



# **Linnunradan rakenne**

## **FYS2053, 5 op, syksy 2022**

D123 Exactum

**Luento 7: Linnunrata ESA:n GAIA-satelliitin  
silmin, 17/10/2022**



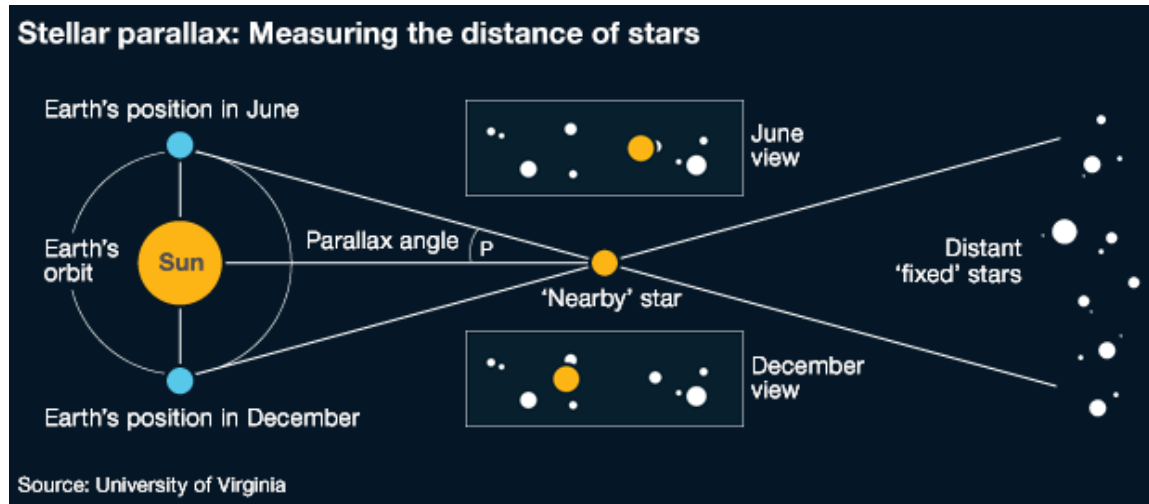
# Tällä luennolla käsitellään

---

1. Parallaksi-etäisyysmittauksia avaruudesta käsin.
2. ESA:n GAIA-satelliitin havaintotavoitteet ja mittaustarkkuus. Lisäksi vertaillaan GAIA:a aikaisempiin havaintolaitteisiin.
3. GAIA:n havaintomenetelmät ja laitteisto. Miksi GAIA on niin mullistava havaintolaite?
4. GAIA:n ensimmäiset tulokset. Valittuja tiede-kohokohtia viimeisiltä vuosilta. GAIA:n merkitys Linnunrata tutkimukselle.
5. GAIA:n data arkisto. Miten GAIA:n tuloksia voi käydä itse tutkimassa ESA:n arkistoissa.



# 7.1 Parallaksimittaukset avaruudesta

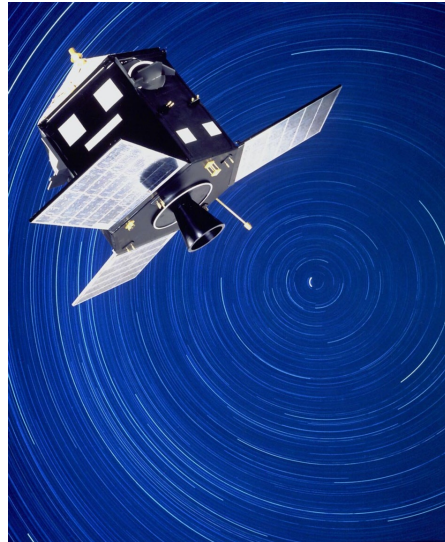


- Tähtitieteessä kohteen etäisyys on täysin keskeisessä asemassa, koska sen avulla voimme arvioida kohteen todellista luminositeettia ja täten ymmärtää paremmin kohteessa vallitsevia astrofysikaalisia olosuhteita.
- Ilmakehä rajoittaa voimakkaasti maanpäällisiä parallaksimittauksia ja tyypilliset maanpääälliset tarkkuudet ovat vain luokkaa  $\sim 0.05\text{-}0.1''$  ( $\sim 10\text{-}20$  pc etäisyys).
- Parallaksimittaukset täytyy tehdä avaruudessa, mikäli halutaan mitata kaukaisempia kohteita suurella tarkkuudella.



# ESA Hipparcos (1989-1993)

- ESA:n Hipparcos-satelliitti oli ensimmäinen missio, joka mittasi tähtien parallakseja avaruudesta käsin.
- Hipparcos pyrki tekemään hyvin suuren tarkkuuden mittauksia ~118 000 tähdelle (Hipparcos-luettelo) ja vähän pienemmän tarkkuuden mittauksia noin miljoonalle tähdelle (Tycho-luettelo).
- Yleinen tarkkuus oli millikaarisekuntien luokkaa, riippuen kohteen kirkkaudesta.



Hipparcos	
Targets:	118,000 stars
Magnitude limit:	12.5
Astrometric resolution:	0.001 arcsecond
Photometric resolution:	0.002 magnitude
Tycho	
Targets:	1 million stars
Magnitude limit:	11.5
Astrometric resolution:	0.025 arcsecond
Photometric resolution:	0.06 magnitude

One arcsecond is  $1/3,600$  of  $1^\circ$  and is the typical resolution of ordinary ground-based visible-light telescopes. One magnitude corresponds to a 2.5-fold change in brightness. For historical reasons, smaller magnitude numbers indicate brighter stars.



## 7.2 ESA:n GAIA satelliitti

- GAIA satelliitti laukaistiin 17.12.2013 ja sillä on yli 5 vuoden ohjeellinen toiminta-aika, sijaitsee L2 pisteessä. Näillä näkymin arvioitu toiminta-aika jatkuu vuoteen 2025.
- GAIA on mullistava havainto-laite ja sen tarkoitus on mitata yli miljardin tähden ( $\approx 1\%$  kaikista Linnunradan tähdistä) tarkat paikat, etäisyydet, ominaisliikkeet sekä radiaalinopeudet (pienemmälle määrälle tähtiä).
- Ensimmäinen tarkka 3D kartta Linnunradasta, myös lähigalaksit (esim. Magellanin pilvet) mukana.



Havainnekuva ESA:n GAIA-satelliitista avaruudessa.



# GAIA:n havaintotavoitteet

- GAIA astrometria: ( $G < 20$  mag, toteutunut  $G \sim 21$ ): ( $G$  on leveä kaista:  $\sim 400$ - $1000$  nm)
  - Havaintoraja noin  $\sim 20$  mag  $\Rightarrow 10^9$  tähteä
  - Tarkkuus: 26 mikrokaarisekuntia  $G=15$  mag (Hipparcos: 1 millikaarisekunti 9 mag)
- GAIA fotometria ( $G < 20$  mag):
  - Astrofysikaalinen diagnostiikka (fotometria eri kaistoissa) + tähtien värit  
 $\Rightarrow \Delta T_{\text{eff}} \sim 100$  K, tähtien painovoimakiihtyvyydet mittaukset, metallipitoisuudet  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0.2$  dex tarkkuudella, sekä tähtien ekstinktio.
- Radiaalinopeudet ( $G_{\text{RVS}} < 16$  mag):
  - Tarkkuus:  $\sim 15$  km s $^{-1}$  tähdille joilla  $G_{\text{RVS}}=16$  mag.
  - Sovellukset:
    - Avaruusnopeuden kolmas komponentti, tähtien kiihtyvyydet.
    - Dynamiikka, tähtipopulaatiot, kaksoistähdet.
    - Tarkemmat spektrit  $G_{\text{RVS}} < 12$  mag: metallipitoisuudet, rotaatio.
  - Periaate: Spektrihavainnot kalsiumin Ca-triplet (845-872 nm) viivoista, resoluutio  $R = \sim 10,800$ .



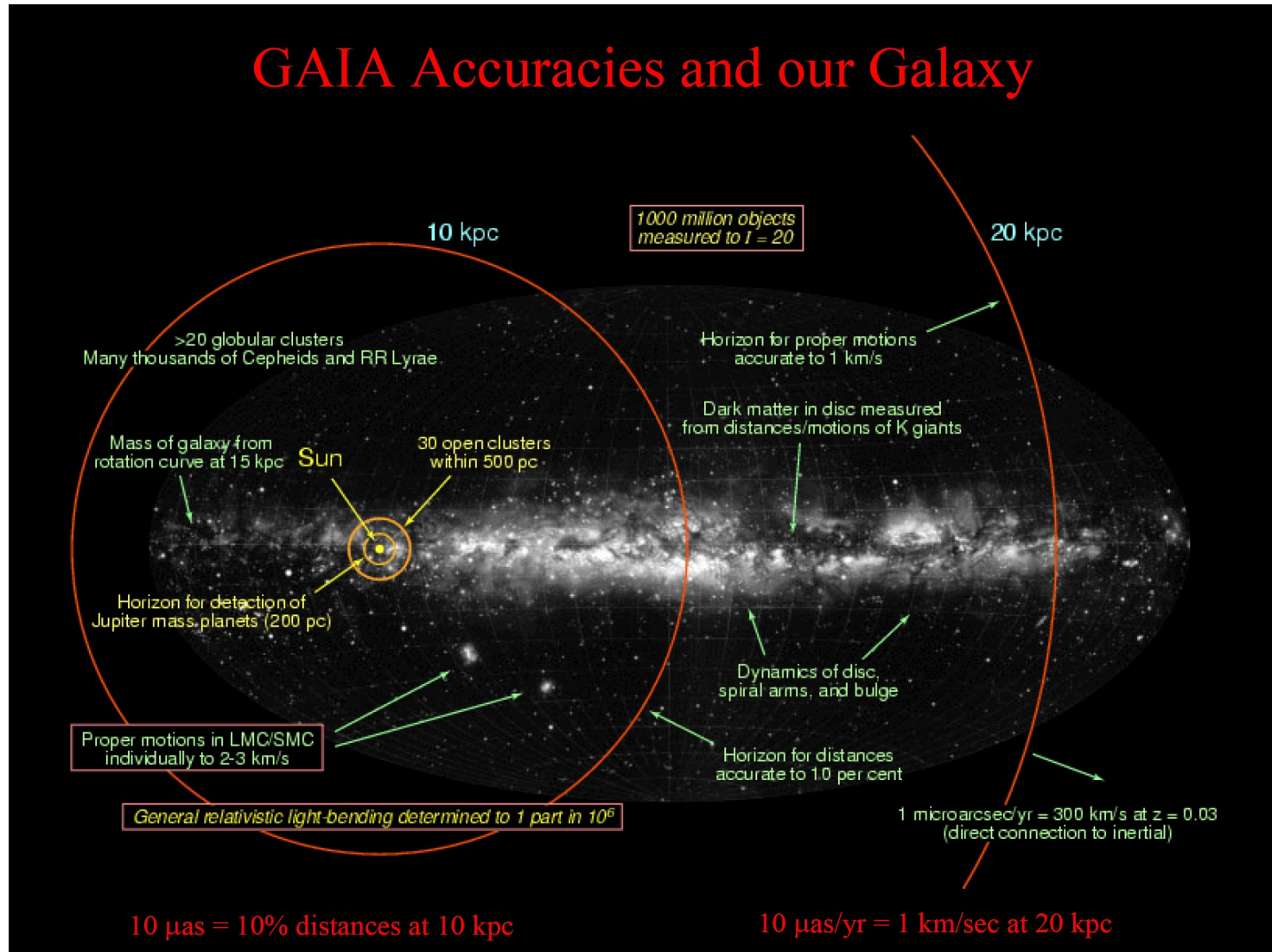
# GAIA vs. Hipparcos

	Hipparcos	Gaia
Magnitude limit	12 mag	20 mag
Completeness	7.3 – 9.0 mag	20 mag
Bright limit	0 mag	3 mag (assessment for brighter stars ongoing)
Number of objects	120,000	47 million to G = 15 mag 360 million to G = 18 mag 1192 million to G = 20 mag
Effective distance limit	1 kpc	50 kpc
Quasars	1 (3C 273)	500,000
Galaxies	None	1,000,000
Accuracy	1 milliarcsec	7 $\mu$ arcsec at G = 10 mag 26 $\mu$ arcsec at G = 15 mag 600 $\mu$ arcsec at G = 20 mag
Photometry	2-colour (B and V)	Low-res. spectra to G = 20 mag
Radial velocity	None	15 km s <sup>-1</sup> to G <sub>RVS</sub> = 16 mag
Observing	Pre-selected	Complete and unbiased



# GAIA:n tarkkuus Linnunradassa

## GAIA Accuracies and our Galaxy







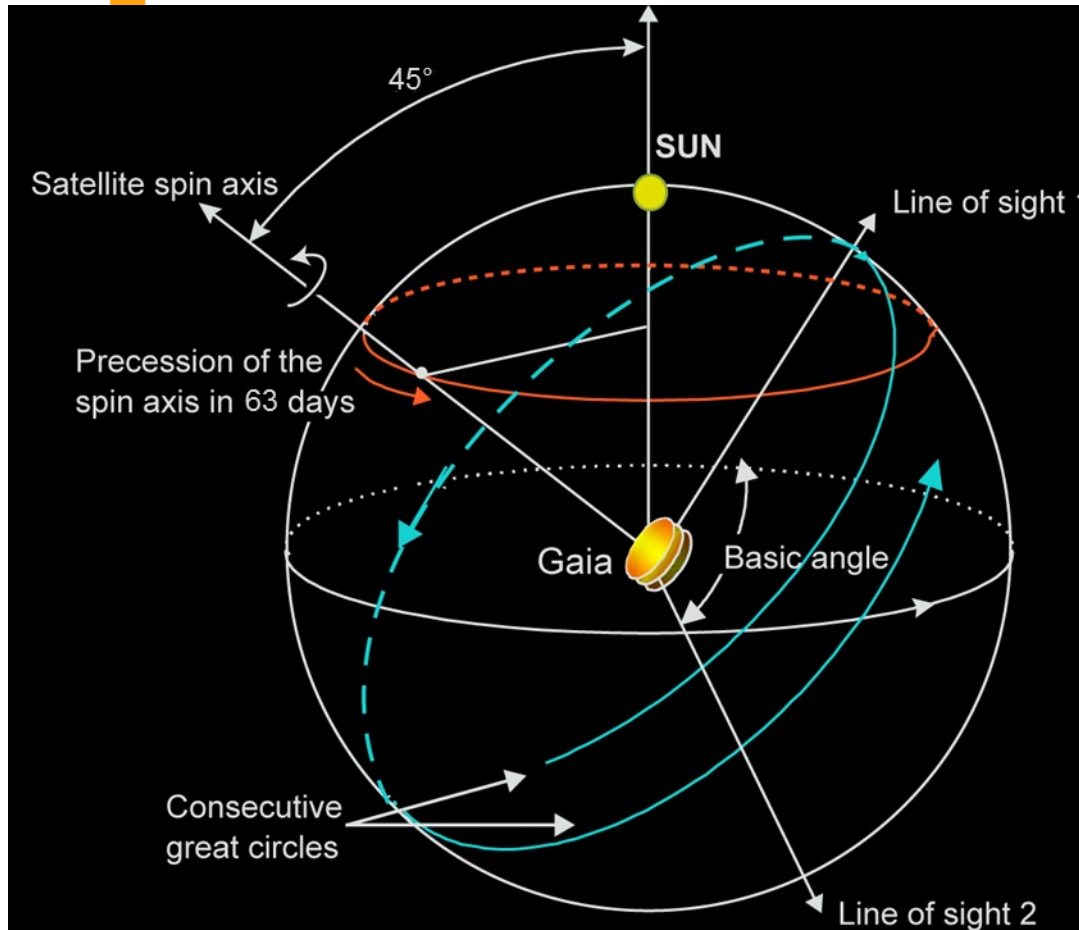
## 7.3 GAIA:n Havaintomenetelmät

- GAIA koostuu kahdesta noin metrin kokoisesta kaukoputkesta, jotka havaitsevat taivasta kahdessa eri suunnassa, joiden väli on kiinnitetty kulmaan  $106.5^\circ$ .
- Havaintoinstrumentti koostuu 106:sta CCD kamerasta, yhteensä 937.8 megapikseliä.
- Jokaista kohdetta havaitaan noin 70 kertaa 5 vuoden aikana. Missiota on jatkettu noin ~5 vuodella, mittausten määrä tuplaantuu noin ~140 jokaista kohdetta kohti.





# GAIA: Taivaan skannaus



Spin axis       $45^\circ$  to Sun  
Scan rate:     $60 \text{ arcsec s}^{-1}$   
Spin period:    $6 \text{ hours}$

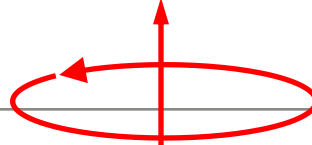
- GAIA mittaa kahden eri kohteen suhteellisen aseman taivaalla erittäin suurella tarkkuudella.
- Lisäksi GAIA mittaa noin 33 miljoonan tähden radiaaliset nopeudet ja tarkemmat kemialliset koostumukset noin 5 miljoonalle tähdelle (kirkkaat tähdet).



# GAIA:n tekniset tiedot I – Havaintolaitteet

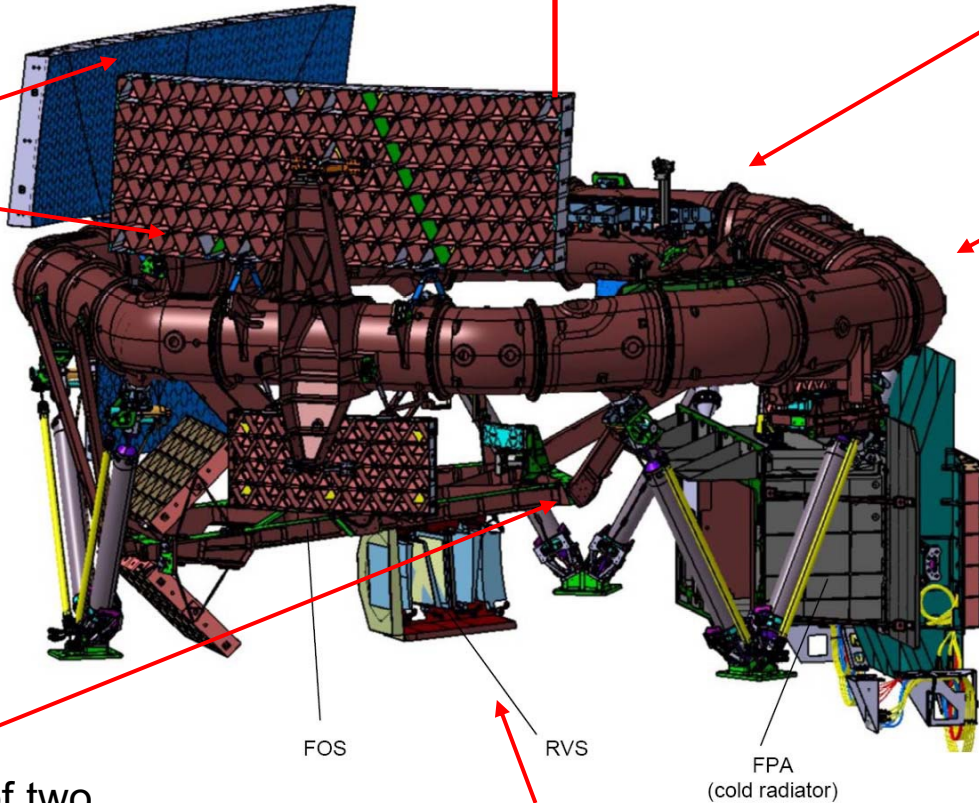
Rotation axis (6h)

Basic-Angle-Monitoring (BAM)  
system



Two SiC primary  
mirrors  
 $1.45 \times 0.50 \text{ m}^2$   
at  $106.5^\circ$

SiC torus  
(optical bench)



Combined  
Focal-Plane  
Assembly  
(FPA) with  
106 CCD  
detectors

Superposition of two  
Fields of View (FoV)

FOS

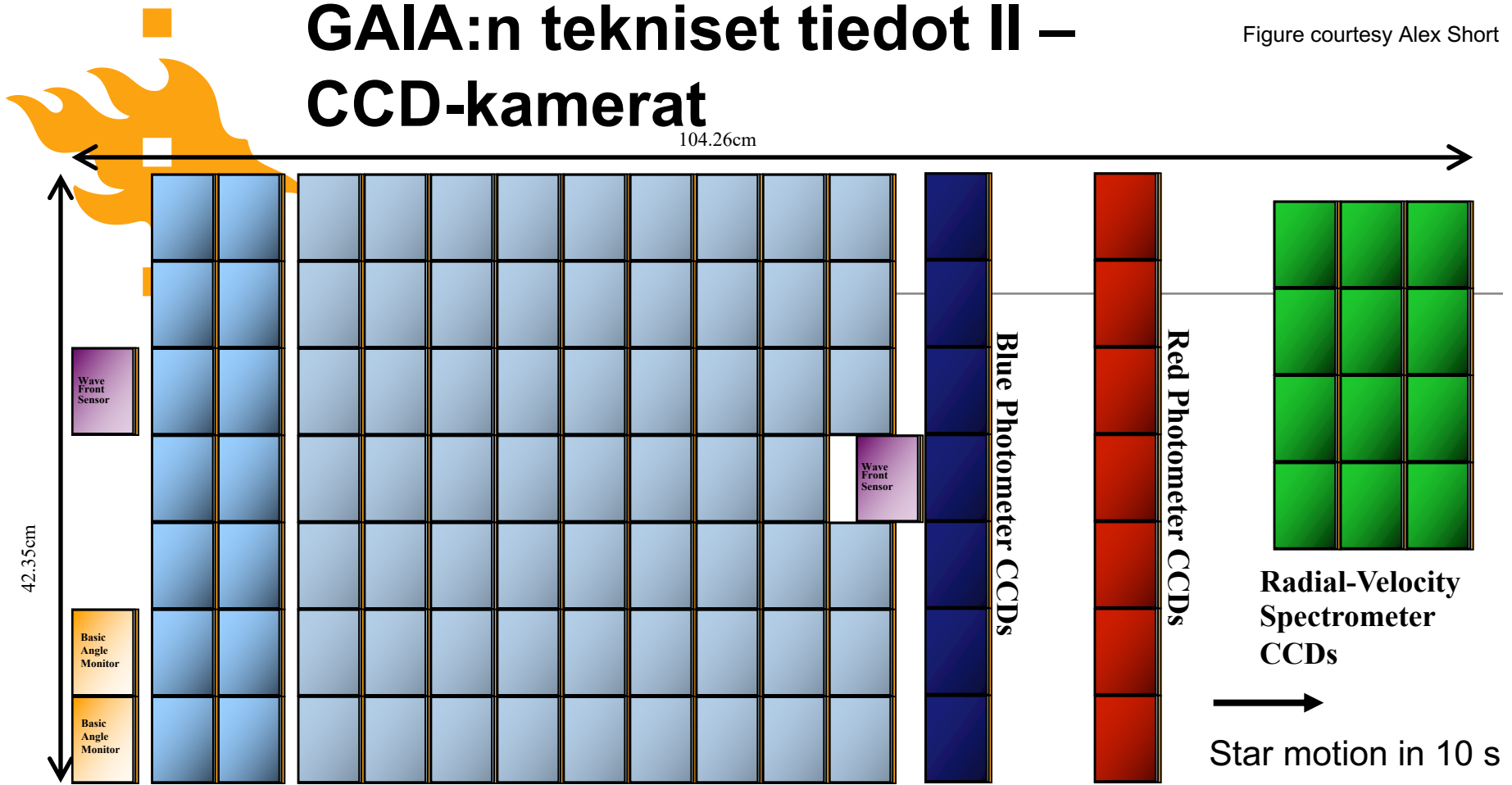
RVS

FPA  
(cold radiator)

Radial-Velocity  
Spectrometer (RVS)

# GAIAn tekniset tiedot II – CCD-kamerat

Figure courtesy Alex Short



**Sky Mapper  
CCDs**

**Astrometric Field  
CCDs**

**Blue  
Photometer  
CCDs**

**Red  
Photometer  
CCDs**

**Radial-Velocity  
Spectrometer  
CCDs**

Star motion in 10 s

**Total field:**

- active area: 0.75 deg<sup>2</sup>
- CCDs: 14 + 62 + 14 + 12 (+ 4)
- 4500 x 1966 pixels (TDI)
- pixel size = 10 μm x 30 μm

HELSINGIN YLIOPISTO = 59 mas x 177 mas  
HELSINGFORS UNIVERSITET  
UNIVERSITY OF HELSINKI

**Sky mapper:**

- detects all objects to G=20 mag
- rejects cosmic-ray events
- field-of-view discrimination

**Astrometry:**

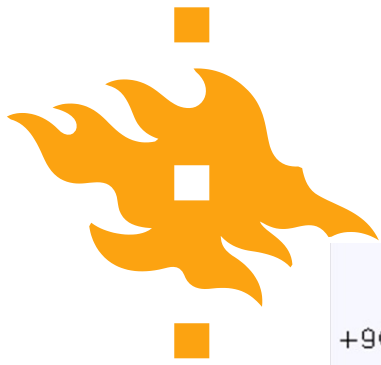
- total detection noise ~ 4 e<sup>-</sup>

**Photometry:**

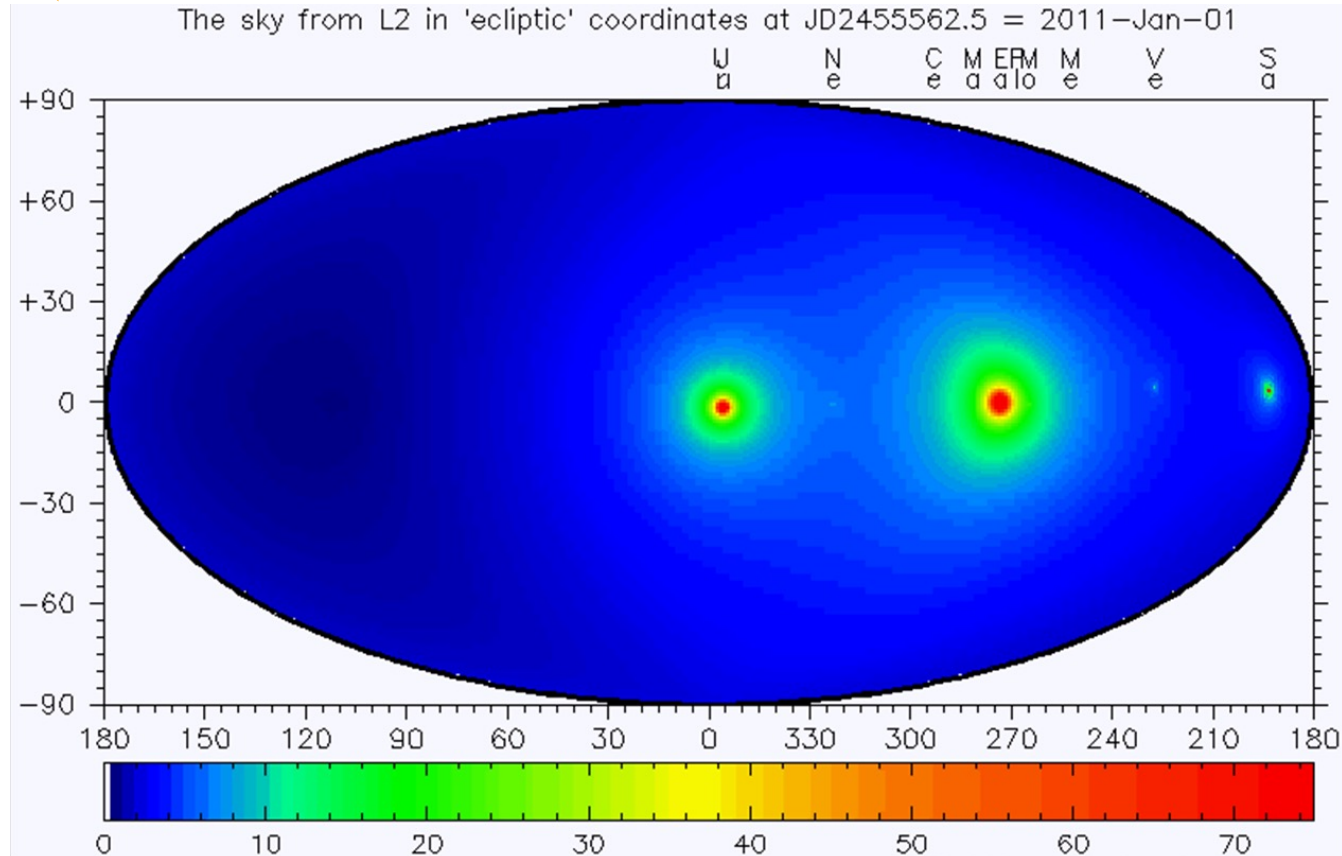
- spectro-photometer
- blue and red CCDs

**Spectroscopy:**

- high-resolution spectra
- red CCDs

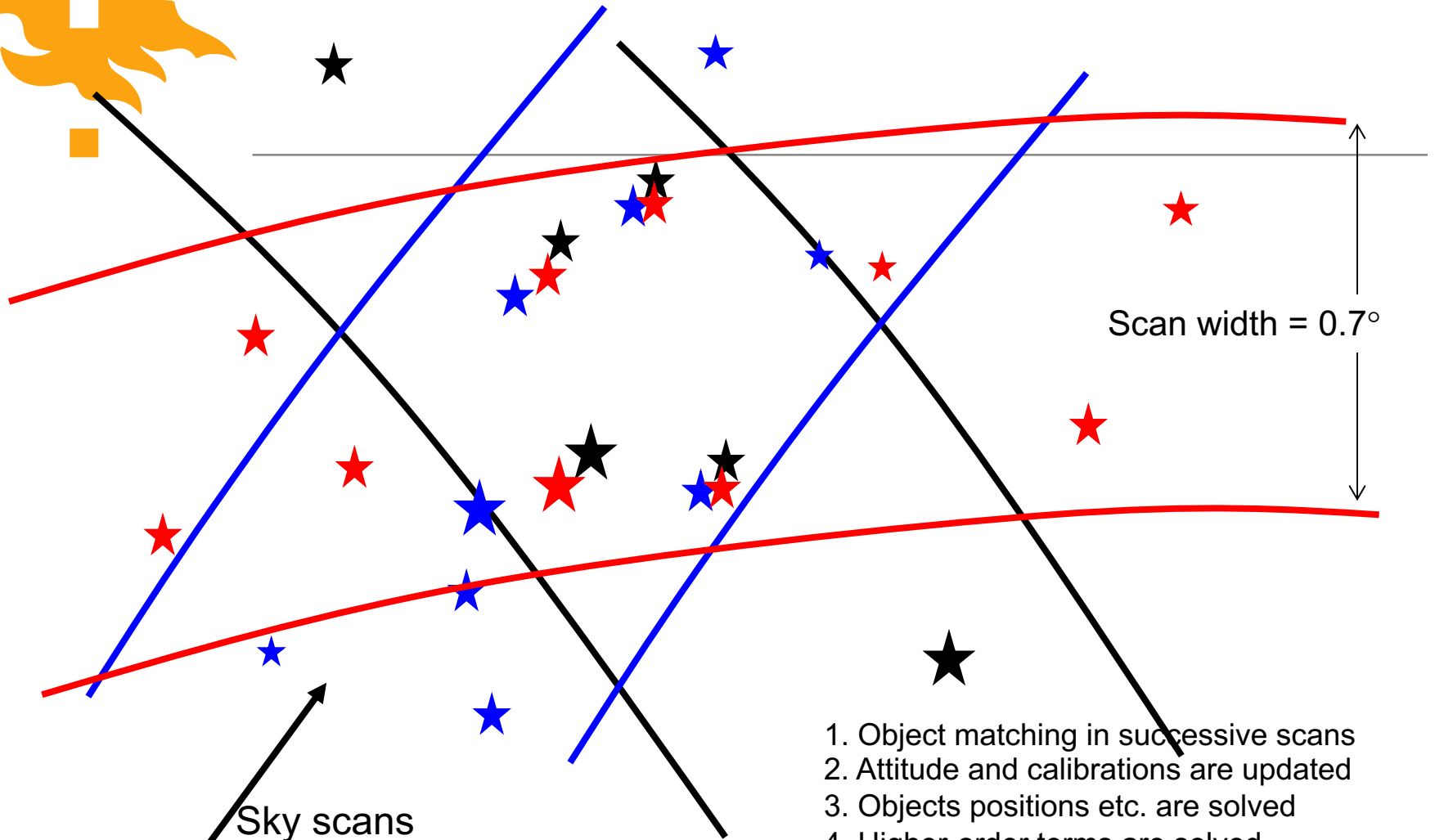


# Valon suhteellisuusteoreettinen taantumisen aurinkokunnassa



- GAIA on niin tarkka, että planeettojen aiheuttama aika-avaruuden gravitaatiokaareutuma täytyy huomioida. Auringon vaikutus poistettu (planeetat + Ceres on nimetty kahdella alkukirjaimella). Luennolla myös video aiheesta.

# GAIA Datareduktio



Sky scans  
(highest accuracy  
along scan)

1. Object matching in successive scans
2. Attitude and calibrations are updated
3. Objects positions etc. are solved
4. Higher-order terms are solved
5. More scans are added
6. System is iterated

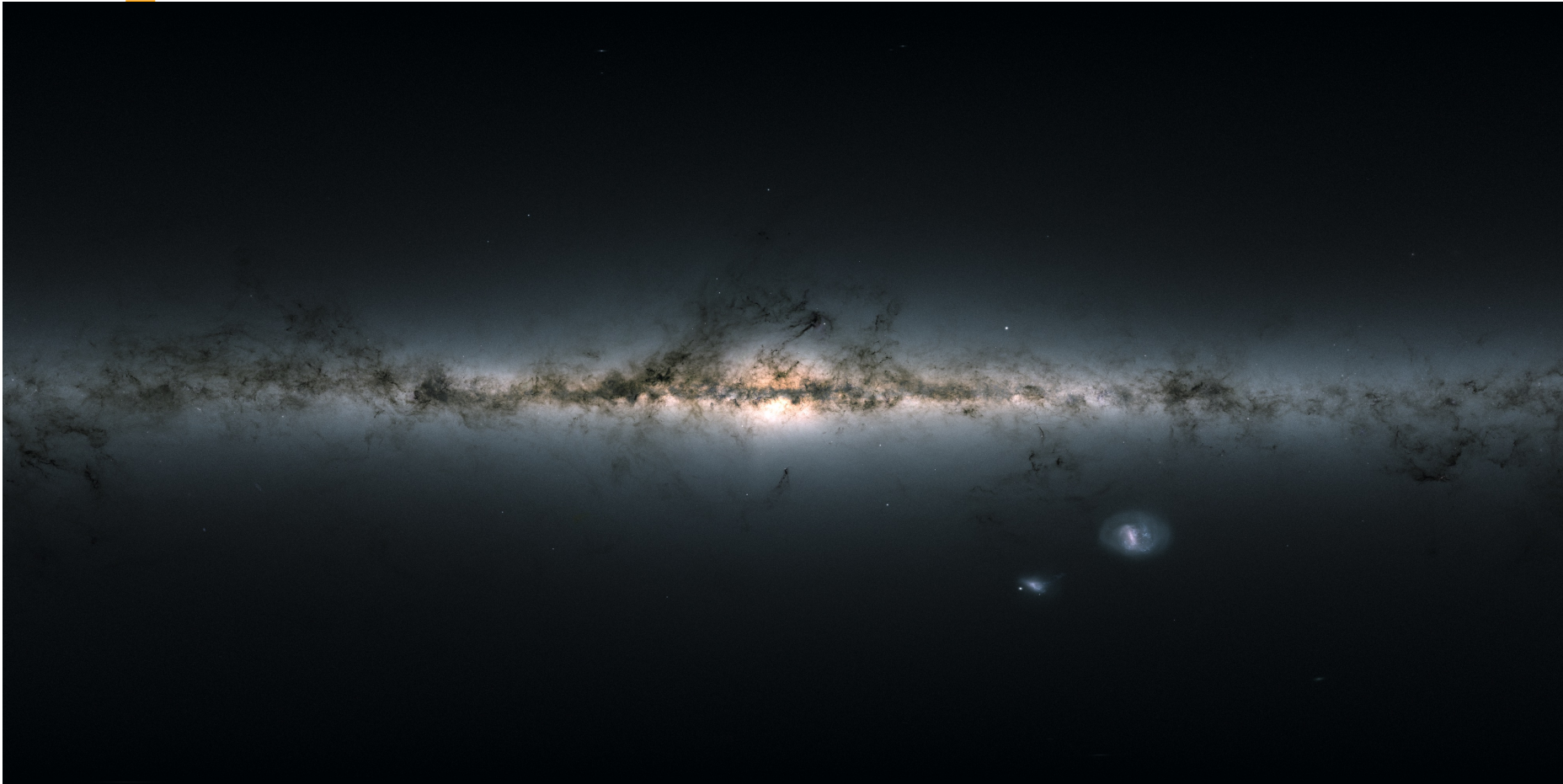


## 7.4 GAIA:n ensimmäisiä tulokset

- GAIA:n tulokset julkaistaan säännöllisissä data release-tilaisuuksissa. Ensimmäinen data release (DR1) oli jo vuonna 2016, toinen vuonna (DR2) 2018 ja kolmas vuonna 2020 (early DR3) ja varsinainen koko data (DR3) 2022. Neljäs data release (DR4) ~2024 ja viimeinen (DR5) noin vuonna 2027.
- GAIA:n ensimmäiset tulokset julkaistiin 13.9.2016 ja ensimmäisessä kartassa oli noin 1142 miljoonan tähden paikat ja kirkkaudet. Noin kahden miljoonan tähden etäisyys määrättiin yhdistämällä havainnot Tycho-Hipparcos katalogin kanssa. Tämä oli vasta esimakua tulevasta!
- GAIA:n toinen data release julkaistiin 25.4.2018. Tässä datasetissä oli GAIA:n ensimmäiset varsinaiset tiedetulokset. Varsinkin suorat parallaksimittaukset yli 1.3 miljardille tähdelle mullistivat ymmärryksemme Linnunradan rakenteesta.
- GAIA:n DR3 tulokset julkaistiin 13.6.2022. Nyt parallaksimittauksia on jo yli 1.8 miljardille tähdelle, lisäksi tarkat spektrit ja niiden suuri lukumäärä mahdollistaa entistä tarkemmat tulokset tähtien astrofysikaalisille parametreille.



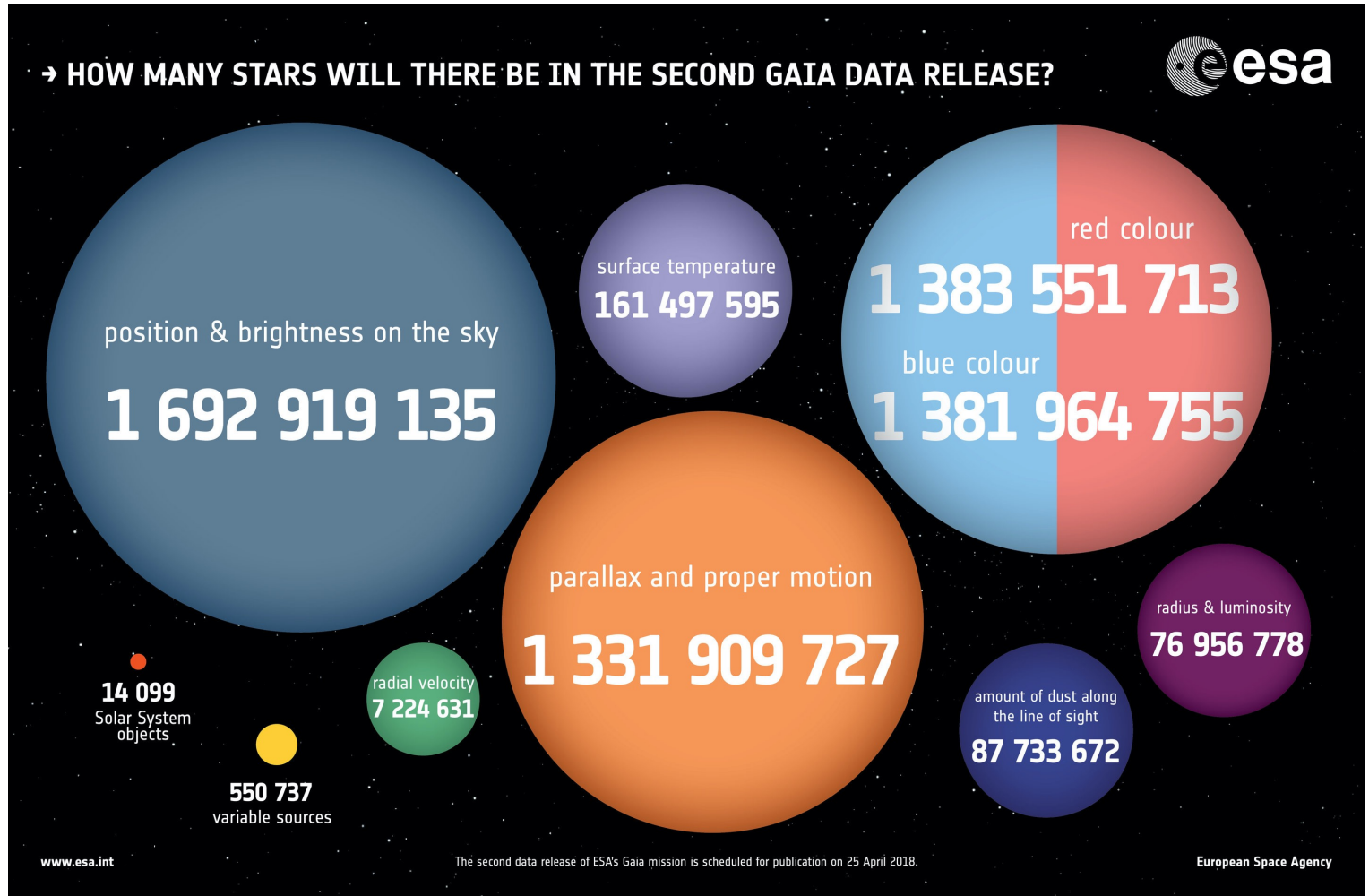
# GAIA: tarkka tähtikartta (DR1)







# GAIA n toinen data release (DR2)



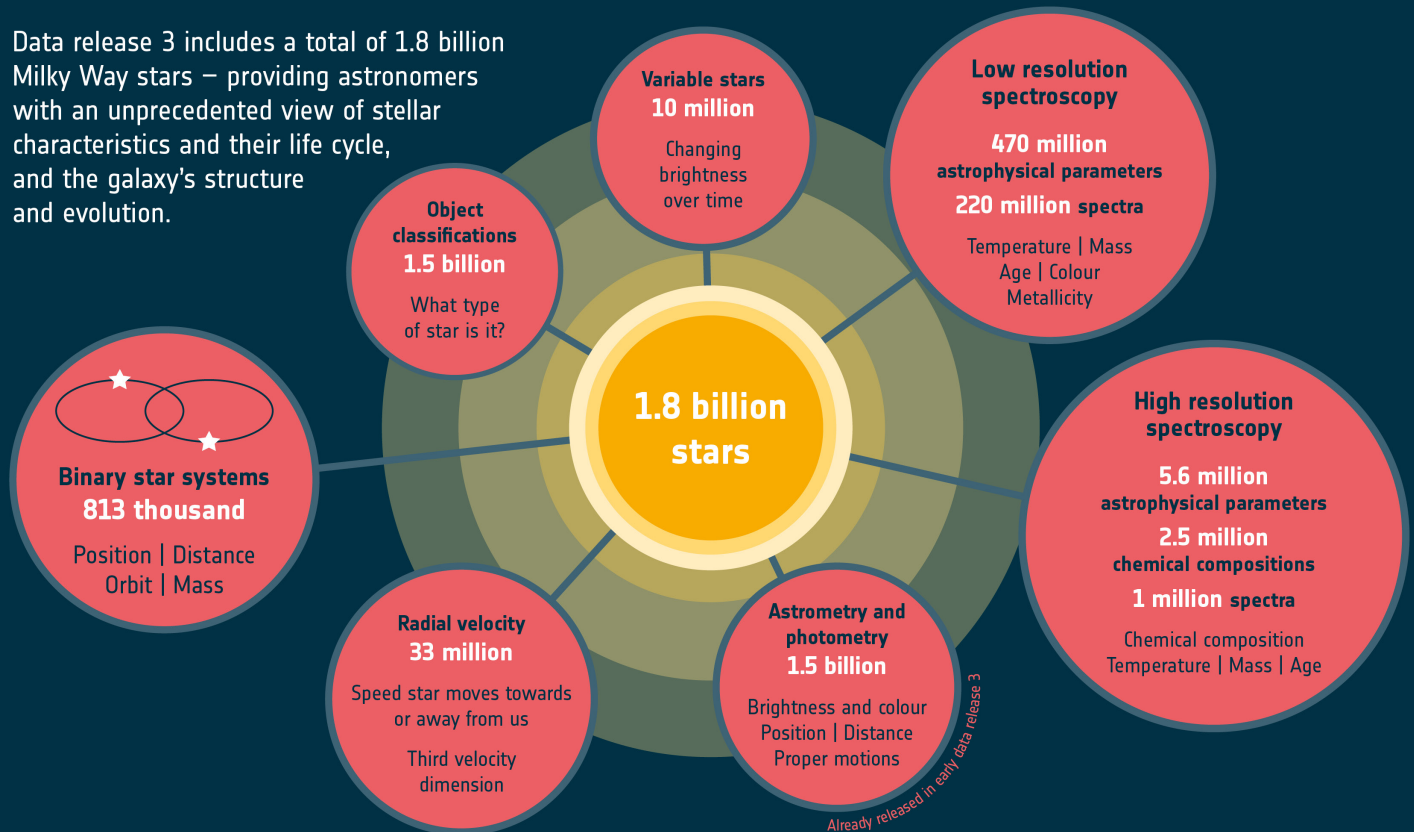


# GAIAn kolmas data release (DR3)



## 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.





# GAIA:n tuloksia: Stellaarinen astrofysiikka

1. Erittäin tarkka tähtien luminositeettien kalibrointi, esimerkiksi:
  - etäisyyksiä 1% tarkkuudella ~10 miljoonalle tähdelle 2.5 kpc etäisyydelle saakka.
  - etäisyyksiä 10% tarkkuudella ~100 miljoonalle tähdelle 25 kpc etäisyydelle saakka.
  - harvinaisten tähtityyppien havaintoja ja havaintoja tähtien ”nopeista” kehitysvaiheista
  - etäisyyden kalibrointi parallaksimittauksilla muille tärkeille etäisyyskohteille  
esim., Kefeidi-tähdet ja RR Lyrae-tähdet myös Magellanin pilvissä.
2. Tähtien fysikaaliset ominaisuudet, esimerkiksi:
  - Tarkat Hertzsprung–Russell diagrammat koko Linnunradassa
  - Auringon ympäristössä tarkat massa- ja luminositeetti-funktiot  
esim., valkoisia kääpiöitä (~400,000) ja ruskeita kääpiöitä (~500)
  - Syntyvien tähtien massat ja kirkkaudet tähtiensynty-alueilla
  - Nuorten tähtien luminositeettifunktiot.
  - Kaikkien eri tähtityyppien havaintoja ja määrittämiä koko Linnunradassa.
  - Kaikkien erityyppisten muuttuja-tähtien havaintoja ympäri Linnunrataa.

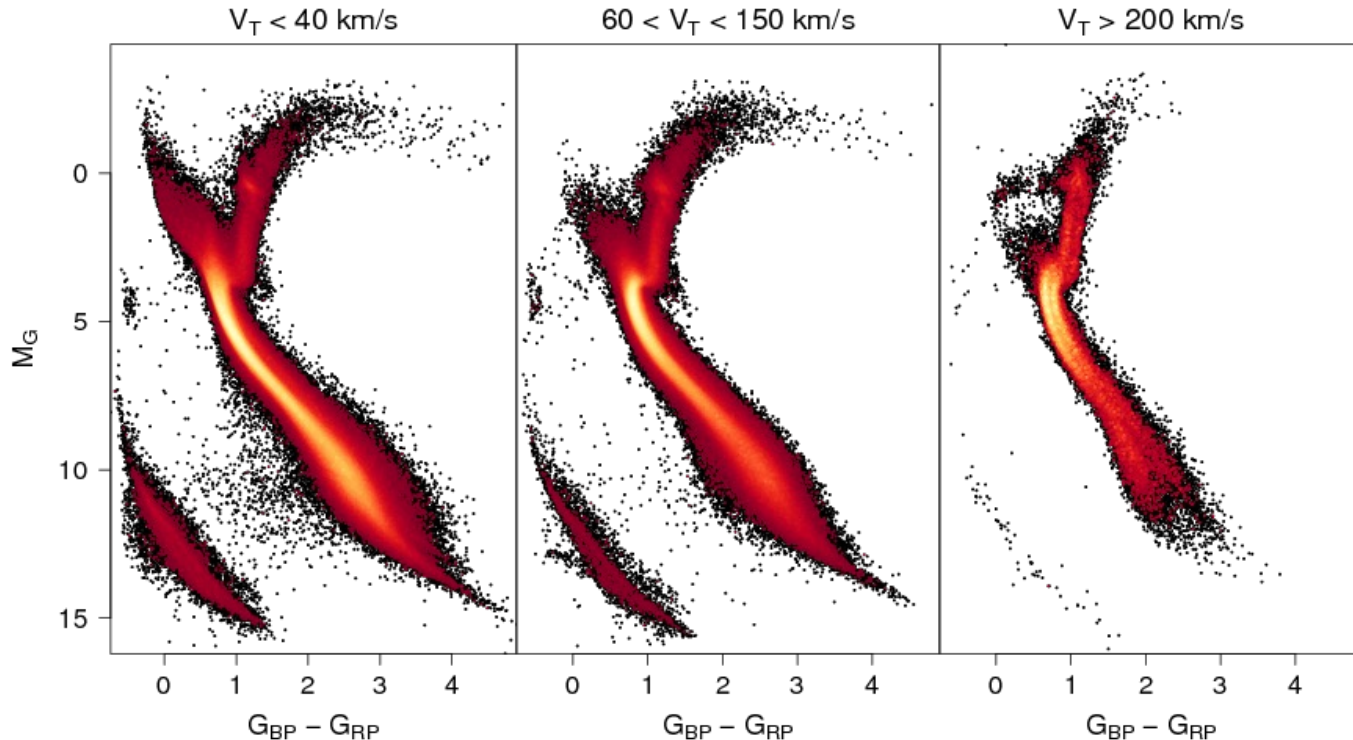


# Esimerkki: Hertzsprung-Russell diagramma

Ohut kiekko

Paksu kiekko

Halotähdet



- GAIA:lla on mahdollista tehdä ennätystarkkoja tähtikartoituksia (H-R diagrammat). Yllä tähdet on jaettu tangentialisen nopeuden suhteen, esim. suuret nopeudet ovat tyypillisiä halotähdille ja tässä jakaumassa ei nähdä juurikaan nuoria tähtiä.



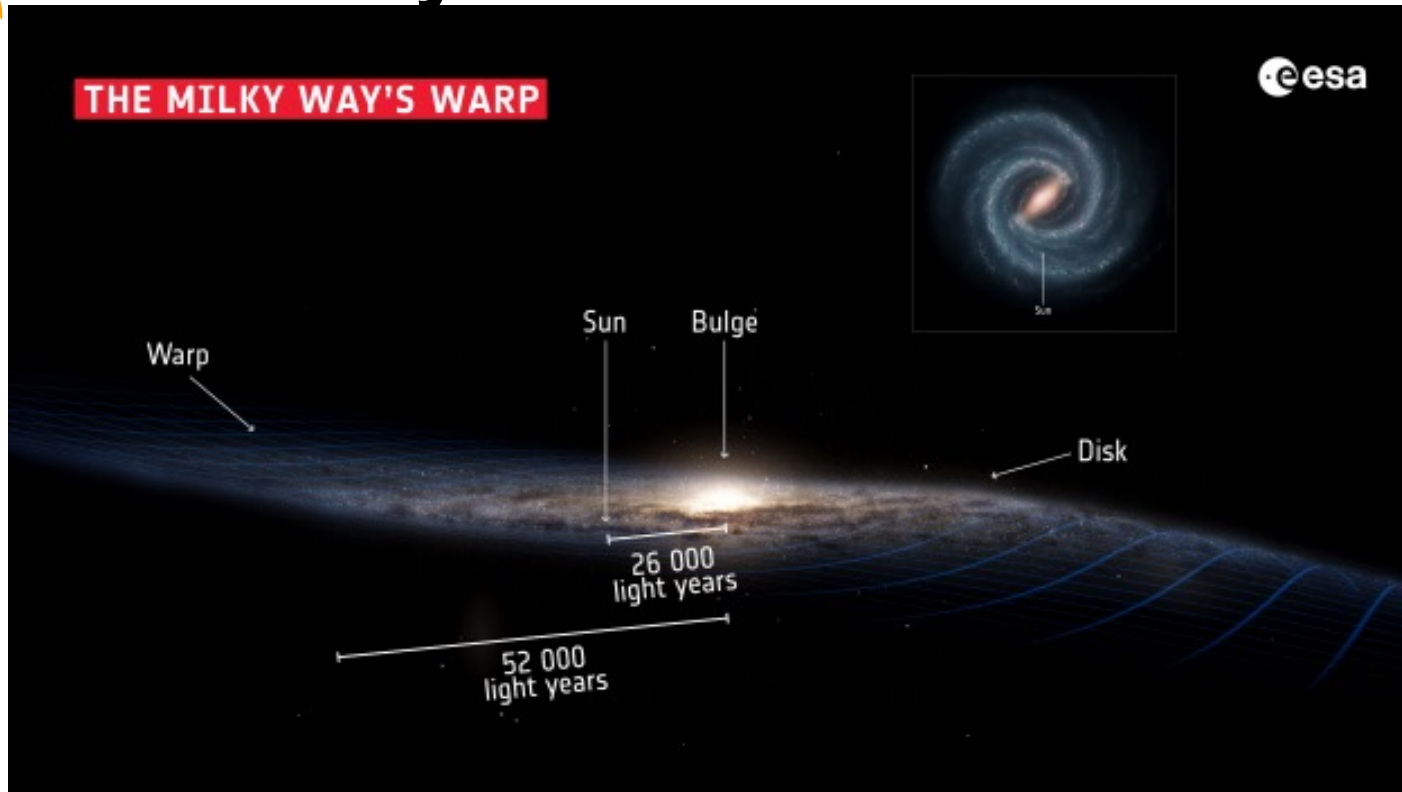
# GAIA:n tuloksia: Linnunradan rakenne

---

- Linnunradassa
  - Etäisyydet ja nopeusjakaumat kaikille tähtipopulaatiolle.
  - Linnunradan kiekon ja halon spatiaalinen ja dynaaminen rakenne.
  - Linnunradan syntyhistoria.
  - Yksityiskohtainen kartta Linnunradan pimeän aineen jakaumasta.
  - Erittäin tarkkoja havaintoja, jolla voidaan testata nykyisiä tähtien synty ja kehitys malleja.
  - Suuri määrä uusia eksoplaneettoja (~7,000)
  - Suuri määrä uusia Aurinkokunnan kappaleita (~250,000)
- ... ja kauempana
  - Tarkka etäisyys eri etäisyysindikaattoreille Magellanin pilven etäisyydelle saakka.
  - Lyhyen aikaskaalan havaintoja supernovista ja muista muuttuvista kohteista (~6,000)
  - Kvasaarihavaintoja, punasiirtymiä, mikro-gravitaatiolinssejä (~500,000)
  - Yleisen suhteellisuusteorian testaaminen valon taipumisella massojen ympärillä.



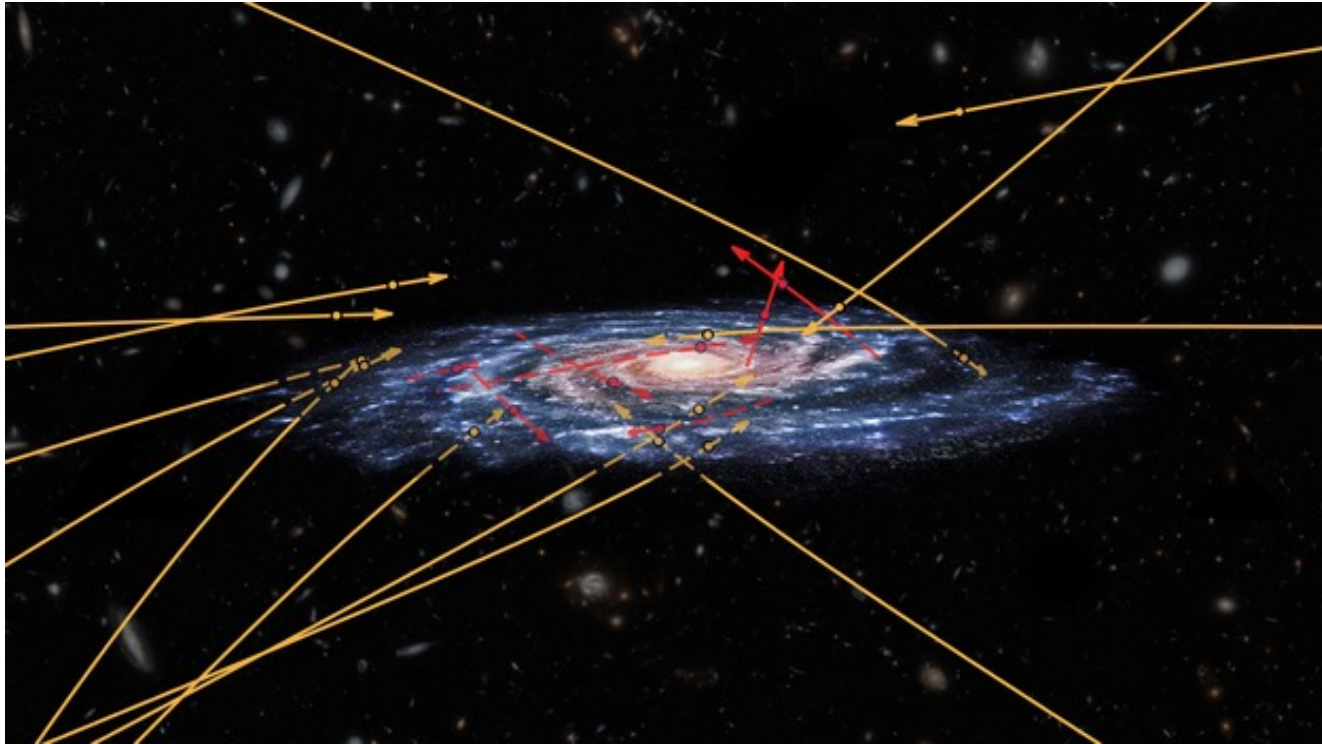
# Esimerkki 1: Linnunradan kiekon vääntymä



- Linnunradan kiekossa on selvä vääntymä (Eng. warp) sen ulko-osissa, joka voi GAIA:n mukaan johtua siitä, että pieni kääpiögalaksi (ehkä Sagittarius-kääpiögalaksi) on parhaillaan törmäämässä Linnunrataan.



## Esimerkki 2: Linnunradasta karkaavia tähtiä



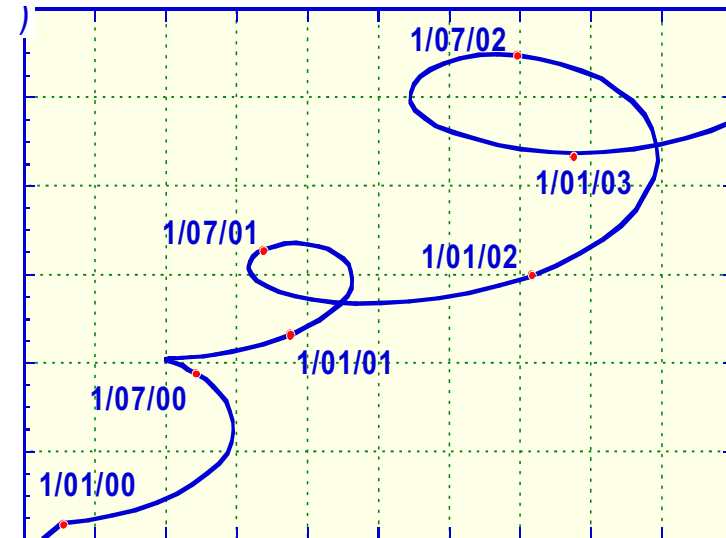
Pakonopeus  
Linnunradasta  
 $v_{\text{esc}} \sim 550 \text{ km/s}$ .

- Punaiset (7 kpl) tähdet karkaavat Linnunradasta (nopeus suurempi kuin pakonopeus). Yllättäen (13 kpl) oranssit tähdet ovat tulossa suurella nopeudella Linnunrataan (tähdet paenneet ehkä muista galakseista).



# GAIA:n tuloksia: Eksoplaneetat

- Astrometrinen kartoitus
  - ~150,000 FGK tähden monitorointi noin ~200 pc etäisyydelle asti.
  - Havaintorajat: ~1 Jupiterin massa,  $P < 10$  vuoden periodin radalla.
  - Kaikki planeetat, joiden periodit  $P \sim 2-9$  vuotta valituille tähdille.
  - Varsinaiset planeetta massat, ei massarajoja (m sin i) (vertaa Doppler-mittaukset).
  - Useampia mittauksia, tietoja myös inkliinaatistasosta.
- Odotettuja tuloksia:
  - ~2000 eksoplaneettaa (yksittäiset planeetat).
  - ~300 useamman planeetan järjestelmää.
  - Esim. 47 UMa tähdelle, jolla tunnetut eksoplaneetat poikkeama= 360  $\mu$ arcsec.
  - Radat ~1000 planeettajärjestelmälle.
  - Massat ~10  $M_{\text{maa}}$  planeetoille 10 pc säteellä.
  - Lisäksi fotometrisiä ylikulkuja: ~5000.







# GAIA:n tuloksia: Aurinkokunta tutkimus (Helsinki mukana)

- Asteroidit yms.
  - Yhtenäiset havainnot ( $G=20$  mag) kaikista liikkuvista kappaleista aurinkokunnassa.
  - ~250,000 kohdetta, enimmäkseen päävyöhykkeen asteroideja.
  - Radat: 30 kertaa tarkemmat radat kuin tähän asti, vaikka aikaisempia havaintoja on jo tehty yli ~100 vuotta.
  - Monelle asteroidille akselien suunnat, rotaatioperiodit ja muotoparametrit.
  - Asteroidien luokittelu ja koostumus etäisyyden funktiona Auringosta.
  - Läpimitat ~1000 noin 20% tarkkuudella, ja massat ~150 asteroidille noin 10% tarkkuudella.
  - Marsin, Maan, ja Venuksen trojalaiset asteroidit (L4- ja L5-pisteet).
  - Kuiper-vyön kohteita: ~50 kohdetta  $G=20$  mag saakka.
  - Maapallon lähellä olevat asteroidit (NEO:t)
  - Uusia mahdollisesti vaarallisia asteroideja (koko yli  $>1$ km, jotka ovat radalla, joka leikkaa Maapallon radan).
  - Havaintoraja: 260-590 m koko 1 AU:n etäisyydellä, riippuen asteroidin albedosta.



## 7.5 GAIA:n arkisto

---

- GAIA DR3 sisältää koordinaatit ( $\alpha, \delta$ ), parallaksit ( $\pi$ ), ja ominaisliikkeet ( $\mu_\alpha, \mu_\delta$ ) 1.46 miljardille ( $1.46 \times 10^9$ ) tähdelle magnitudivälissä  $3 < G < 21$  (G on laajakaistainen,  $\lambda = 400\text{-}1000$  nm, fotometrinen suodatin). Näiden 5 parametrin lisäksi joillakin tähdillä (~33 miljoonaa) on myös säteisnopeus tiedossa.
- Tietoa instrumenteista ja mittaustuloksista löytyy ESA:n sivustolta: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/home>
- GAIA-datoihin pohjautuvia artikkeleita ilmestyy tällä hetkellä viikoittain.
- Seuraavassa hiukan esimerkkejä GAIA-arkiston käytöstä: <http://gea.esac.esa.int/archive/>



# GAIA:n-arkisto: Basic query

- Katsotaan aluksi “Basic search” –käyttöliittymää: <http://gea.esac.esa.int/archive/> sivulta “SEARCH” välilehdeltä.
- Esimerkissä, valitaan läheisiä tähtiä, jotka sijaitsevat Auringon apeksin suunnalla, korkeintaan  $2^\circ$  päässä pisteestä:  
 $\alpha = 18\text{h}$  ( $270^\circ$ ),  $\delta = 30^\circ$ .
- Rajoitutaan lisäksi niihin tähtiin, joiden säteisnopeus tunnetaan tarkasti. Huomaa, että parallakseissa ja ominaisliikkeissä kulmayksikkönä on millikaarisekunti (mas).

Position File

Name Equatorial Target in  Circle  Box

RA 270 Dec 30 (ICRS) Radius 2 deg

Search in: galadr2\_gaia\_source

Extra conditions

+ Add condition Filter: If all conditions

parallax	>=	2	Remove
parallax_over_error	>=	5	Remove
radial_velocity_error	<=	1	Remove

Display columns

Max. number of results: 500

Reset Form Show Query Submit Query





# Mitä opimme?

1. Tarkat parallaksimittaukset kaukaisille kohteille täytyy tehdä avaruudesta käsin (Hipparcos 1989-1993, GAIA 2013-).
2. GAIA on täysin mullistava havaintolaite ja se mittaa noin 1.5 miljardin tähden ( $\approx 1\%$  kaikista Linnunradan tähdistä) tarkat paikat, etäisyydet, ominaisliikkeet sekä radiaalinopeudet (pienemmälle määrälle tähtiä,  $\sim 33$  miljoonaa tähteä).
3. GAIA:n tulokset julkaistaan säännöllisissä data release-tilaisuuksissa ja viimeisin (DR3) julkaistiin vuoden 2022 kesällä. Kaikki data on julkista ja siihen pääsee käsiksi ESA:n arkiston kautta.
4. GAIA on mullistamassa Linnunradan rakenteen ja kehityksen tutkimuksen ja alan oppikirjat tulevat menemään ainakin osittain uusiksi.