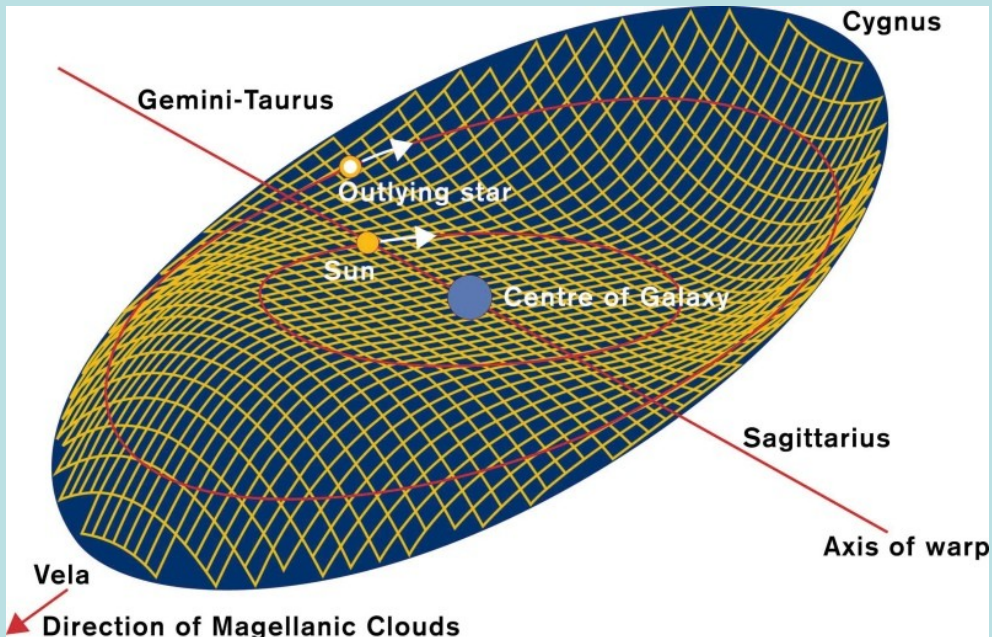


# A Hipparcos eredményeiből

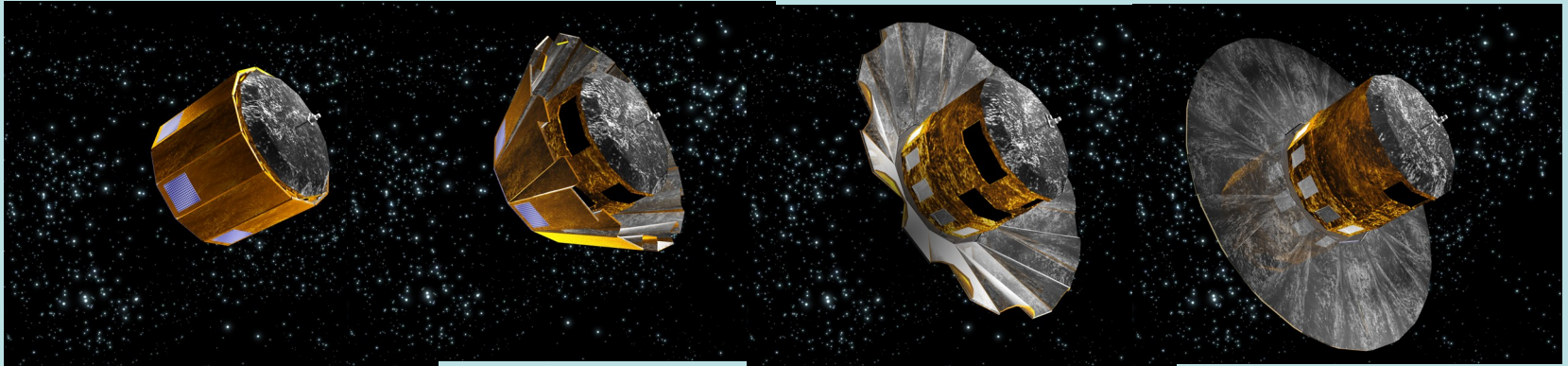
A Tejútrendszer korongja nem sík, és a küllős spirális jelleg is látszik az adatokból.

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 példaként mutatott galaxis torzultabb a Tejútrendszerénél.)

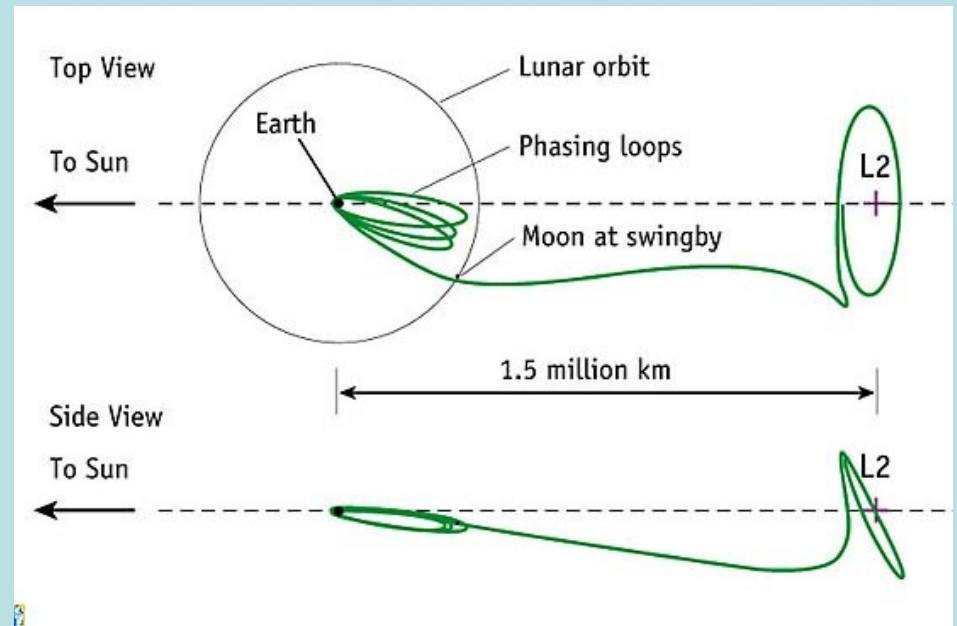


# A Gaia asztrometriai űrszonda - 2013-



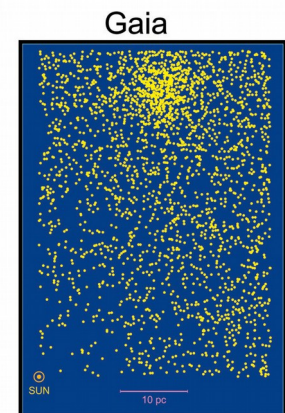
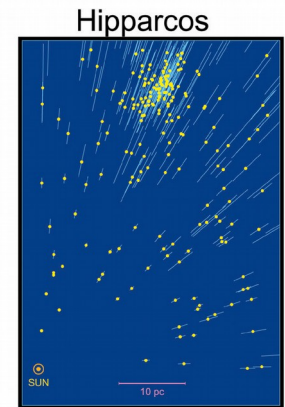
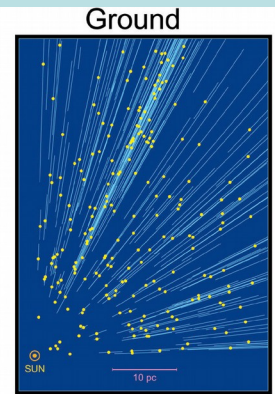
2000-ben hagyta jóvá az ESA. Eredetileg GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), de a megvalósított szondában a mérést nem interferometrikus módszerrel végzik. Ezért a végleges neve **Gaia**.

Indítás: 2013. december 19. Kourou (az ESA indítóállomása)  
Egy hónap alatt jutott az L2 pont körüli Lissajous-pályára.



# A Hipparcos és a Gaia összehasonlítása

	Hipparcos	Gaia	
Magnitúdóhatár	12	20 magnitúdó	20,7
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	
Fotometria	2-színfotometria (B és V)	alacsony diszp. spektrum V = 20 m-ig	
Radiális sebesség	nincs	15 km/s V=16-17 m-ig	
Megfigyelési program	előre kiválasztva	teljes es torzítatlan	



2014 nyarán egy hónapig a déli ekliptikai pólus (SEP) környékét mérte. A fő mérési program kezdete: 2014. szept. A működés kezdetén a Gaiára vonatkozó adatok kissé módosultak:  $G = 20 \rightarrow 20,7$  magnitúdó (1 milliárd helyett 1,6 milliárd objektum); RVS 16,2 magnitúdóig

# GAIA

10 kpc

1000 million objects measured to  $1 = 20$

20 kpc

>20 globular clusters  
Many thousands of Cepheids and RR Lyrae

Horizon for proper motions accurate to 1 km/s

Dark matter in disc measured from distances/motions of K giants

Mass of galaxy from rotation curve at 15 kpc

Sun

30 open clusters within 500 pc

Horizon for detection of Jupiter mass planets (200 pc)

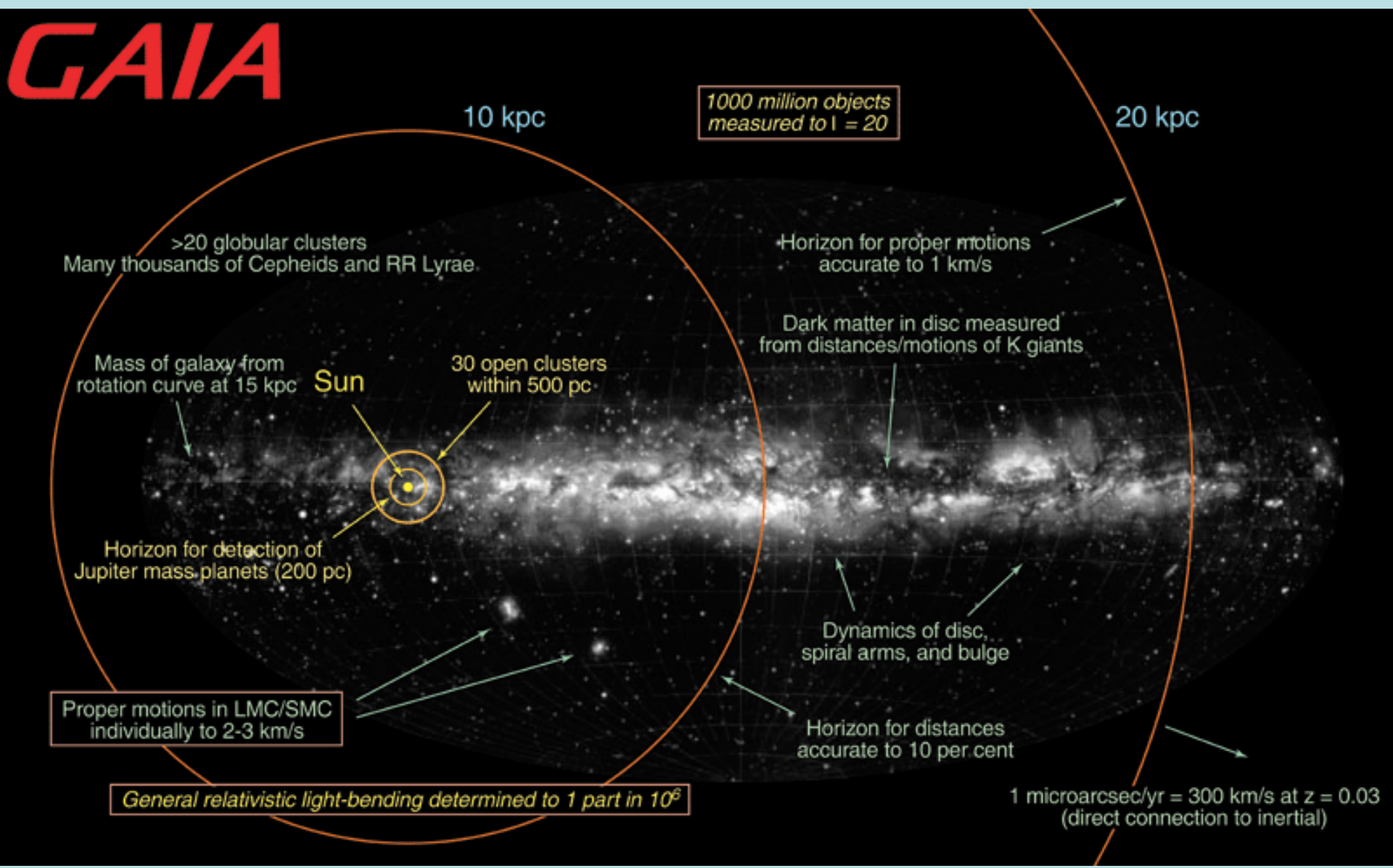
Dynamics of disc, spiral arms, and bulge

Proper motions in LMC/SMC individually to 2-3 km/s

Horizon for distances accurate to 10 per cent

General relativistic light-bending determined to 1 part in  $10^6$

1 microarcsec/yr = 300 km/s at  $z = 0.03$   
(direct connection to inertial)



# Szemponatok a Gaia tervezésekor

## teljes látómező:

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

## csillagterképező:

- mindent detektál 20<sup>m</sup>-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 <sub>c</sub> [mag]	-0.22	0.75	3.85
Bright stars	5-14 $\mu\text{s}$ (3 mag < V < 12 mag)	5-14 $\mu\text{s}$ (3 mag < V < 12 mag)	5-14 $\mu\text{s}$ (5 mag < V < 14 mag)
V = 15 mag	26 $\mu\text{s}$	24 $\mu\text{s}$	9 $\mu\text{s}$
V = 20 mag	600 $\mu\text{s}$	540 $\mu\text{s}$	130 $\mu\text{s}$

Astrometric Performance

Complete sky survey 0 < G < 20

G [mag]	B1V			G2V			M6V		
	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 <sup>-1</sup> ]
B1V	7.5	1
	11.3	15
G2V	12.3	1
	15.2	15
K1III-MP (metal-poor)	12.8	1
	15.7	15

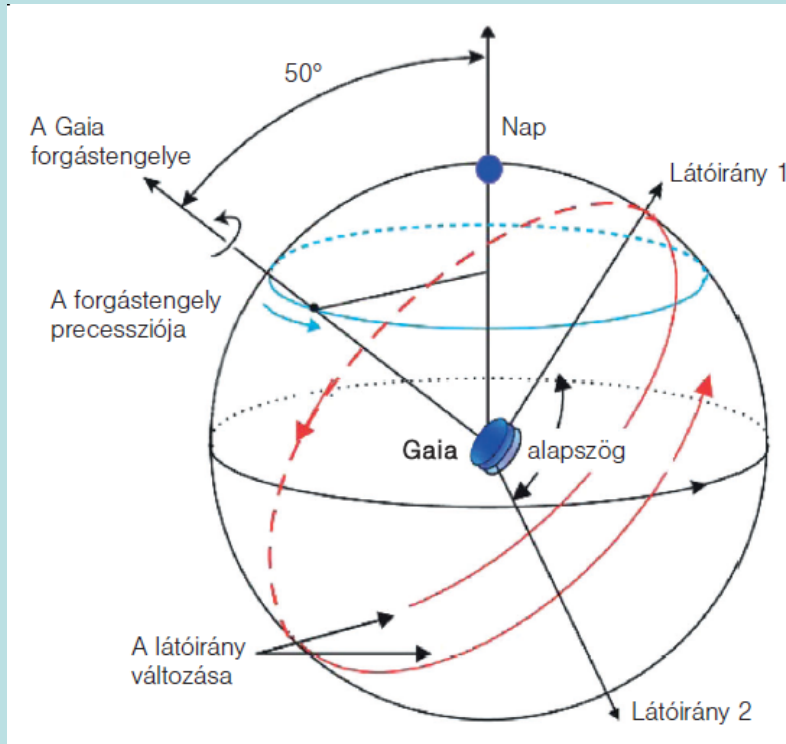
Spectroscopic Performance: 60 million RVs

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

- Asztrometria (V < 20):
  - 20 magnitúdóig teljes (fedélzeti detektálás)  $\Rightarrow$  10<sup>9</sup> csillag
  - pontosság: 10–25 milliiodomod 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  $\Rightarrow \Delta T_{\text{eff}} \sim 200$  K, log g, [Fe/H] 0,2 dex, extinkció
- Radiális sebesség (V < 16–17):
  - 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 asztrometriai űrszonda



főtükrök mérete: 1,45x0,5 m

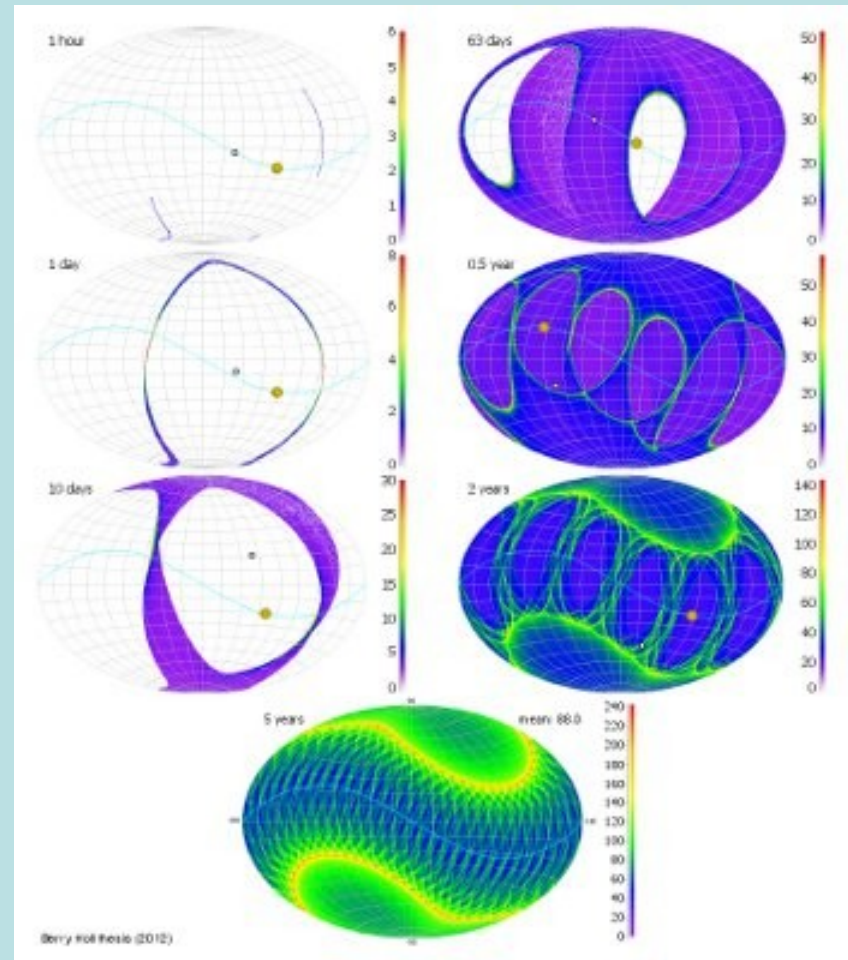
alapszög: 106,5 fok

60"/s forgási sebesség

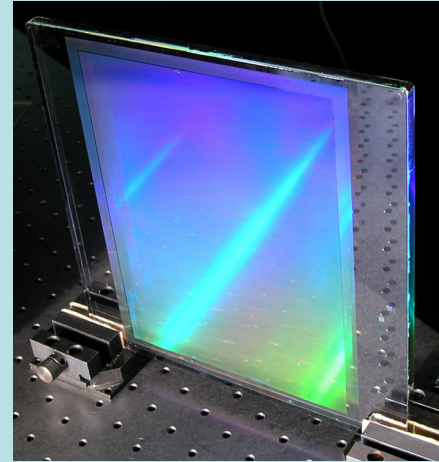
2x0,45 négyzetfok látómező

Eredetileg 5 év mérés, már meghosszabbítva 2020 végéig, és tovább is lehet.

50 Gb/nap adat (össz: 1 Pb)

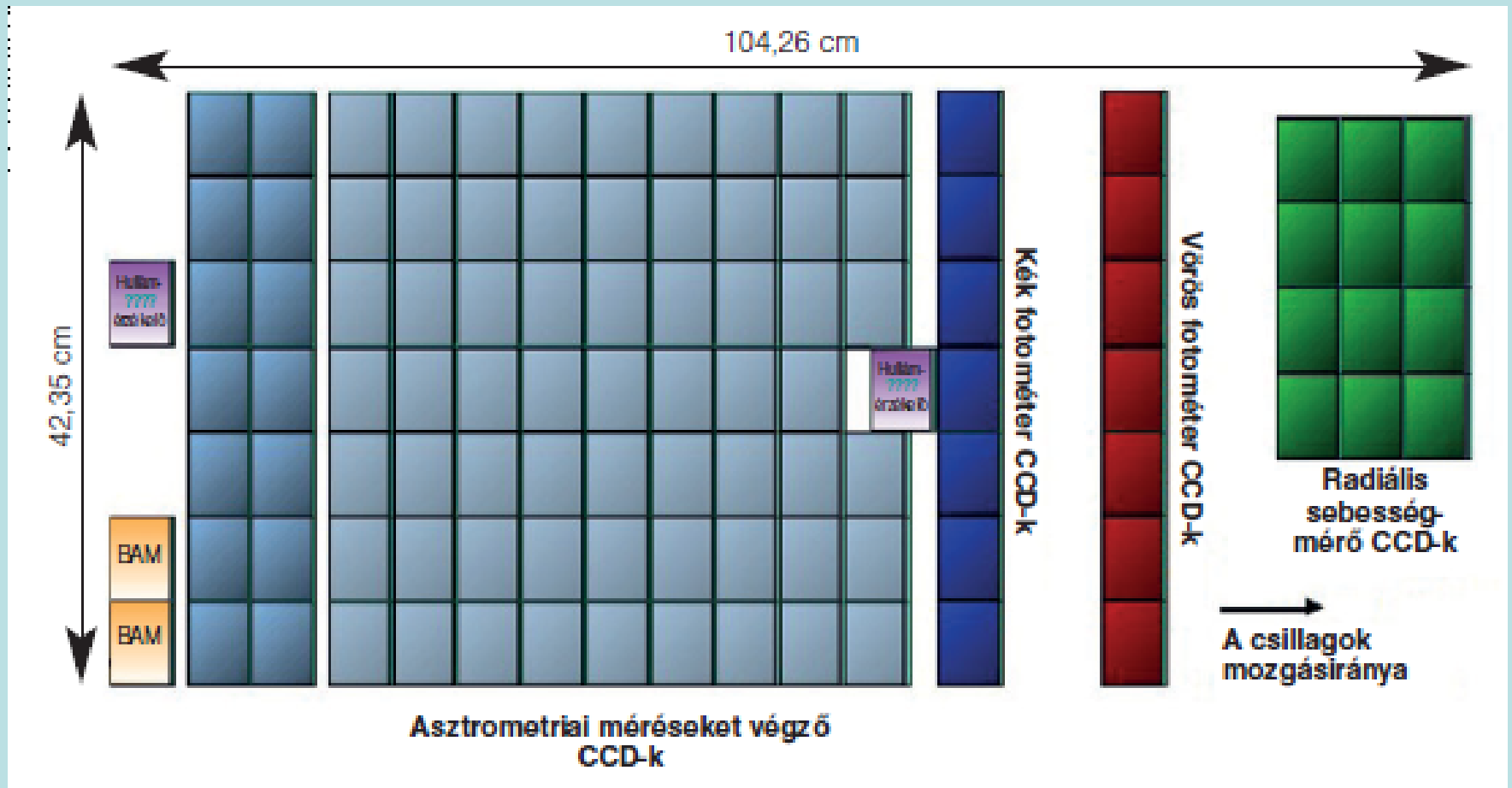


# A Gaia asztrometriai űrszonda

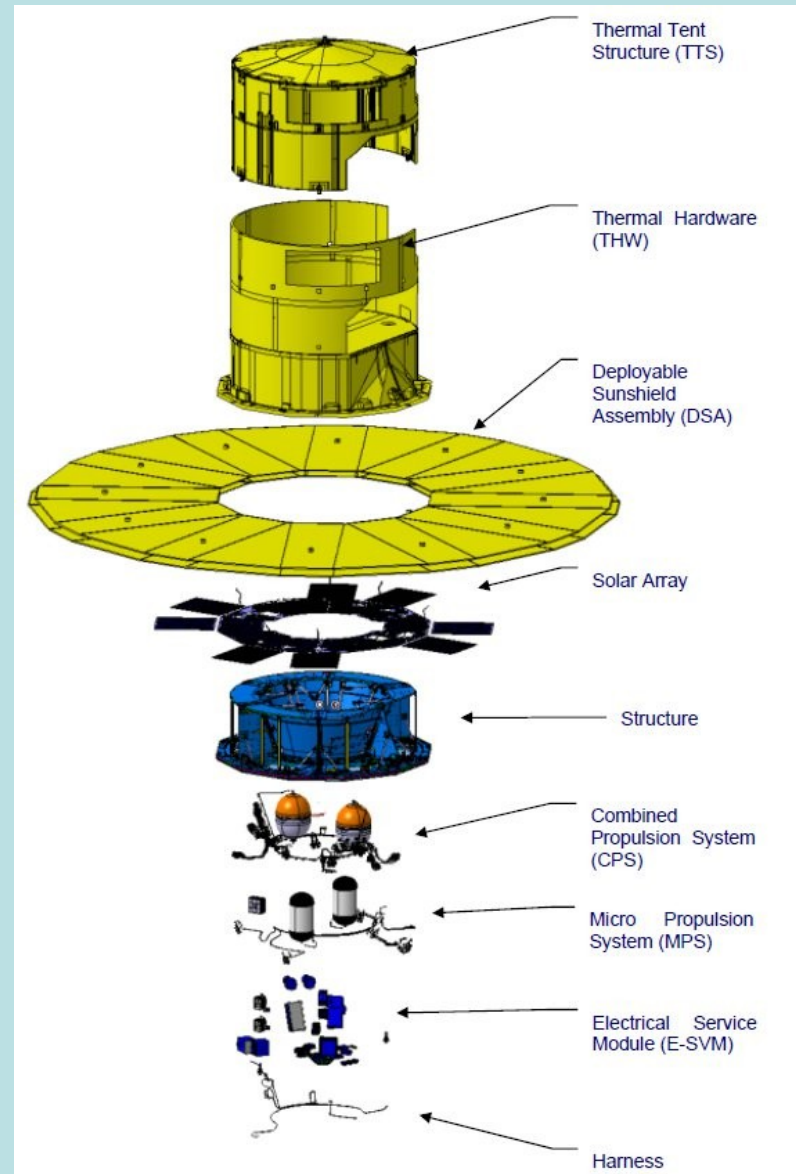
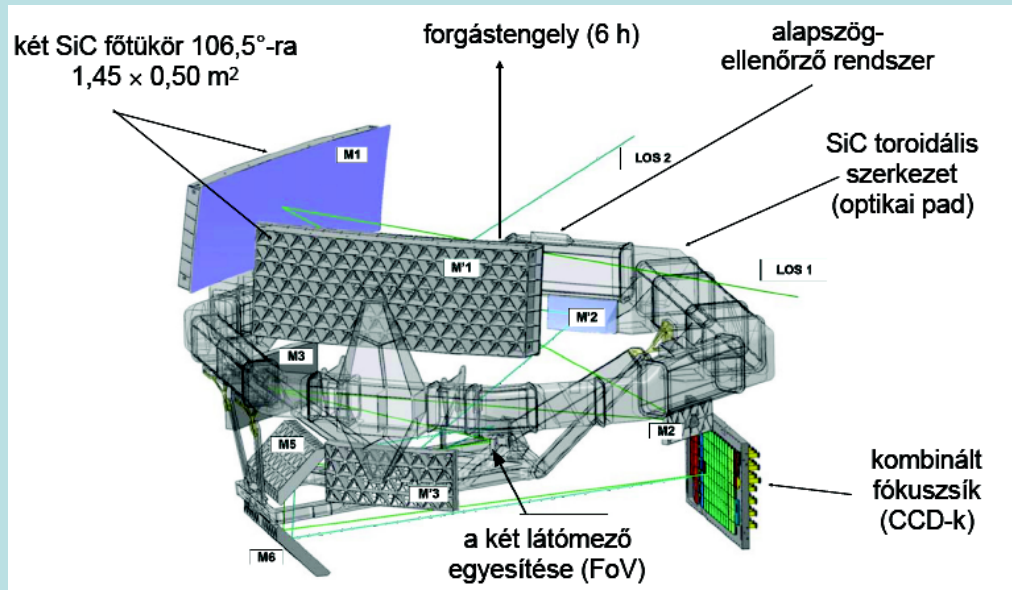


*ESA, S. Corvaja 2013*

# A Gaia asztrometriai űrszonda



# A Gaia asztrometriai űrszonda



# Fotometria a Gaiával

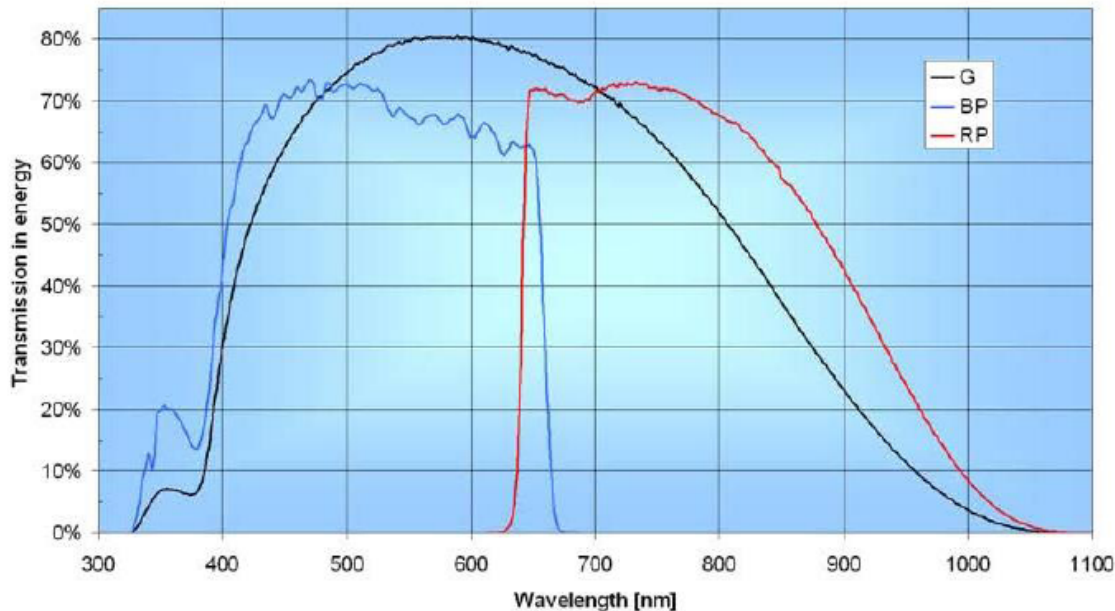
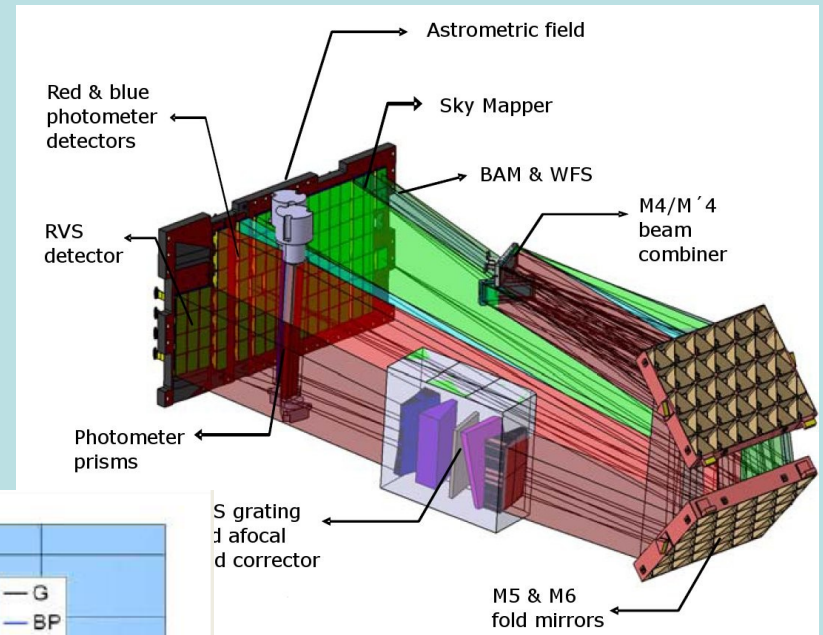
Fotometria:

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

BP (330-680 nm),

RP (640-1050 nm)

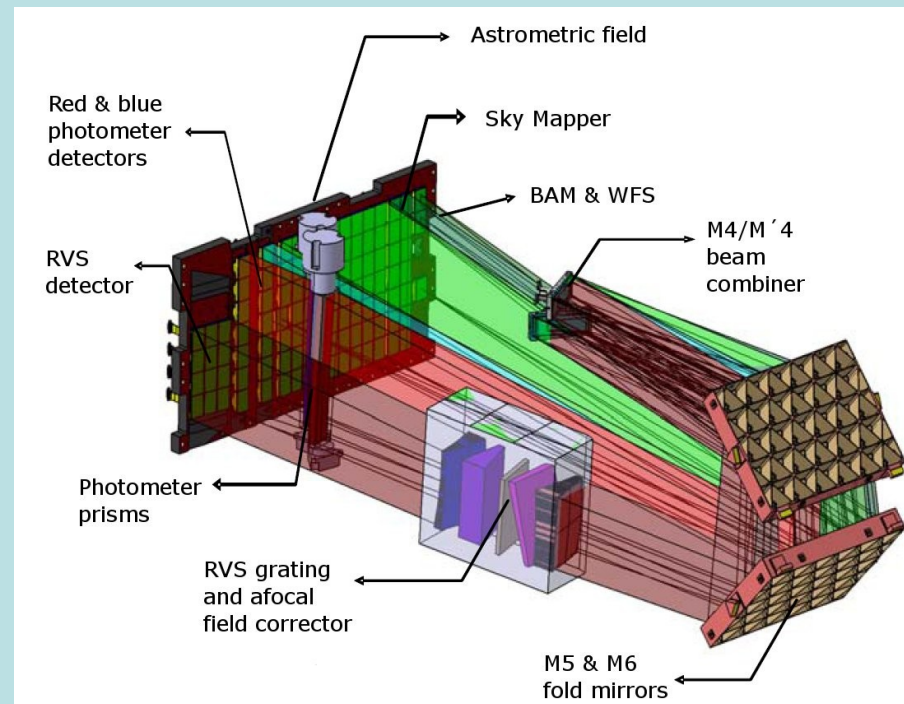
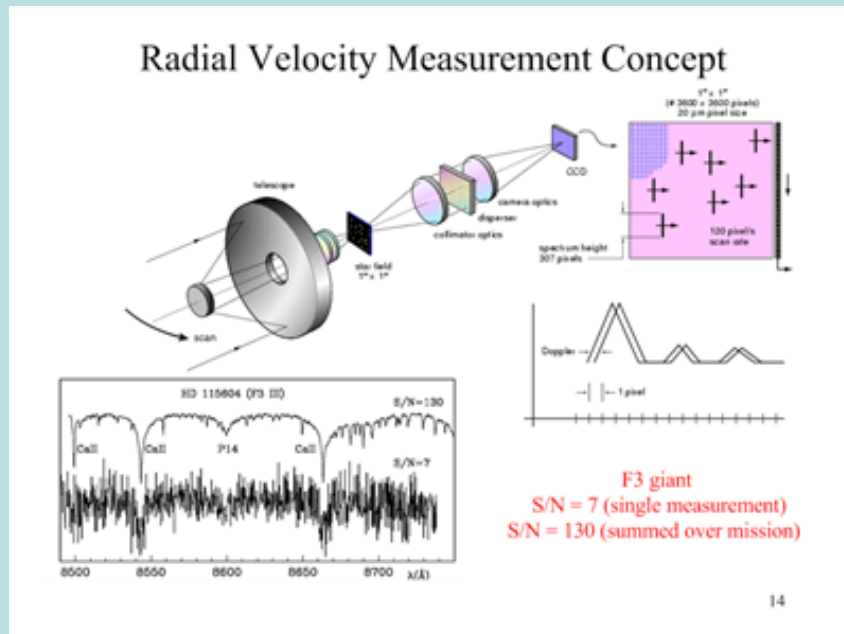
spektrofotometria;  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$   
fényesség



# 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.



# Várható asztrofizikai 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 luminozítási függvény a Naphoz közeli fehér törpékre (kb. 200000) és barna törpékre (kb. 50000);
- Csillagkeletkezési tartományok (főszorozat előtti csillagok) kezdeti tömegfüggvénye és luminozítási függvénye;
- A fényváltozás detektálása és jellemzése a HRD egészére.

## 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 <sup>6</sup> ★ up to 5-10 kpc (M <sub>v</sub> <-5) up to 1-2 kpc (M <sub>v</sub> <5)
$\sigma_{\pi}/\pi < 10 \%$	22 396 ★	30 579 ★	~ 150 x 10 <sup>6</sup> ★ up to 30-50 kpc (M <sub>v</sub> <-5) up to 2-5 kpc (M <sub>v</sub> <5)
Error on M <sub>v</sub>	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



## 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 $\pi$	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

Holl et al. (2018) igazolta a várakozásokat a változócsillagok nagy számát illetően.

# A 6-dimenziós térkép 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. 20000 exobolygóról;
- Más projektek támogatása adatszolgáltatással (pl. VLT, JWST);
- Távolságstandardok kalibrálása a Magellán-felhőkig;
- Tranziens objektumok detektálása + riasztás azonnali továbbészlelésre (Gaia Science Alert System, kb. 20000 objektum);
- Kvazárok (kb. 500000) detektálása, gravitációs lencsék szerkezete.

# Egyéb kutatások a Gaiával

## Naprendszer

- 20 magnitúdóig minden mozgó objektum kimutatása;
- Kb. 100000 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.

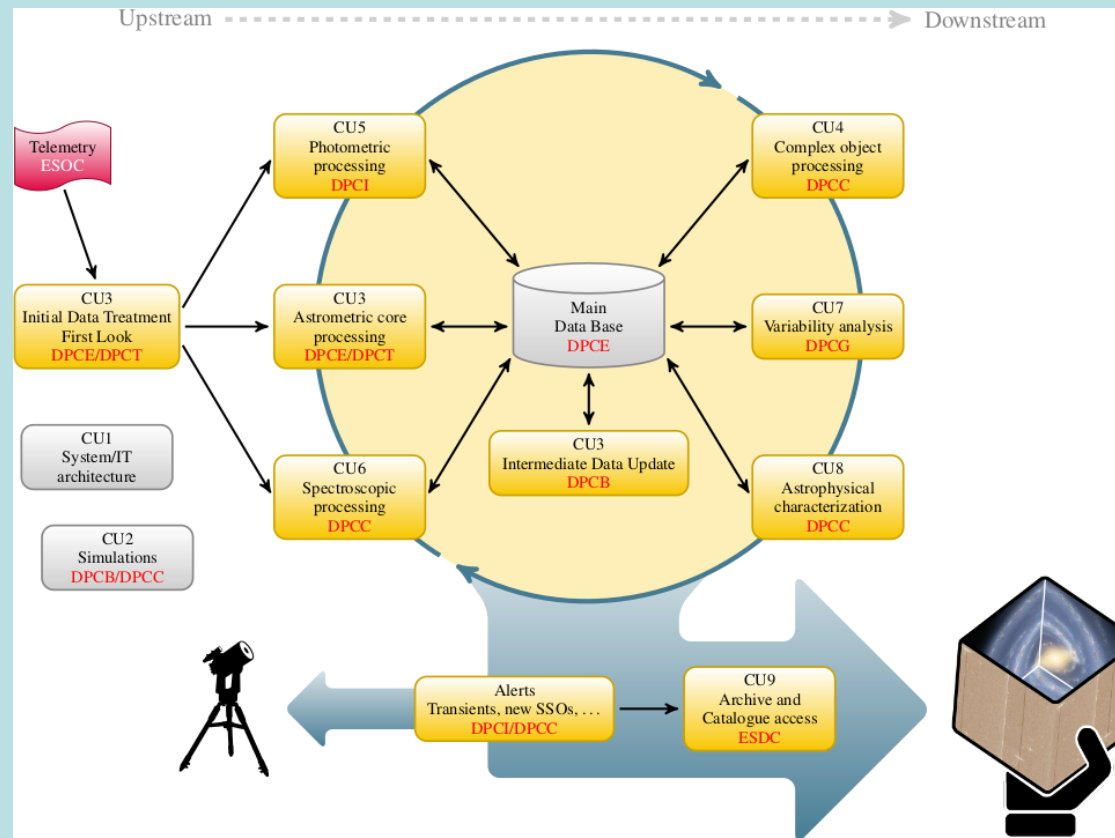
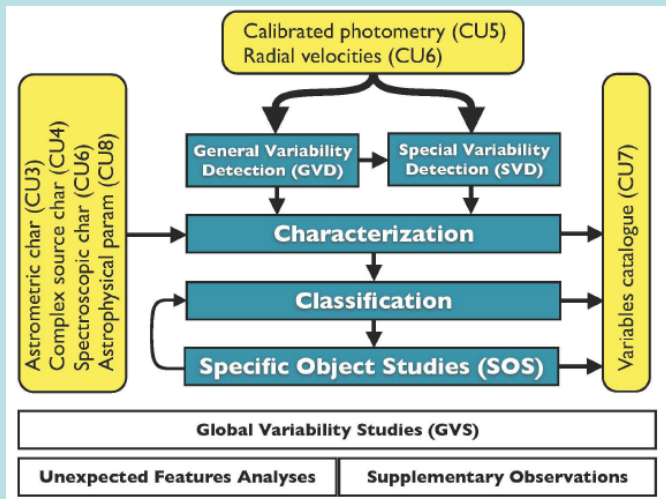
## Általános relativitáselmélet

- 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.

# A Gaia-adatok feldolgozása

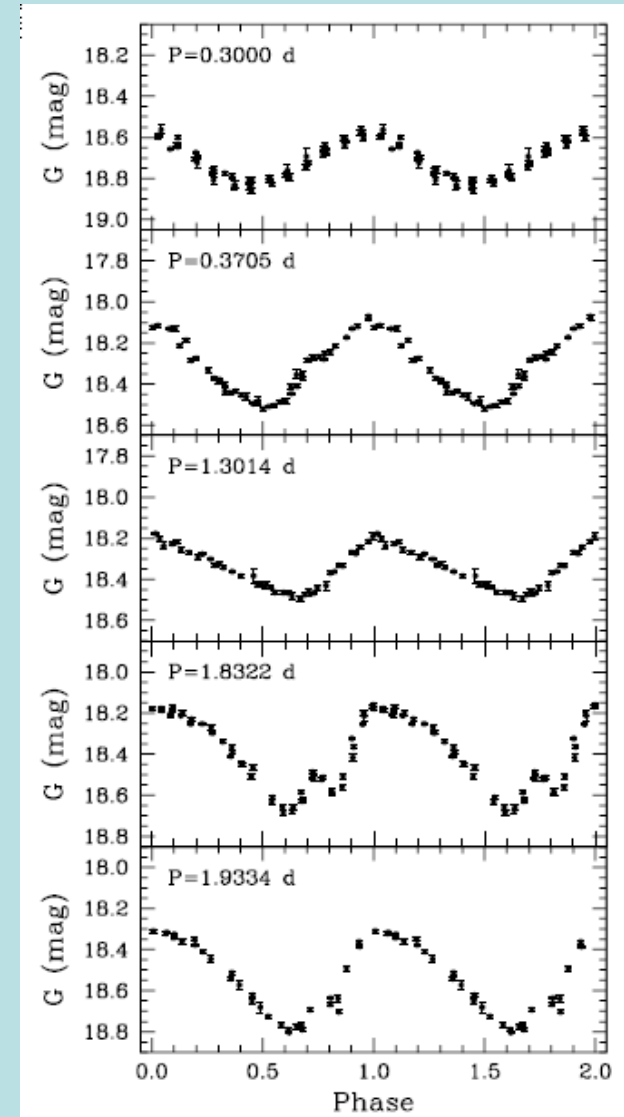
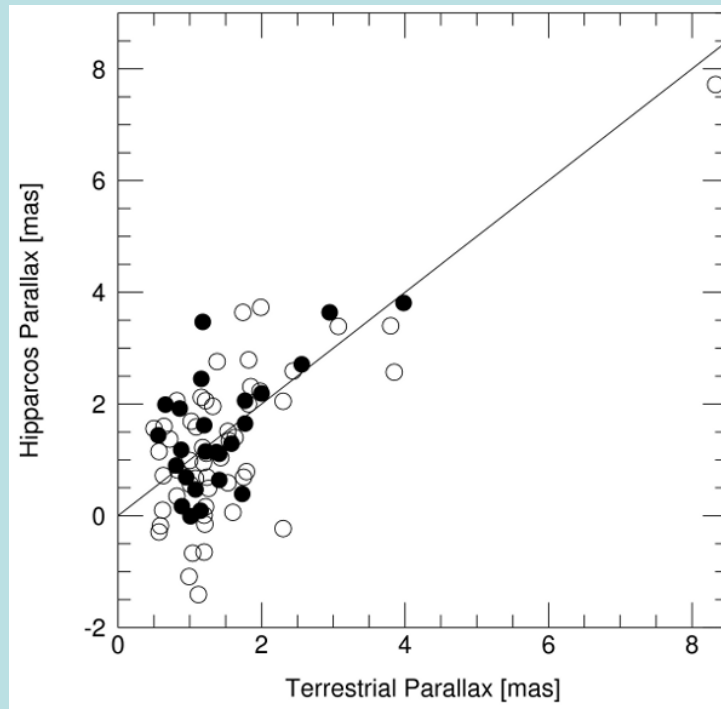
DPAC (Data Processing and Analysis Consortium): 450 tag 20 európai országból + 4 másik földrészről; adatfeldolgozó központok (DPC) és koordinációs egységek (CU):

- 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



# Magyar részvétel a Gaia projektben

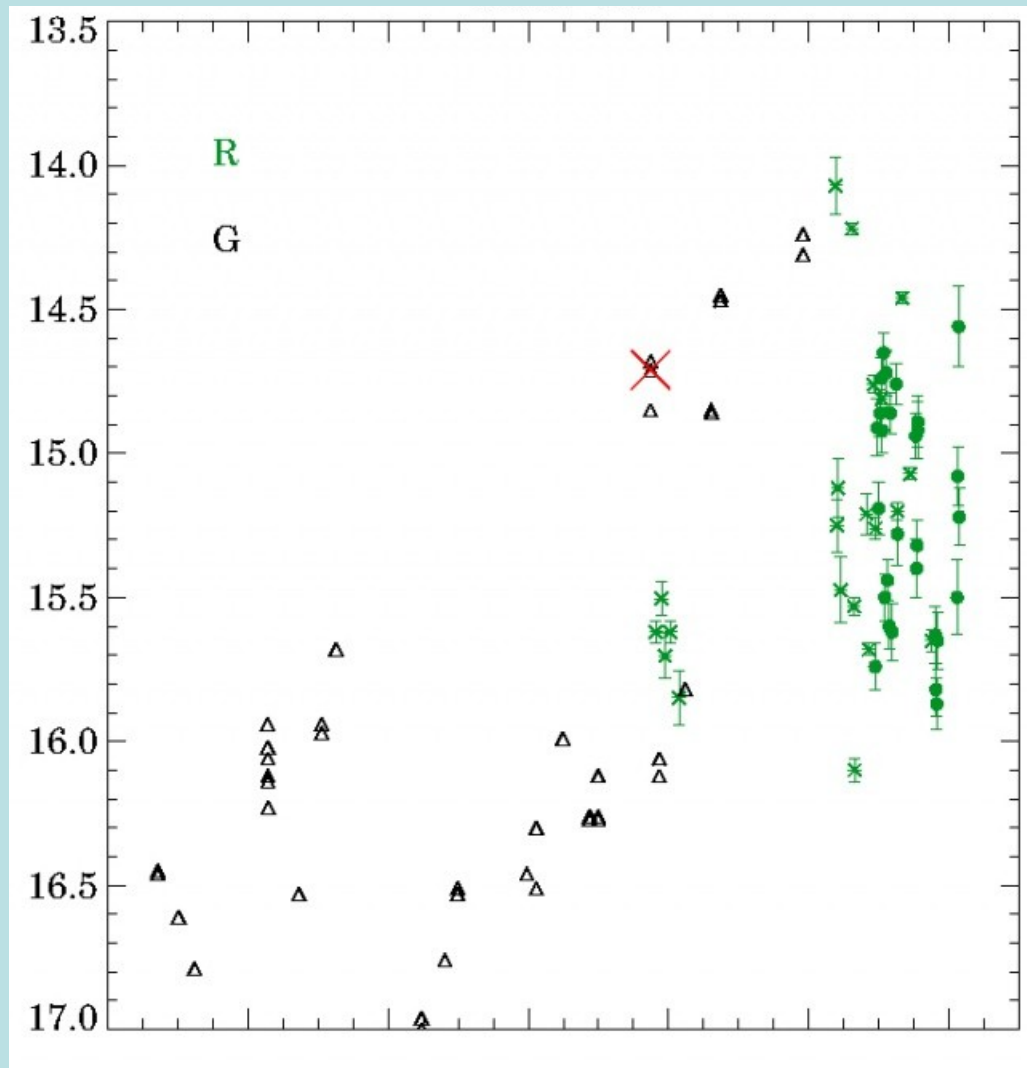
A Hipparcostól egyenes út vezetett a Gaiához. Részvétel a DPAC CU7 Variability Processing koordinációs egységben. Az adat-mintavételezést asztrometriai célok vezérelték, a változócsillagászat számára nem ideális az idősor.



# Magyar részvétel a Gaia projektben

A Gaia Science  
Alert riasztása után  
földi fotometriai  
követés:  
a V555 Ori fiatal  
változócsillag  
kitörése (a  
vízszintes skála  
kb. egy év)

*Szegedi Elek-Elza  
szívességéből*

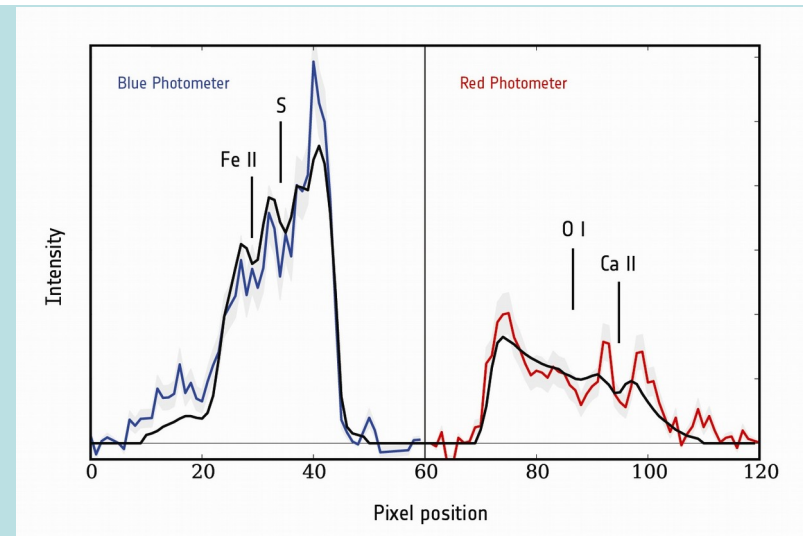
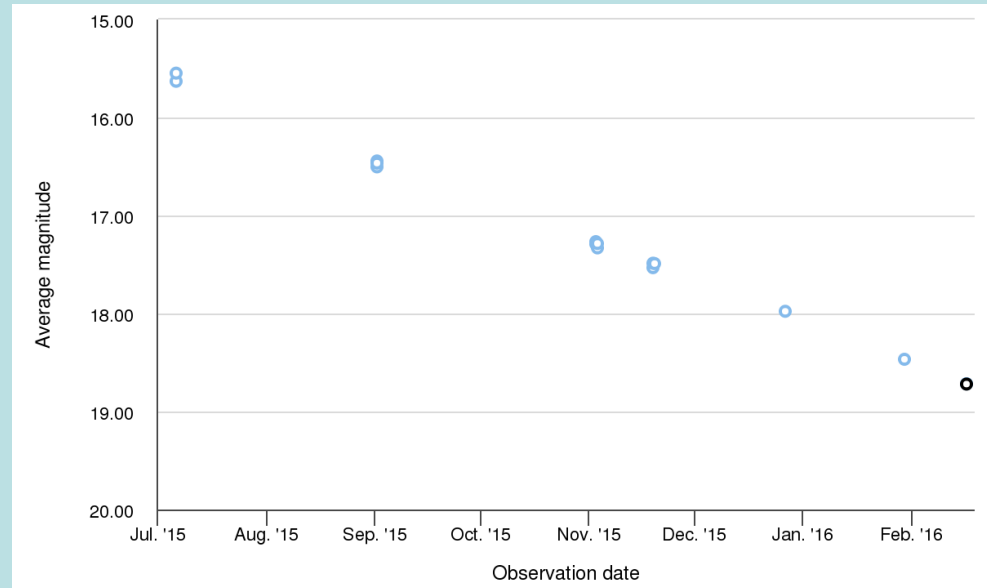


# A Gaia Science Alert

A *Gaia Science Alert* fontos kiegészítő program (földfelszíni távcsövekkel).

A Gaia16aeg szupernóva fénygörbéje (jobbra fent). Típusa: SNI**b**, távolsága: 200 millió fényév.

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



# A Gaia „hétköznapijai”

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

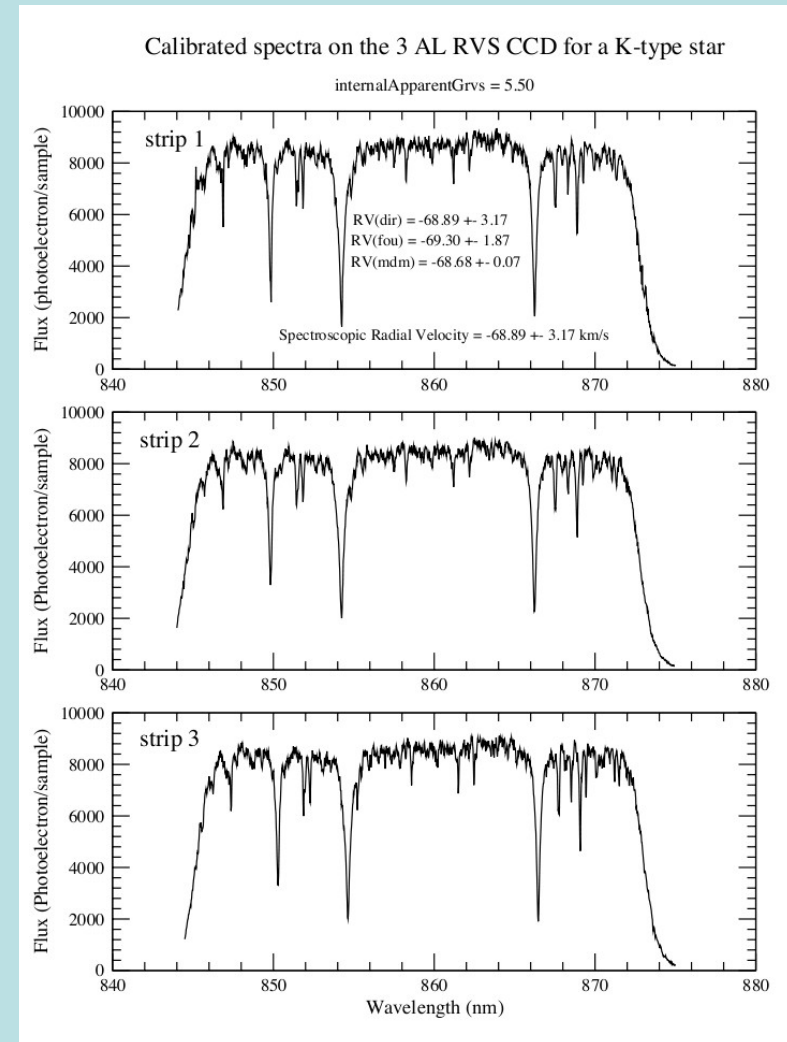
- Az alapszög stabilitása nem éri el a tervezettet (de mérni tudják a pillanatnyi értéket - BAM);
- Szórt fény zavar (jégrétegen törő napfény) + a tükörrre fagy a pára (néha melegítik).

**Próbamérések:** a déli ekliptikai pólus irányában végezték egy hónapig.

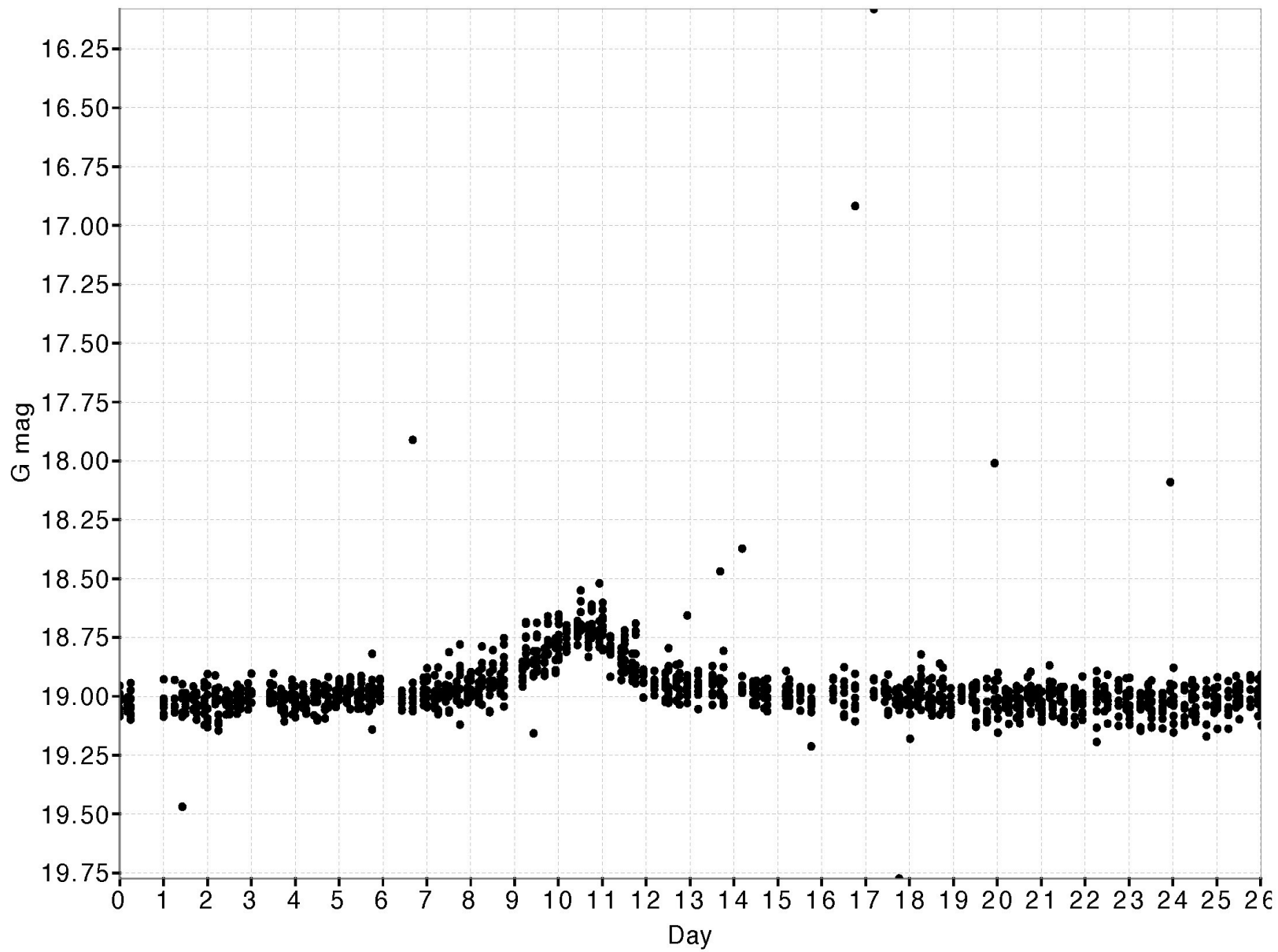
**Az adatok közlésének politikája**

**Kezdeti eredményekre példák:**

- K típusú csillag színeképe
- Mikrolencse-esemény a Nagy-Magellán-felhő irányában (Gaia Science Alert).





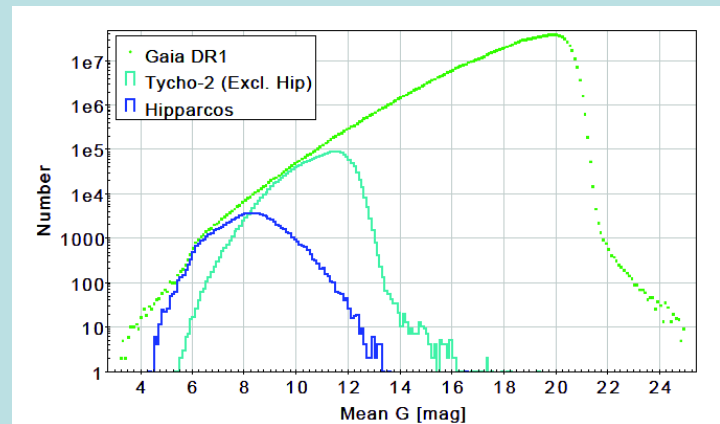
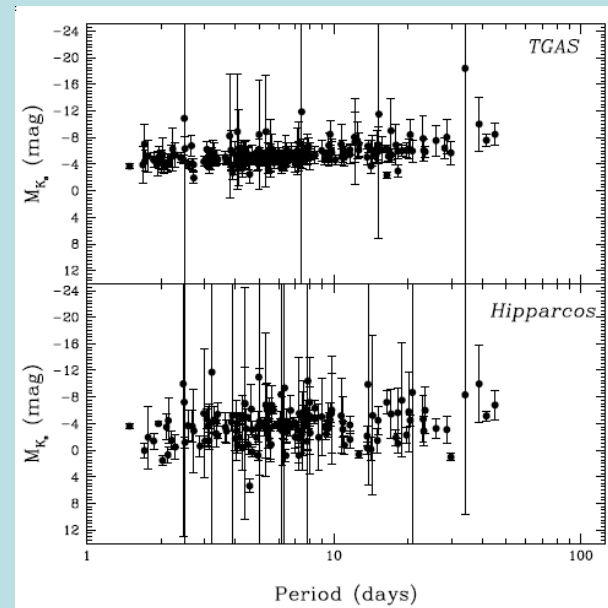


# A Gaia adatközlései

A **Gaia Data Release 1 (DR1)** 2016. szeptember 14. óta érhető el:  
<http://archives.esac.esa.int/gaia/DR1>

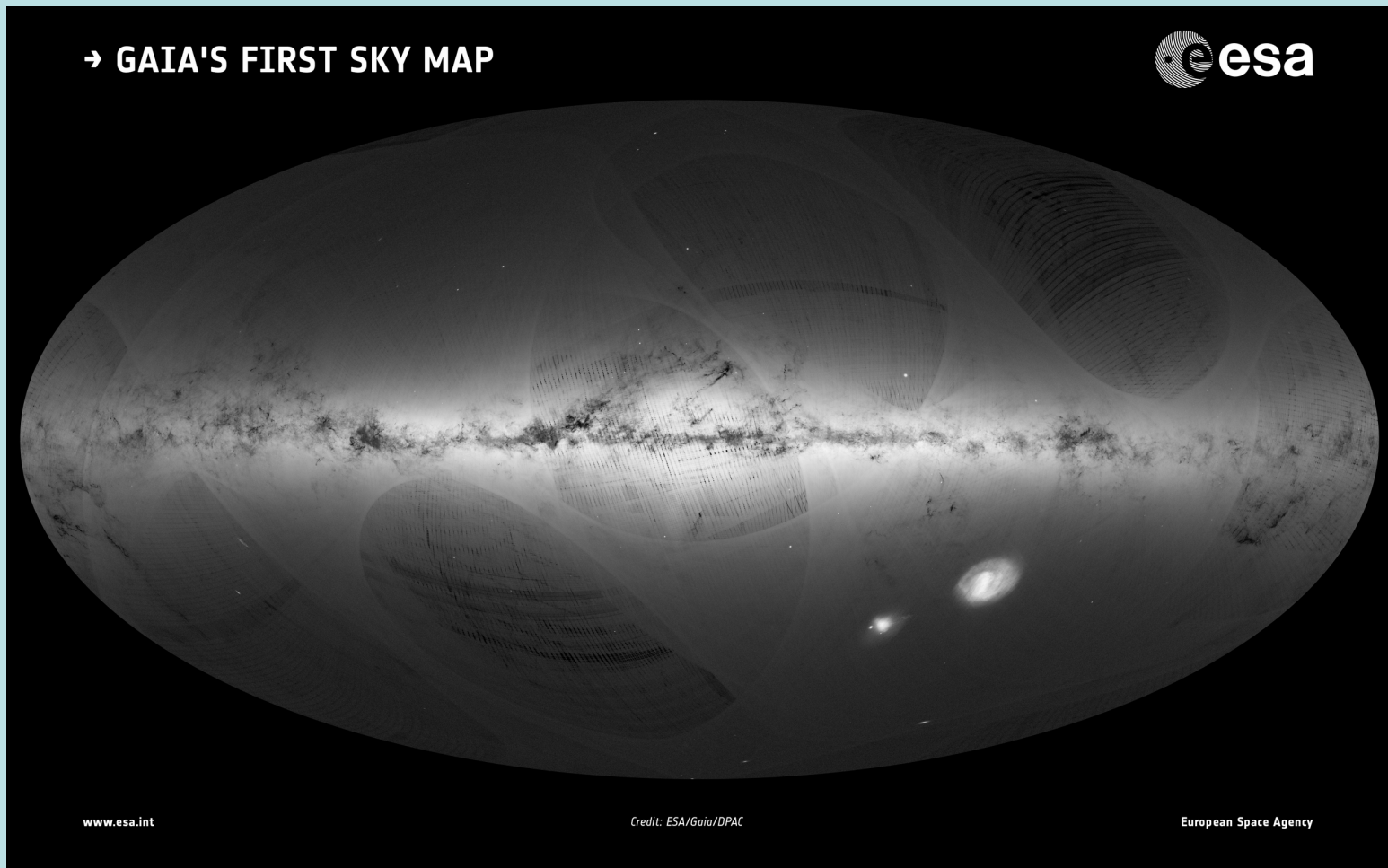
Az első 14 hónapban végzett mérések alapján J2015,0 epochára:

- 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.



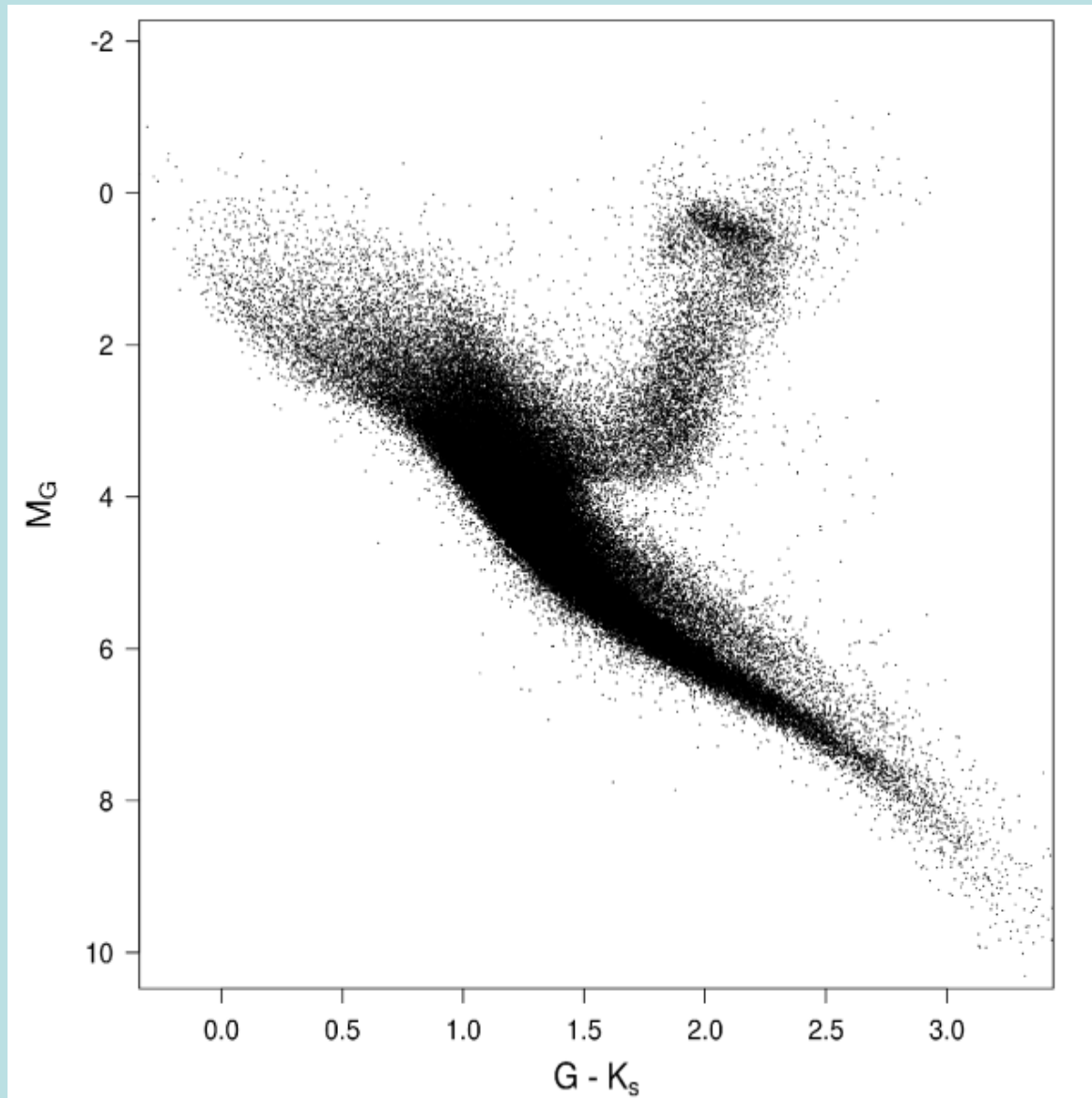
**Fig. 1.** Distribution of the mean values of  $G$  for all *Gaia* DR1 sources shown as histograms with 0.1 mag wide bins. The distributions for the HIPPARCOS and *Tycho-2* (excluding the HIPPARCOS stars) subsets are also shown. Note the lack of bright sources at  $G \leq 7$ .

# A Gaia DR1 Tejút-térképe

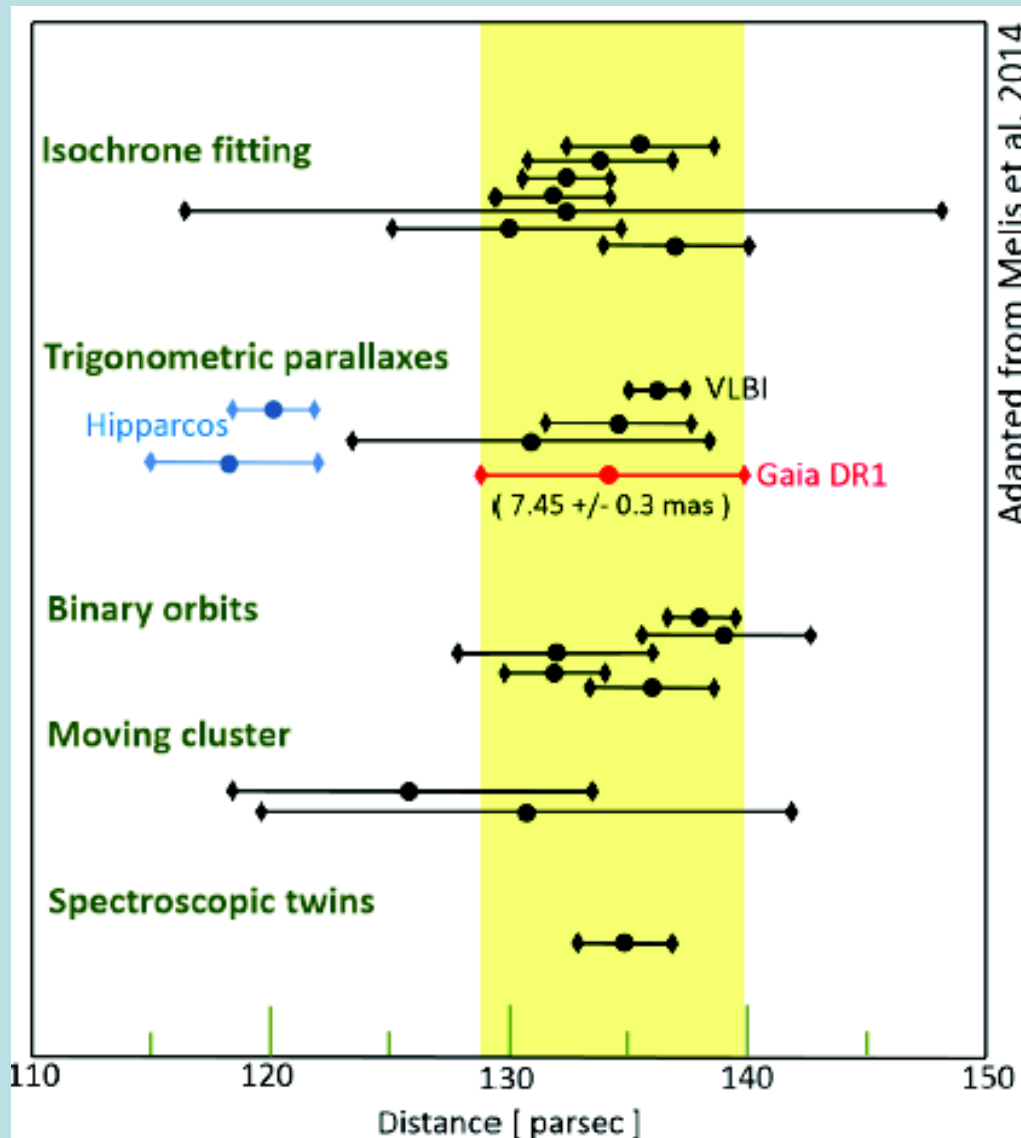


Forrás: ESA/Gaia/DPAC, A. Moitinho & M. Barros, Lisszaboni Egyetem

# 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:

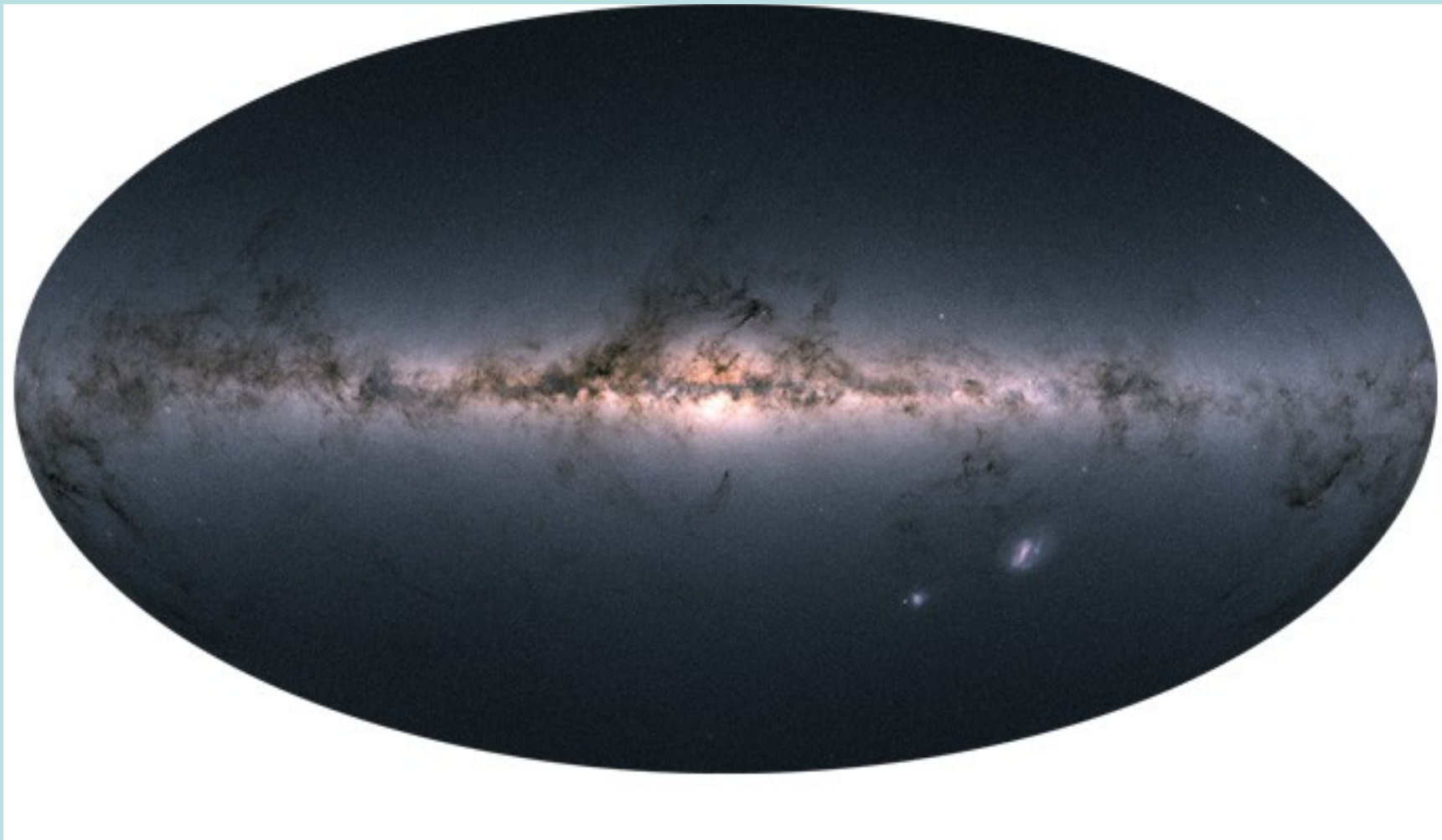
- 1,7 milliárd csillagra égi pozíció és  $G$  magnitúdó;
- több mint 1,3 milliárd csillagra parallaxis, sajátmozgás,  $G_{BP}$  és  $G_{RP}$ ;
- több mint 7 millió csillagra átlagos radiális sebesség;
- 161 millió csillagra felszíni hőmérséklet, 88 millió csillagra extinkció és vörösödés, 77 millió csillagra 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 <sup>-1</sup> at $G < 15$ 0.2 mas yr <sup>-1</sup> at $G = 17$ 1.2 mas yr <sup>-1</sup> at $G = 20$ 3 mas yr <sup>-1</sup> 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 <sup>-1</sup> 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 <sup>-1</sup> 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 <sup>-1</sup> at $G_{RVS} < 8$ 0.6 km s <sup>-1</sup> at $G_{RVS} = 10$ 1.8 km s <sup>-1</sup> at $G_{RVS} = 11.75$
Systematic radial velocity errors	< 0.1 km s <sup>-1</sup> at $G_{RVS} < 9$ 0.5 km s <sup>-1</sup> at $G_{RVS} = 11.75$
Effective temperature $T_{\text{eff}}$	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 mint sűrű katalógus

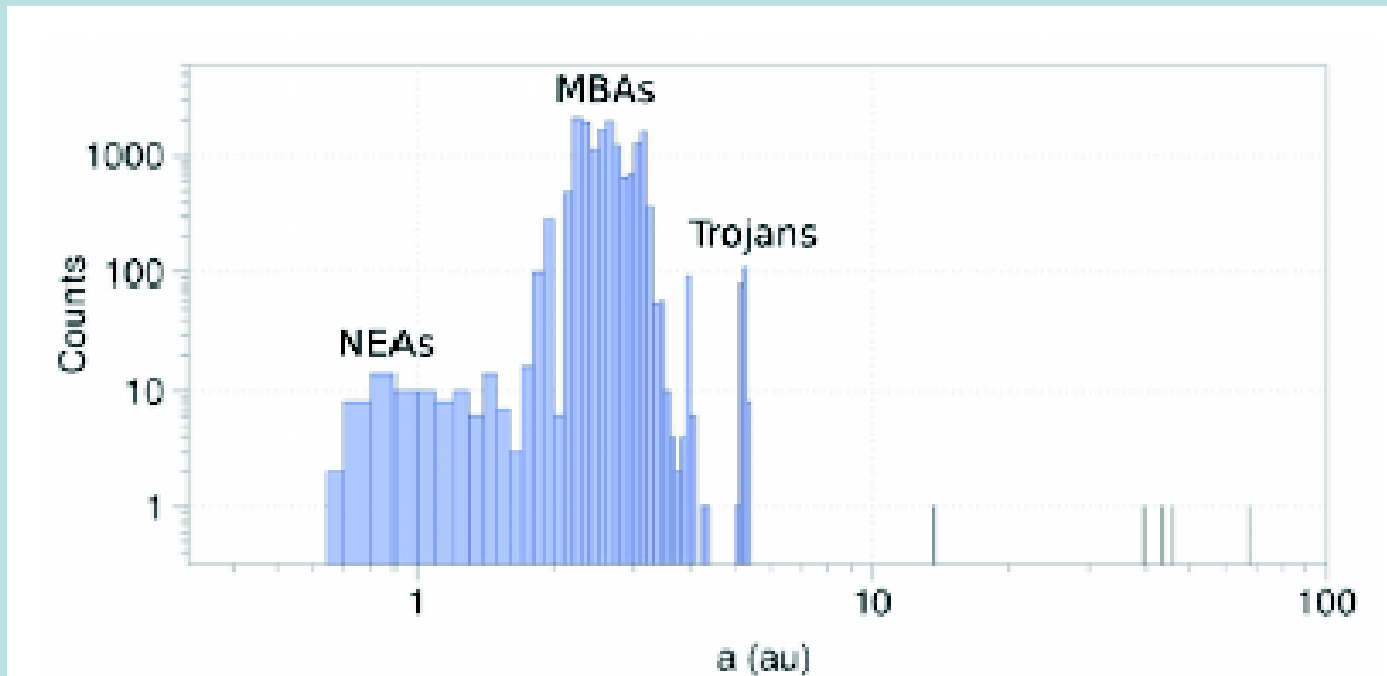
**Table 3.** Properties of *Gaia* DR2 and external catalogues.

Catalogue	$N$ Sources	PosErr <sub>max</sub> <sup>a</sup> (arcsec)	Effective resolution (arcsec)	$\Delta$ Epoch <sub>max</sub> (yr)	SysErr <sub>max</sub> <sup>b</sup> (arcsec)	Survey type <sup>c</sup>
<i>Gaia</i> DR2	1 692 919 135	0.1	0.4 <sup>d</sup>			
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 <sup>f</sup>	62.79	0.63	Dense
PPMXL	910 468 688	1.342 <sup>e</sup>	~2 <sup>f</sup>	15.5	0.155	Dense
SDSS DR9	469 029 929	10.0	~0.7 <sup>f</sup>	16.79	0.17	Dense
URAT-1	228 276 482	0.429	~2.5 <sup>f</sup>	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 <sup>g</sup>	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-2</i>	2 539 913	0.254	~0.8	24.275	0.2475	Sparse
RAVE 5	457 555 <sup>h</sup>	0.6 <sup>i</sup>	3.5 <sup>j</sup>	15.5 <sup>i</sup>	0.155	Sparse

A Gaia DR2 minden adata elérhető:

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

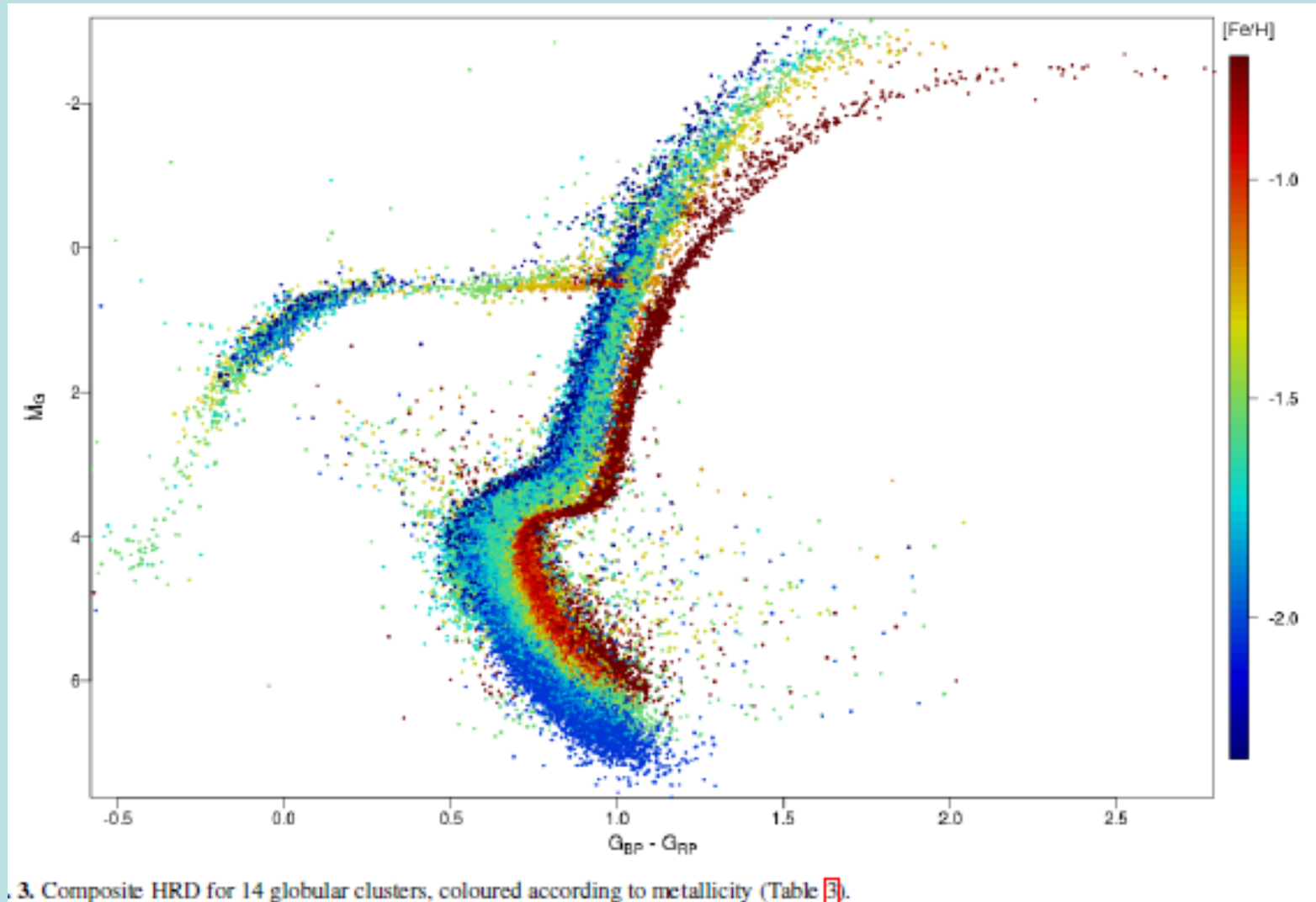
# A Gaia DR2 eredményeiből



**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 Gaia DR2 eredményeiből



Babusieux et al. (2018)

# A Gaia DR2 eredményeiből

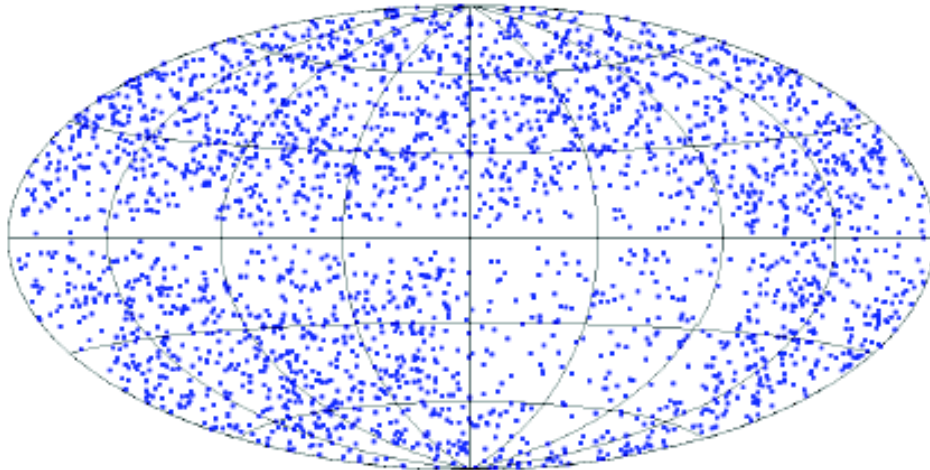


Fig. 13. Sky distribution of the 2820 *Gaia* sources identified as most probable optical counterparts of quasars in the ICRF3-prototype. Hammer-Aitoff projection in Galactic coordinates with origin at the centre of the map and longitude increasing from right to left.

Mignard et al. (2018)

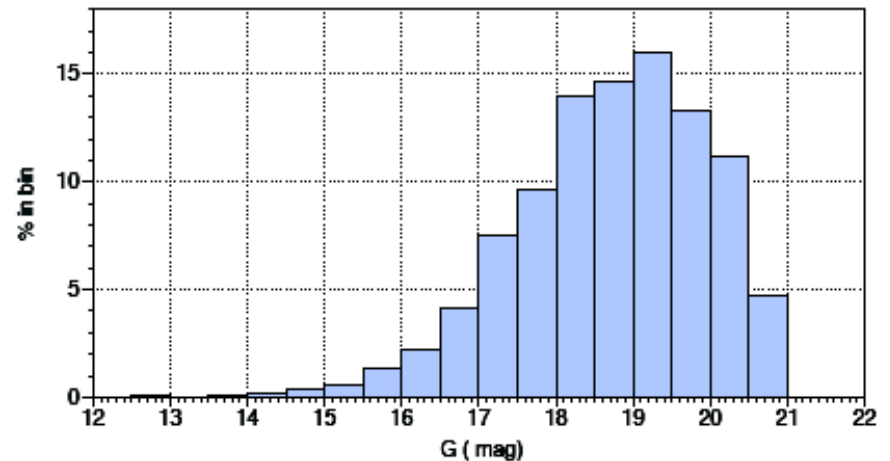
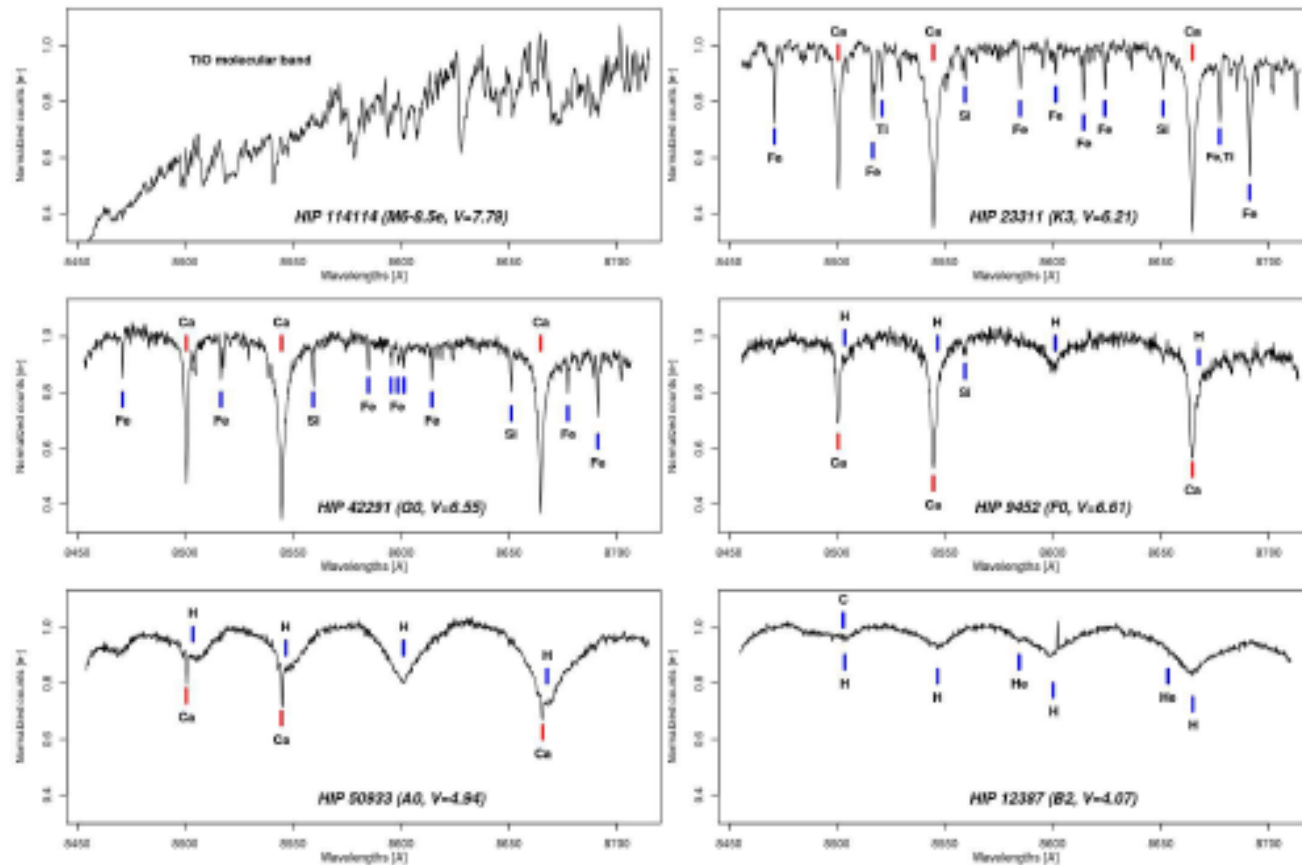


Fig. 14. Magnitude distribution of the 2820 *Gaia* sources identified as likely optical counterparts of quasars in the ICRF3-prototype.

# A Gaia DR2 eredményeiből

M. Cropper et al.: *Gaia* RVS

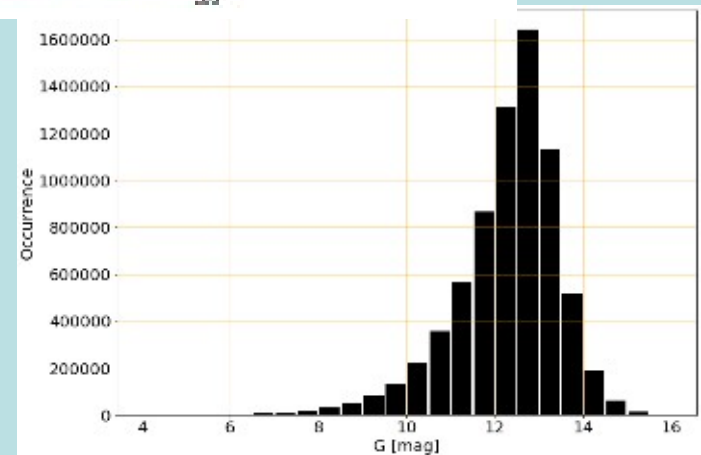
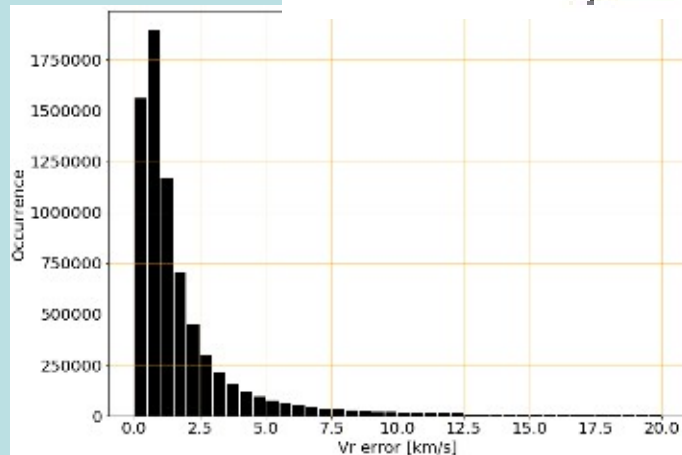
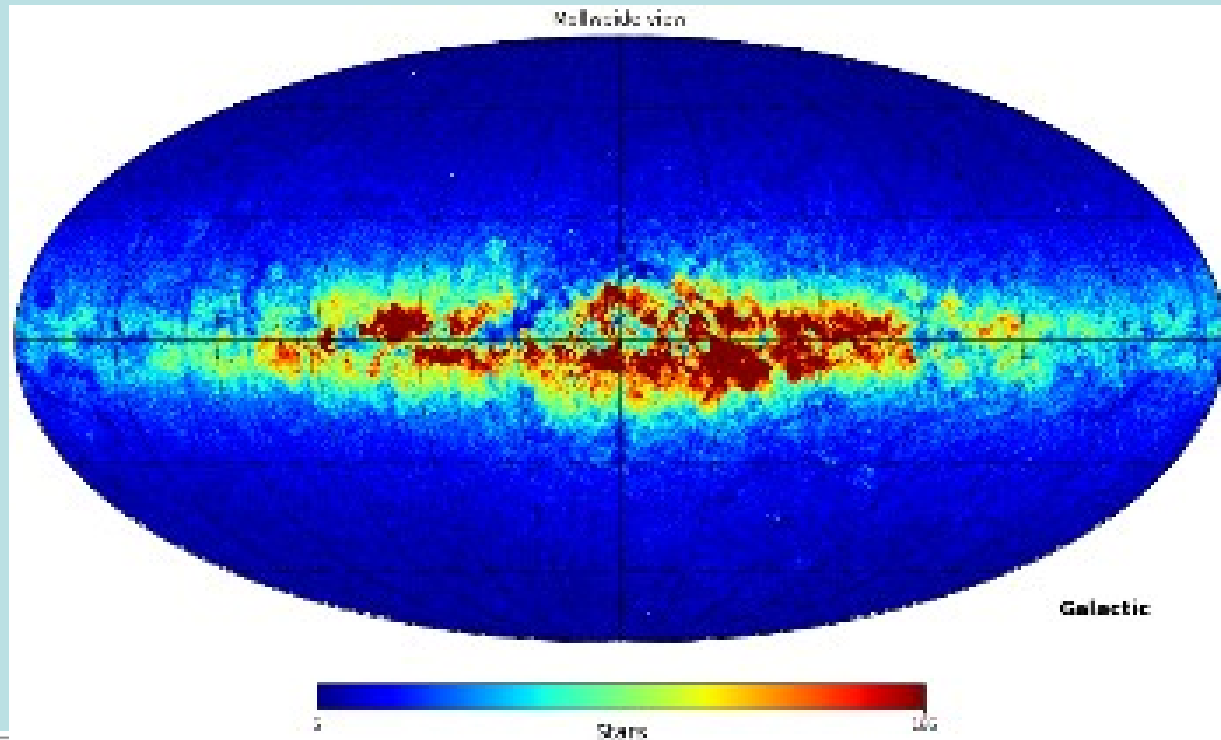


**Fig. 17.** RVS spectra of 6 *Hipparcos* stars from spectral type B2 to M6, with an identification of the major spectral lines in the RVS bandpass. In addition, although not evident in these spectra, diffuse interstellar bands are recorded at 862nm.

Cropper et al. (2018)

# A Gaia DR2 eredményeiből

Katz et al.  
(2019)



# A Gaia DR2 eredményeiből

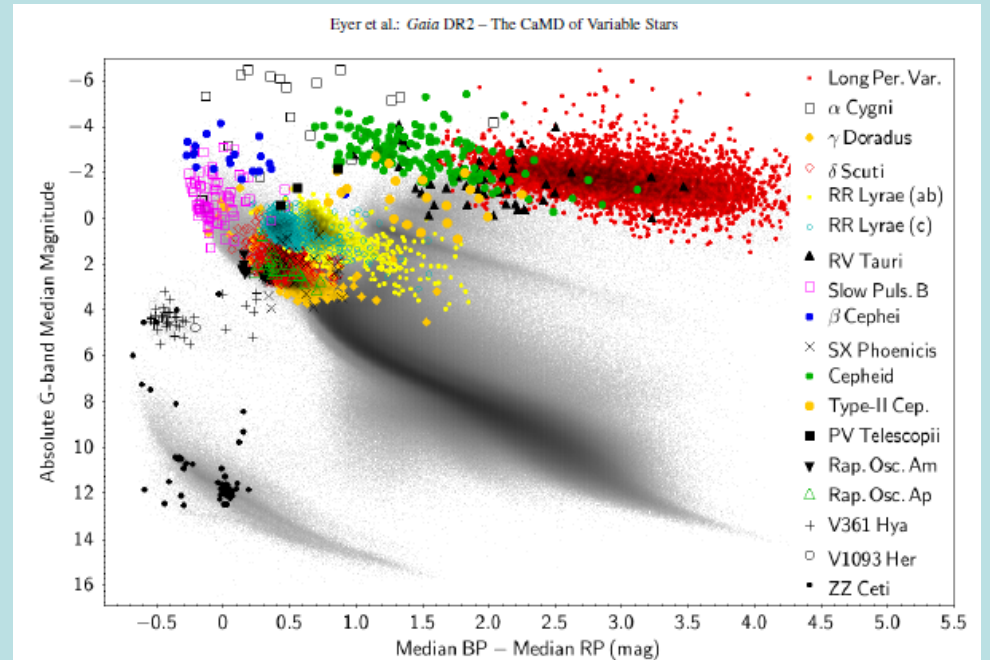
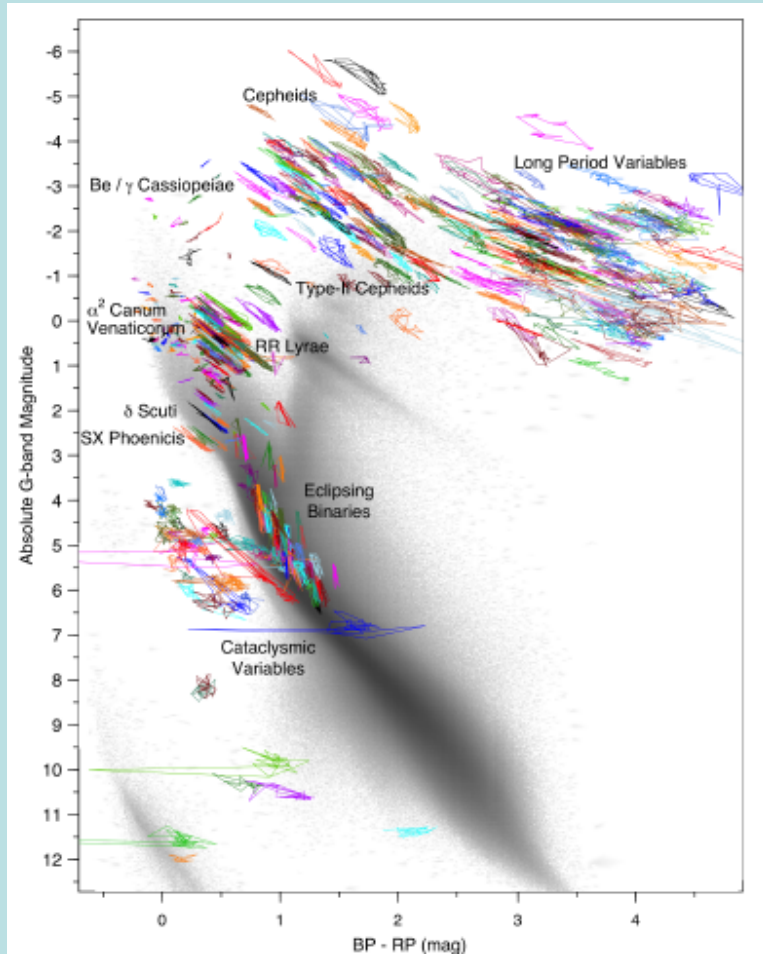
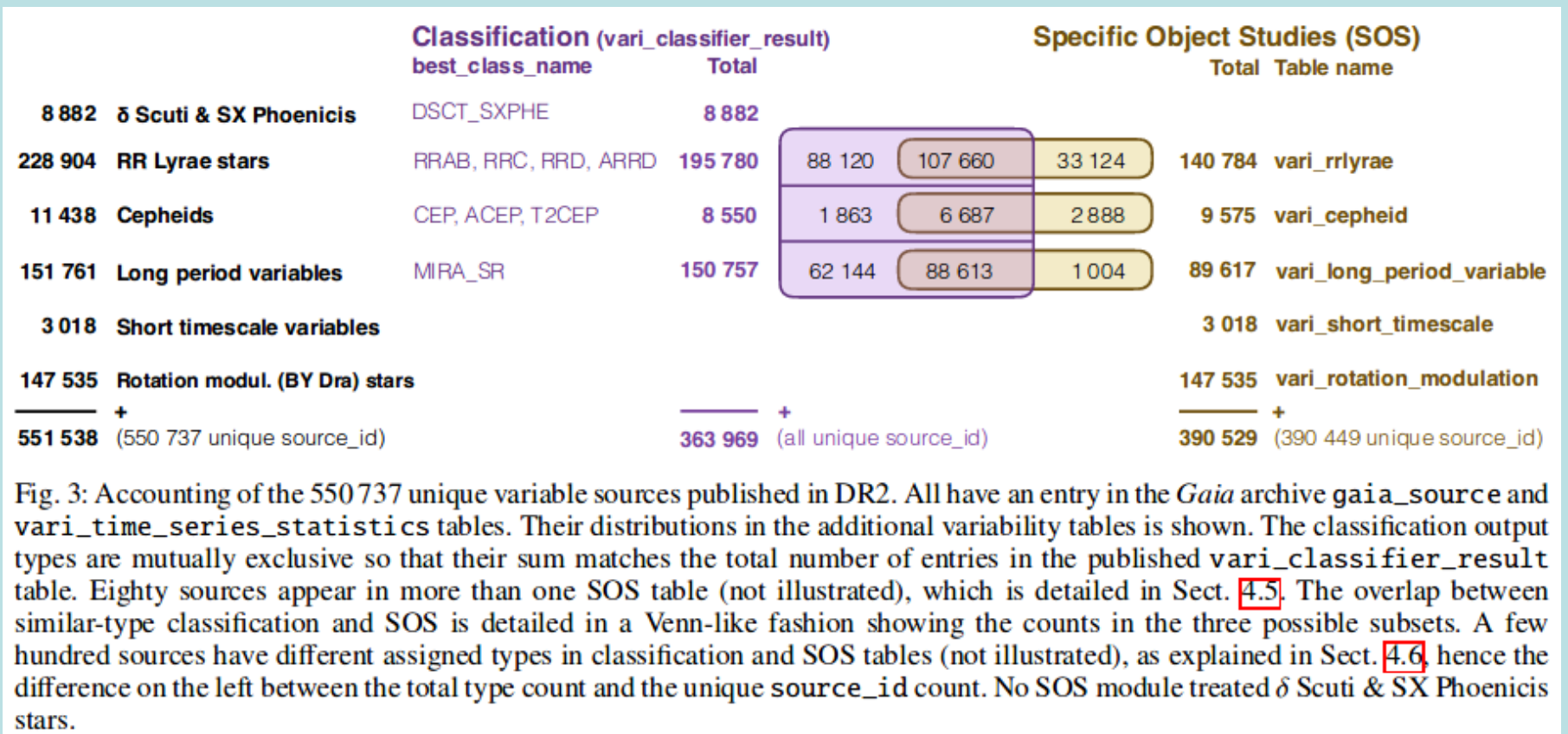


Fig. 2. Known pulsating variable stars retrieved from published catalogues are placed in the observational CaMD, with symbols and colours representing types as shown in the legend (see [A.1](#)) for the references from literature per type). All stars satisfy the selection criteria described in

Eyer et al. (2019)



Holl et al. (2019)



# A Gaia DR2 eredményeiből

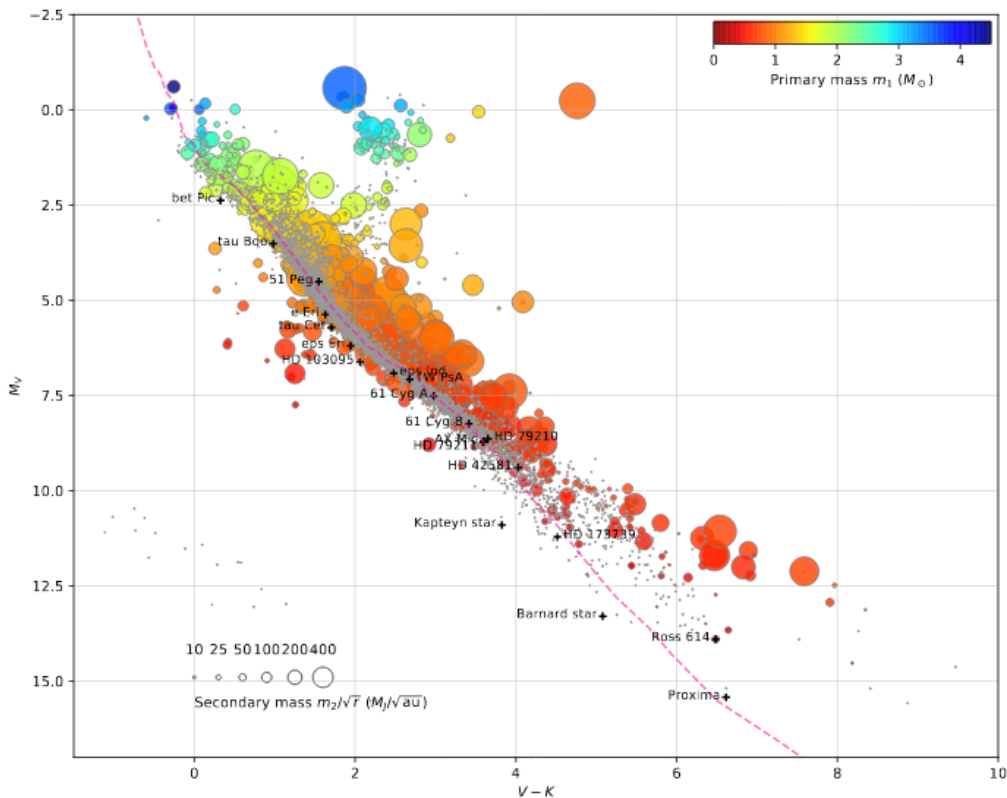


Fig. 9. Positions of the stars of our sample within 50 pc in the  $[M_V, V - K]$  color-magnitude diagram. The stars exhibiting a PMA signal-to-noise ratio  $\Delta_{G2} > 2$  are represented in colors. The symbol size correspond to the normalized companion masse  $m_2^2$ , following the scale displayed in the lower left corner, and the primary mass  $m_1$  is represented in color using the scale represented in the upper right corner. The stars with a PMA signal-to-noise ratio  $\Delta_{G2} \leq 2$  are represented using light gray dots, and the objects discussed individually in Sect. 5 are indicated with "+" symbols.

A 6741 csillag 30%-a mellett eddig ismeretlen kísérő lehet (Kervella et al., 2019)

Közeli ( $d < 50$  pc) csillagok kettőssége a sajátmozgás-anomália kimutatásával.

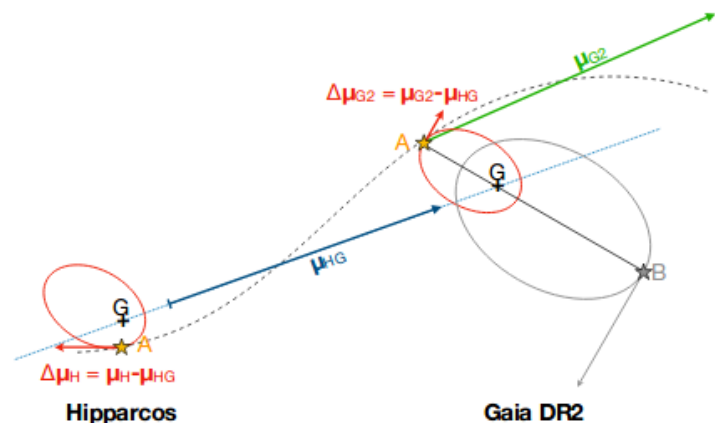
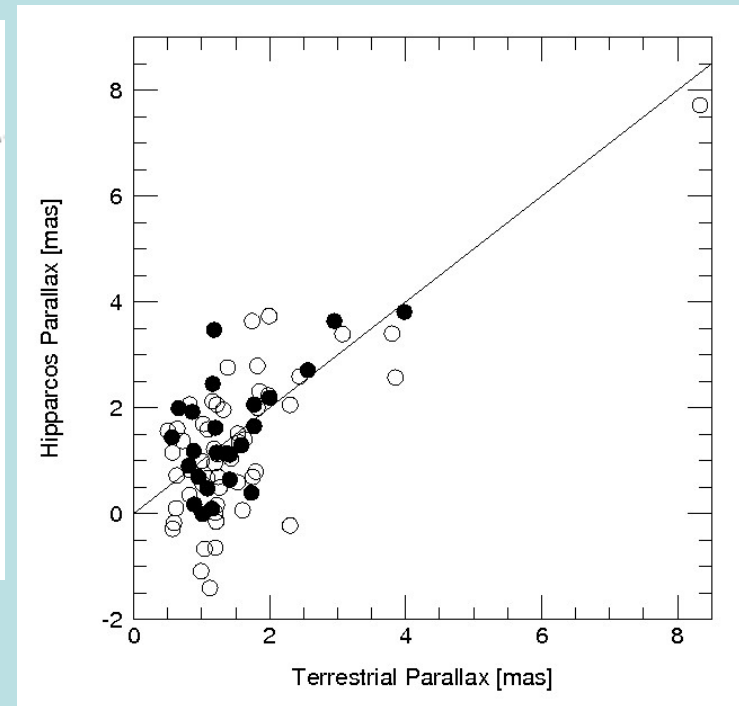
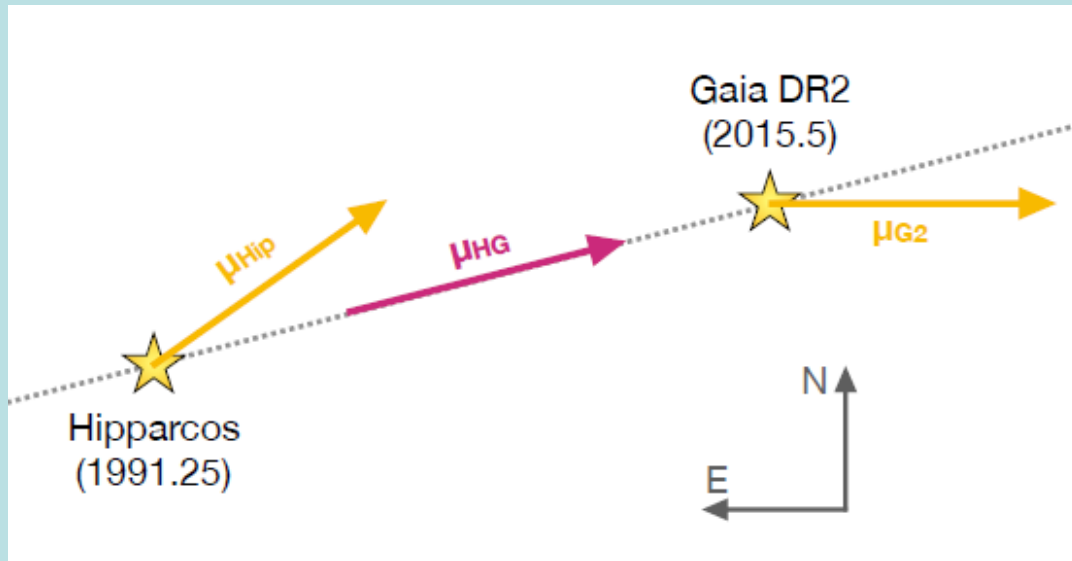


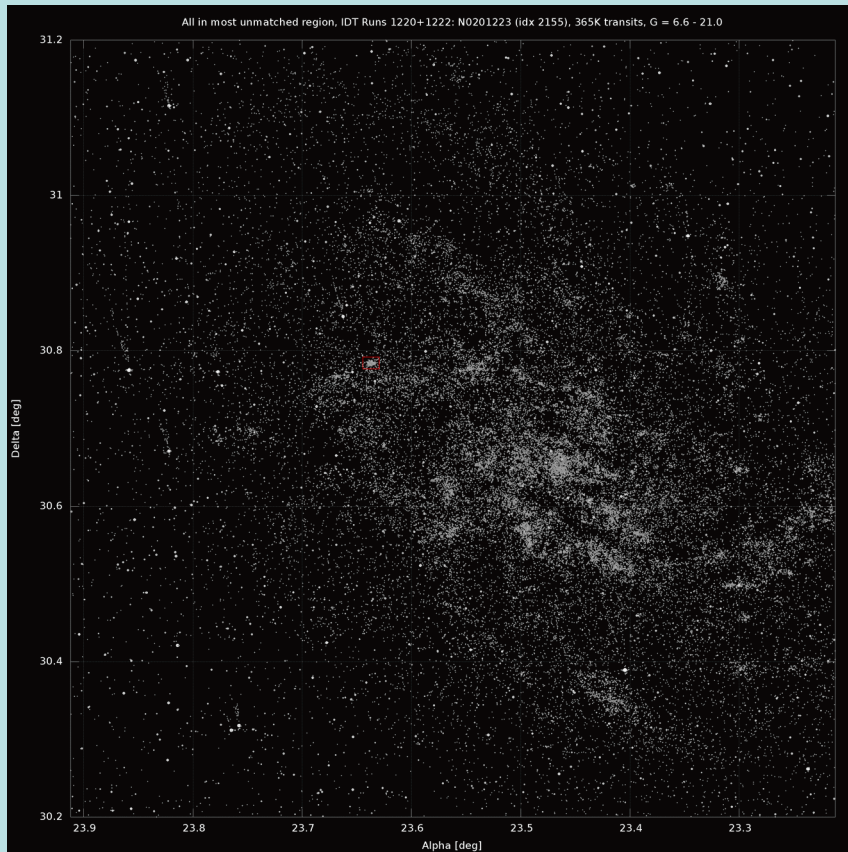
Fig. 1. Principle of the proper motion anomaly  $\Delta\mu_{H/G2}$  determination. We assume in the figure that the secondary object B has a negligible photometric contribution, and that the photocenter of the system is at the position of star A.

# A Gaia DR2 eredményeiből



Cefeidák és RR Lyrae típusú csillagok kettősségének közvetett kimutatása (Kervella et al., 2019)

# A Gaia DR2 eredményeiből

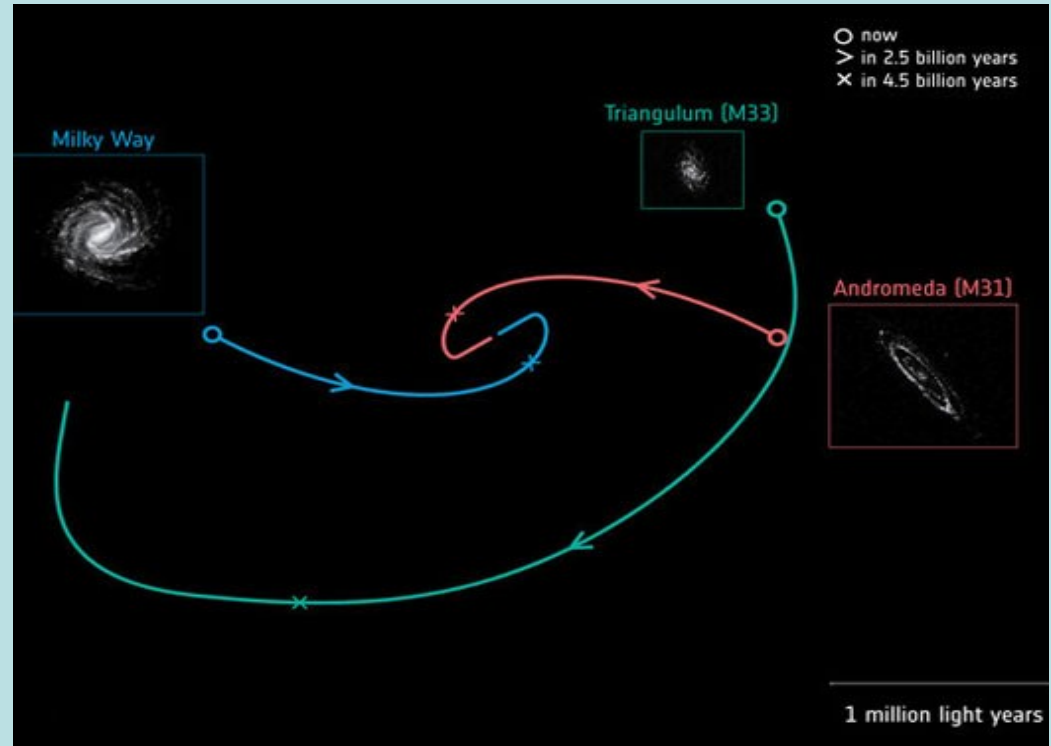
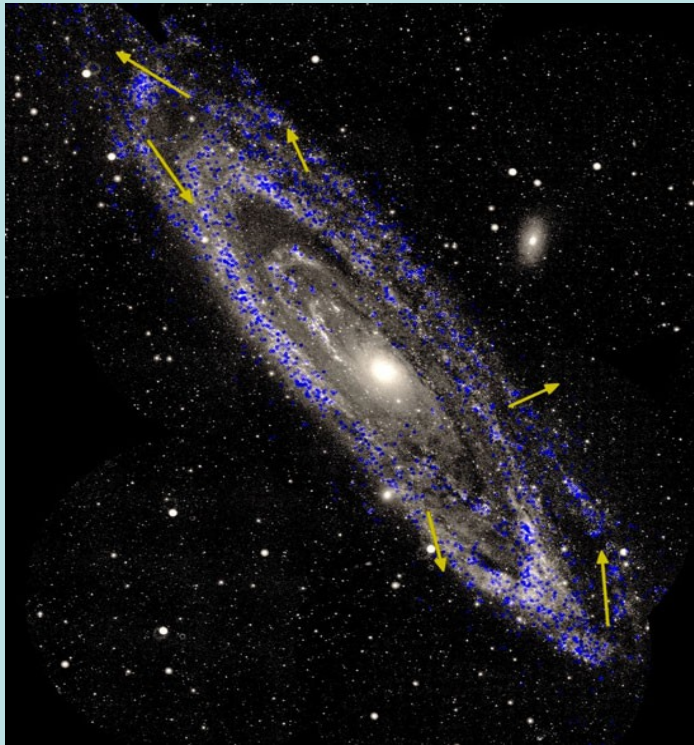


M33 – ESA/Gaia/DPAC/IEEC-UB



a Nagy-Magellán-felhő rotációja

# A Gaia DR2 eredményeiből

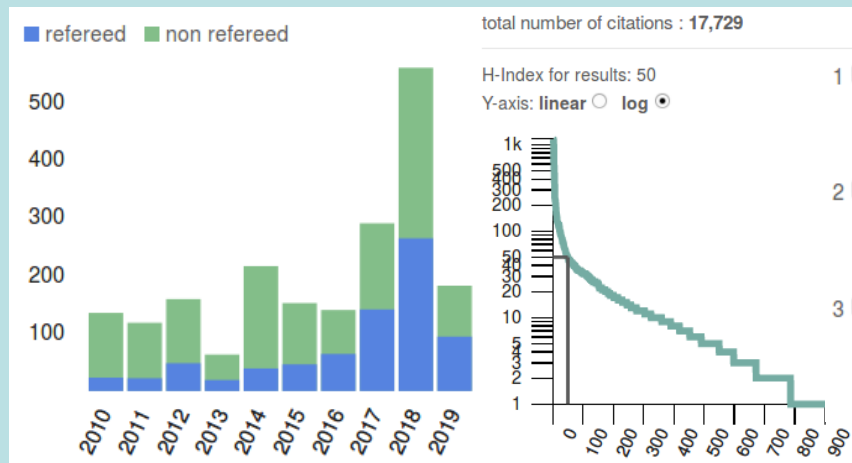
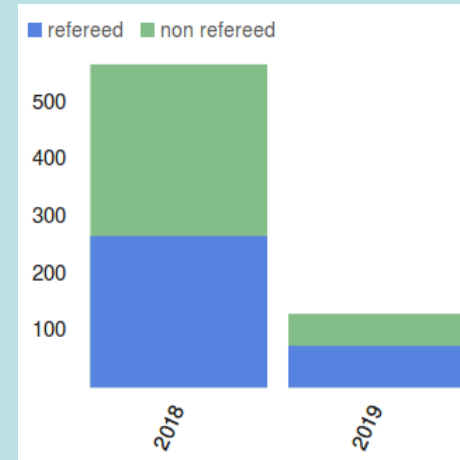
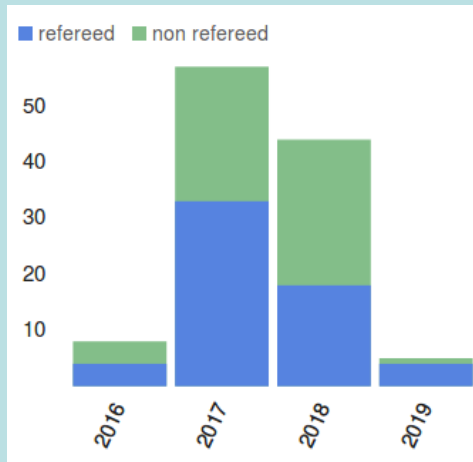


Van der Marel et al. (2019)

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.

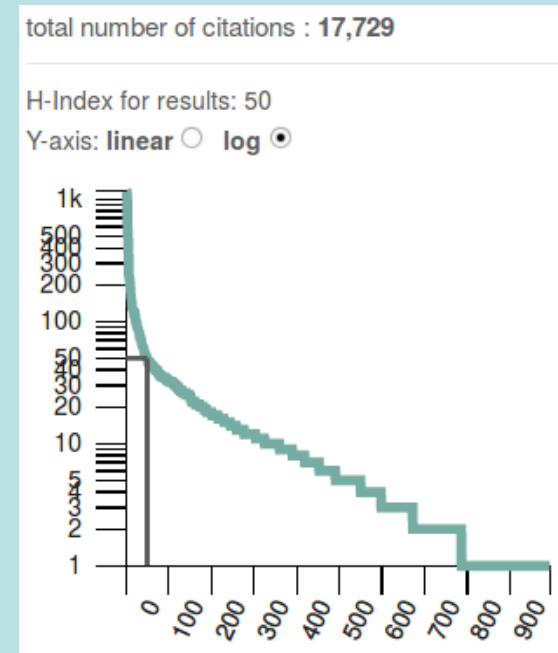
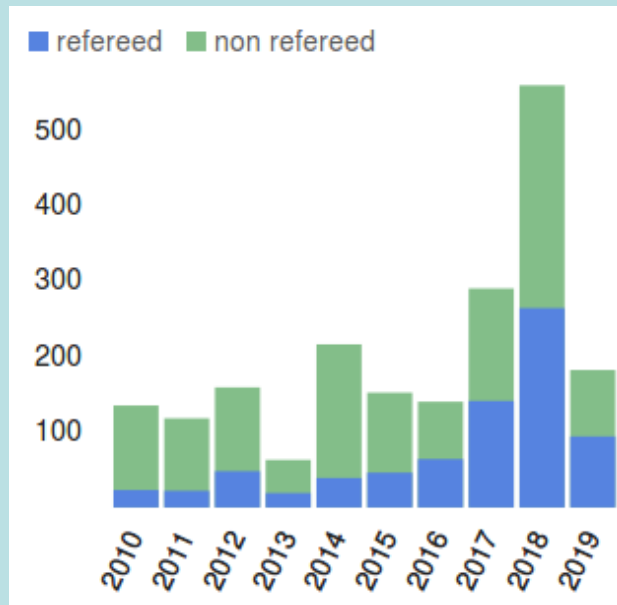
# A Gaia DR1 és DR2 hatása



Rank	Title	Year	Cited
1	<a href="#">2016A&amp;A...595A...1G</a> <b>The Gaia mission</b> Gaia Collaboration; Prusti, T.; de Bruijne, J. H. J. <i>and 623 more</i>	2016/11	cited: 1162
2	<a href="#">2018A&amp;A...616A...1G</a> <b>Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties</b> Gaia Collaboration; Brown, A. G. A.; Vallenari, A. <i>and 451 more</i>	2018/08	cited: 1154
3	<a href="#">2016A&amp;A...595A...2G</a> <b>Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties</b> Gaia Collaboration; Brown, A. G. A.; Vallenari, A. <i>and 589 more</i>	2016/11	cited: 1033

# Gaia-cikkek a szakirodalomban

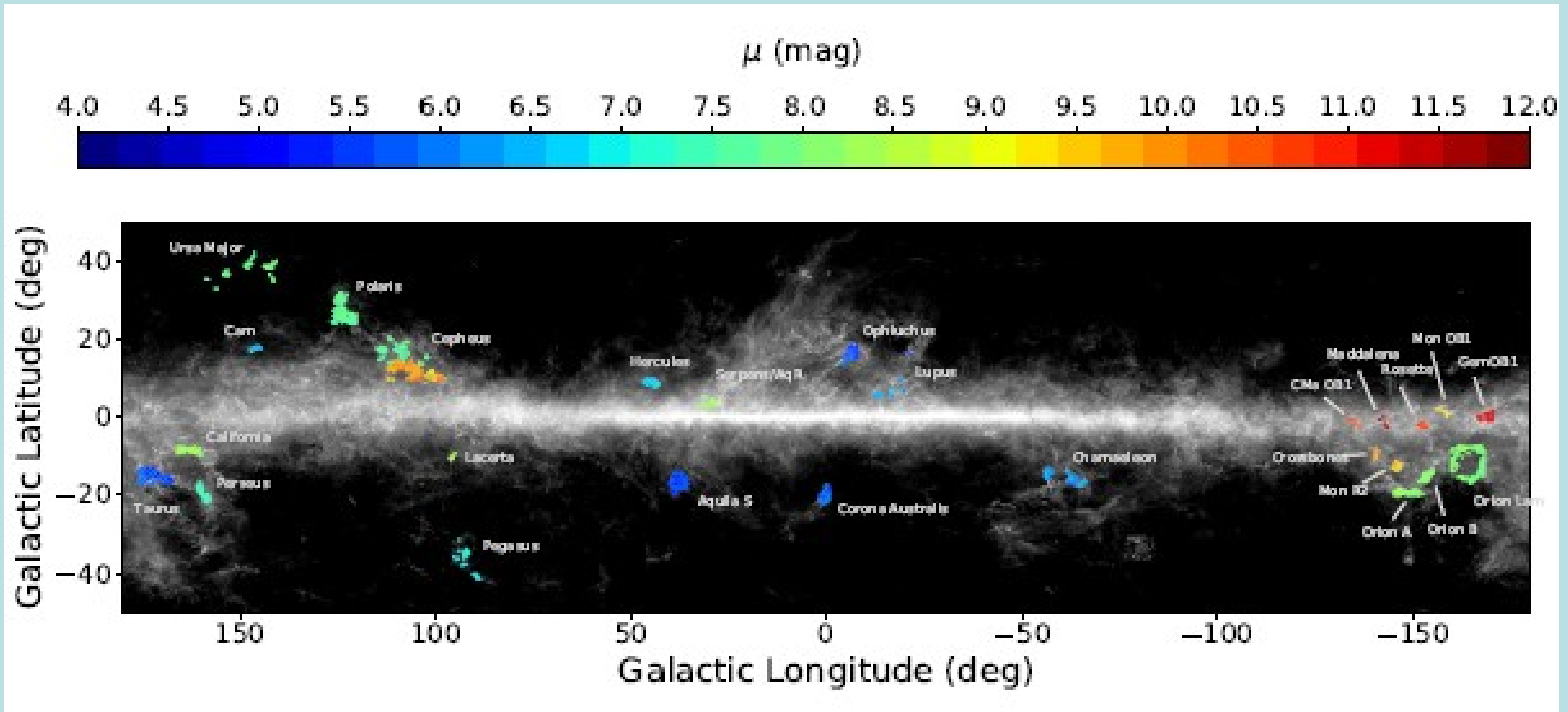
2019.  
márciusig



A legtöbb  
hivatkozást  
kapott  
cikkek

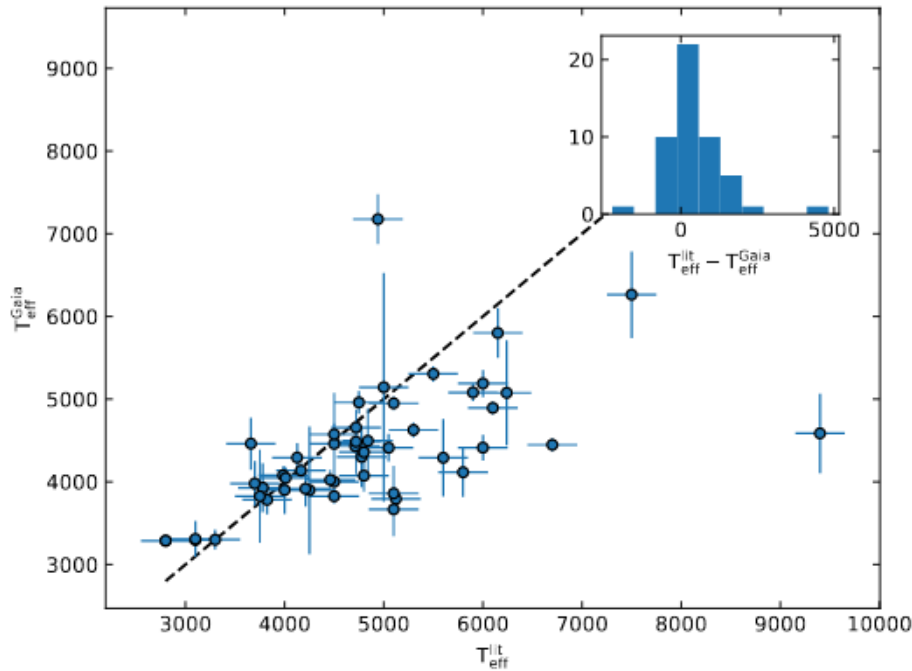
1	<input type="checkbox"/>	2016A&A...595A...1G <a href="#">The Gaia mission</a> Gaia Collaboration; Prusti, T.; de Bruijne, J. H. J. <i>and 623 more</i>	2016/11	cited: 1162			
2	<input type="checkbox"/>	2018A&A...616A...1G <a href="#">Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties</a> Gaia Collaboration; Brown, A. G. A.; Vallenari, A. <i>and 451 more</i>	2018/08	cited: 1154			
3	<input type="checkbox"/>	2016A&A...595A...2G <a href="#">Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties</a> Gaia Collaboration; Brown, A. G. A.; Vallenari, A. <i>and 589 more</i>	2016/11	cited: 1033			

# A Gaia DR2 eredményeiből

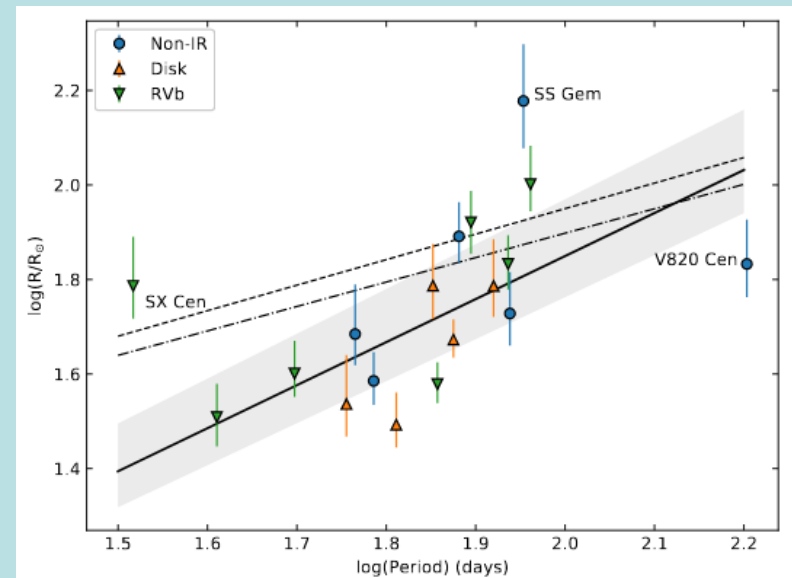
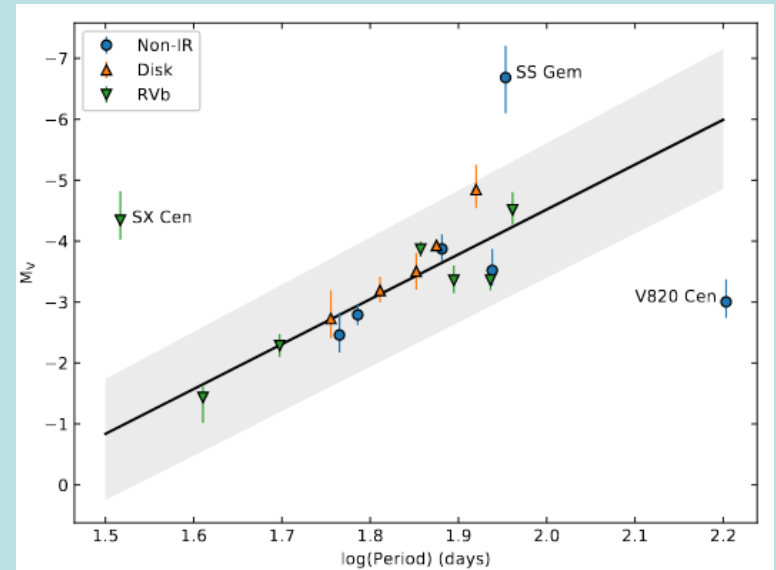


Tejútrendszerbeli molekulafelhők távolságmodulusa  
(Zucker et al., 2019)

# 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



A tejútrendszerbeli RV Tauri típusú csillagok: instabilitási sáv, P-L reláció, P-R reláció (Bódi & Kiss, 2019)

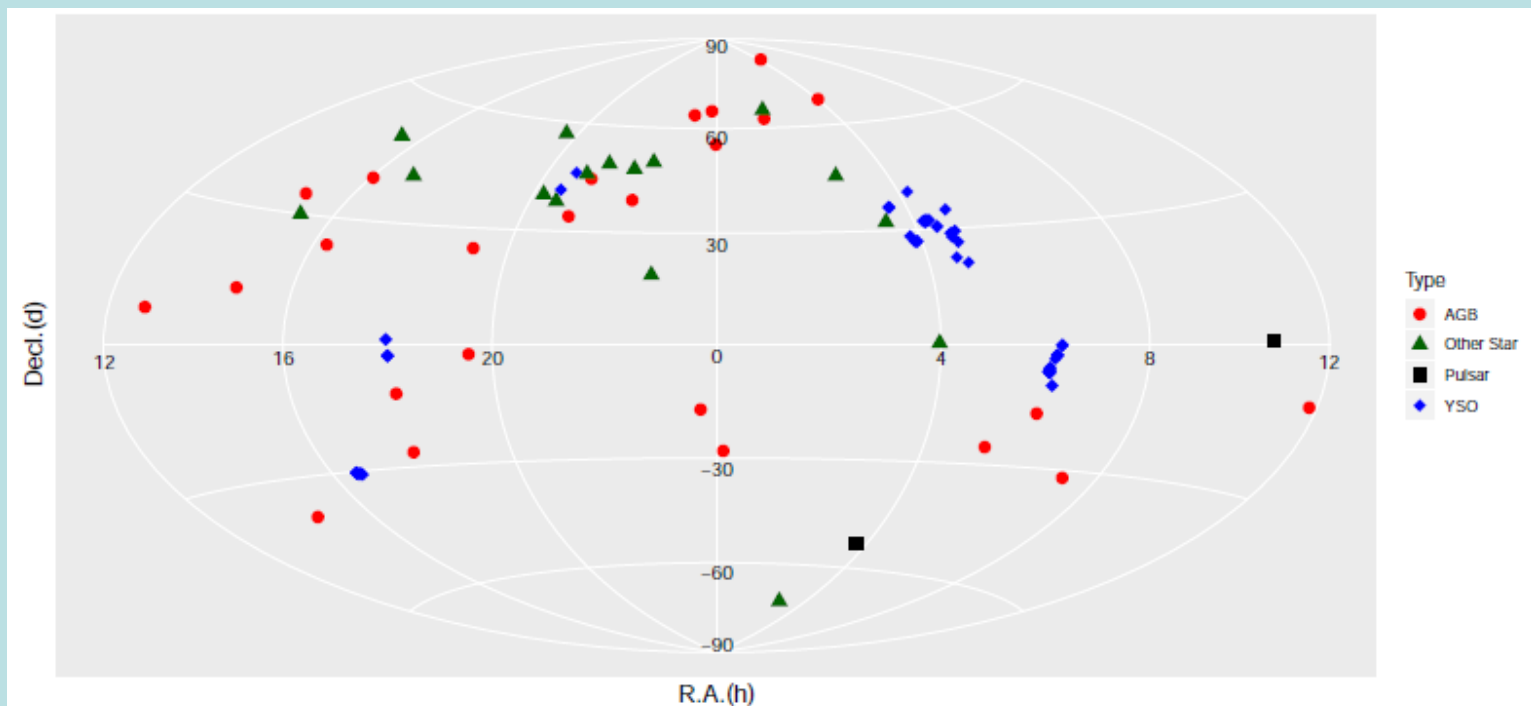


# Azért nem árt az óvatosság...

VLBI-vel mért parallaxisokkal összevetve a Gaia DR2-ben közölt parallaxisokban  $-75 \pm 29$  mikroívmásodperc szisztematikus hibát találtak.

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>



# Jöhet a Gaia DR3 – és a folytatás

Az eredetileg tervezett 5 éves mérési sorozat 2019 nyarán véget ér, de a Gaia már 2020 végéig megkapta az ESA-támogatást. Sőt ígéret van a mérési program 2022 végéig történő támogatására (pályázni később kell erre).

A végső Gaia-katalógus ezért 2024-nél korábban nem várható.

Az adatközlések eddig is késtek a tervezetthez képest, de a Gaia DPAC csak biztos(nak tűnő) adatokat akar nyilvánosságra hozni. A DR3-at ezért két részre is bontották, hogy a késés ne fokozódjon.

Gaia EDR3 (early release): 2020. III. negyedév, teljes asztrometria és fotometria.

Gaia DR3: 2021. II. félév, 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)
- asztrofizikai információk (a színek alapján)
- a kettős és többszörös csillagokra vonatkozóan külön asztrometriai információ

# 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 $\mu$ as (9)	Scanning (2)	1989–1993
Tycho		< 11.5	2.5 M	7000 $\mu$ as (9)		
AIST-Struve	Russia	< 15	> 4 M	1000 $\mu$ as (14)	Scanning (4)	Not developed
Roemer	ESA	< 18	400 M	140 $\mu$ as (14)	Scanning (2)	Superseded
Roemer+		< 20	1000 M	35 $\mu$ as (14)	Scanning (2)	Part of Gaia
GAIA (*)	ESA	< 15	50 M	6 $\mu$ as (14)	Scanning (3)	Now Gaia
Gaia		6–20	1000 M	15 $\mu$ as (14)	Scanning (2)	Launch 2013
DIVA (*)	Germany	< 15	35 M	900 $\mu$ as (13)	Scanning (2)	Cancelled 2003
FAME	USA	5–15	40 M	50 $\mu$ as (9)	Scanning (2)	Cancelled 2002

HST FGS:  $3 < V < 17$  magnitúdó, 0,2 ezredívmásodperc (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)

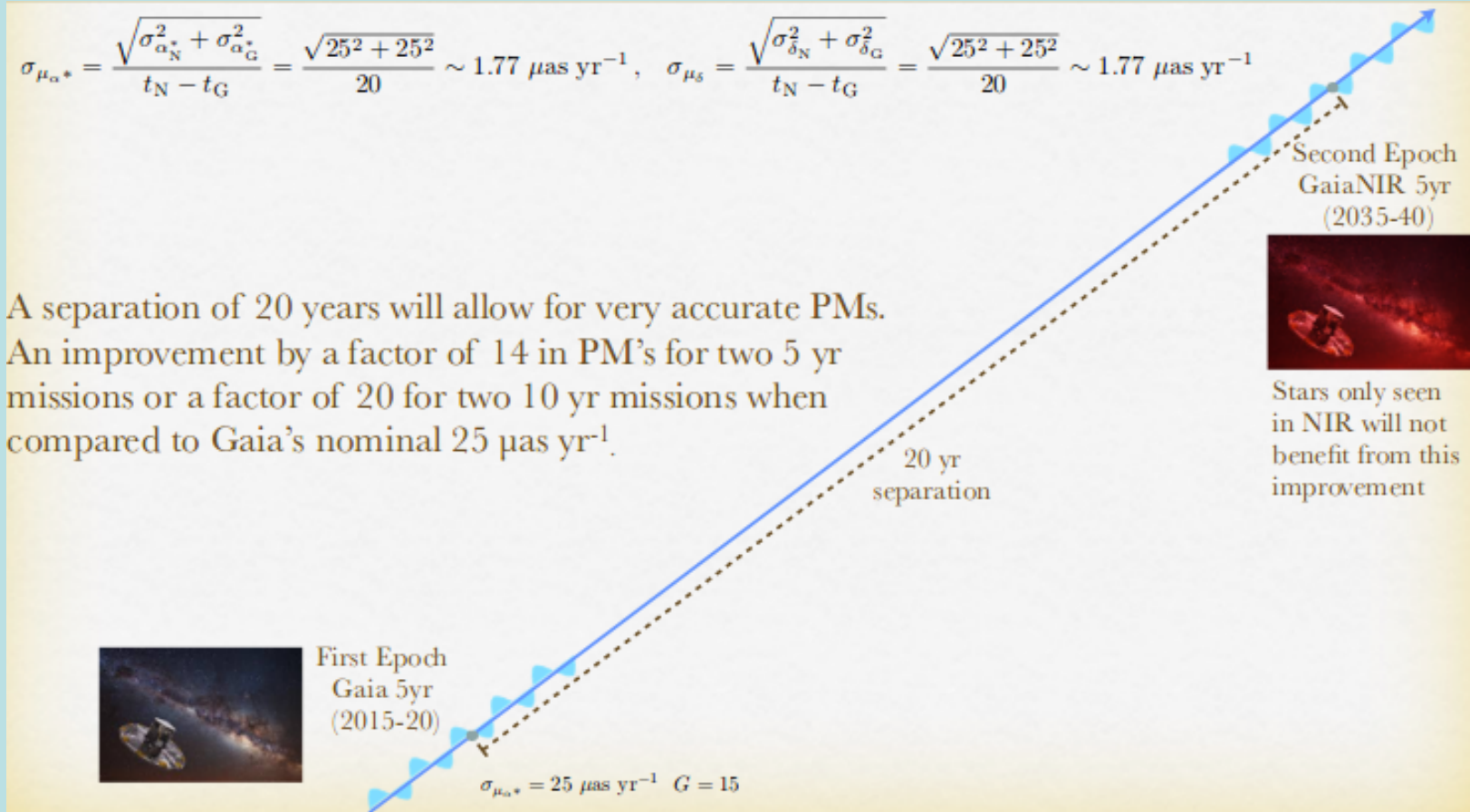
JASMINE (Japan Astrometric Satellite for **IN**frared Exploration): 900 nm-en, 3 lépésben:

Nano-JASMINE (2011, de még a Földön van, 5 cm átmérő, 35 kg, 3 mas)

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

JASMINE (még nem hagyták jóvá, 80 cm, 1500 kg, 10 mas 200  $\square^\circ$ -ról)

# Tervezett asztrometriai űrprojekt



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

# Még egy érdekesség

OGLE-2005-SMC-001 mikrolencse-jelenség egyidejű földi és Spitzer-mérése. Parallaxismeghatározást is végeztek. De a lencse kettőscsillag volt, az analízist elbonyolítva.

