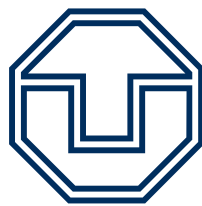
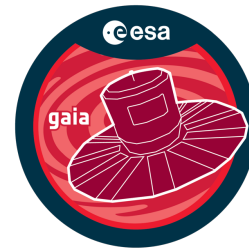
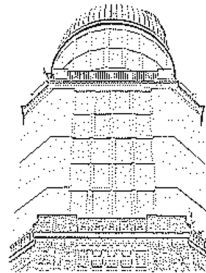


# Weltraumastrometrie mit Gaia: Data Release 3 Eine wissenschaftliche Revolution

Das Gaia-Team des Lohrmann-Observatorium, TU Dresden



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**



Gaia DR3, TU Dresden, 1. Juli 2022

Gaia ist keine Science Fiction mehr!



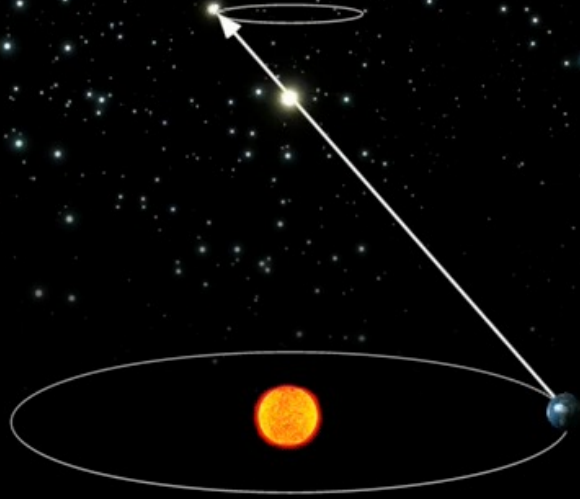
# Willkommen in der Gaia-Ära!



Das Universum in 6 Dimensionen... und viel mehr!

# Gaia misst die Positionen der Quellen: Oft und sehr genau

esa

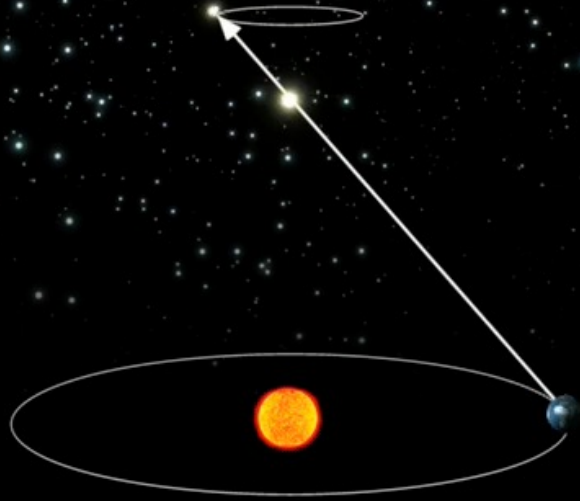


Scheinbare Bewegungen der Sterne am Himmel:

1. Elliptische „hin-und-her“-Bewegung (Parallaxe)
2. Quasi-lineare eigene Bewegung der Sterne

# Gaia misst die Positionen der Quellen: Oft und sehr genau

esa



esa

Scheinbare Bewegungen der Sterne am Himmel:

1. Elliptische „hin-und-her“-Bewegung (Parallaxe)
2. Quasi-lineare eigene Bewegung der Sterne

# Die Gaia-Revolution

esa



esa

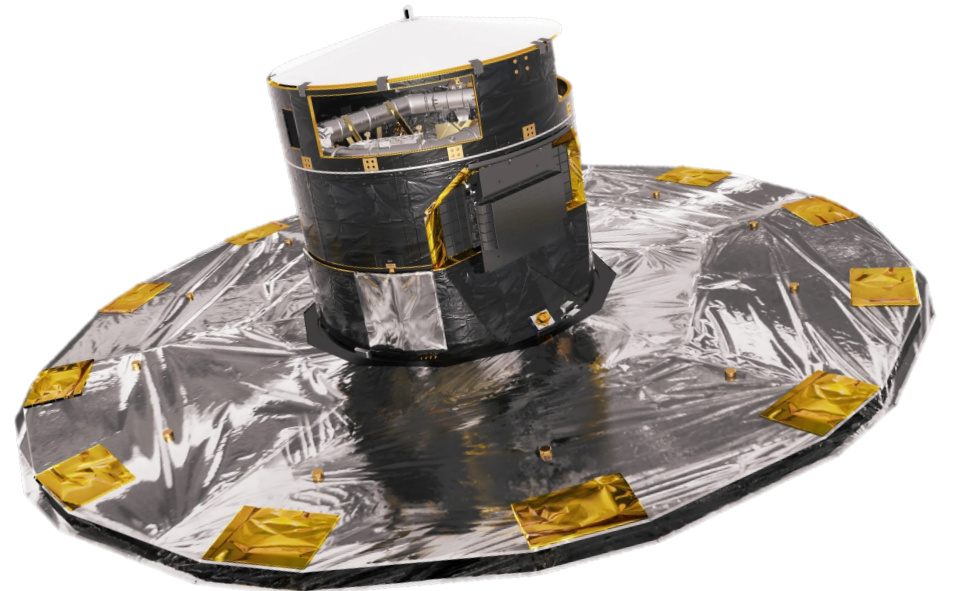


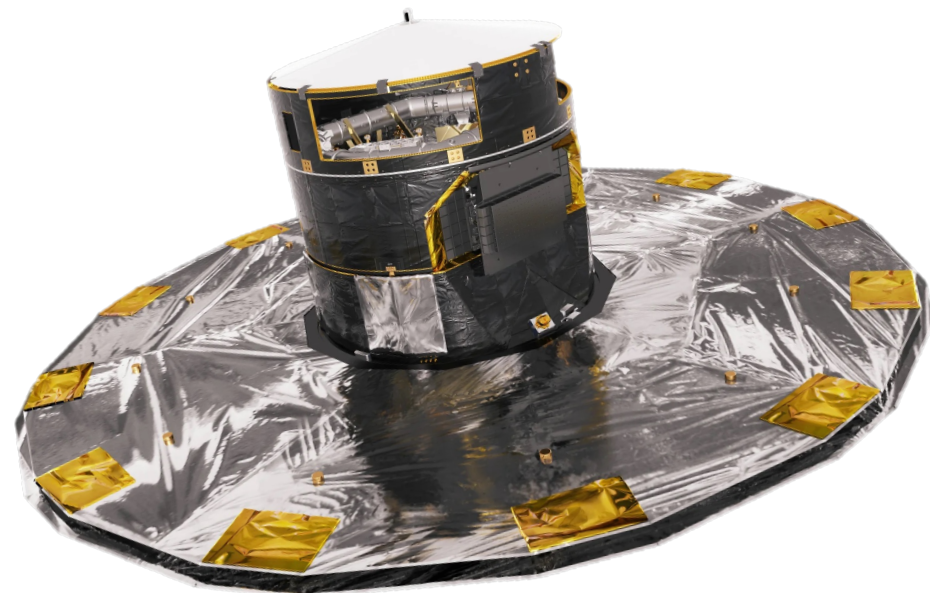
10000 Mal mehr Objekte als vorher  
100 Mal genauer als vorher

Die Zielgenauigkeit von Gaia beträgt ca. 10 Mikrobogensekunden.

Eine Mikrobogensekunde entspricht der Dicke eines Papierblattes von der anderen Erdseite aus.

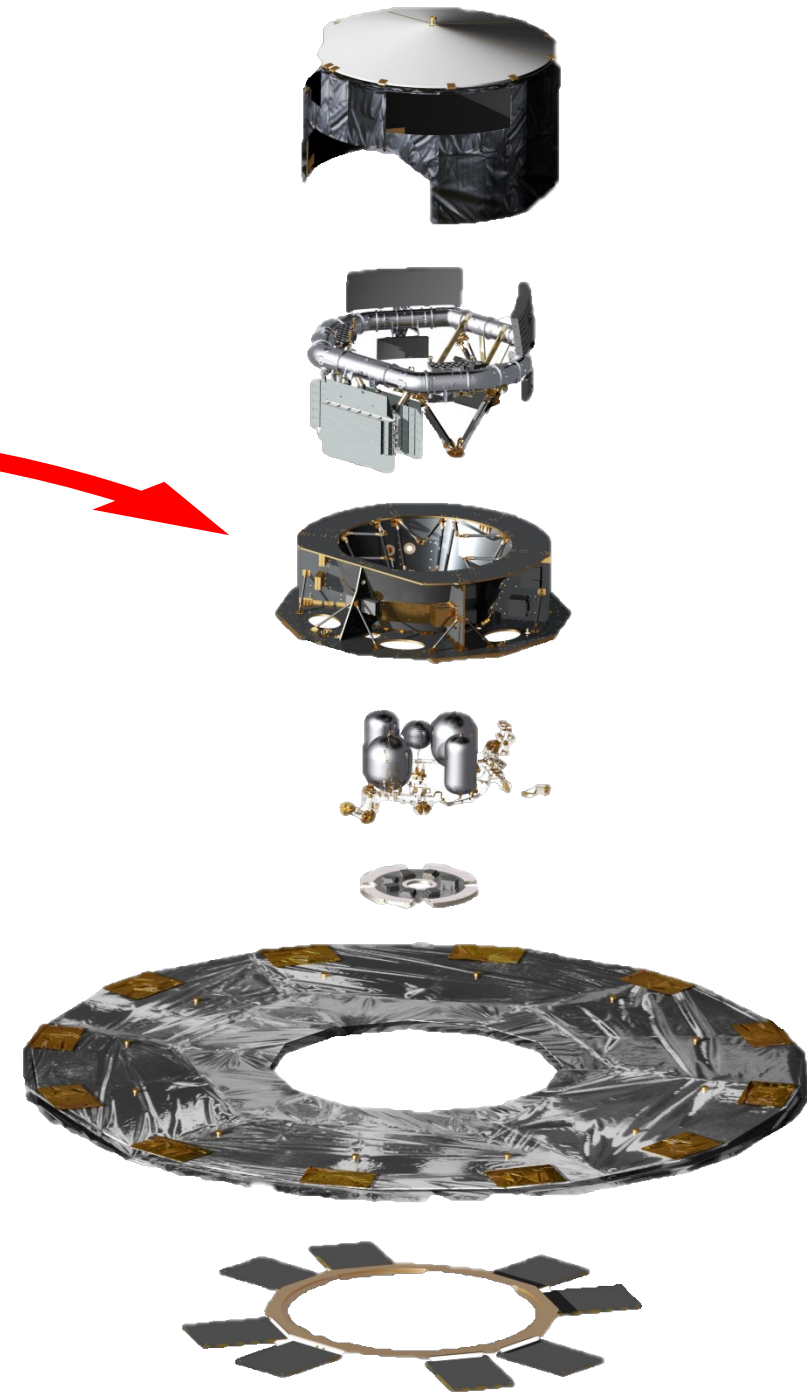
# Teil 1: Wie arbeitet der Gaia-Satellit?



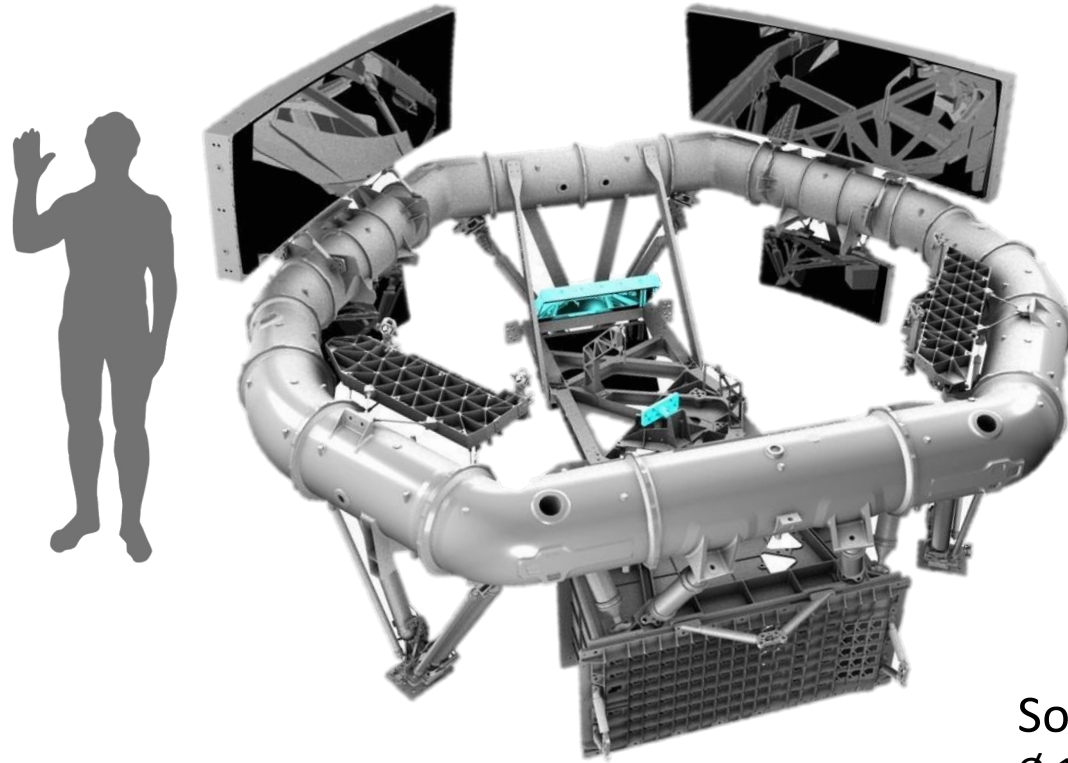




# Aufbau des Satelliten



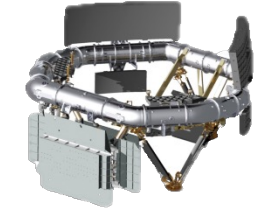
# Aufbau des Satelliten



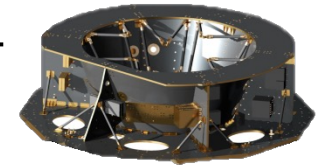
Thermalzelt  
Ø 3m, Höhe ca. 3,3m



Gaia-Instrument  
710kg, Ø 3m, Höhe 2m



Service-Modul  
920kg, Ø 3m, Höhe 1m



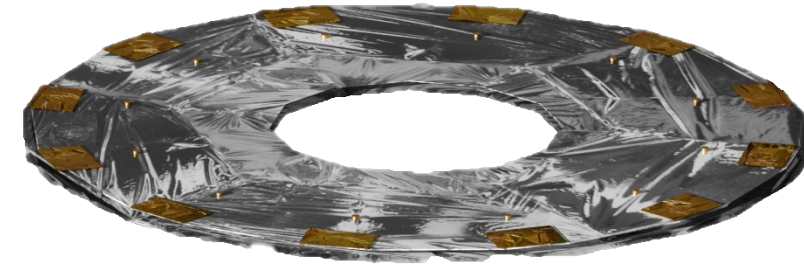
Antriebsystem  
ca. 420kg Treibstoff



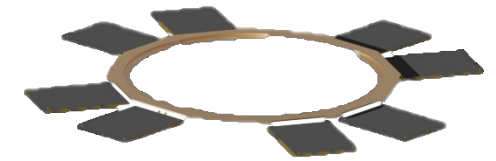
Antenne



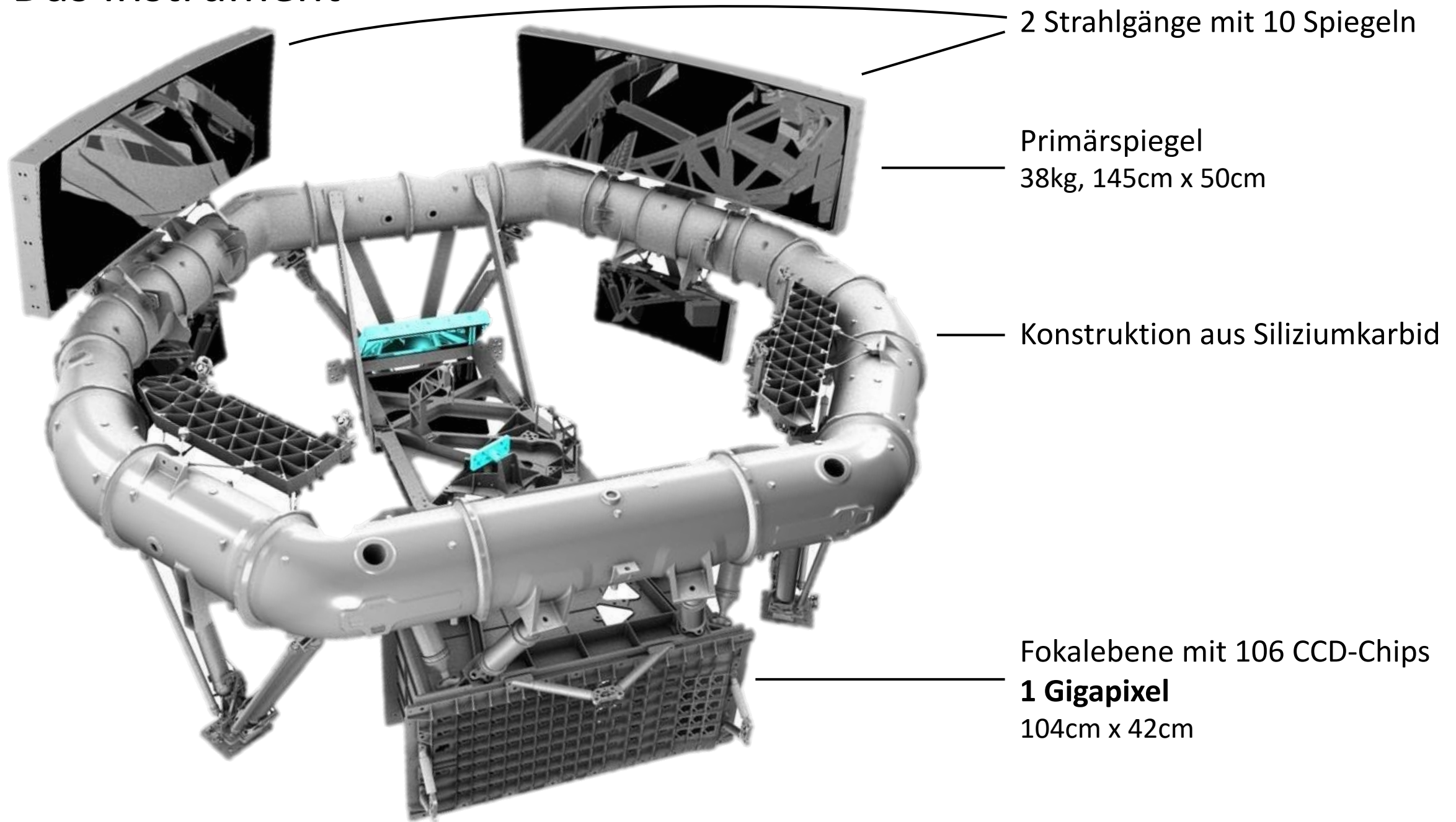
Sonnenschild  
Ø 10m, ca. 30cm Stärke



Solarzellen  
12,8m<sup>2</sup>, ca. 1900W Leistung



# Das Instrument



# Das Instrument - speziell konstruiert für hochgenaue Astrometrie

- 2 Sichtfelder für die Messung **absoluter Entfernung**
- hohe **mechanische Stabilität**: keine sich bewegenden Teile
- hohe **thermische Stabilität** der Instrumente
- **automatische Erkennung** von Himmelsobjekten an Bord
- **automatische Datenverarbeitung** an Bord: nur Pixel mit sinnvollen Daten werden heruntergeladen

Gaias Beobachtungsplan („Scanning Law“) optimiert für:

- sehr **gleichmäßige Beobachtungsabdeckung** des Himmels
- **kontinuierliche Beobachtungen** über bis zu 10 Jahre hinweg
- hohe **thermische Stabilität** durch konstanten Neigungswinkel zur Sonne



**Gaia Raketenstart**  
19.12.2013  
ESA Raumfahrtzentrum Kourou  
Französisch-Guayana  
Trägerrakete: Soyuz ST



Entfaltung des Sonnenschilds nach Ankunft im Erdorbit



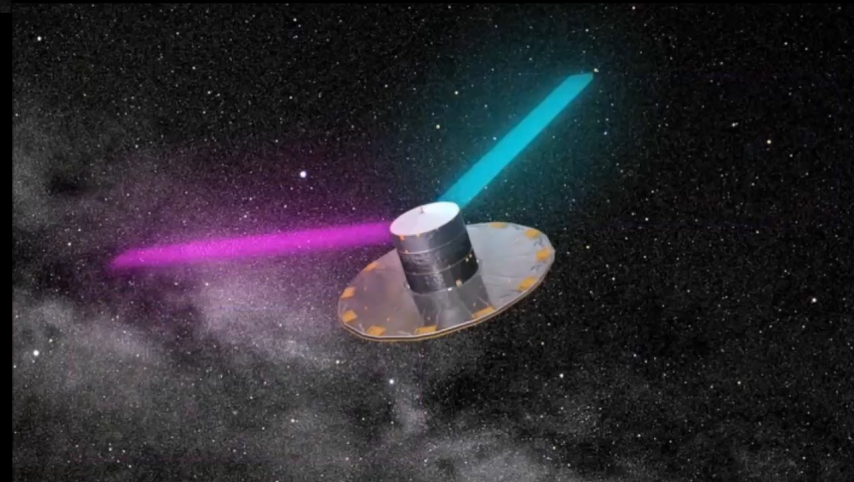
Beginn der Himmelsbeobachtung am Lagrange-Punkt  $L_2$

Was misst Gaia an Bord?



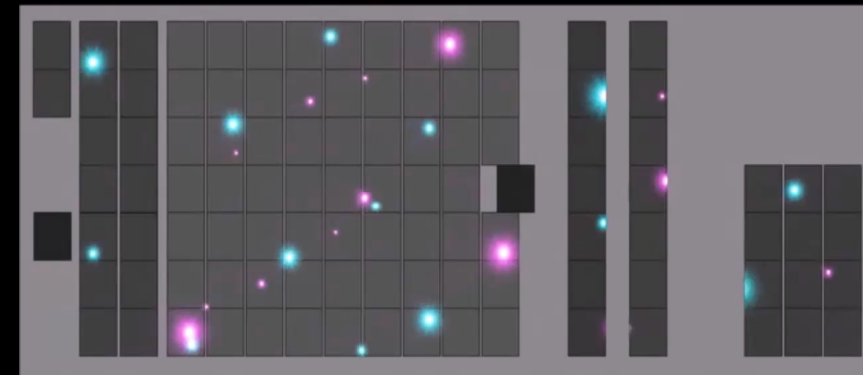
Scan des Himmels gleichzeitig in 2 Sichtfeldern mit Basiswinkel-Abstand von  $106,5^\circ$  und einer Rotationsperiode von 6h

Abbildung der Beobachtungen beider Sichtfelder auf gemeinsame Fokalebene mit 106 CCD-Sensoren

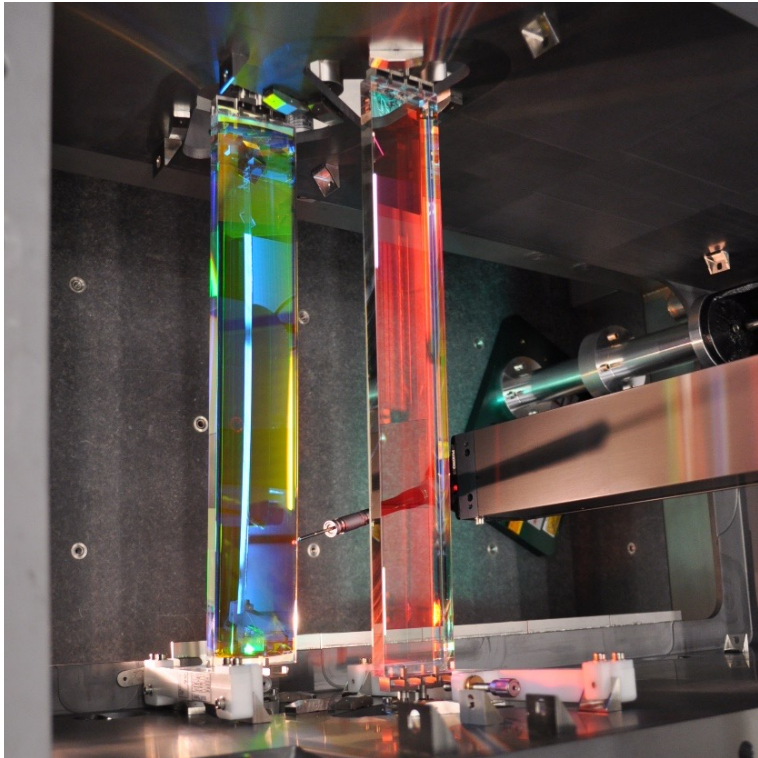


Erfassen des Lichts der Quelle beim Überstreichen der Fokalebene:

- mit Atomuhrzeit-genauen Zeitstempeln
- in Millipixel-genauen Pixelframes um die Quelle
- auf astrometrischen, photometrischen und spektroskopischen CCDs



# Spekto-Photometrie und Spektroskopie an Bord

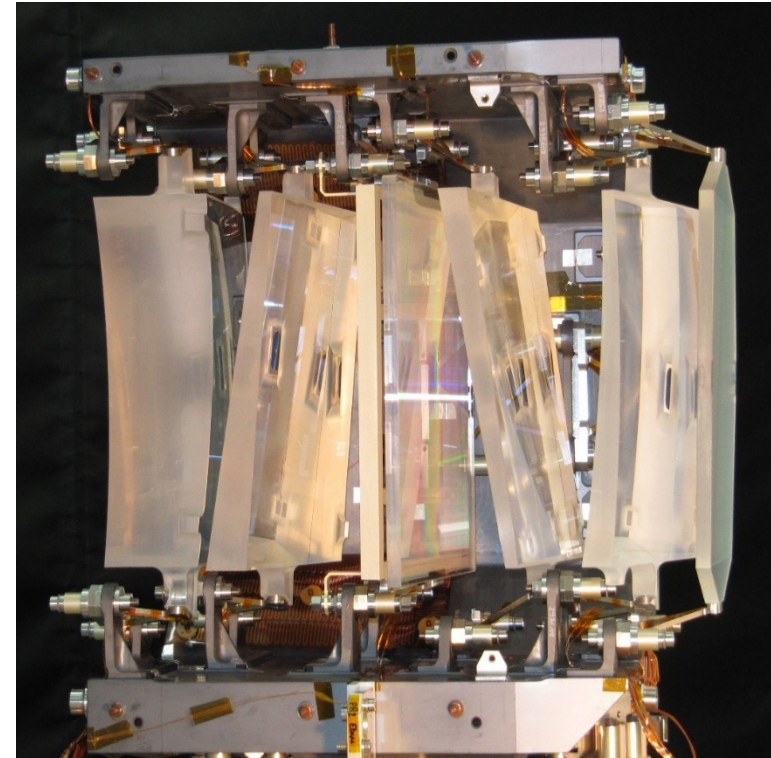


## 2 Spekto-Photometer (2x7 CCDs):

Blaues Photometer: 330–680 nm

Rotes Photometer: 640–1050 nm

im Bild: vorgeschaltete Quarzglas-Prismen



## Radialgeschwindigkeiten-Spektrometer (3x4 CCDs):

- schmalbandiges Infrarot: 845–872 nm
- mittlere Auflösung:  $\lambda/\Delta\lambda \sim 11500$

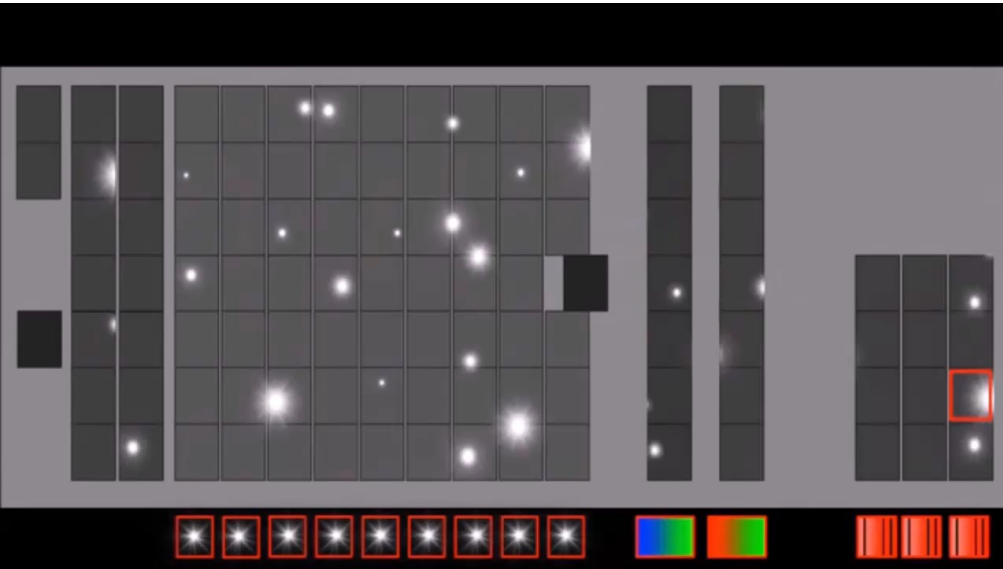
im Bild: vorgeschaltetes optisches Modul:

- eine Gitterplatte (Mitte),
- vier prismatische Quarzglas-Linsen,
- eine Bandpass-Filterplatte (ganz rechts).



Wie werden Gaias Messungen verarbeitet?

# Gaias Daten empfangen

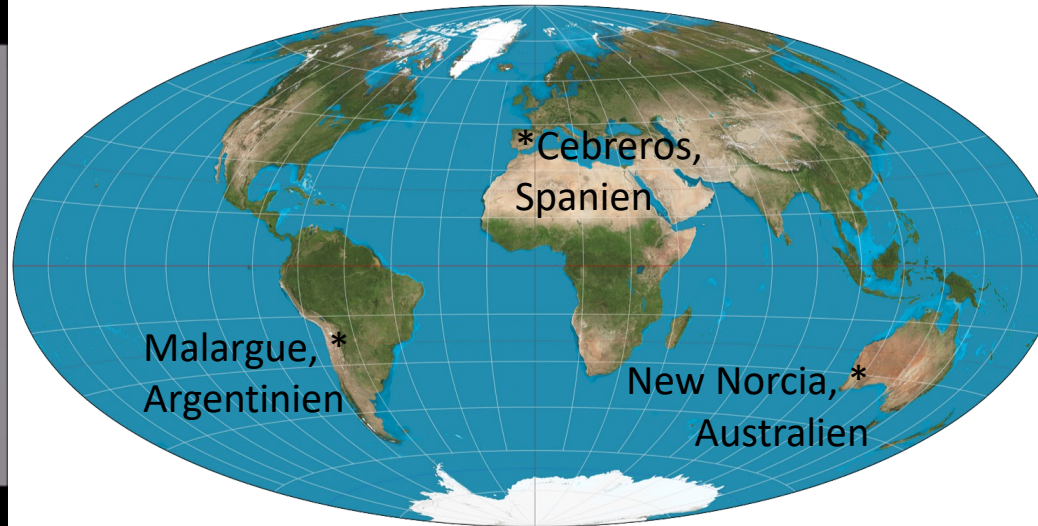


Möglichst kompakte Datenpakete:

nur sehr kleines Pixel-Frame um die Quelle herum ausgelesen

→ Täglicher Durchschnitt:

- täglich 40 Millionen Objekte
- 400 bis 500 Millionen Messungen
- 40 GB Daten produziert



Download der Gaia-Daten gemäß Datenaufkommen ca. 8-14 Stunde täglich auf 1 von 3 Radioantennen weltweit

→ Gaia ist größter Konsument des ESTRACK Deep-Space-Antenna-Netzwerks



35m-Antenne Cebros, bei Madrid, Spanien

Download-Bandbreite: 8,7Mbit/s

# Die Herausforderung der Gaia-Datenbearbeitung

Inputdaten von Gaia geliefert:

- Für jeden Stern ca. 1600 Rohbilder (inkl. Spektren & Helligkeitskurven) :  $\rightarrow >3 \times 10^{12}$

Anzahl der Parameter des Gleichungssystems der **Astrometrischen Lösung**

(räumliche Koordinaten und Bewegung) aller Sterne:

- für jeden Stern mind. 5 astrometrische Parameter bei ca. 2 Milliarden Sternen:  $\rightarrow >10^{10}$
- räumliche Orientierung des Satelliten: 4 Parameter pro 15 – 30 Sek:  $\rightarrow >10^8$
- Kalibration des Instruments: min. 6000 Parameter pro Tag :  $\rightarrow >6 \times 10^6$
- globale Parameter (bspw. Lichtablenkungseffekte):  $\rightarrow <100$

$\rightarrow$  **Direkte Lösungen sind unmöglich!**

# Die Herausforderung der Gaia-Datenbearbeitung

Nur zwei Projekt-Gruppen können Gaias **Astrometrischen Lösungen** berechnen:

ESAC/ESA, Madrid

&

**Lohrmann-Observatorium, TU Dresden**

Computer "Taurus" @ ZIH, TU Dresden

Der 3. Gaia-Katalog benutzt nur 25% der Zieldatenmenge  
(34 Monate von bis zu 10 Jahren Beobachtungszeit)

*Besonderer Dank dem **Zentrum für Informationsdienste  
und Hochleistungsrechner (ZIH)** der TU Dresden:*

**bis jetzt über 20 Millionen CPU-Stunden**

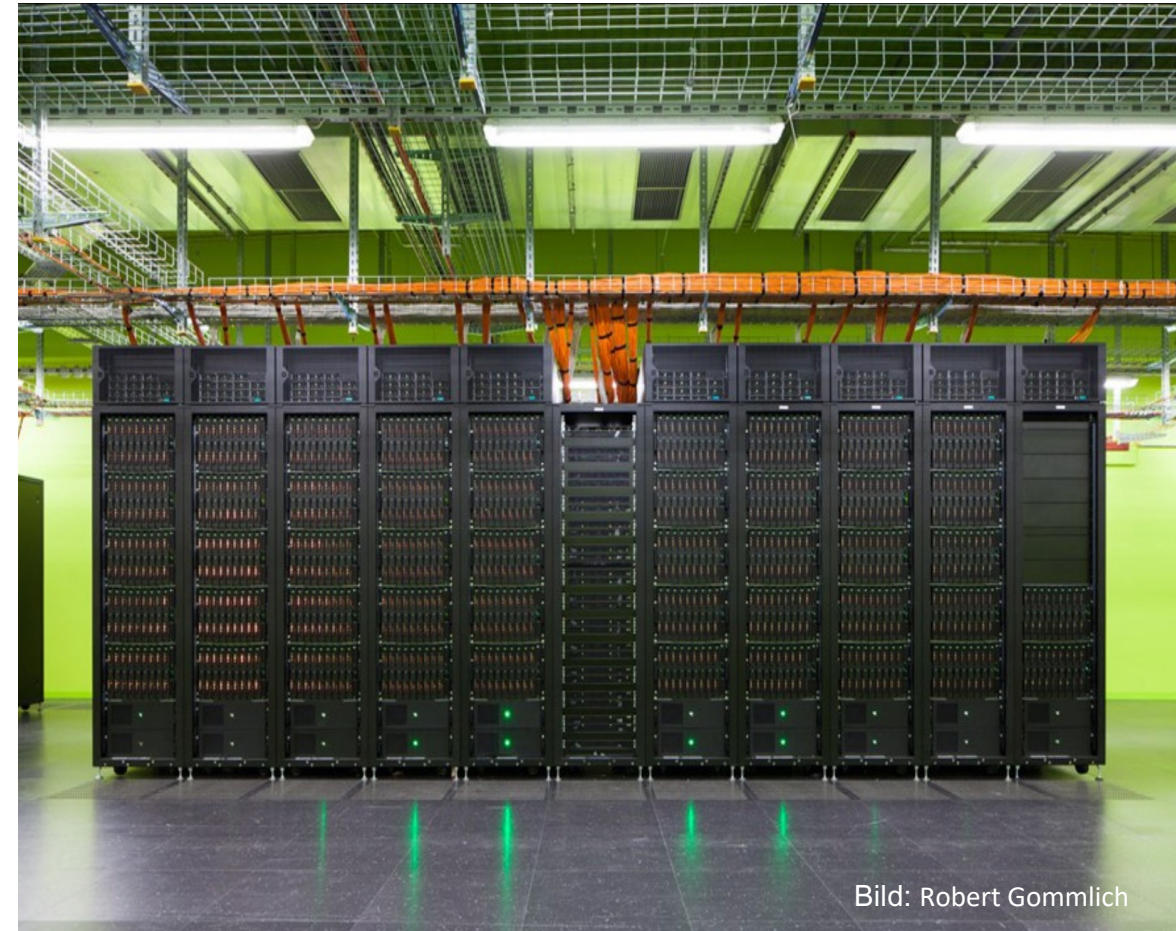


Bild: Robert Gommlich

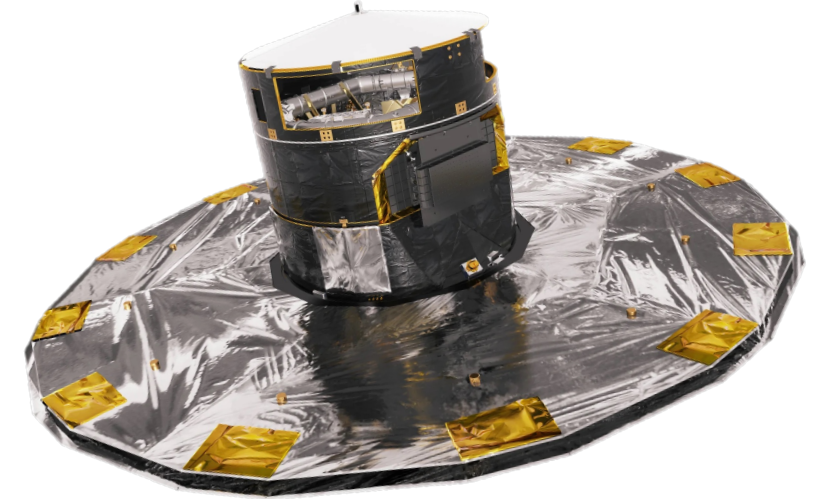
# Ergebnisse der Datenverarbeitung

Gaia beobachtet:

- kontinuierlich seit mehr als **8 Jahren** (12.671 Gaia-Umdrehungen seither)
- über **2 Milliarden** ausreichend helle Quellen ( $< \text{Magnitude } 21$ )
- jede Quelle durchschnittlich **150 Mal** (in 10 Jahren)

Astrometrische und Spektroskopische Ergebnisse:

- räumliche Positionen und Geschwindigkeiten
- Radialgeschwindigkeit
- niedrig-aufgelöste Spektren im blauen & roten Wellenlängenbereich
- hochaufgelöste Spektren in einem schmalen Infrarot-Bereich
- zeitliche aufgelöste Helligkeit und Farben



# Teil 2: Gaia Data Release 3

## Wissenschaftliche Highlights

Die Datenfreigabe 3 umfasst insgesamt 1,8 Milliarden Sterne in der Milchstraße und bietet den Astronom:innen einen noch nie dagewesenen Einblick in die Eigenschaften von Sternen und deren Lebenszyklus sowie in die Struktur und Entwicklung der Milchstraße.



Bereits in der teilweisen Datenfreigabe 3 veröffentlicht

Die Datenfreigabe 3 umfasst insgesamt 1,8 Milliarden Sterne in der Milchstraße und bietet den Astronom:innen einen noch nie dagewesenen Einblick in die Eigenschaften von Sternen und deren Lebenszyklus sowie in die Struktur und Entwicklung der Milchstraße.



**Doppelsternsysteme**  
**813.000**

Position | Distanz  
Umlaufbahn | Masse

**Objektklassifizierungen**  
**1,5 Milliarden**

Welche Art von Stern ist es?

**Veränderliche Sterne**  
**10 Millionen**

Veränderung der Helligkeit im Laufe der Zeit

**Spektroskopie mit niedriger Auflösung**

**470 Millionen** astrophysikalische Parameter  
**220 Millionen** Spektren

Temperatur | Masse  
Alter | Farbe | Metallizität

**1000x**  **→ 273 Jahre!**

**Radialgeschwindigkeit**  
**33 Millionen**

Geschwindigkeit, mit der sich ein Stern auf uns zu oder von uns weg bewegt

Dritte Geschwindigkeitsdimension

**Astrometrie und Photometrie**  
**1,5 Milliarden**

Helligkeit und Farbe | Position | Distanz  
Eigenbewegungen

**Spektroskopie mit hoher Auflösung**

**5,6 Millionen** astrophysikalische Parameter  
**2,5 Millionen** chemische Zusammensetzungen  
**1 Million** Spektren

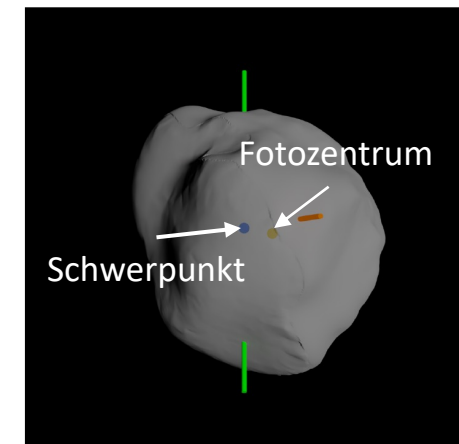
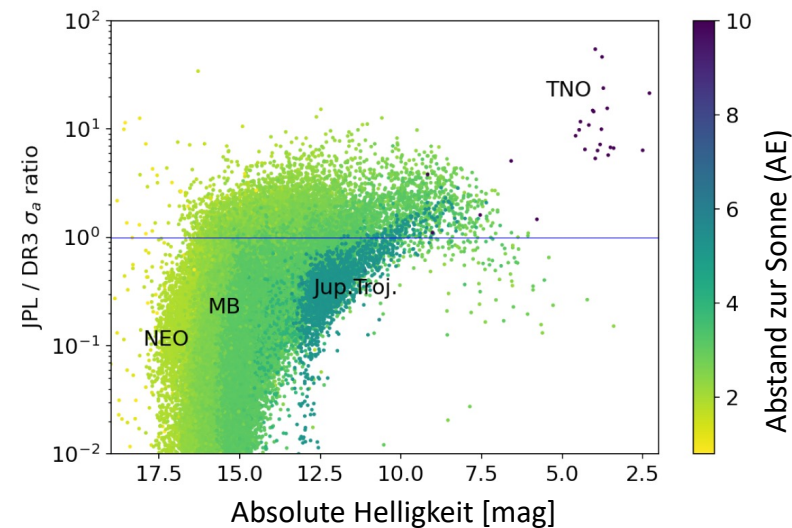
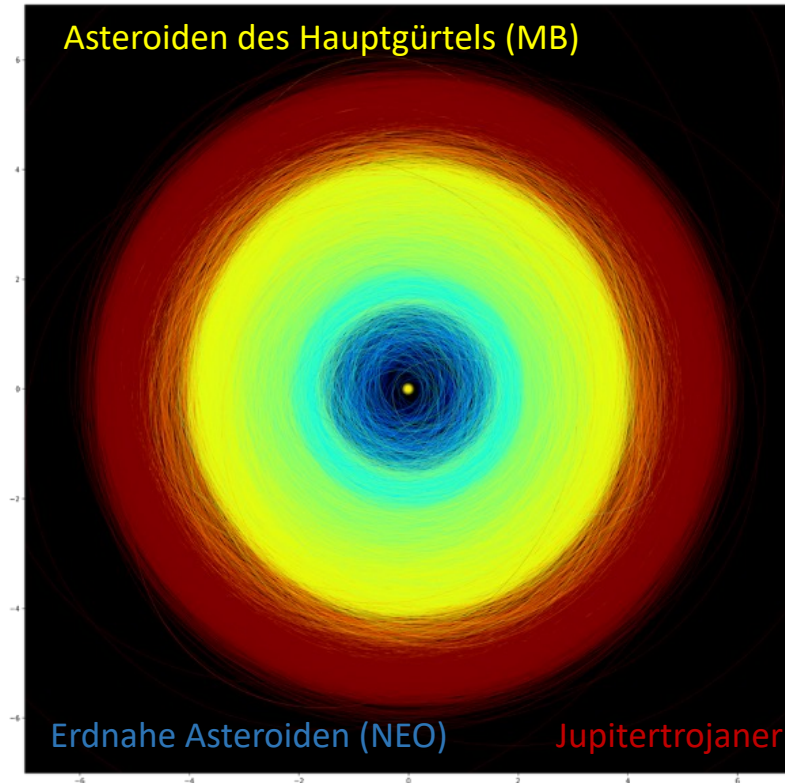
Chemische Zusammensetzung | Temperatur | Masse | Alter

Bereits in der teilweisen Datenfreigabe 3 veröffentlicht



# Asteroiden in Gaia DR3: Bahnen

- Gaia beobachtet nicht nur Sterne!
- **Bahnen für fast 160.000 Objekte** des Sonnensystems aus rund 23,3 Mio. Beobachtungen
- Mit 33 Monaten an Daten sind rund 10.000 Bahnen schon jetzt besser bekannt als bisher.
- Am Ende der Mission (DR5, 10 Jahre) wird dies für viele Asteroiden um einen Faktor 10-100 gestiegen sein.
- Höhere Genauigkeit bedeutet:
  - Bessere Bahnen (Verfolgung, Kollisionen, Sternbedeckungen)
  - Beobachtung kleinerer Effekte (Begleiter, Form, nicht-gravitative und relativistische Effekte uvm. )



(21) Lutetia

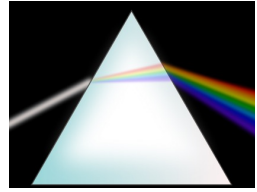
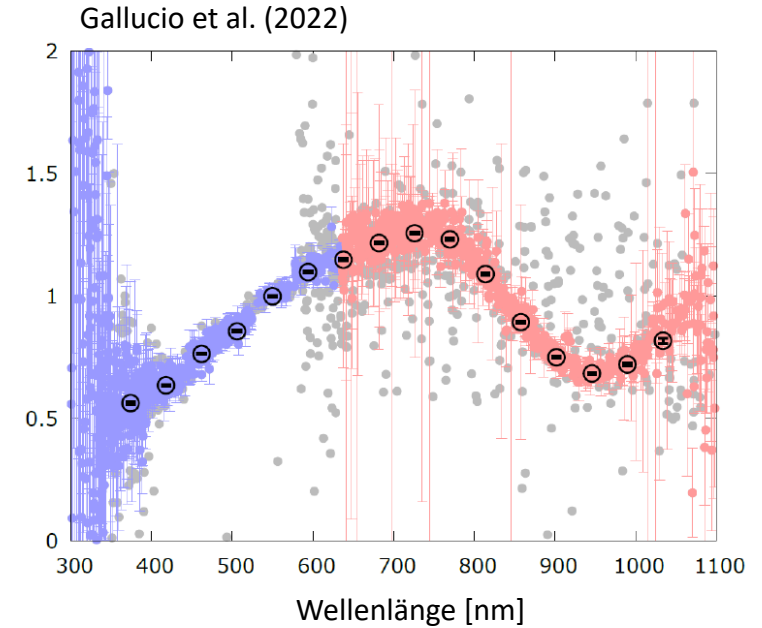
# Asteroiden in Gaia DR3: Spektren

Zusätzlich zu den Positionen

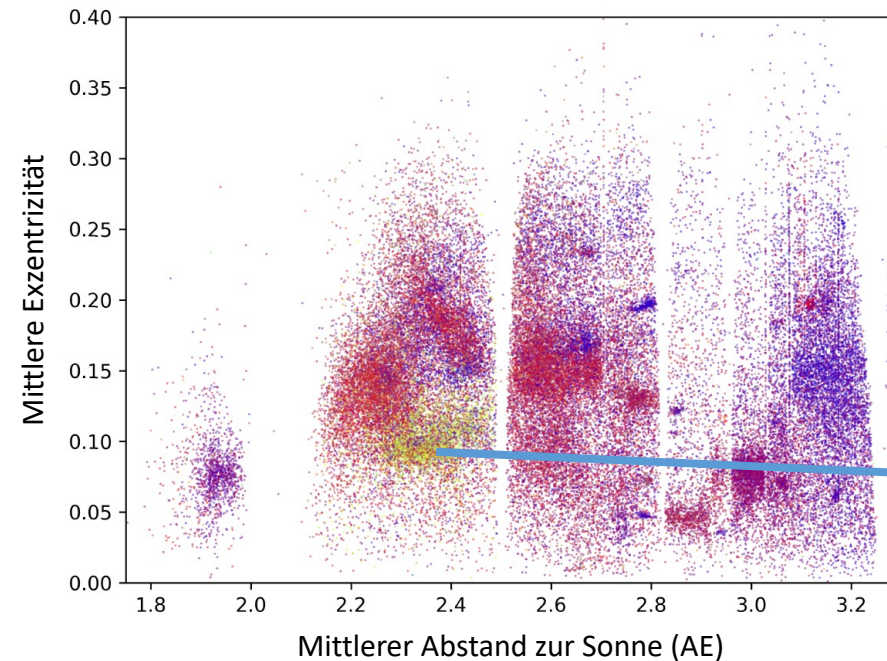
- Mehr als **60.000 Objekte mit Reflektionsspektrum** (Farbinformation)
- bisher 5.000-6.000 bekannt

Liefert Informationen zu

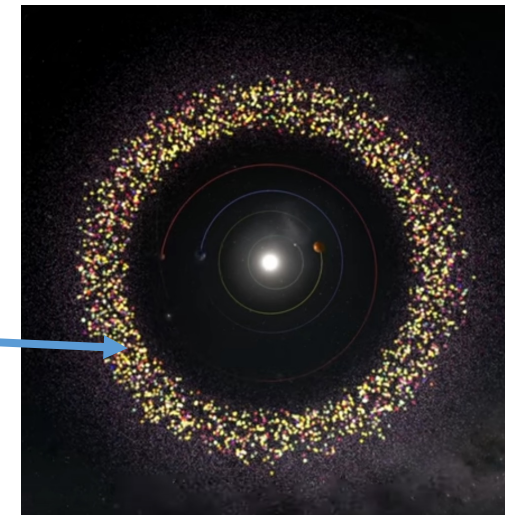
- Chemische Zusammensetzung der Körper
- Früheren Kollisionen - Gruppierung zu Asteroidenfamilien
- Kombiniert mit Orbits → Dynamik und Entwicklungsgeschichte im Sonnensystem



Quelle: Wikipedia

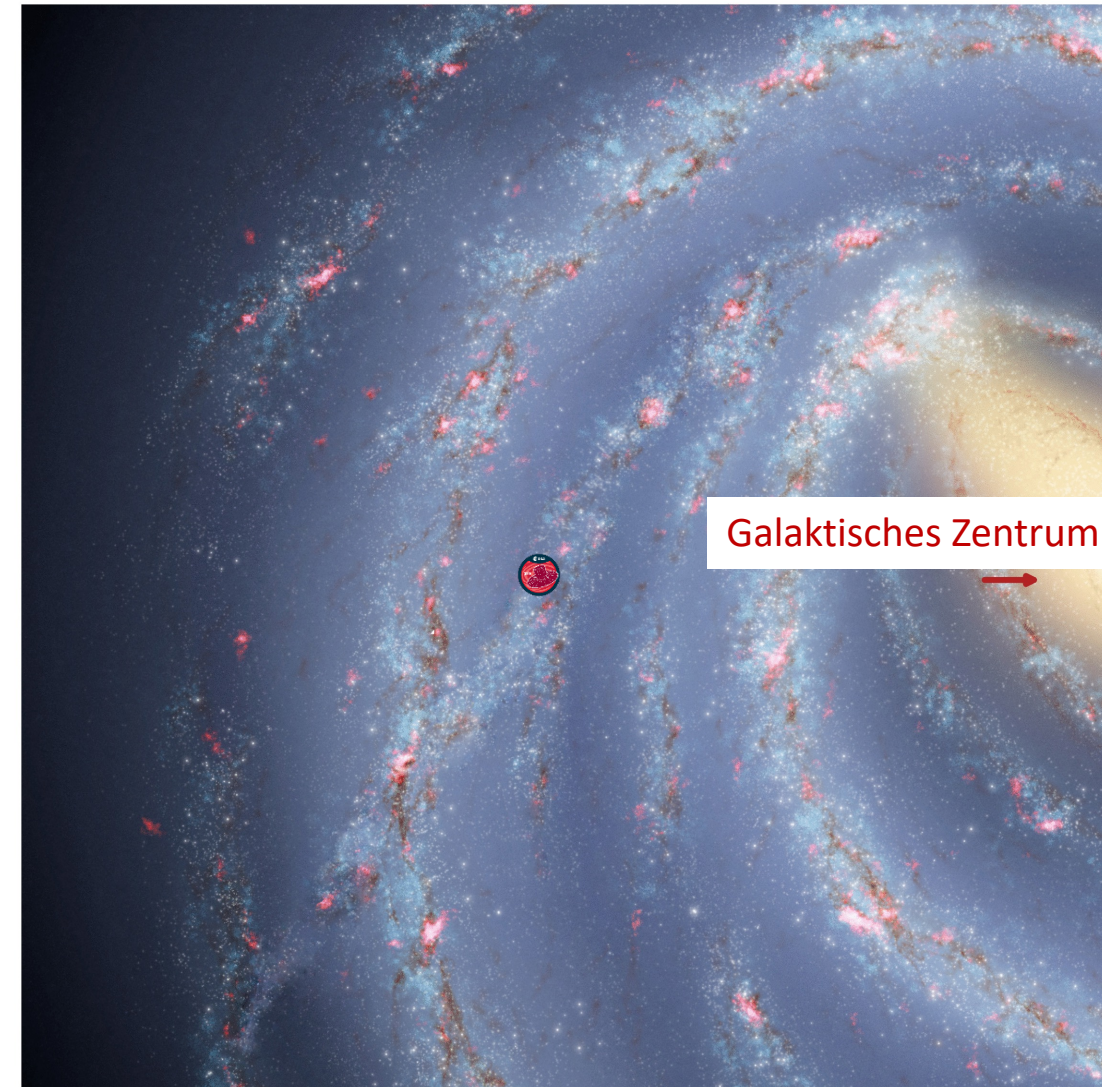


Vesta-Familie



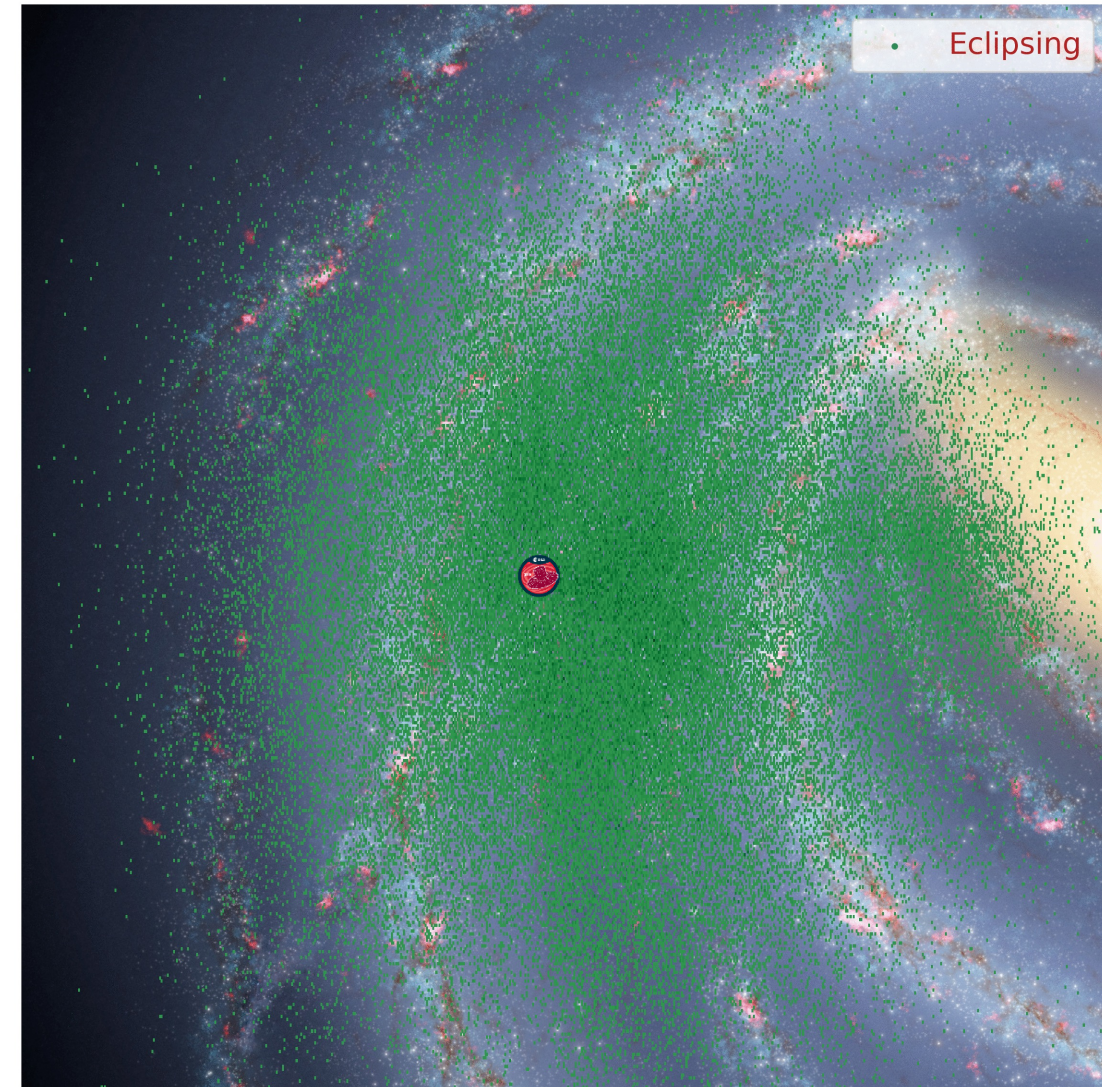
# Doppelsterne im Gaia DR3

- Mehrzahl der Sterne in Doppel-, Mehrfachsternsystemen
- Erstmals in Gaia DR3 enthalten
- Beobachtung: Einzelquelle (Komponenten sind zu weit weg / zu nah beieinander, um getrennt aufgelöst zu werden)
- Modellierung als Einzelquelle passt nicht zu den Beobachtungen
- Kombination der Daten der Gaia-Instrumente



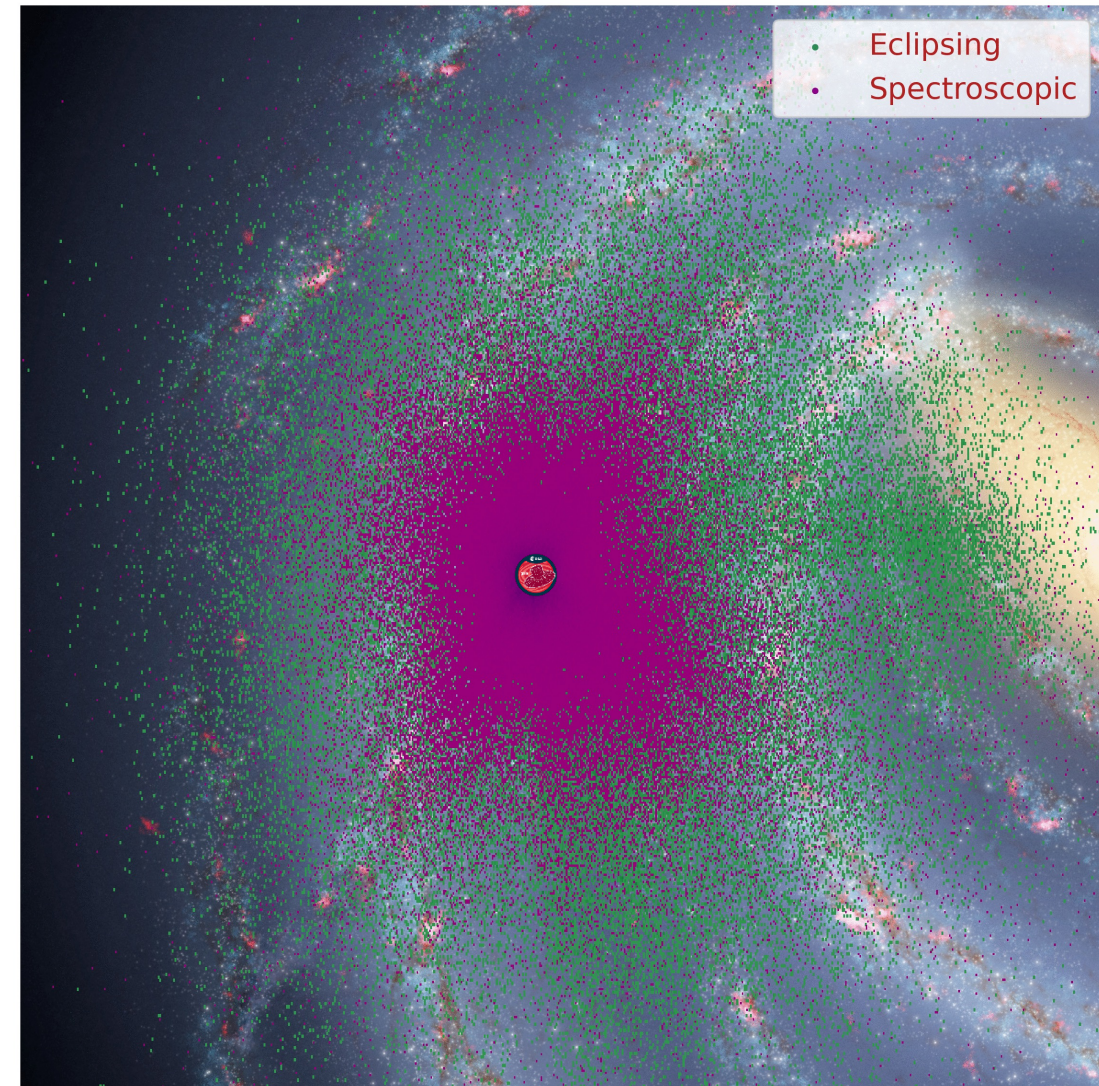
# Doppelsterne im Gaia DR3

- Mehrzahl der Sterne in Doppel-, Mehrfachsternsystemen
- Erstmals in Gaia DR3 enthalten
- Beobachtung: Einzelquelle (Komponenten sind zu weit weg / zu nah beieinander, um getrennt aufgelöst zu werden)
- Modellierung als Einzelquelle passt nicht zu den Beobachtungen
- Kombination der Daten der Gaia-Instrumente
  - **Photometrie: ~87 000**



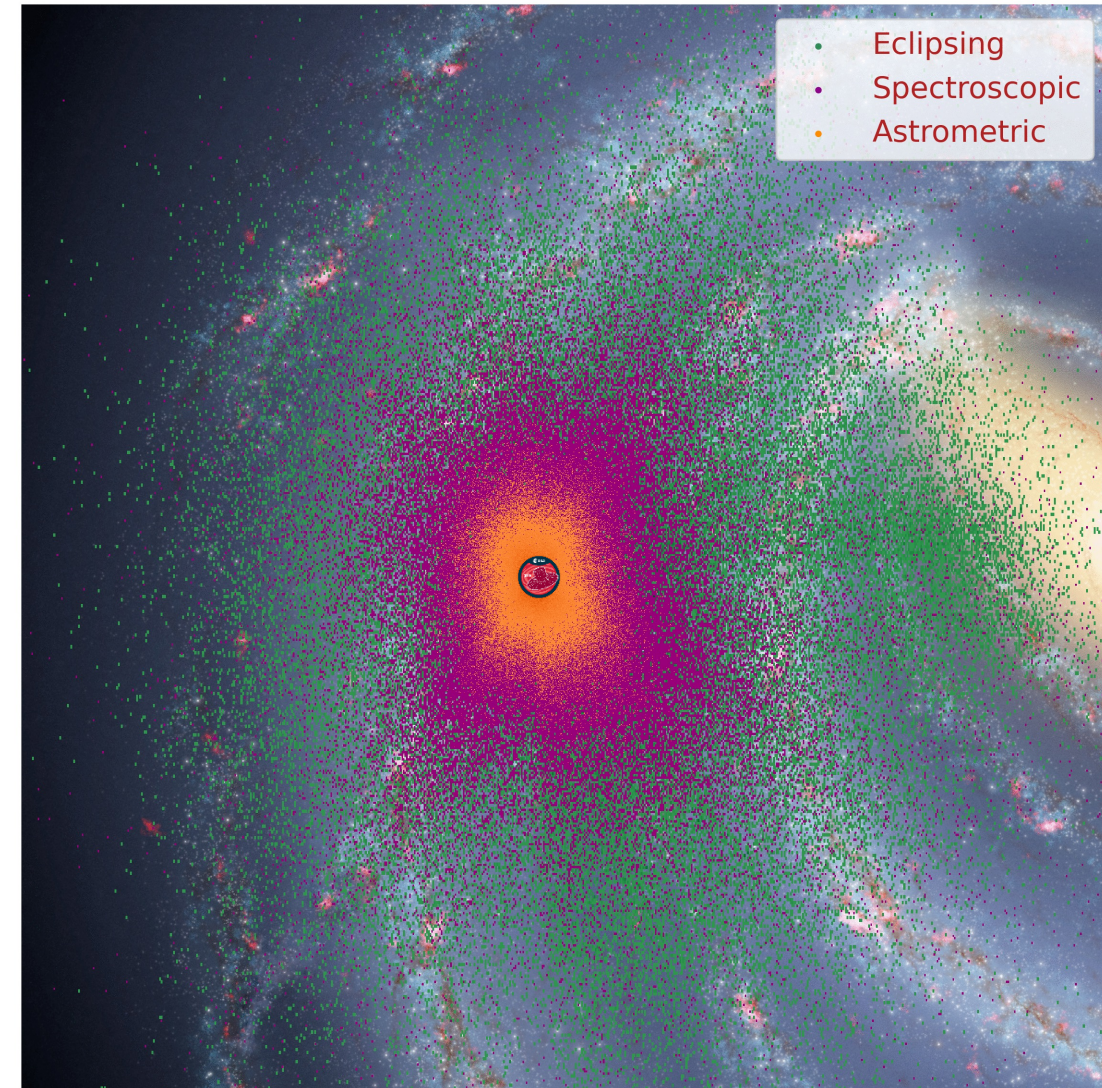
# Doppelsterne im Gaia DR3

- Mehrzahl der Sterne in Doppel-, Mehrfachsternsystemen
- Erstmals in Gaia DR3 enthalten
- Beobachtung: Einzelquelle (Komponenten sind zu weit weg / zu nah beieinander, um getrennt aufgelöst zu werden)
- Modellierung als Einzelquelle passt nicht zu den Beobachtungen
- Kombination der Daten der Gaia-Instrumente
  - **Photometrie: ~87 000**
  - **Spektroskopie: ~185 000 („Spectroscopic Binary Orbits Catalogue“ v9: 4100 Orbits)**



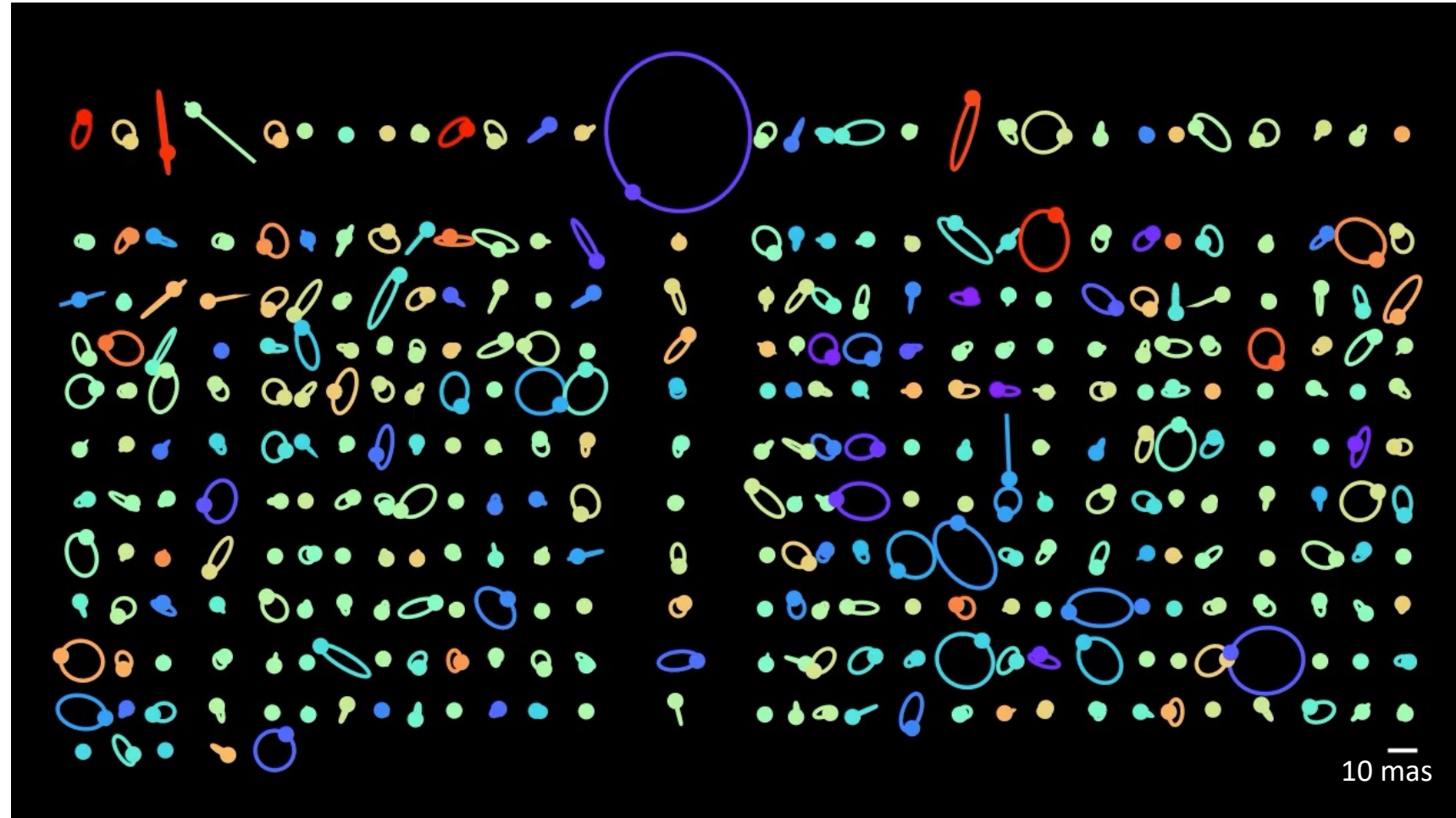
# Doppelsterne im Gaia DR3

- Mehrzahl der Sterne in Doppel-, Mehrfachsternsystemen
- Erstmals in Gaia DR3 enthalten
- Beobachtung: Einzelquelle (Komponenten sind zu weit weg / zu nah beieinander, um getrennt aufgelöst zu werden)
- Modellierung als Einzelquelle passt nicht zu den Beobachtungen
- Kombination der Daten der Gaia-Instrumente
  - **Photometrie:** ~87 000
  - **Spektroskopie:** ~185 000 („Spectroscopic Binary Orbits Catalogue“ v9: 4100 Orbits)
  - **Astrometrie:** ~169 000 („Washington Double Star Catalogue“: 3400 Orbits)



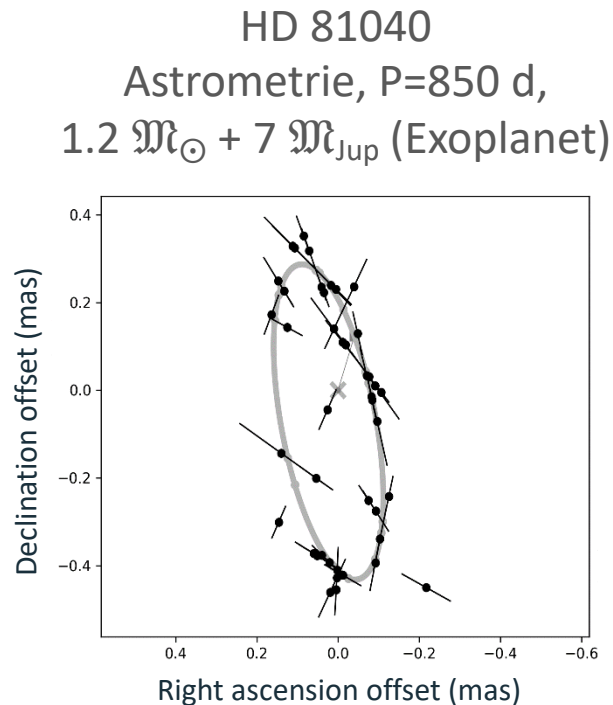
# Vielfältige Orbits

- Im Bild rechts:  
355 der rund 170.000  
astrometr. Doppelsterne  
in DR3
- innerhalb 50pc (163 ly)  
und Periode < 1000 Tage
- Maßstäblich dargestellt
- Farbe:
  - Heiße Sterne und  
weiße Zwerge
  - Sonnenähnlich
  - kühle, leichte Sterne



# Vielfältige Begleiter

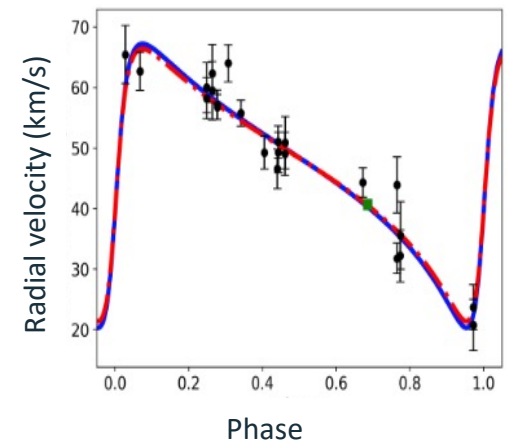
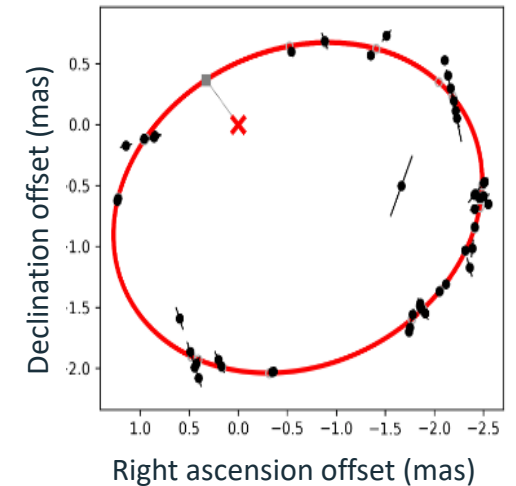
- Kombination der Messmethoden gibt Information über die Masse, Größe, Helligkeit der einzelnen Sterne des Systems
- Photometrie und Astrometrie erlaubt (Wieder)-Entdeckung von Exoplaneten



Gaia DR3 513602552152793907  
Astrometrie und Spektroskopie.,  
P=546d,  $1.2 M_{\odot} + 1.5 M_{\odot}$   
(Neutronenstern?)

- Viele Kandidatensysteme
- müssen noch bestätigt werden

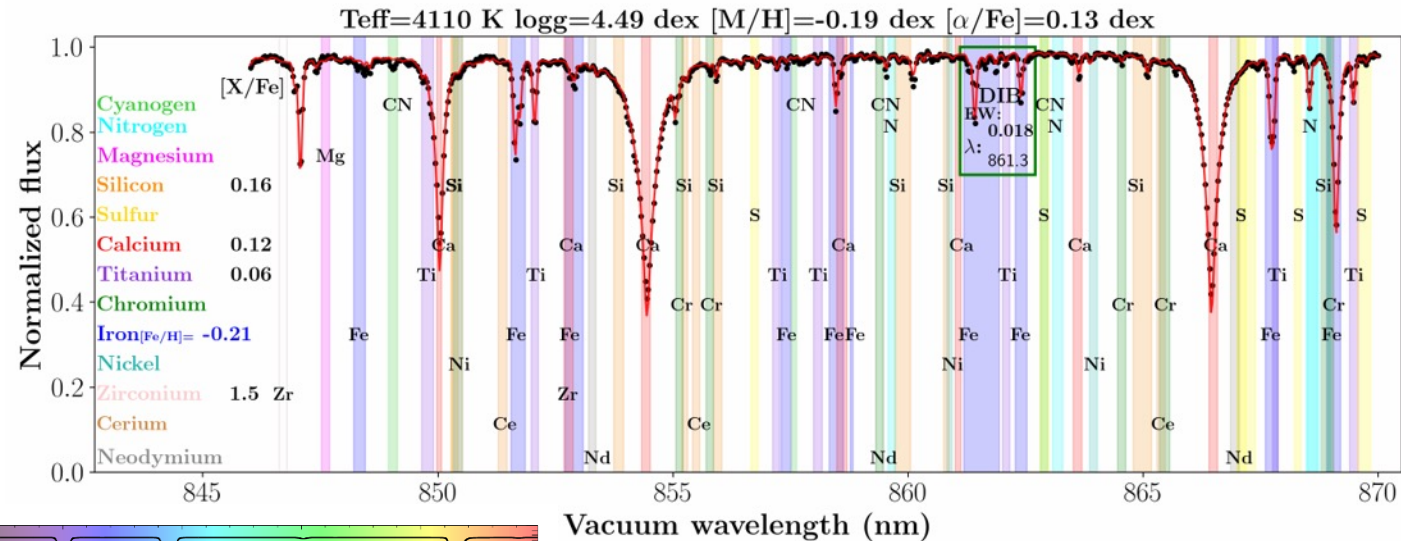
- Spektroskopische Orbits zeigen sehr schwere, lichtschwache Begleiter → Neutronensterne? Schwarze Löcher?



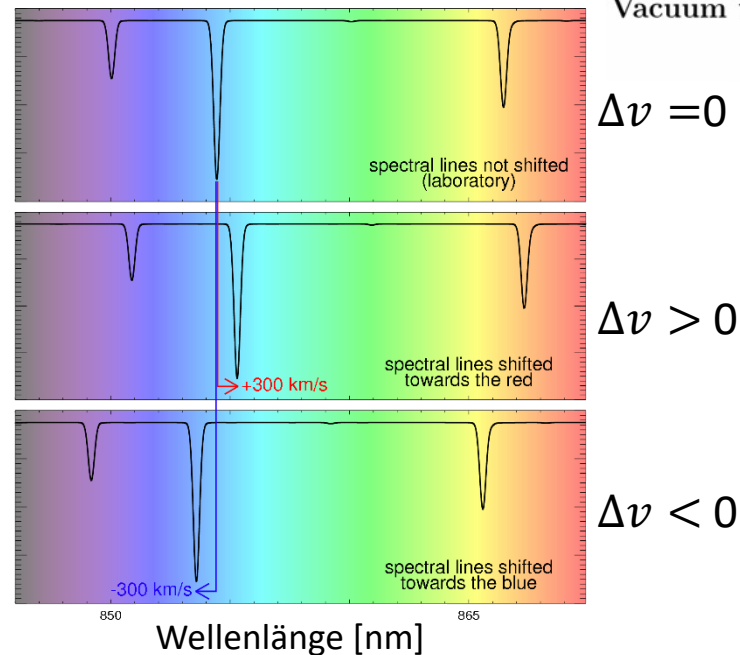


# Radialgeschwindigkeiten in Gaia DR3

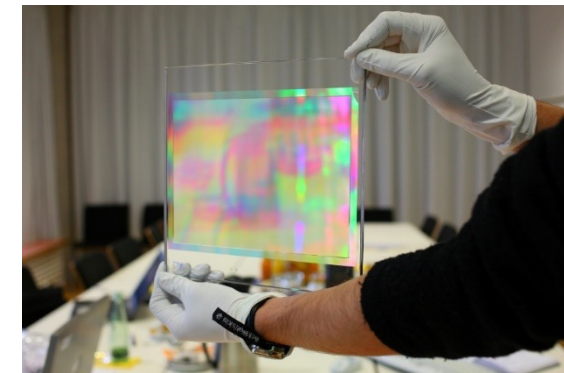
- Hochaufgelöstes Spektrum des RVS
- nahes Infrarot (845 – 872 nm)
- Absorption bei bestimmten Wellenlänge durch Elemente in z.B. Sternatmosphäre
- Lage der Absorptionslinien abhängig von der relativen Geschwindigkeit der Quelle



ESA/Gaia/DPAC-CU8, Recio-Blanco and the GSP-Spec team



Messung der Verschiebung → Radialgeschwindigkeit



# Radialgeschwindigkeiten in Gaia DR3

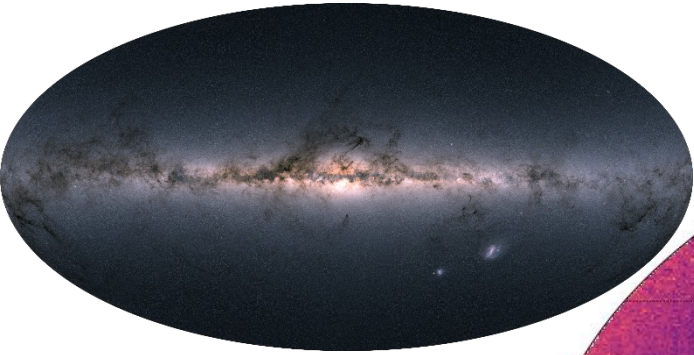
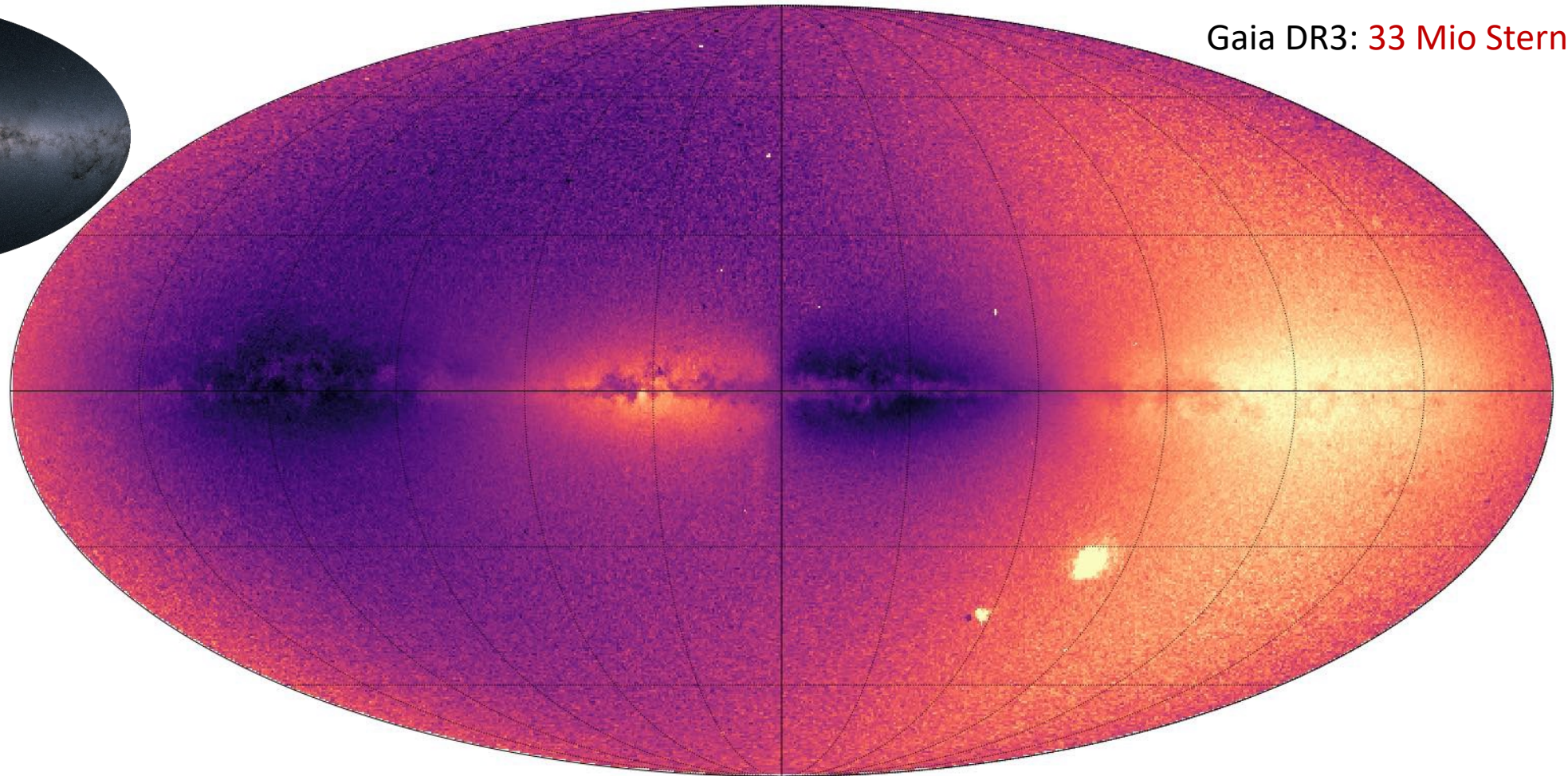


Bild: ESA / DPAC

Gaia DR3: 33 Mio Sterne



# Radialgeschwindigkeiten in Gaia DR3

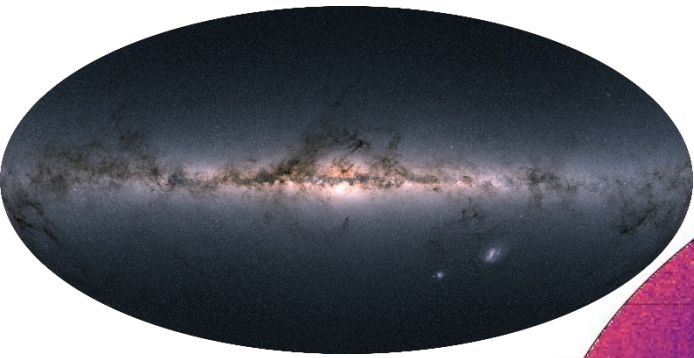
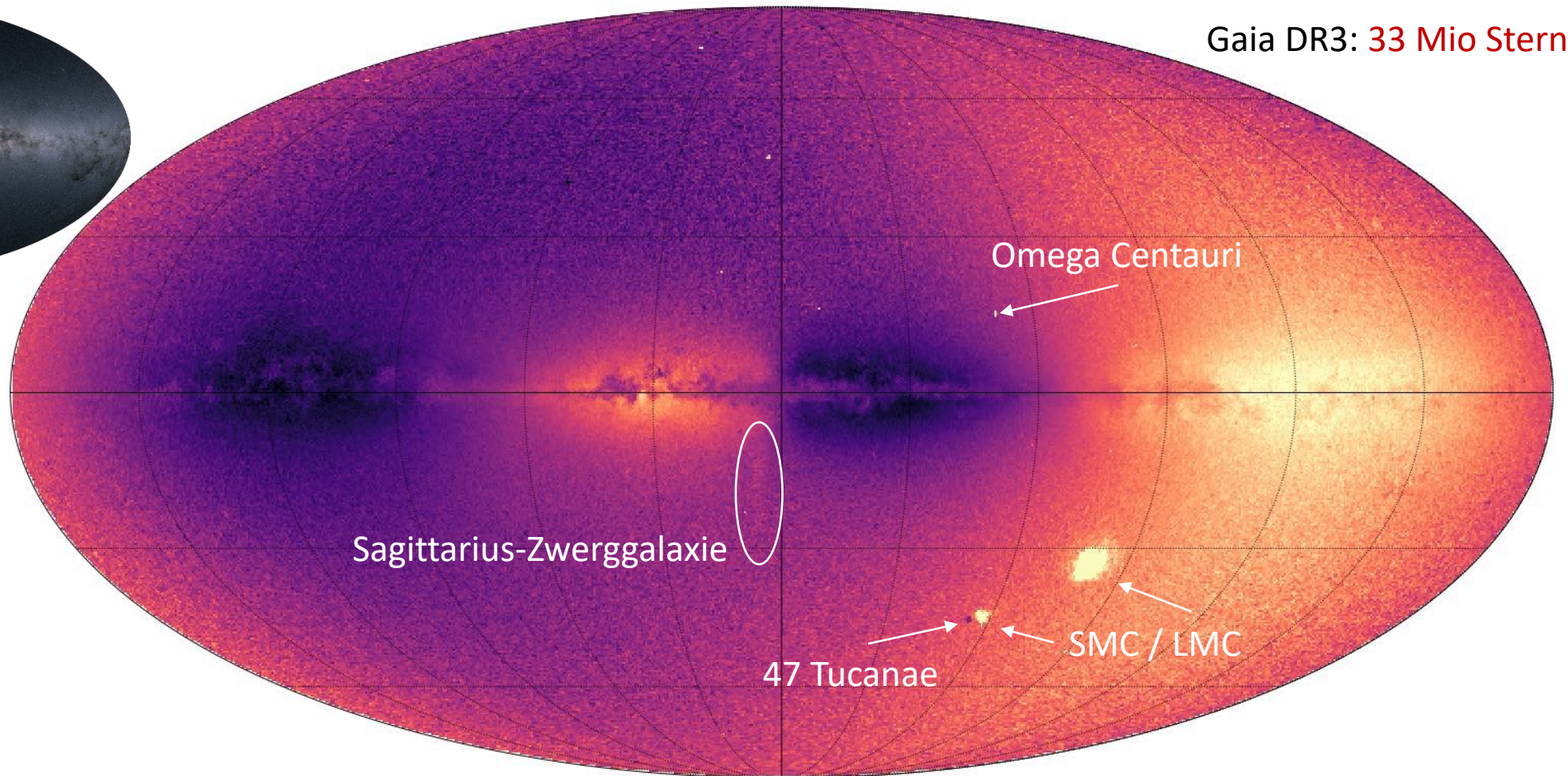


Bild: ESA / DPAC

Gaia DR3: 33 Mio Sterne



auf uns zu

-50

-30

-10

10

30

50

von uns weg

Radialgeschwindigkeit [km/s]

# Teil 3: Extragalaktische Objekte mit Gaia

# Gaia sieht alles!.. OK, fast alles...

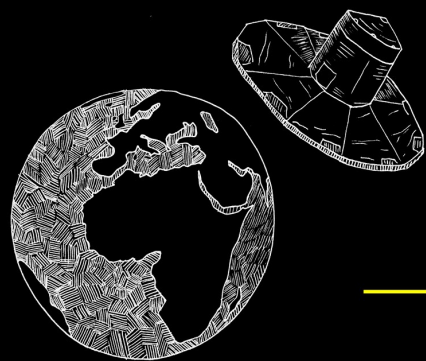
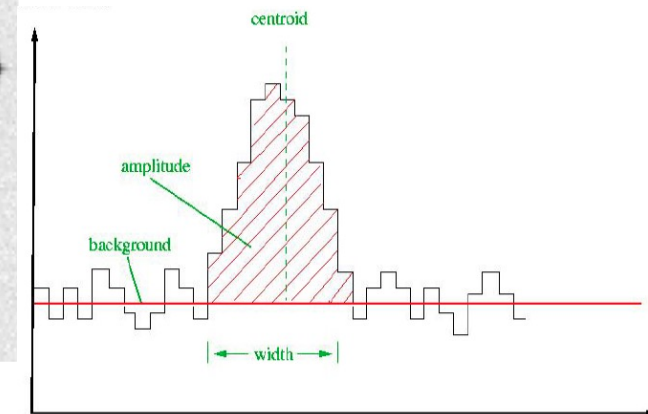
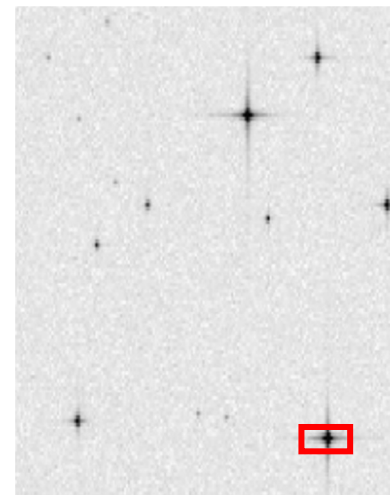
Gaia ist optimiert für Sterne, aber...

Eine Quelle wird von Gaia aufgezeichnet, wenn

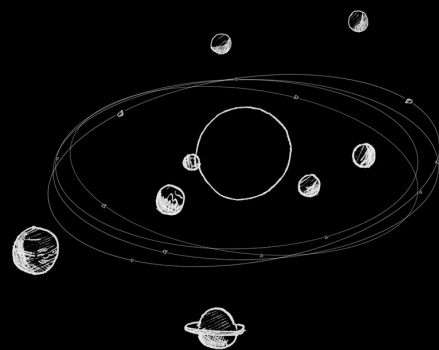
- sie hell genug ist und
- ihr Lichtprofil ausreichend steil in ihrem Zentrum ist.

→ Gaia beobachtet viele nicht-stellare Objekte:

- Extragalaktische Objekte – Quasare und Galaxien
- Objekte des Sonnensystems



Earth & Gaia

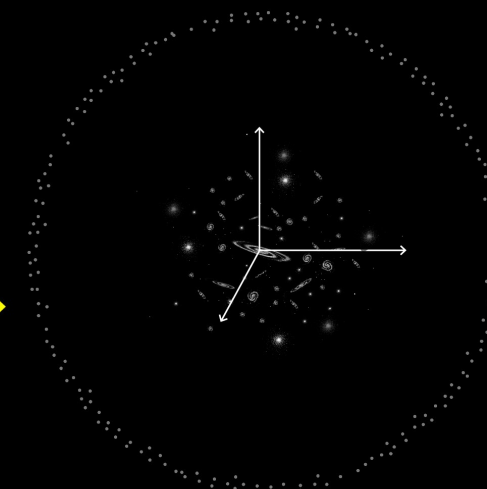


Solar System objects

S  
t  
a  
r  
s



Nearby galaxies



Celestial reference frame: distant quasars

# Gaia erkennt die Natur der Quellen

Aber wie erkennt man, dass ein Objekt eine Galaxie oder ein Quasar ist?

Mehrere weitgehend unabhängige Methoden basieren auf:

- Helligkeit
- Variabilität
- BP/RP-Spektren
- Parallaxen
- Eigenbewegungen

oder einem Teil davon

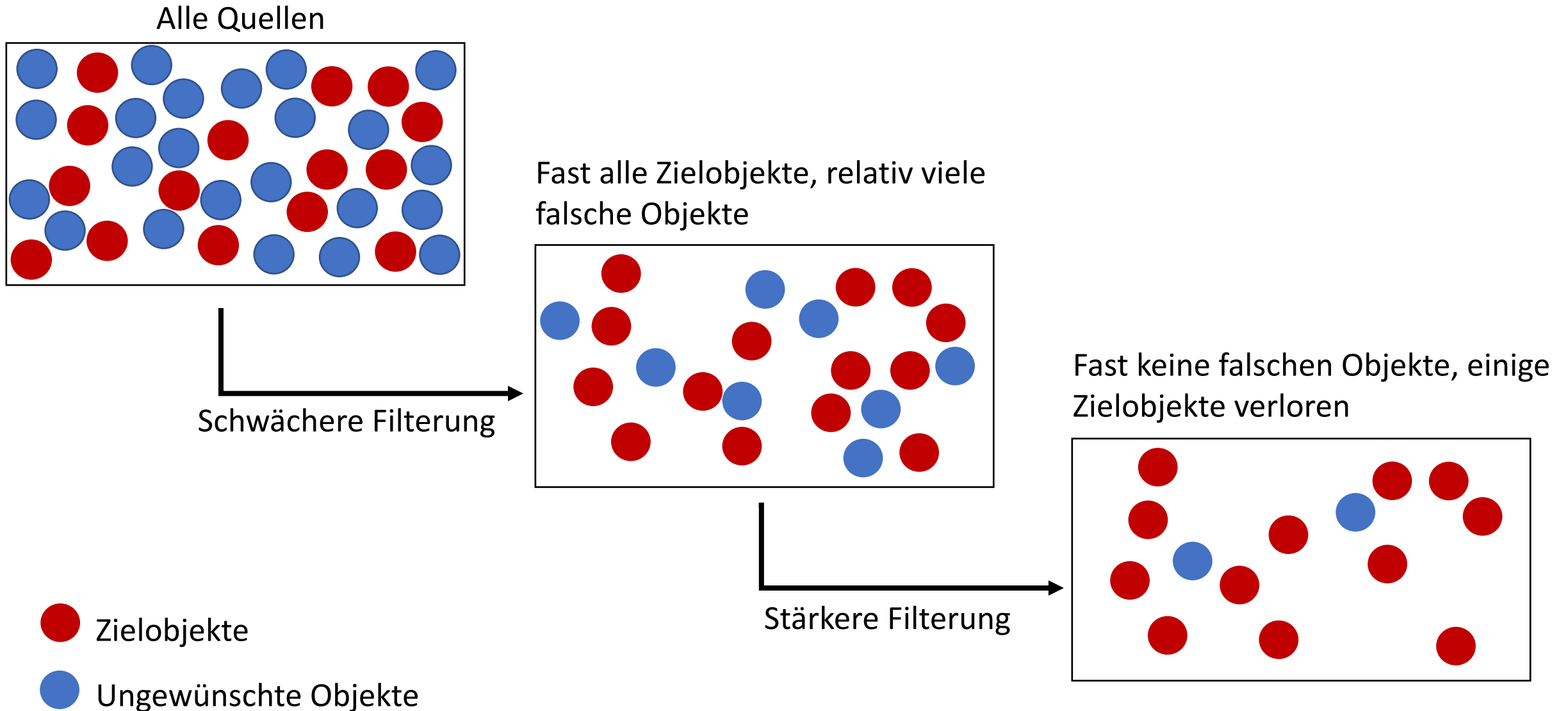
Maschine Learning / Bayesian Inference / Detektion ausgedehnter Objekte / Astrometrische Filterung

Astrometrische Filterung von Quasaren:

Parallaxe und Eigenbewegungen müssen wie Beobachtungsrauschen aussehen!

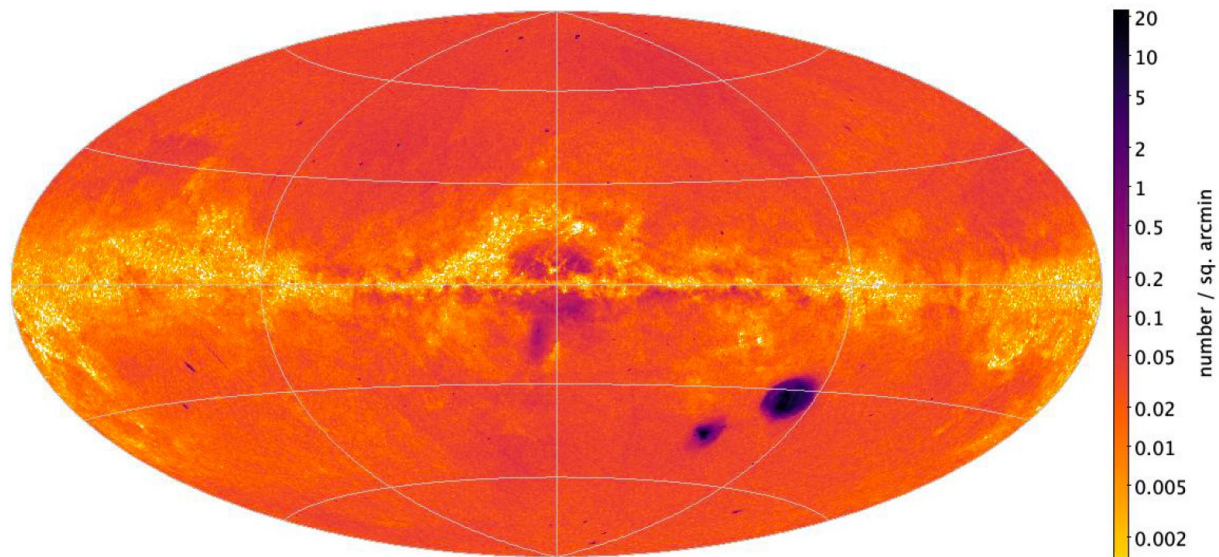


# Dilemma der Auswahl: Vollständigkeit versus Reinheit

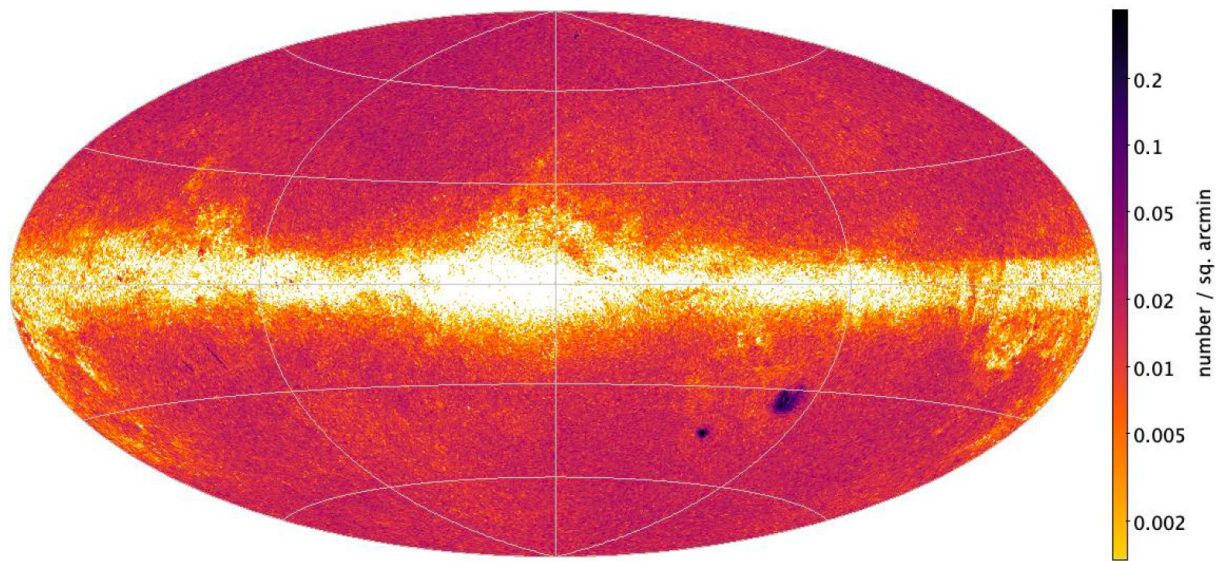


# Quasare

Vollständigere Auswahl: 6.649.162 Quellen

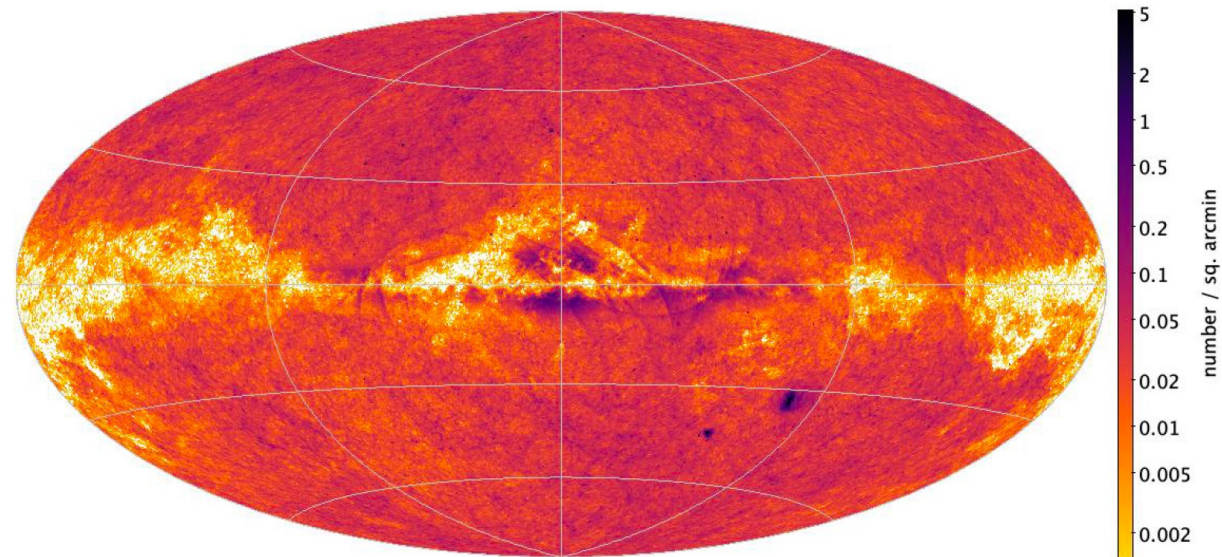


Reinere Auswahl: 1.942.825 Quellen

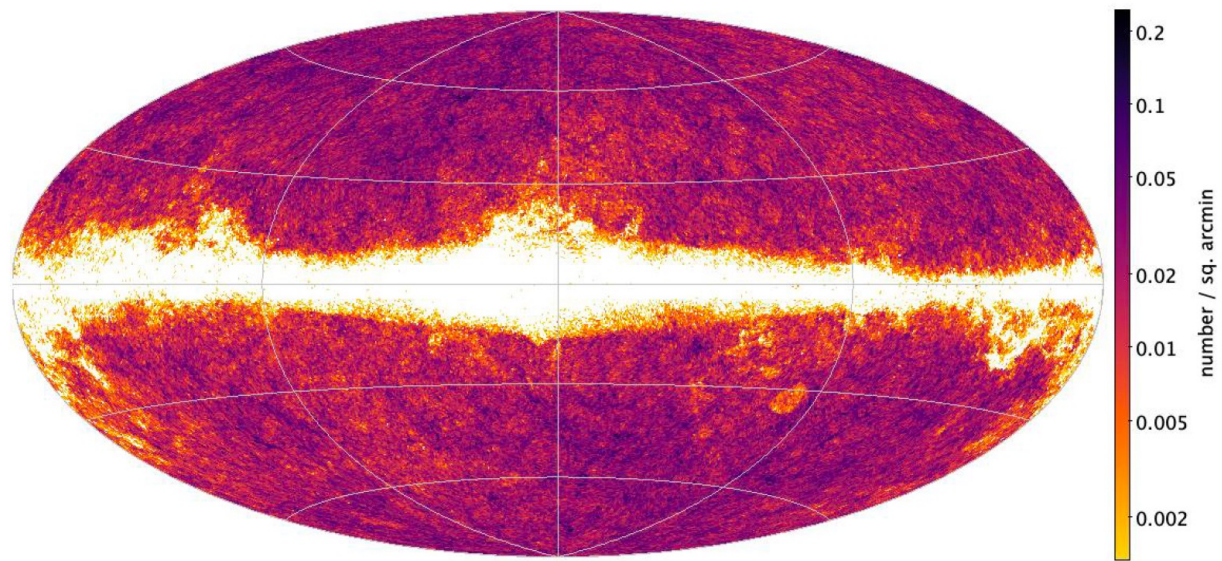


# Galaxien

Vollständigere Auswahl: 4.842.342 Quellen

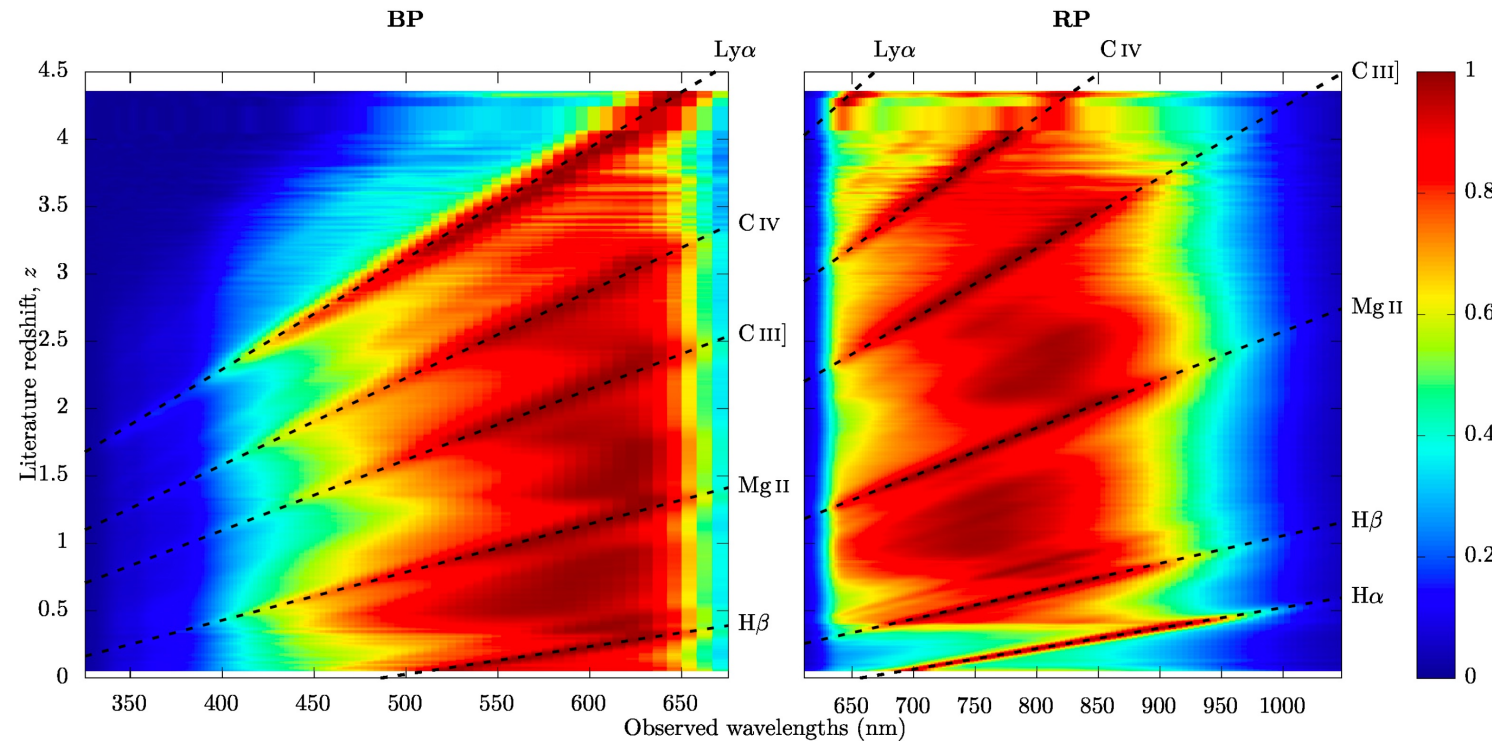


Reinere Auswahl: 2.891.132 Quellen





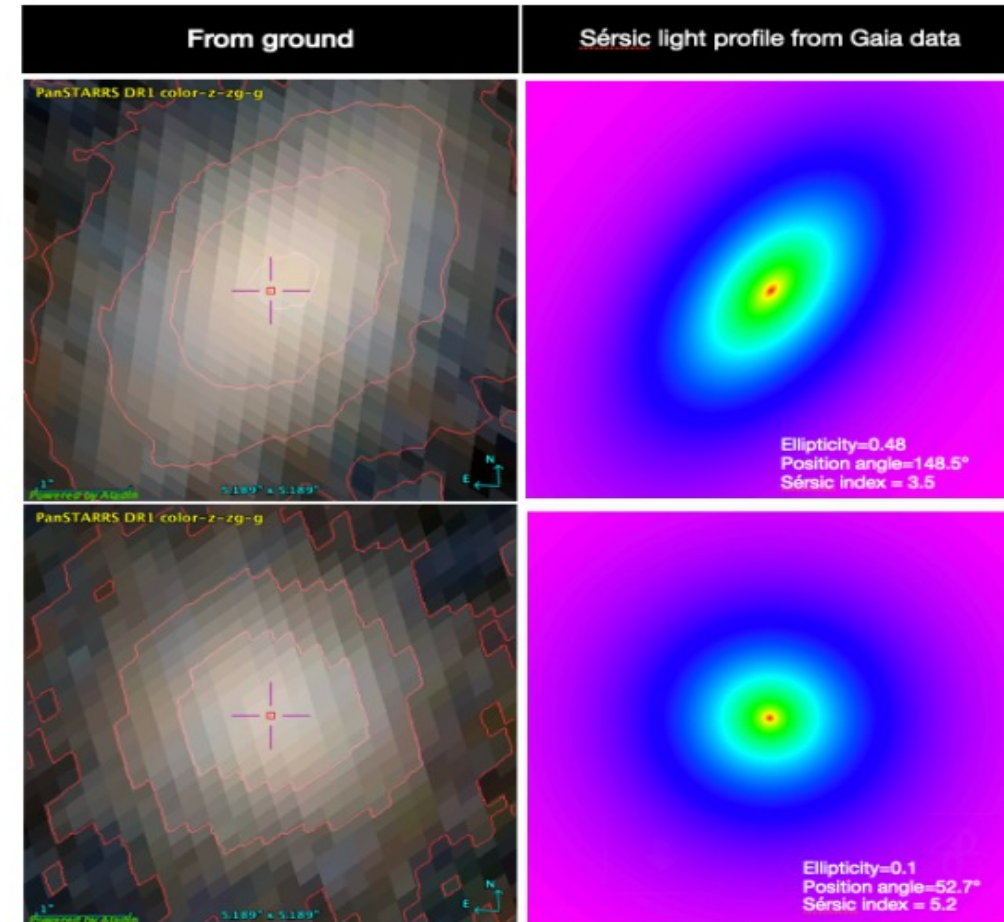
# Gaia liefert weitere Informationen über Quasare und Galaxien



6.375.063 QSO-Rotverschiebungen aus BP/RP-Spektren

Delchambre et al. (2022)

Gaia Collaboration, Bailer-Jones et al. (2022)

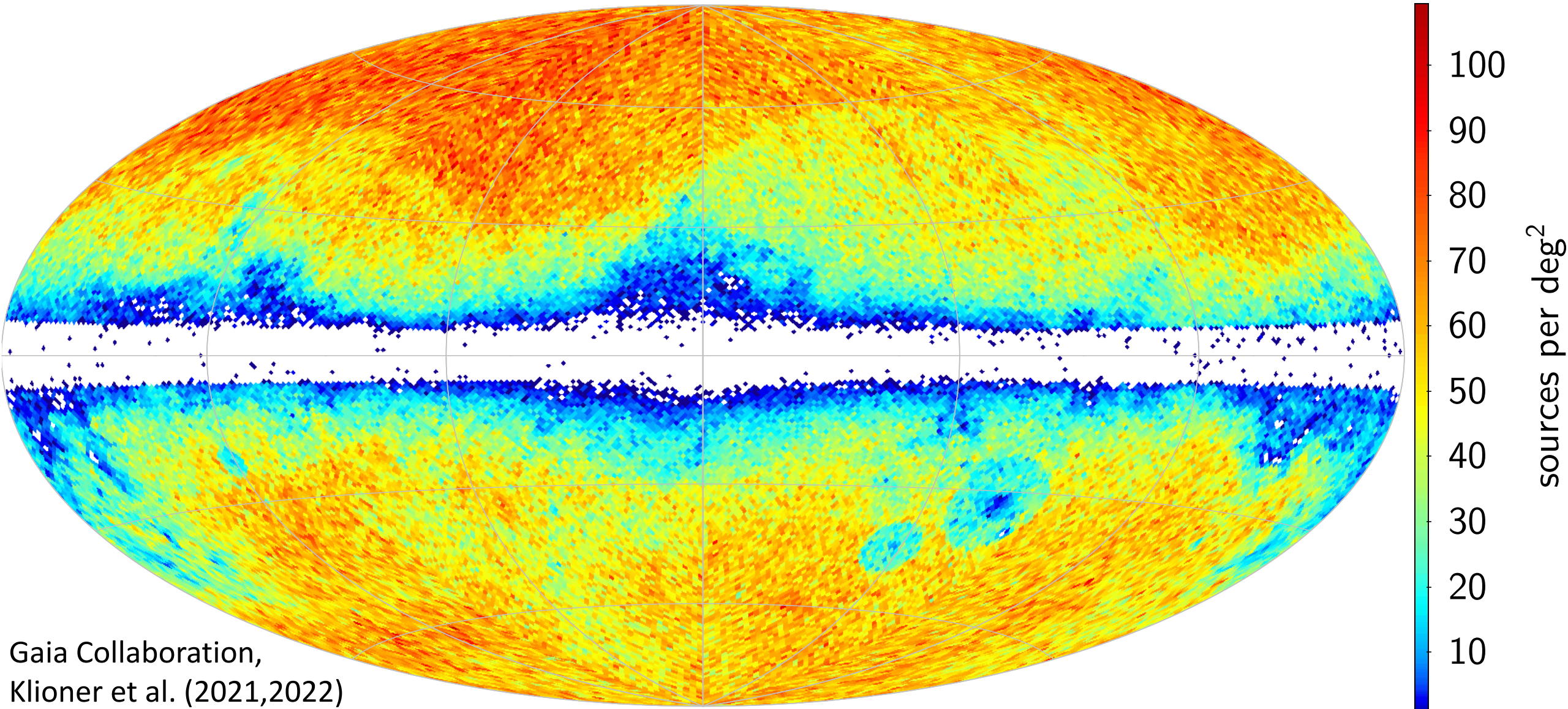


64.498 Host-Galaxien für die Quasare  
15.867 davon mit Licht-Profilen

Ducourant et al. (2022)

# Gaia-Himmelsreferenzsystem 3 (Gaia-CRF3, 2020)

Ein astrometrisch gefilterter Cross-Match mit 17 externen Katalogen: 1.614.173 Quasare



Gaia Collaboration,  
Klioner et al. (2021,2022)

# Gaia-Himmelsreferenzsystem 3 (Gaia-CRF3, 2020)

Ein astrometrisch gefilterter Cross-Match mit 17 externen Katalogen: **1.614.173 Quasare**

Im Jahre 2021 wurde Gaia-CRF3 durch die Internationale Astronomische Union offiziell anerkannt.

Bisher:

Das Himmelsreferenzsystem mit Radio-Beobachtungen (VLBI)

2018: **4588 Quasare**

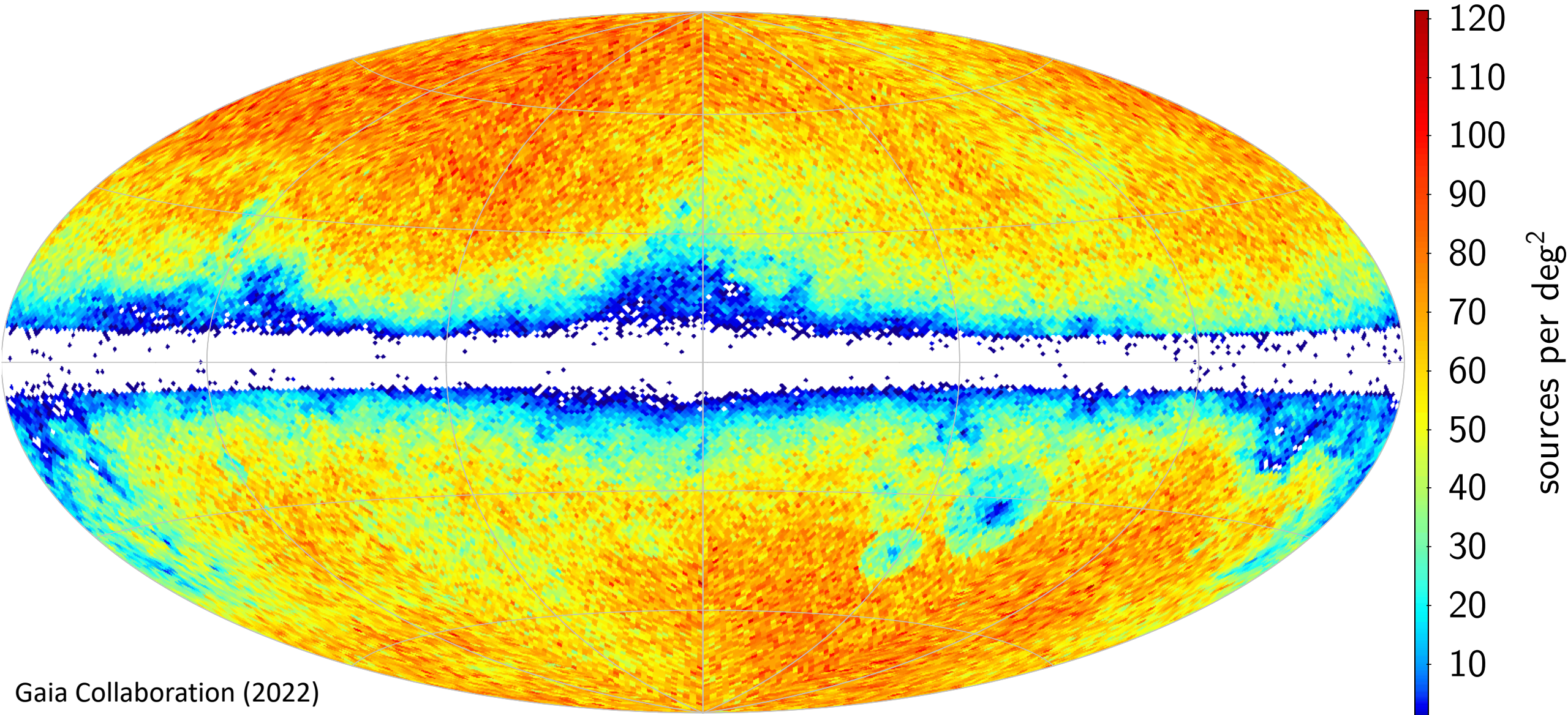
Im Jahre 2020 hat Gaia einen Faktor 350 mehr Quasaren geliefert.  
Die astrometrische Genauigkeit ist vergleichbar!

sources per deg<sup>2</sup>

100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10

# Astrometrische Filterung der QSO-Kandidaten in Gaia DR3 (2022)

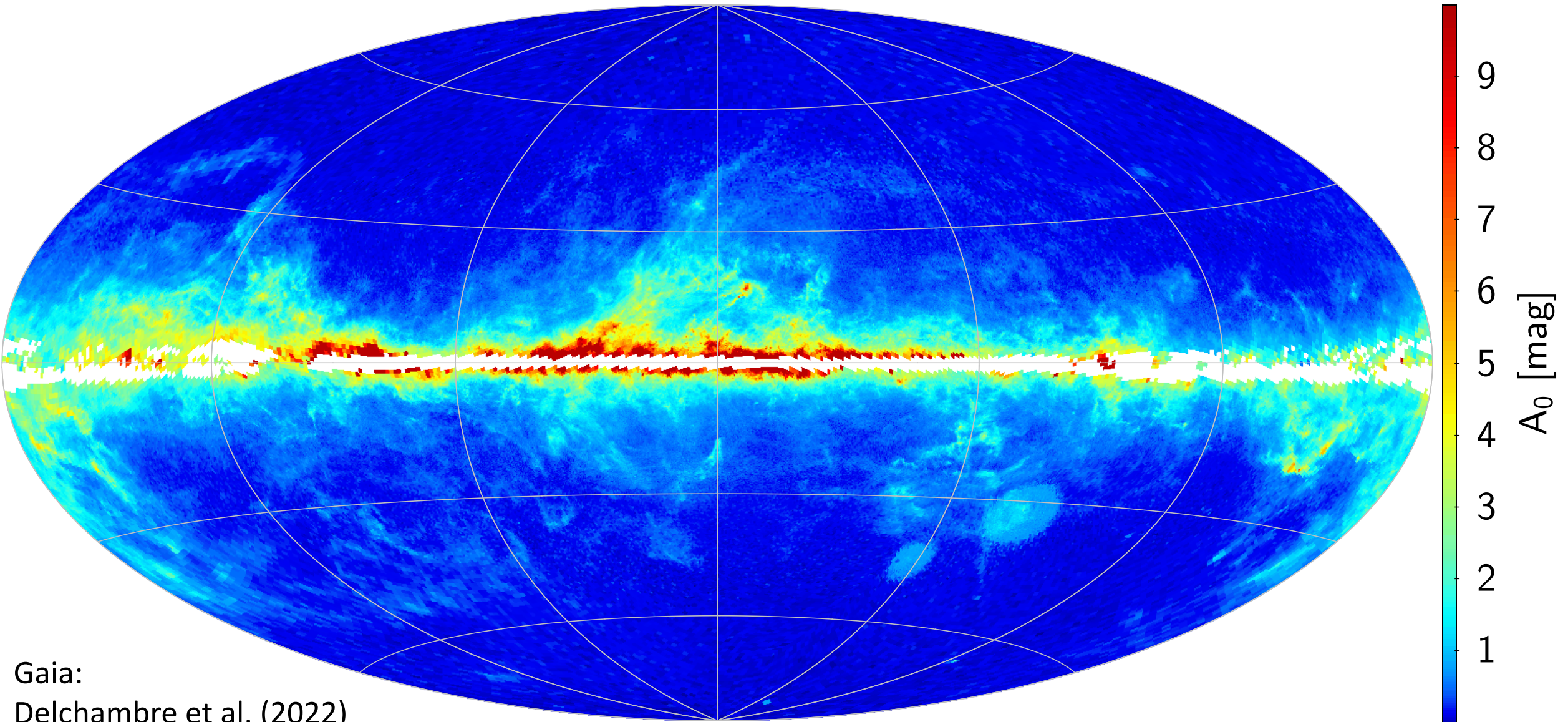
17 externe Kataloge und die QSO-Auswahl in Gaia DR3:  $1.614.173 + 283.581 = 1.897.754$  Quasare



# Qualitätssicherung: Vergleich mit der galaktischen Extinktion

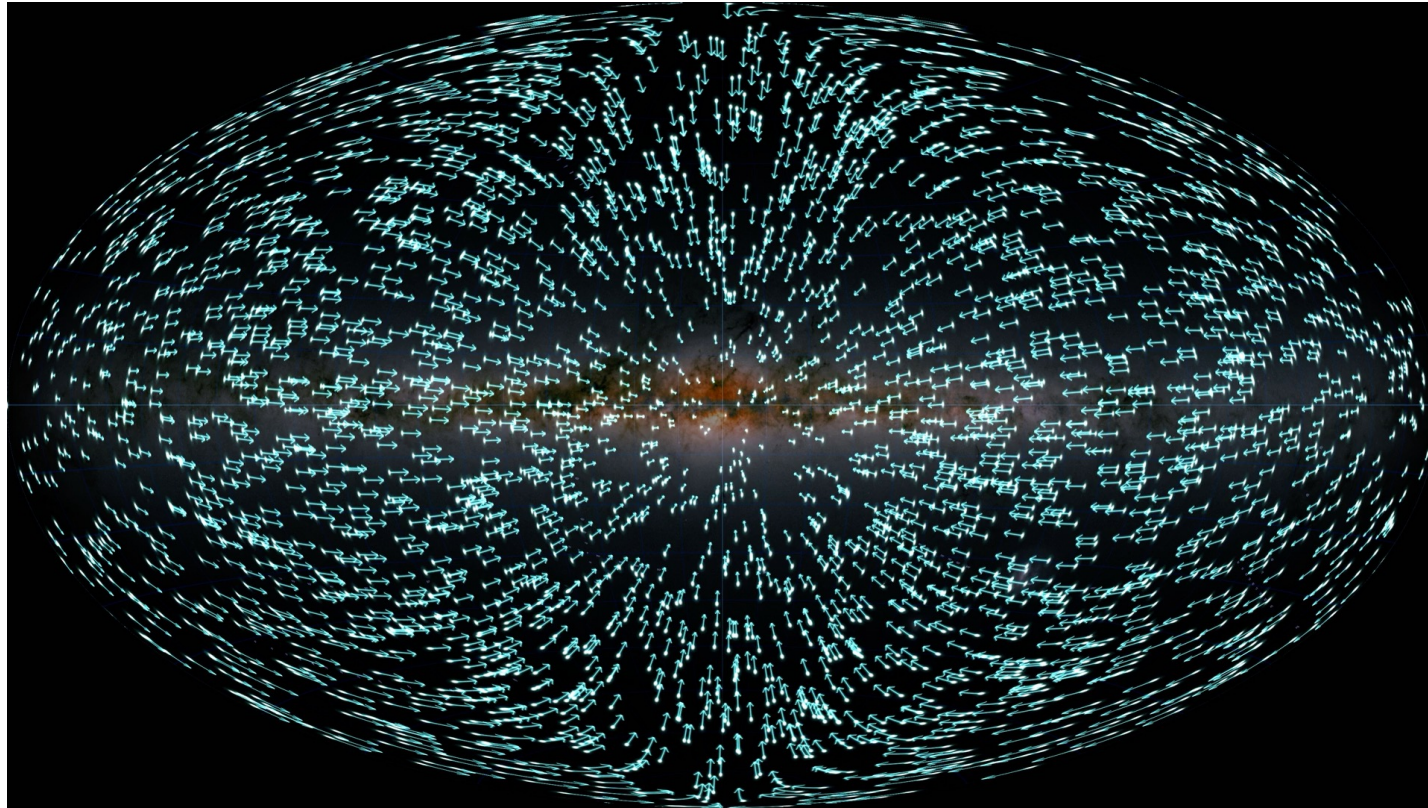
Staub im interstellaren Raum macht Himmelsobjekte lichtschwächer (und röter)...

Eine gute Übereinstimmung mit der Dichte der Quasaren in der astrometrischen Auswahl !



# Qualitätssicherung: Die Beschleunigung des Sonnensystems

- Die Aberration des Lichtes ändert die scheinbaren Richtungen zu den Sternen, wenn die Geschwindigkeit des Beobachters sich ändert.
- Die Beschleunigung des Sonnensystems aus den koordinierten scheinbaren Bewegungen von Quasaren



$(2.32 \pm 0.16) \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  in die Richtung  $\alpha = 269.1^\circ \pm 5.4^\circ$ ,  $\delta = -31.6^\circ \pm 4.1^\circ$

# Teil 4: Gaia und die Relativität

Einfluss relativistischer Effekte auf die Messungen &  
Tests der Relativitätstheorie und fundamentaler Physik

# Größenordnungen der Effekte

Relativistische Effekte sind im allgemeinen sehr klein!

## Beispiele:

- Lichtablenkung durch Sonne: 1,75"
- Periheldrehung von Merkur: 0,43"/yr
- Lichtablenkung durch Jupiter: 16 mas
- Relativistische Aberration: 4 mas
- Quadrupol Anteil bei Jupiter: 240  $\mu$ as
- Gravitationswellen (gemessen):  $< 10^{-18}$  m
- Effekte in Gaia Uhren: Millisekunden

1" = 1 Bogensekunde = 1/3600tel Grad

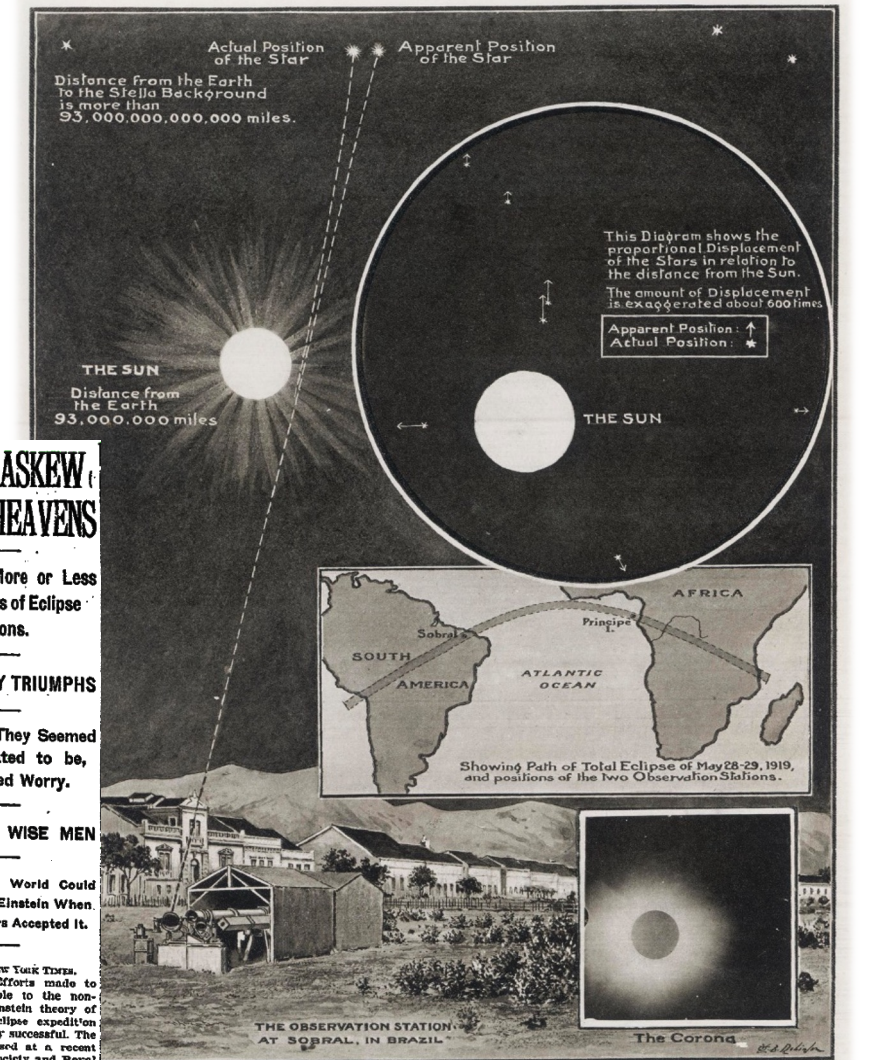
1mas = 1 Milli-Bogensekunde = 1/3 600 000tel Grad

1 $\mu$ as = 1 Mikro-Bogensekunde = 1/3 600 000 000 Grad



"STARLIGHT BENT BY THE SUN'S ATTRACTION": THE EINSTEIN THEORY.

DRAWN BY W. B. ROBINSON, FROM MATERIAL SUPPLIED BY DR. CROMMELIN.



## LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

## EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

## A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.

Special Cable to THE NEW YORK TIMES. LONDON, Nov. 8.—Efforts made to put in words intelligible to the non-scientific public the Einstein theory of light proved by the eclipse expedition so far have not been very successful. The theory was discussed at a recent meeting of the Royal Society and Royal Astronomical Society, Sir Joseph Thom-

THE CURVATURE OF LIGHT: EVIDENCE FROM BRITISH OBSERVERS' PHOTOGRAPHS AT THE ECLIPSE OF THE SUN.

The results obtained by the British expedition to observe the total eclipse of the sun last May verified Professor Einstein's theory that light is subject to gravitation. Writing in our issue of November 15, Dr. A. C. Crommelin, one of the British observers, said: "The eclipse was specially favourable for the purpose, there being no fewer than twelve fairly bright stars near the limb of the sun. The process of observation consisted in taking photographs of these stars during totality, and comparing them with other plates of the same region taken when the sun was not in the neighbourhood. Then if the starlight is bent by the sun's attraction, the stars on the eclipse plates would seem to be pushed outward compared with those on the other plates. . . . The second Sobral camera and the one used at Principe agree in supporting (Einstein's theory). . . . It is of profound philosophical interest. Straight lines in Einstein's space cannot exist; they are parts of gigantic curves."—[Drawing Copyrighted in the United States and Canada.]



# GREM – Gaia Relativity Model

## Ziele von Gaia

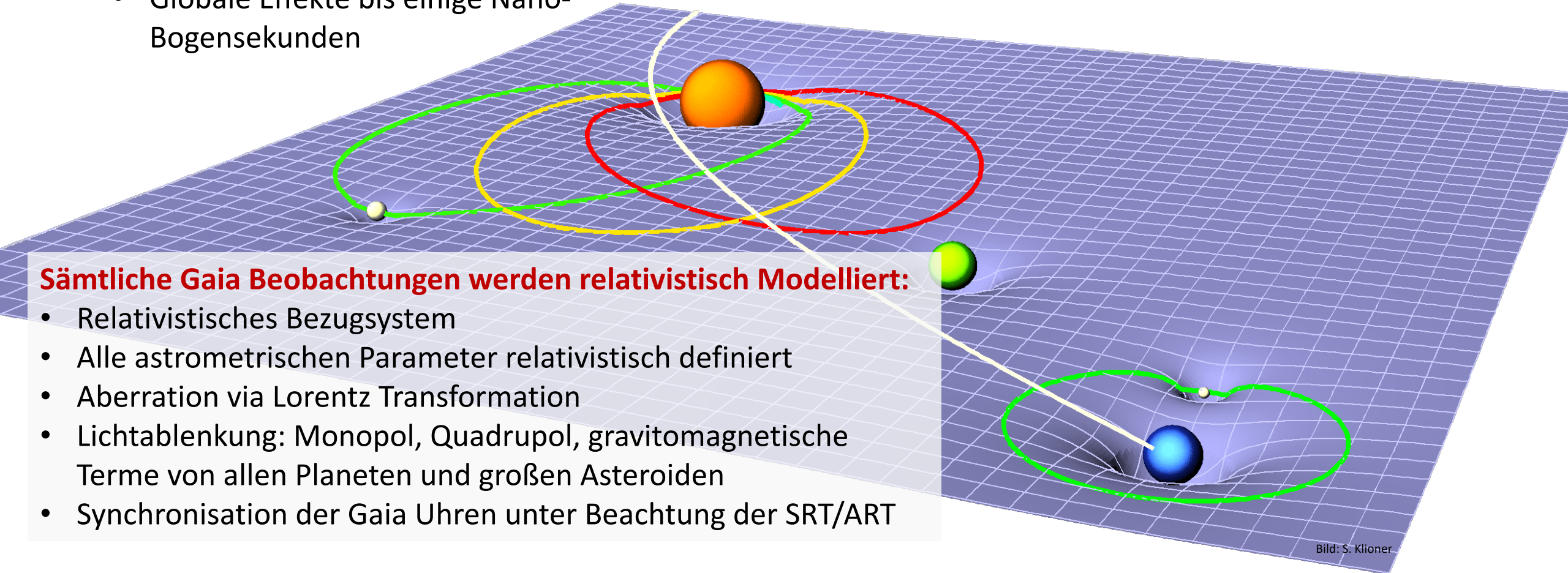
- Individuelle Messgenauigkeit bis einige Mikro-Bogensekunden
- Globale Effekte bis einige Nano-Bogensekunden



Komplexe Beobachtungen, durch relativistische Effekte beeinflusst, müssen in wohldefinierten und konsistenten Parametern beschrieben werden.

## **Sämtliche Gaia Beobachtungen werden relativistisch Modelliert:**

- Relativistisches Bezugssystem
- Alle astrometrischen Parameter relativistisch definiert
- Aberration via Lorentz Transformation
- Lichtablenkung: Monopol, Quadrupol, gravitomagnetische Terme von allen Planeten und großen Asteroiden
- Synchronisation der Gaia Uhren unter Beachtung der SRT/ART



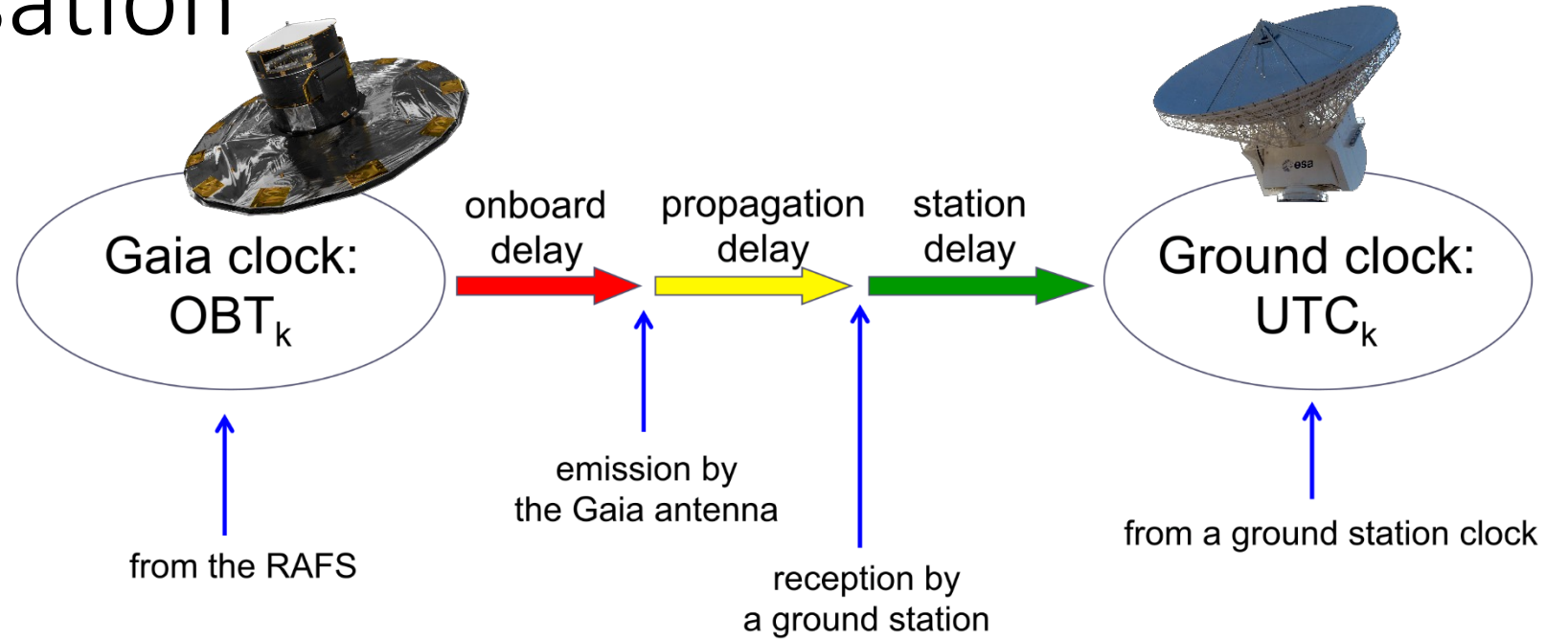
# Uhrensynchronisation

Eine Atomuhr im Weltraum & eine Atomuhren auf der Erde auf „Berg- und Talfahrt“ im Raum-Zeit-Gebirge.

Beachtung relativistischer Effekte notwendig für <1ms Synchronisation!



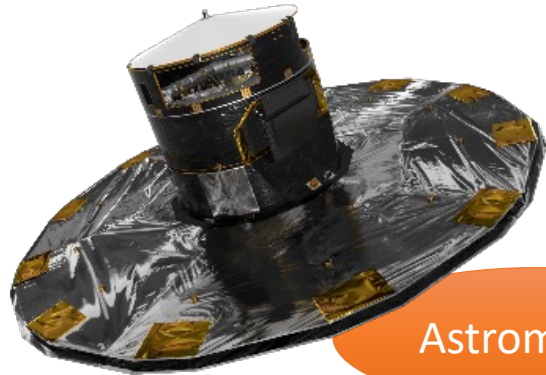
Bild: Airbus/ESA



- Erdrotation & -orientierung
- Troposphärenmodell
- Wetterbedingungen
- Verzögerung durch Elektronik
- Geometrische Verzögerung
- Bewegung der Bodenstation
- Relativistische Koordinaten von Gaia und Bodenstation
- 4D Transformation von TT/TCB
- Shapiro Verzögerung

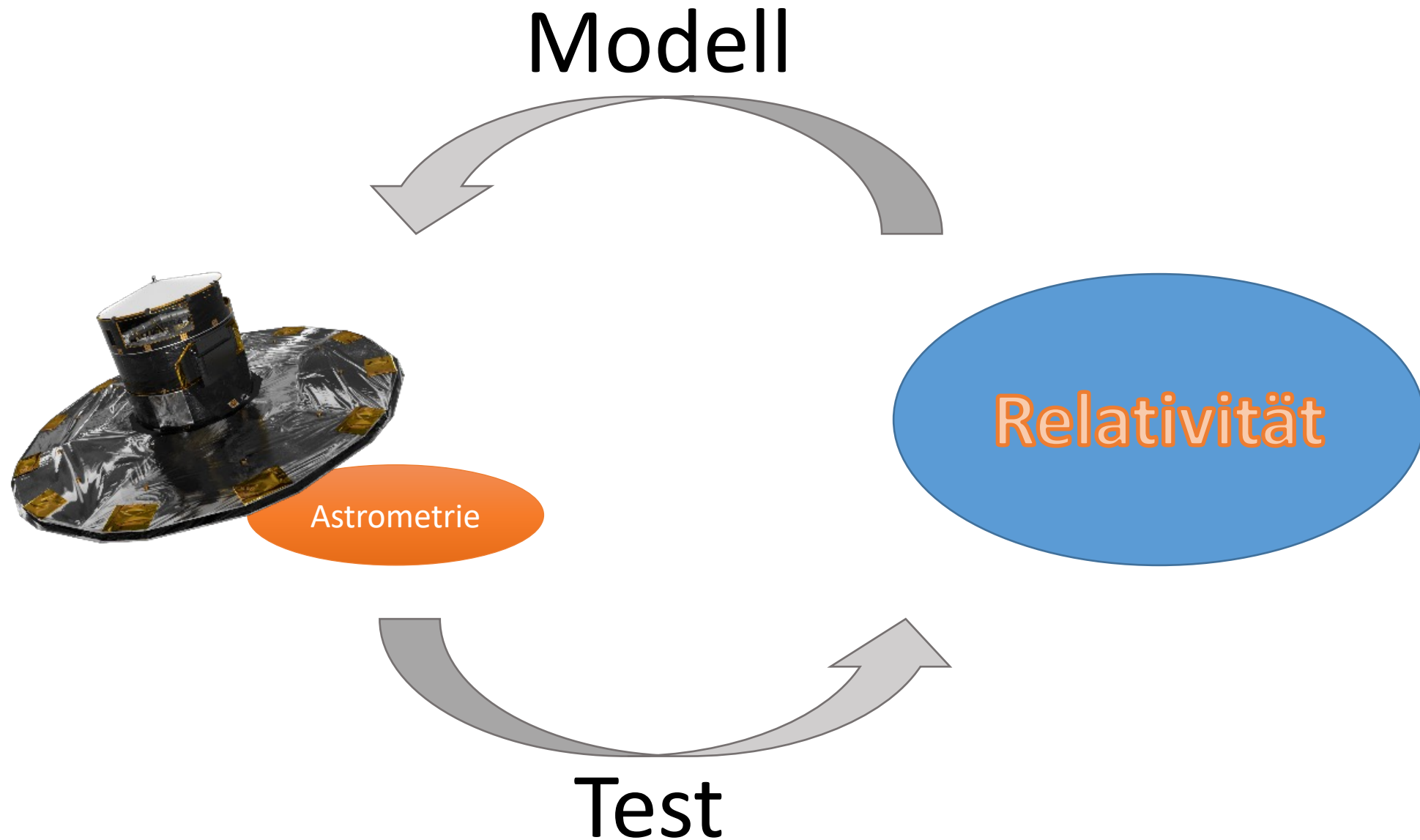
Rahmenwerk zur Synchronisation komplett relativistisch formuliert!

# Modell



Astrometrie

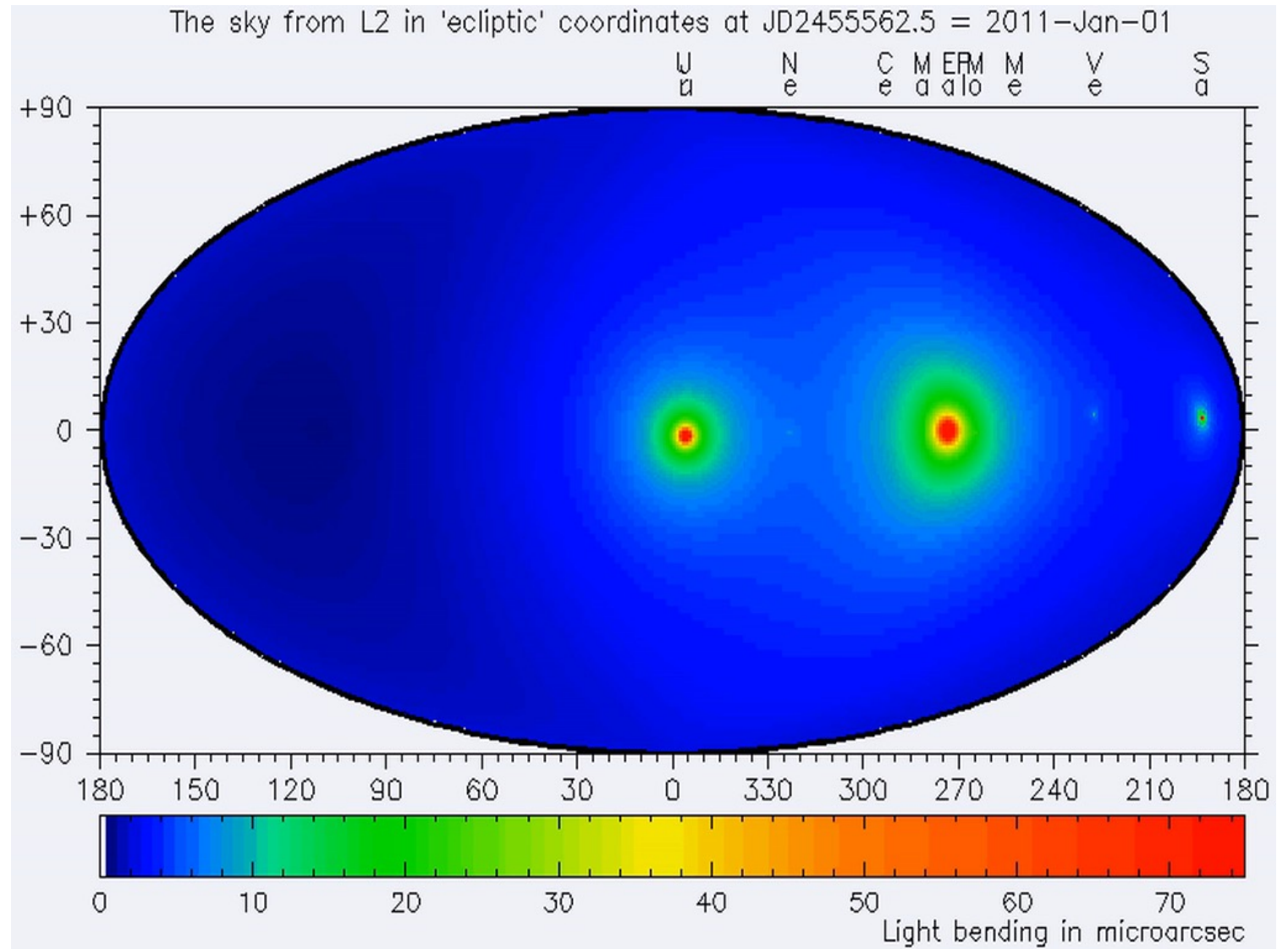
Relativität



Jeder relativistische Effekt der in unseren Modellen benutzt wird,  
kann auch für Tests der Relativitätstheorie benutzt werden!

# Relativistische Tests / Fundamentalphysik

- Relativistische Effekte der speziellen Relativitätstheorie
- Lichtablenkung
  - „Klassische“ Lichtablenkung
  - Ablenkungseffekte höherer Ordnung
  - Mikrolensing
  - Unbekannte Deflektoren
  - Kosmologische Tests
- Beschleunigung des Sonnensystems
- Gravitationswellen
- ...



# Gravitationswellen

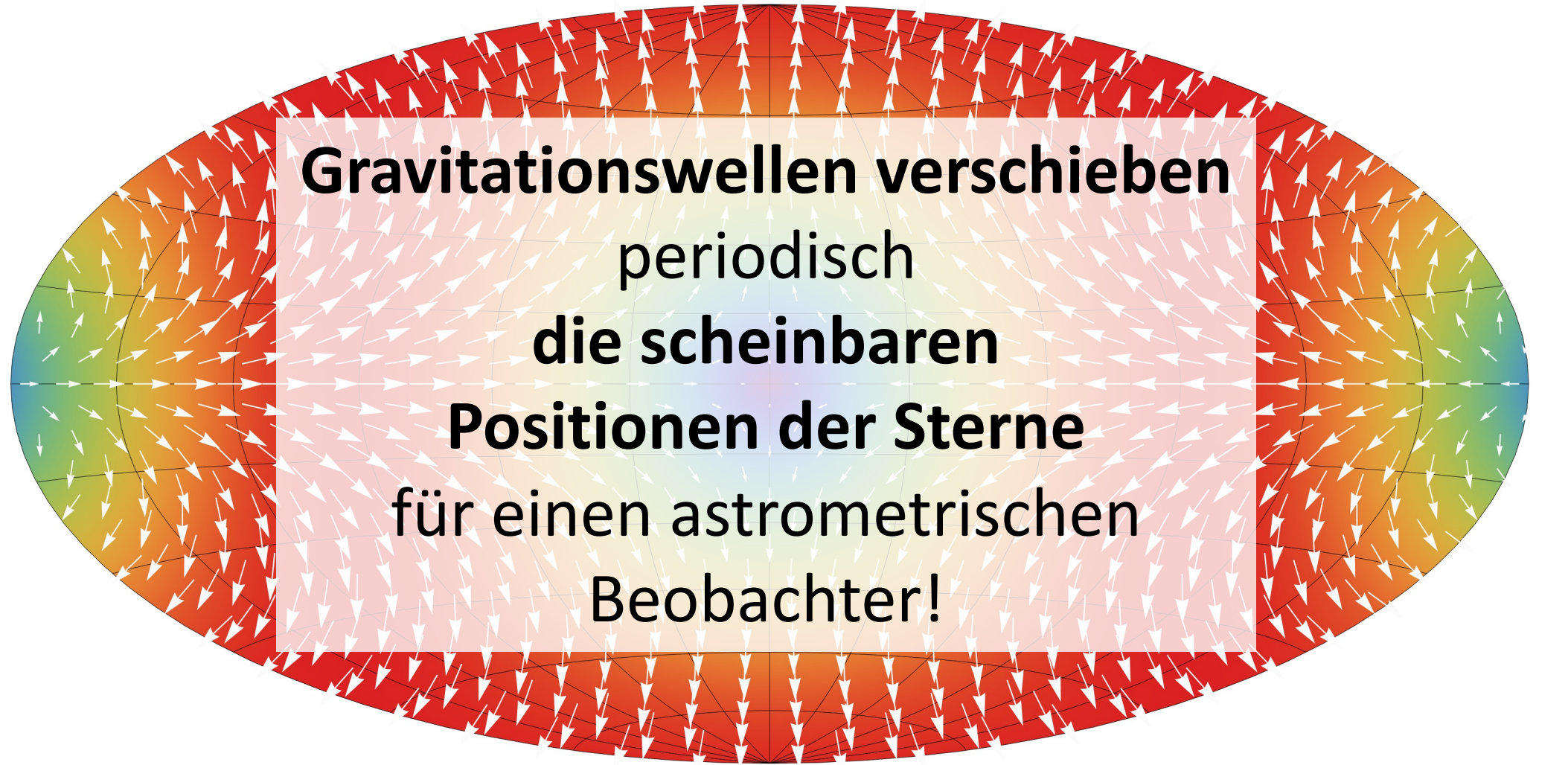


Gravitationswellen sind zeitlich veränderliche, sich ausbreitende, Gravitationsfelder.

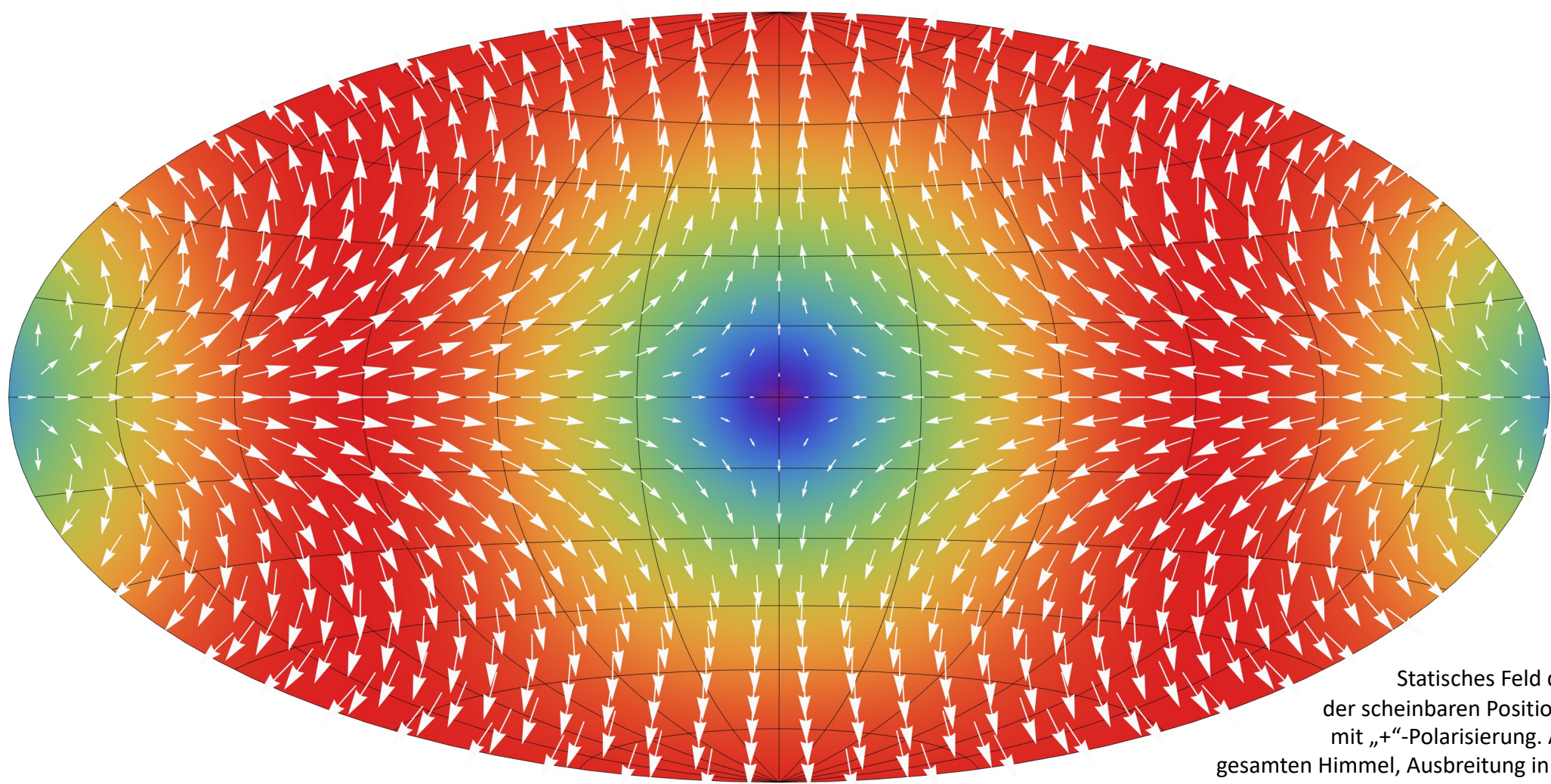
Messbarer Effekt (Anlagen in Betrieb):

- Stauchung und Streckung des Raumes (erfolgreich gelungen mit Interferometern)
- Laufzeitverschiebung von Pulsar Pulsen

# Gravitationswellen



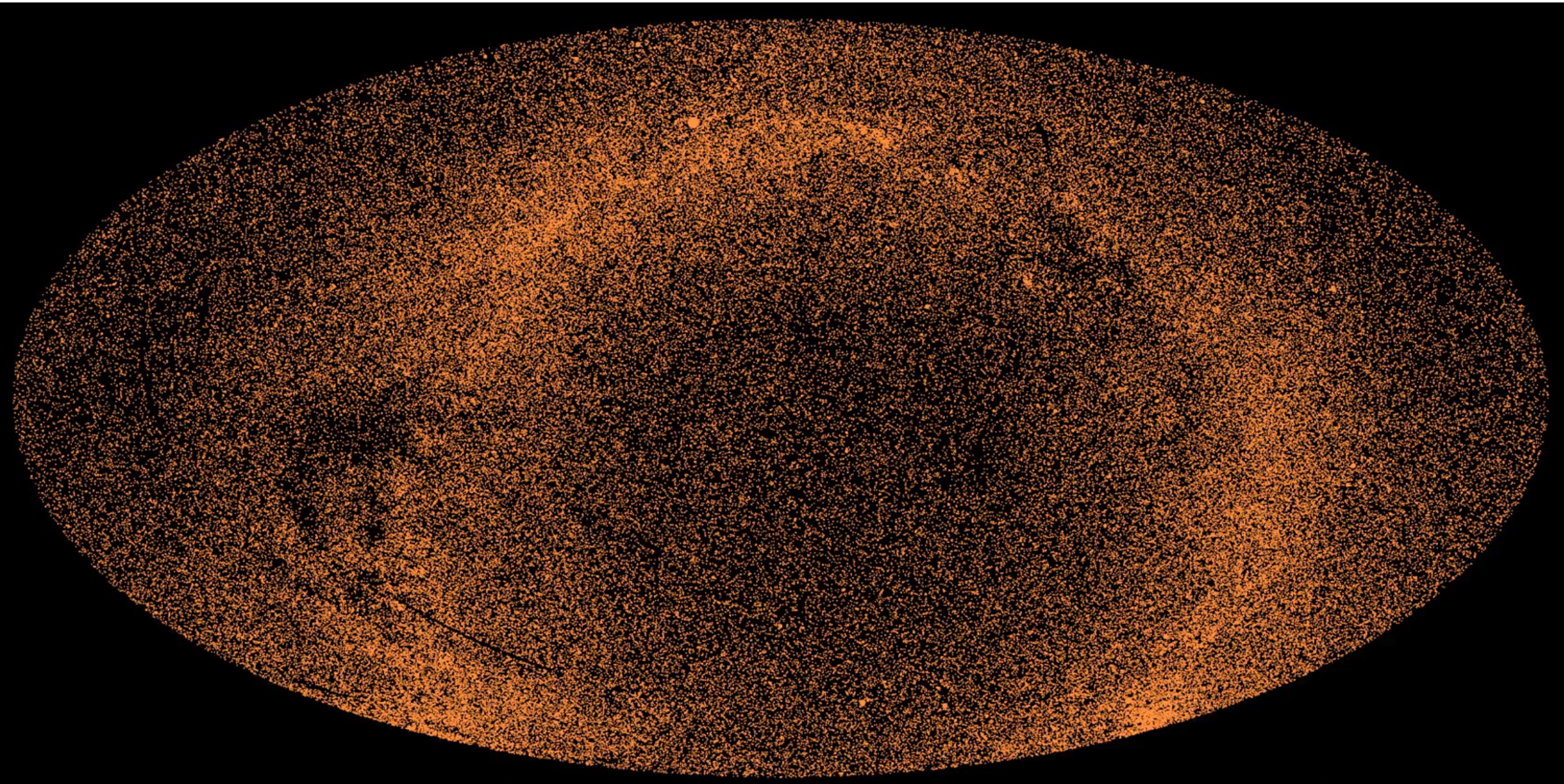
# Gravitationswellen



Statisches Feld der Verschiebungen der scheinbaren Positionen durch eine GW mit „+“-Polarisierung. Abbildung zeigt den gesamten Himmel, Ausbreitung in Richtung Bildmitte.

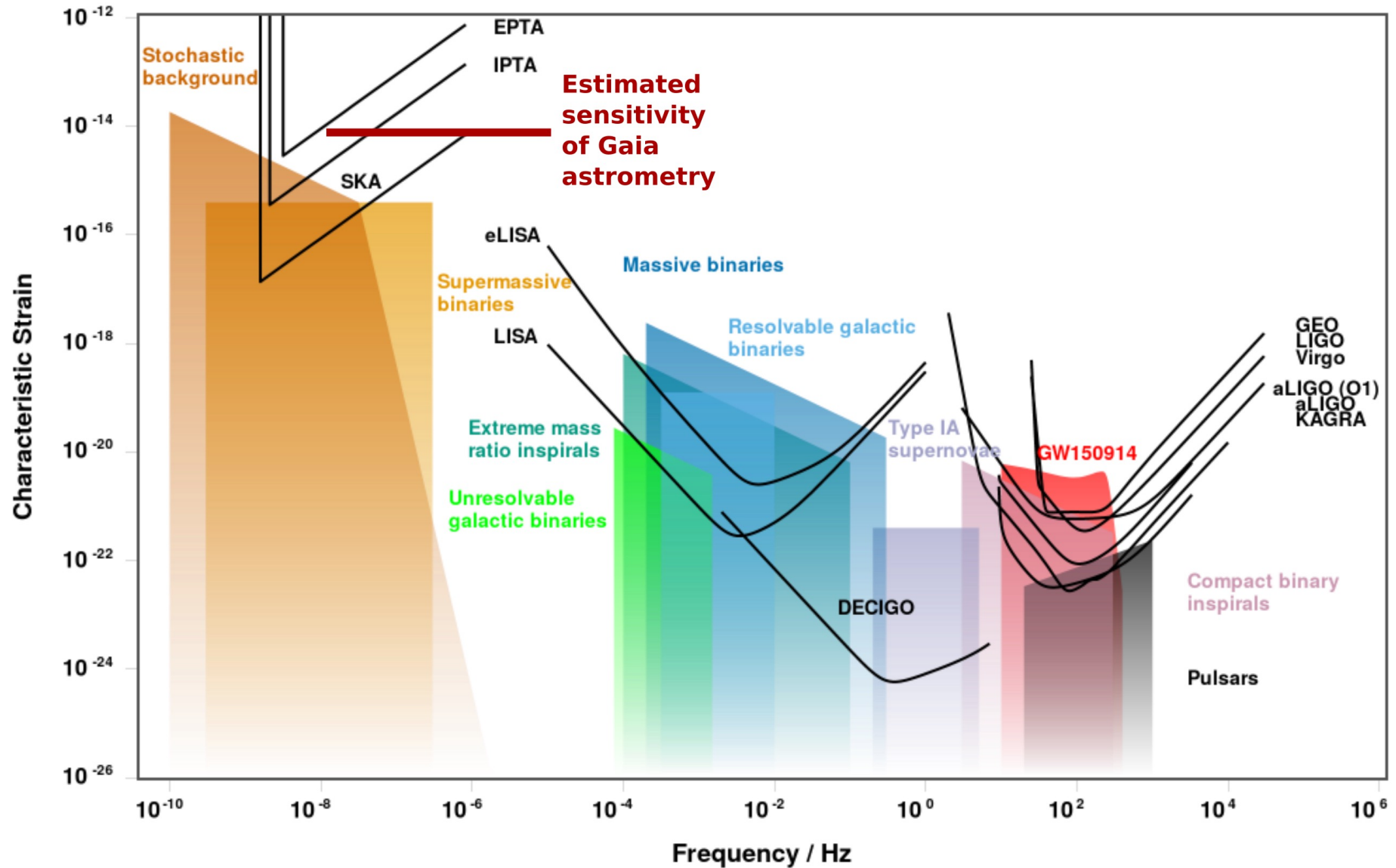






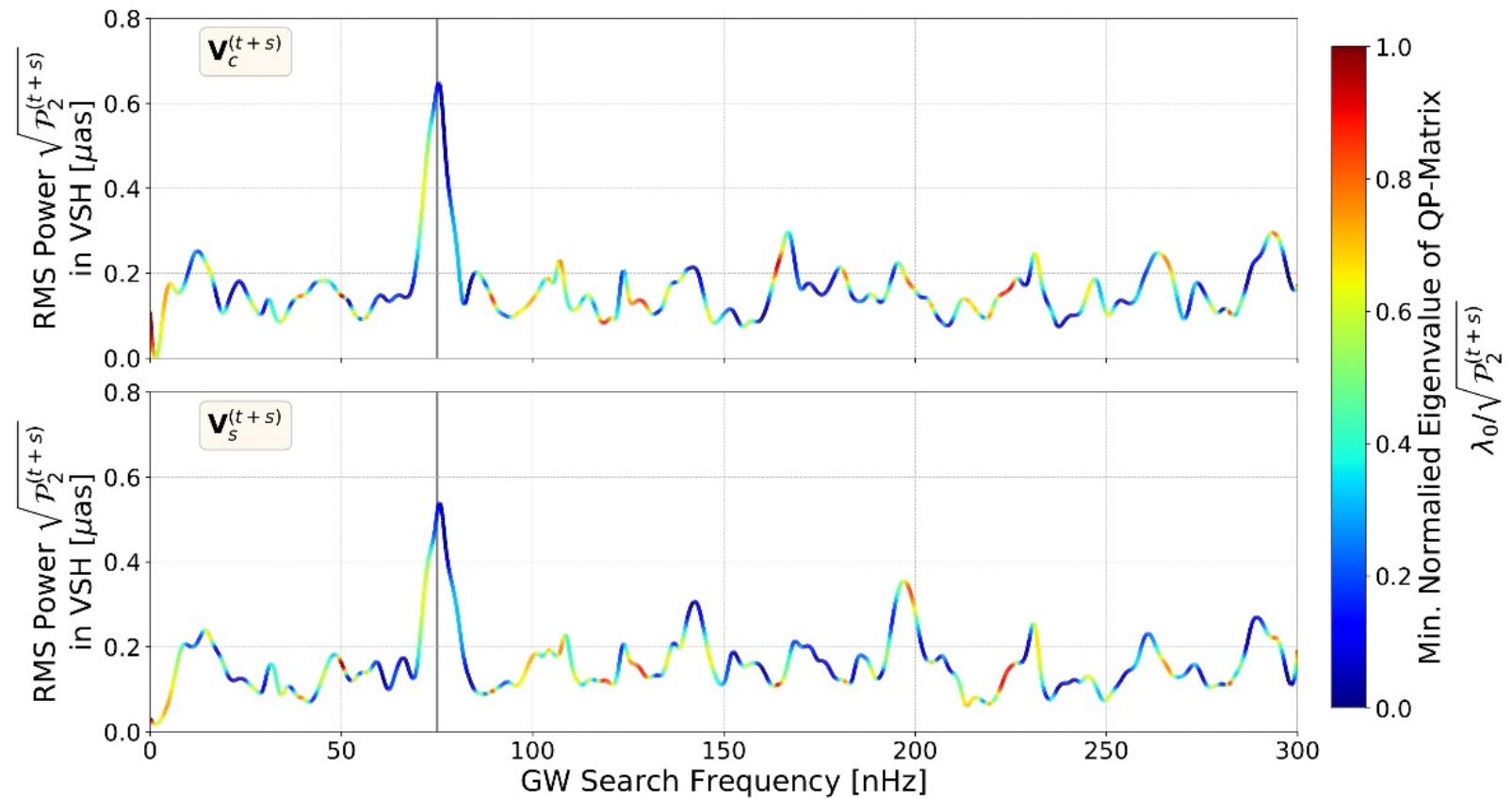
Animation des GW Effektes einer „×“-Polarisation. Ausbreitung in Richtung Bildmitte.

# Gravitationswellen



# Gravitationswellen

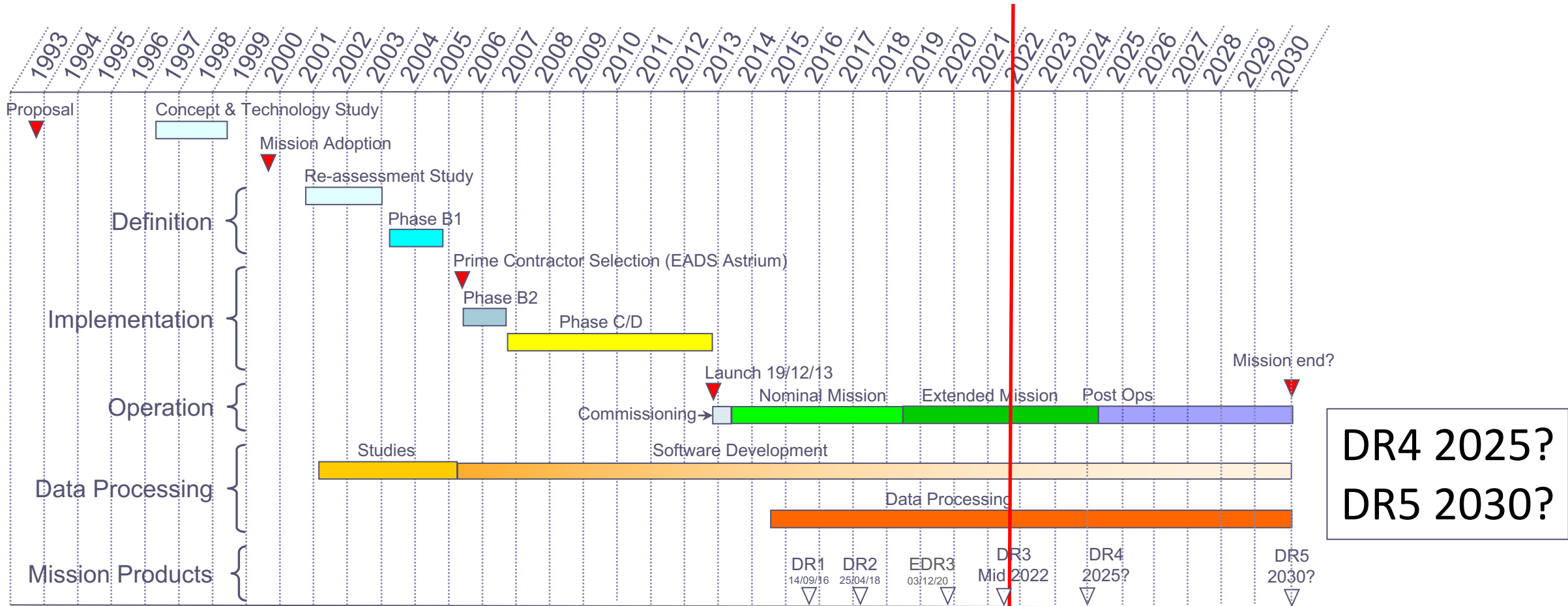
- GWs werden in astrometrischer Lösung nicht modelliert
- Effekt für einzelne Beobachtungen irrelevant
- Effekt verbleibt in Residuen (Diskrepanz zwischen Beobachtungen und endgültigem Katalog)
- Seit 2016 durch ESA finanzierte Forschung zur Detektion von GWs in Gaia Daten (Residuen) am Lohrmann-Observatorium
- Anwendung unserer Methode spätestens für DR5 (2027)



Unsere Detektionsmethode angewendet auf simulierten Gaia Daten. Peak im Spektrum der GW Frequenzen deutet auf vorher eingefügtes Signal hin.

Wie geht es weiter?

# Missionszeitplan



DR4 2025?  
DR5 2030?

Heute = Tag 2898 der wiss. Beobachtungen

Bis heute: 108 TB von (komprimierten) wissenschaftlichen Daten  
 1999 Milliarden astrometrische Beobachtungen,  
 403 Milliarden photometrische Beobachtungen,  
 40 Milliarden Spektren

Gaia Data Release 3, 13.06.2022

<34% der Daten wurden für die DR3 benutzt

# Gaia in Dresden

## 1. Astrometrische Lösungen:

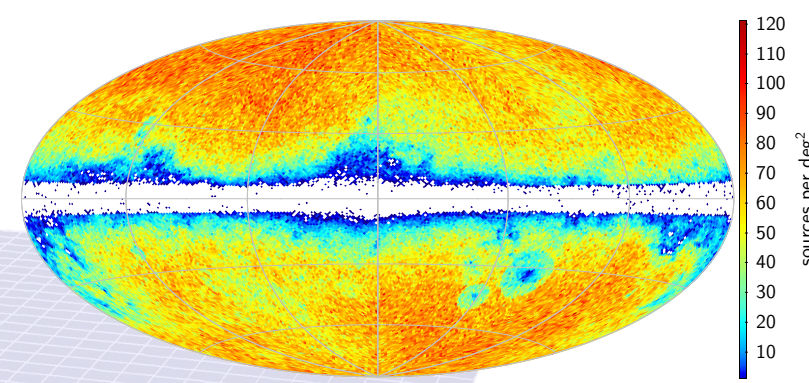
Stabilität, Verifikation,  
Untersuchungen der Kalibrationen,  
Relativistische Tests

## 2. Die relativistischen Modelle der Gaia-Beobachtungen

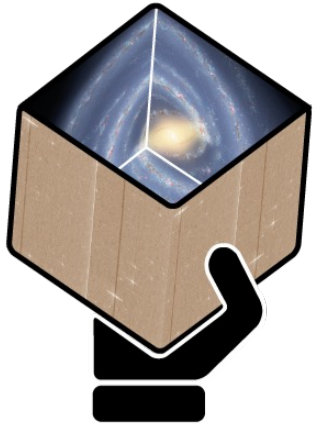
## 3. Das Himmelreferenzsystem von Gaia (Gaia-CRF): Katalog der Quasaren

## 4. Synchronisation und Überwachung der Gaia-Atomuhr

## 5. Tests fundamentaler physikalischer Gesetze mit Gaia-Daten



450 Menschen aus 160 Instituten in 24 Ländern arbeiten seit mehr als 20 Jahren für Gaia



gaia

010000110010011001101010

Gaia  
DPAC  
Data Processing & Analysis Consortium

$\alpha \delta \varpi \mu \alpha^*$   $H\delta G \dots$