

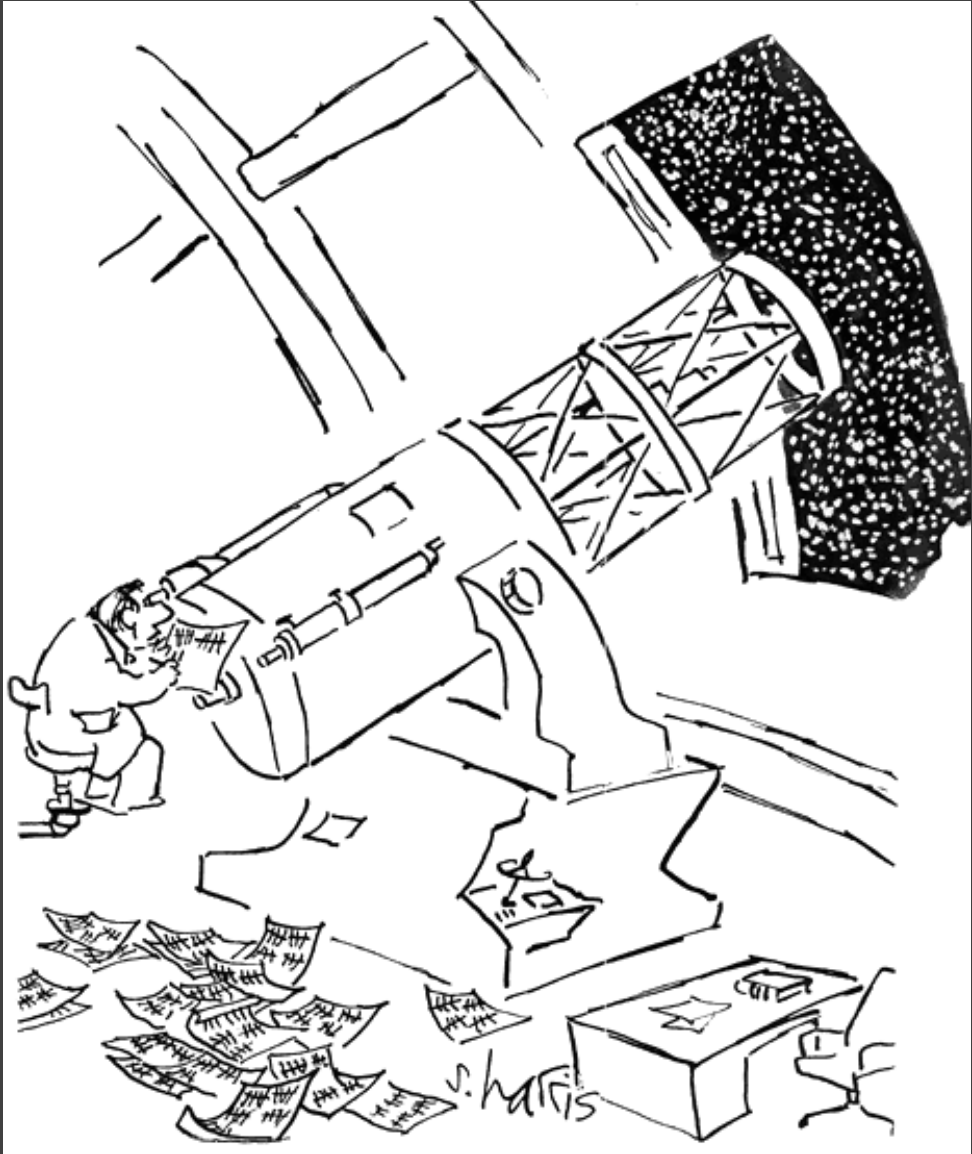
# Астрономия и компьютеры



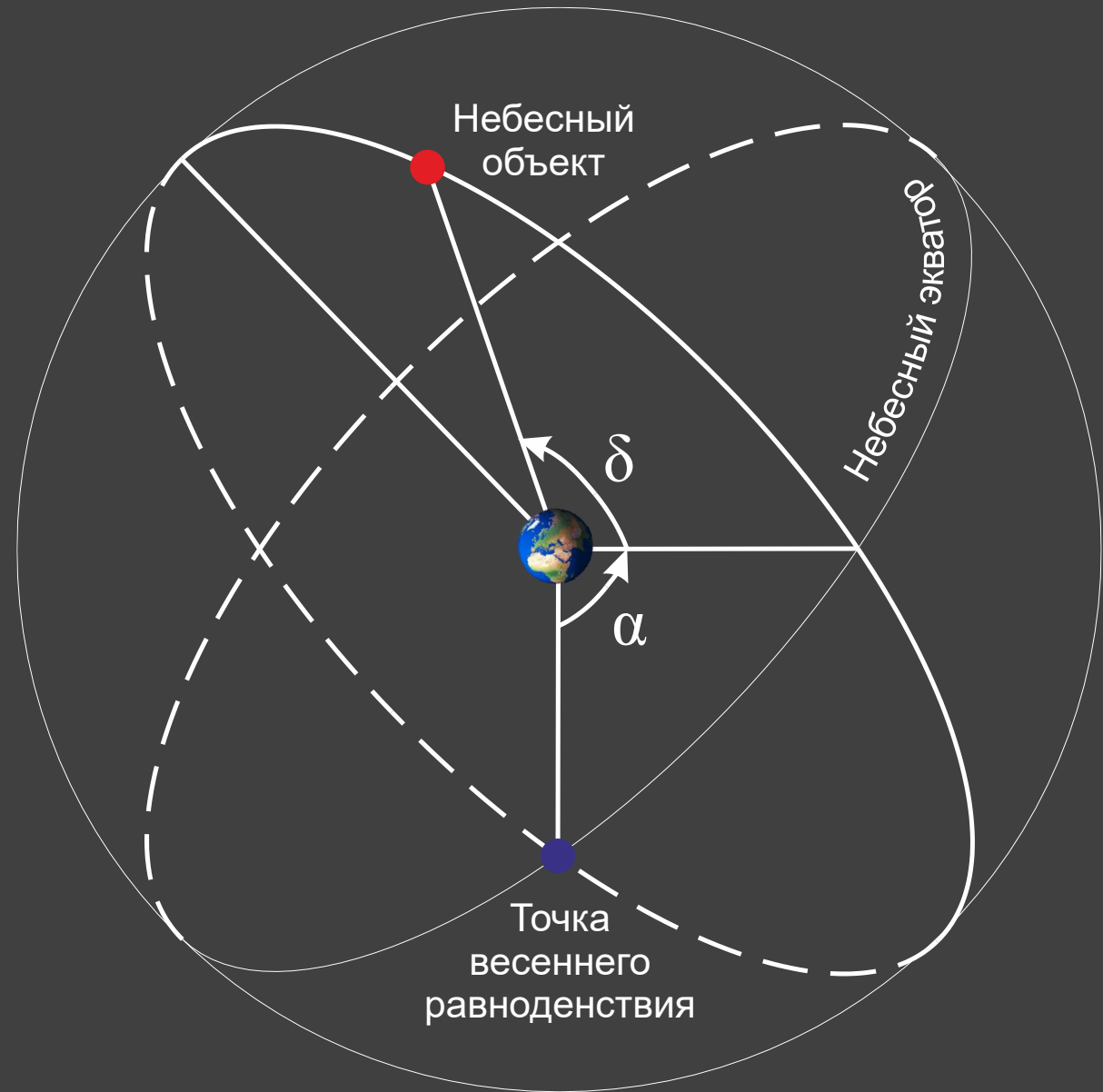
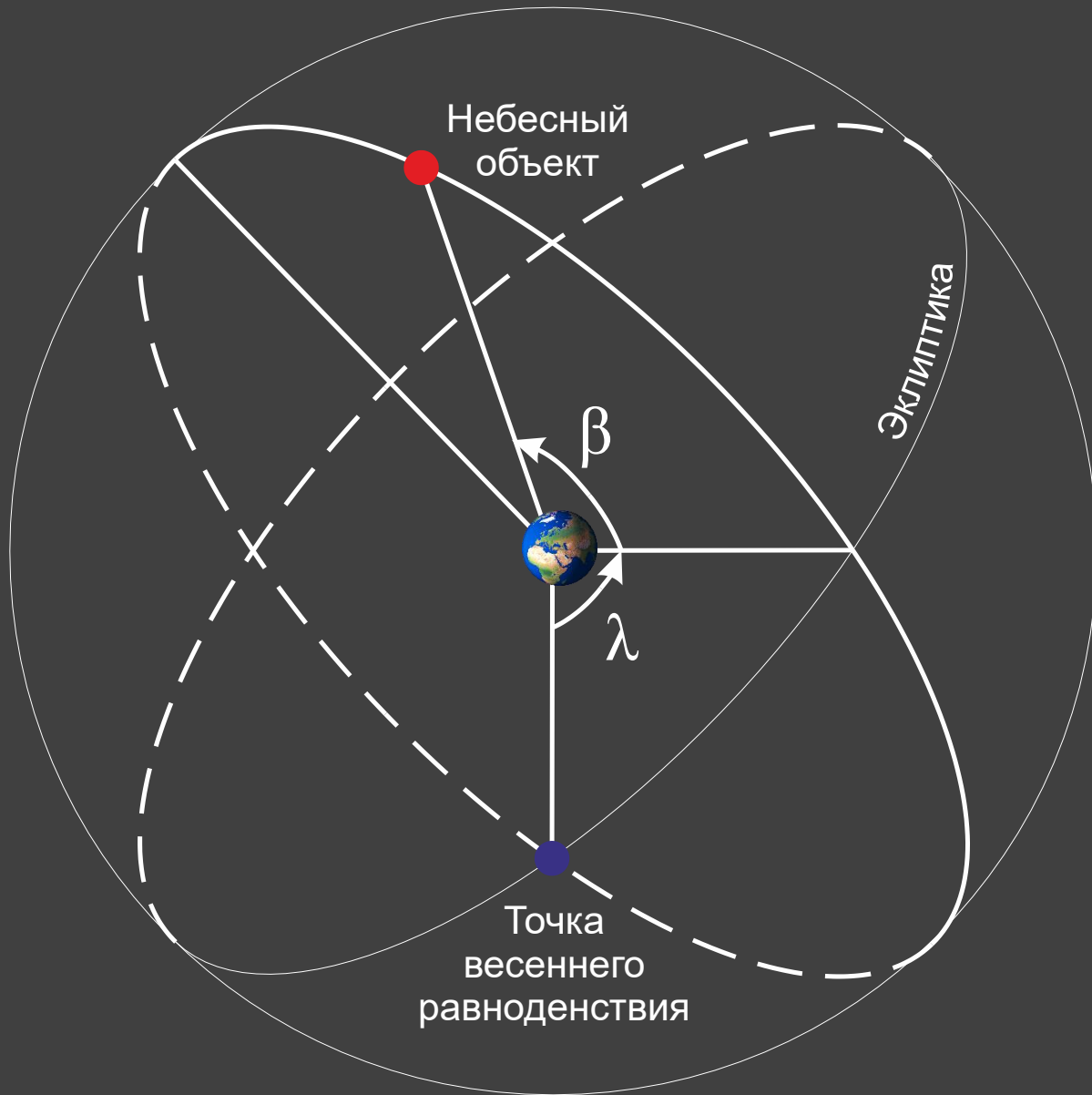
Дмитрий Вибе  
Институт астрономии РАН



# Звездочётство



# Координаты на небесной сфере





# Каталог Гиппарха (135 до н.э.)

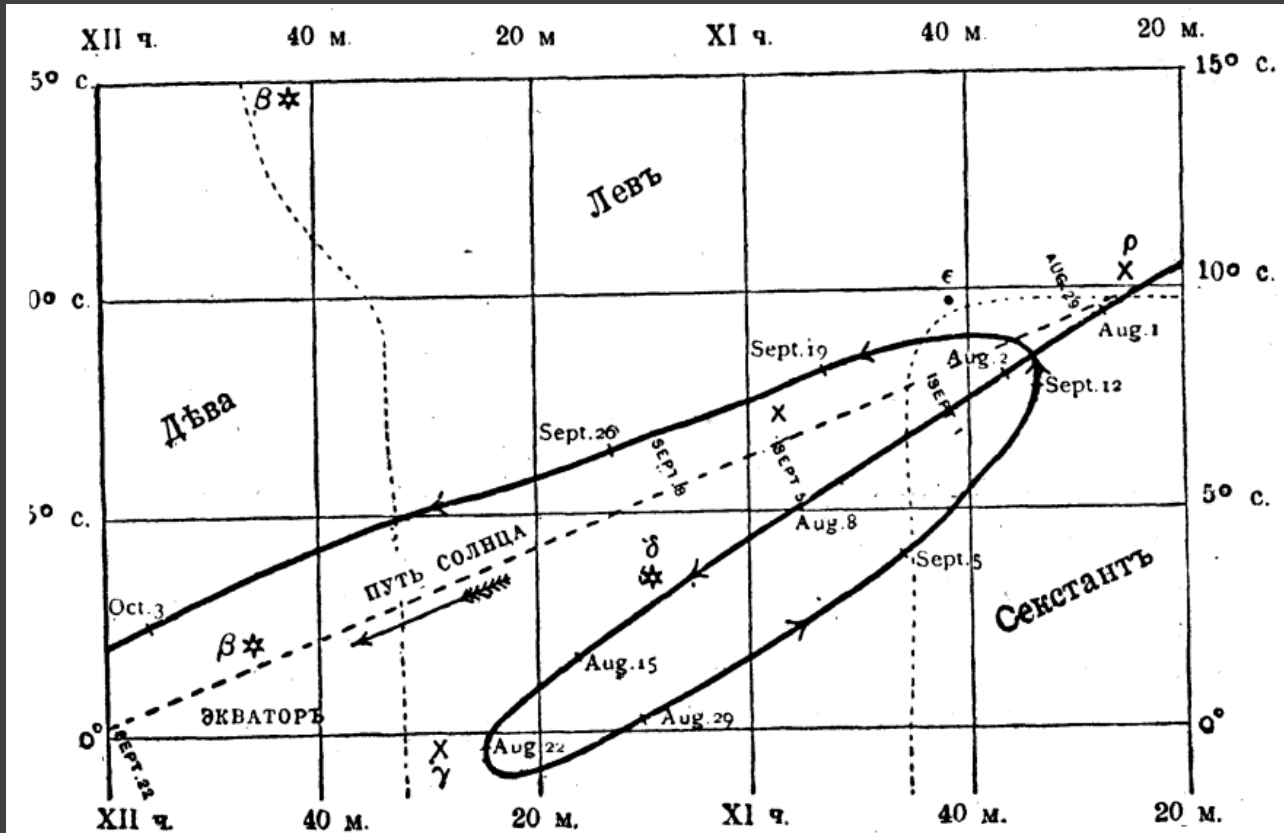


Видимая величина

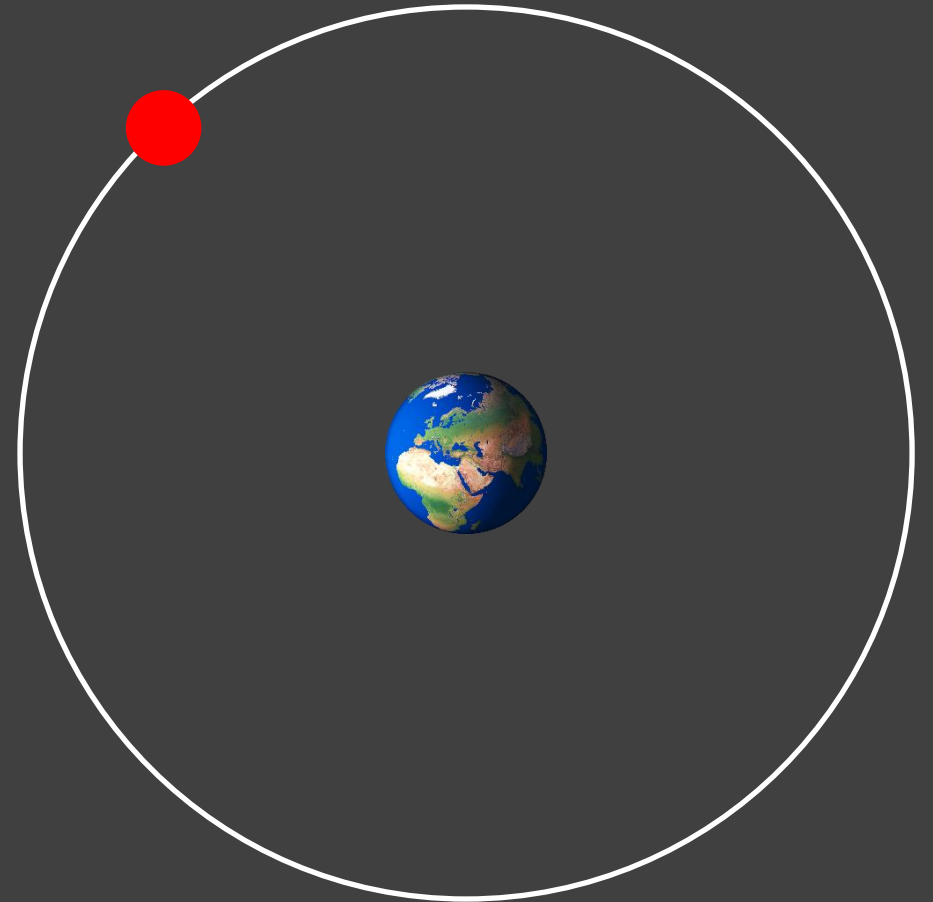




# Звёзды подвижные и неподвижные

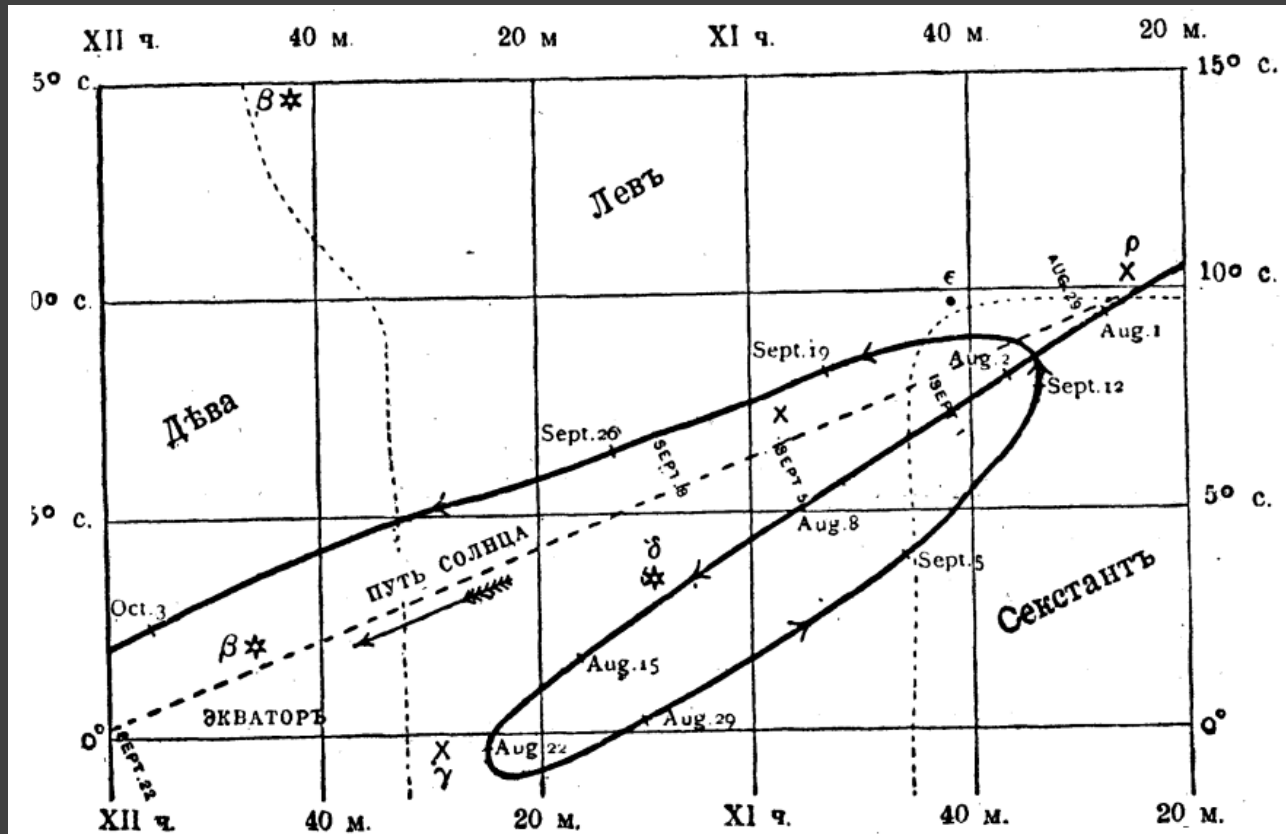


Фиг. 7. Видимый путь Меркурия съ 1 авг. по 3 окт. 1898 г. Числа при пунктирной линіи отмѣчаютъ положеніе солнца, остальные — положенія Меркурия.

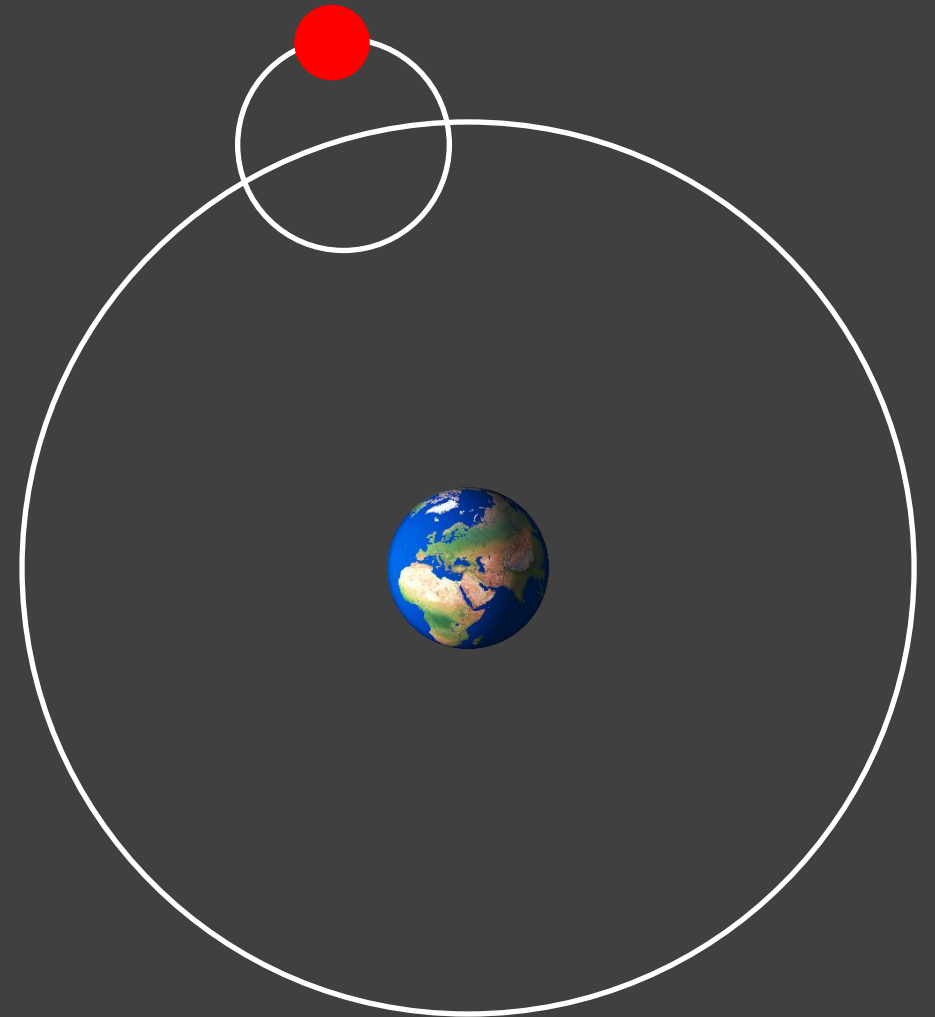


Ретроградный Меркурий

# Эпициклы и деференты



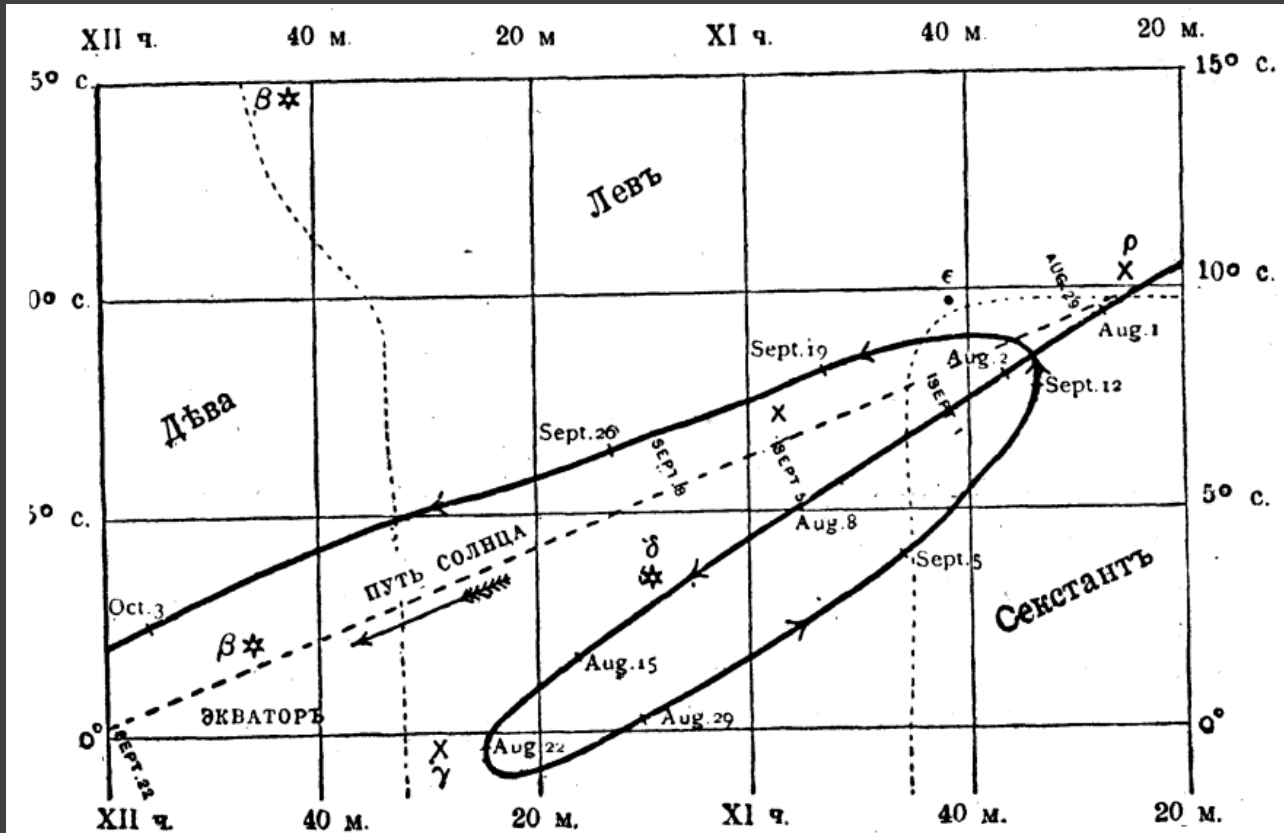
Фиг. 7. Видимый путь Меркурия съ 1 авг. по 3 окт. 1898 г. Числа при пунктирной линіи отмѣчаютъ положеніе солнца, остальные — положенія Меркурія.



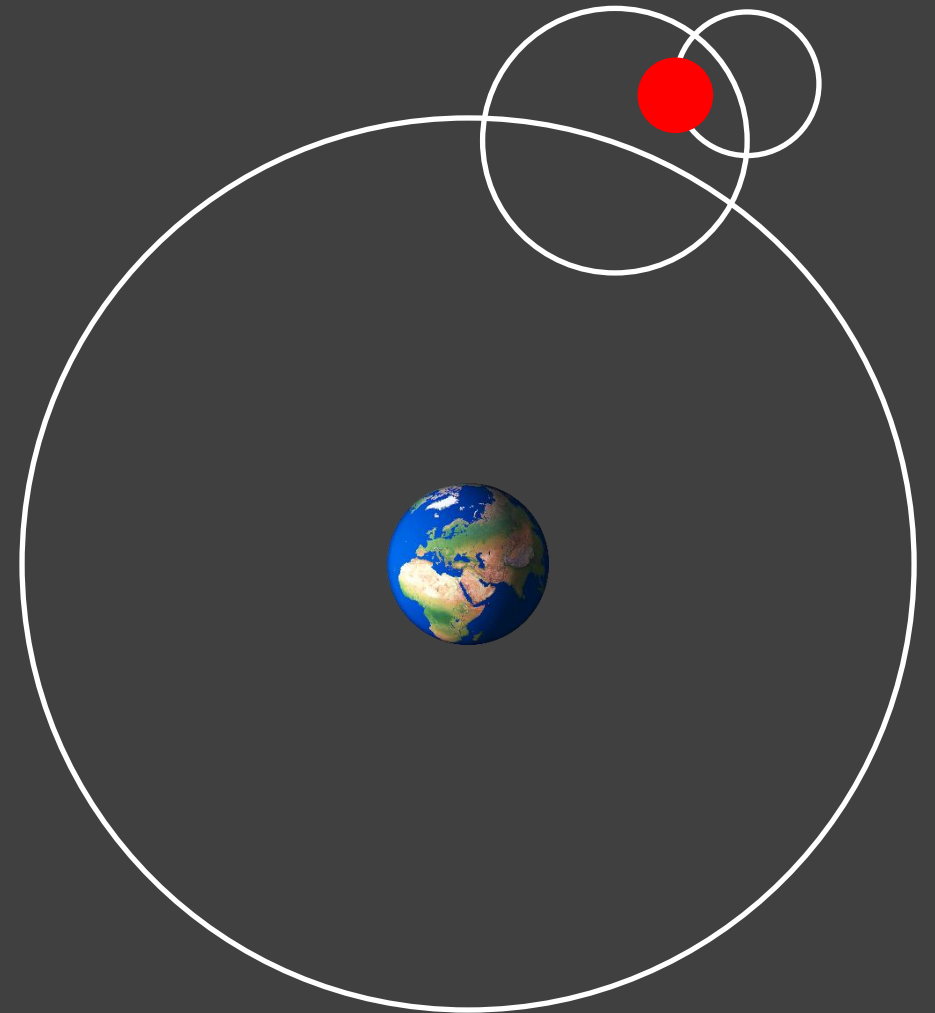
Ретроградный Меркурий



# Эпициклы, ещё эпициклы и деференты

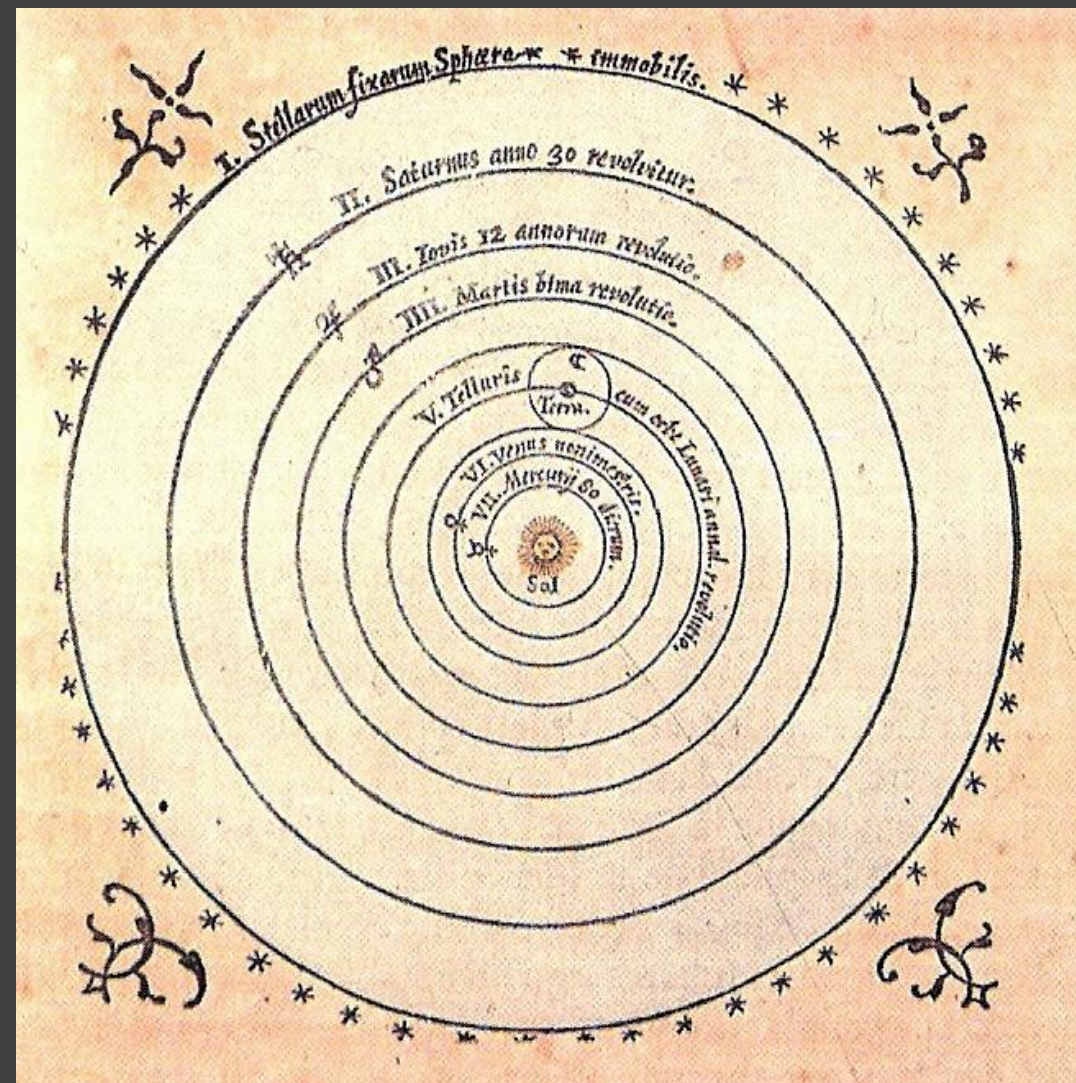
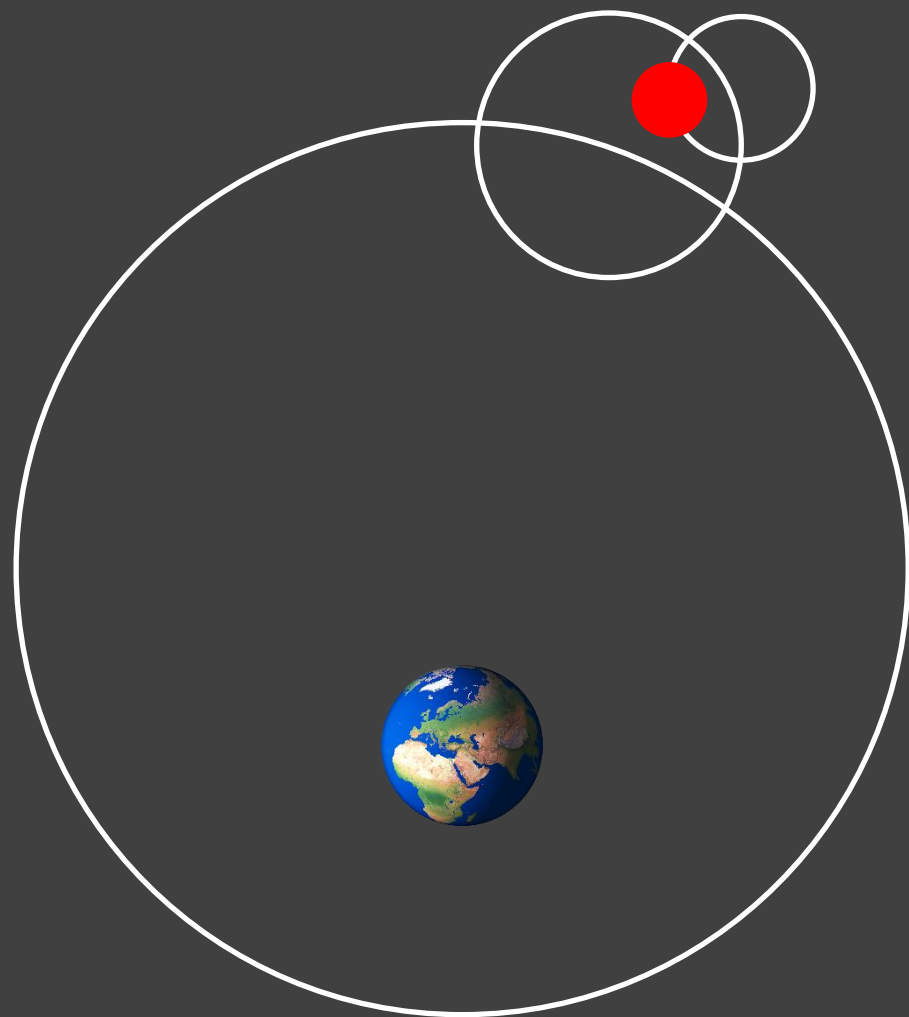


Фиг. 7. Видимый путь Меркурия съ 1 авг. по 3 окт. 1898 г. Числа при пунктирной линіи отмѣчают положеніе солнца, остальные — положенія Меркурия.



Ретроградный Меркурий

# Эксцентричность





# Три закона Кеплера

- Планеты Солнечной системы движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце
- Каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причём радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, за равные промежутки времени заметает равные площади
- Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся, как кубы больших полуосей орбит планет

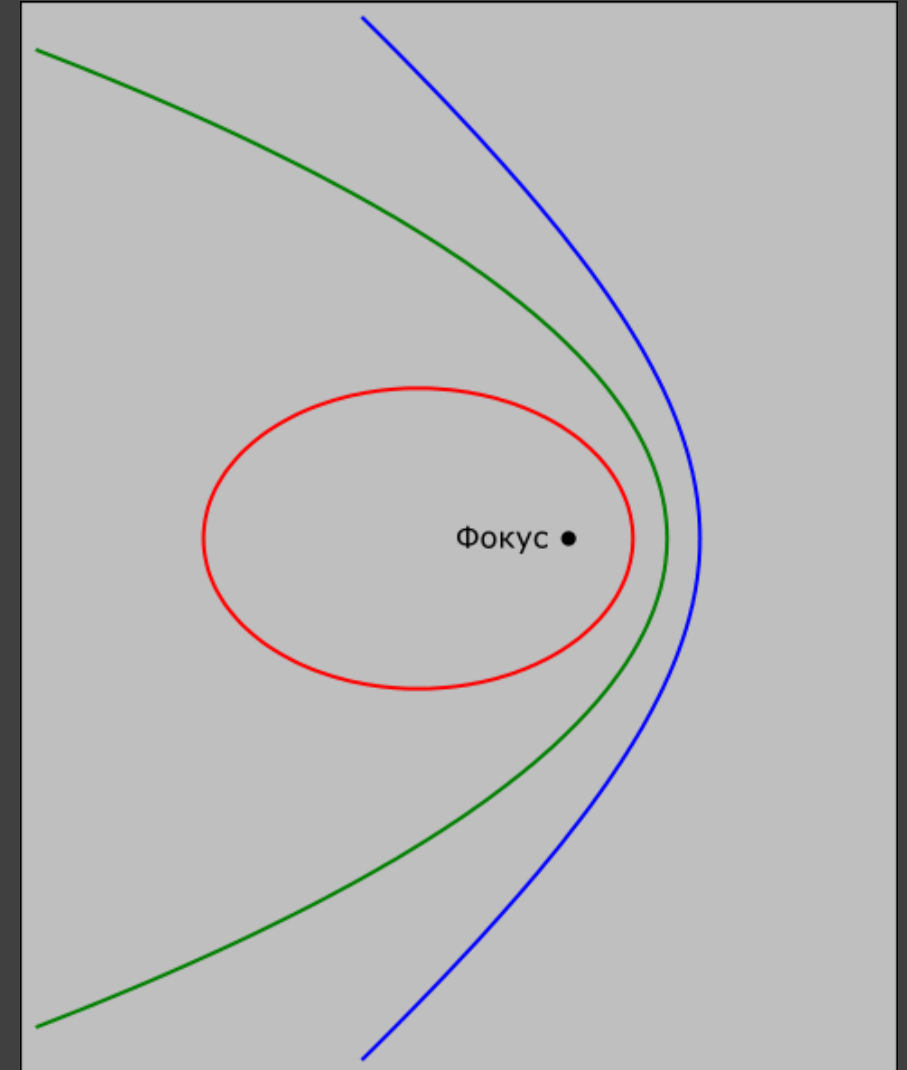
Опубликованы в 1609–1619 гг.



# Исаак Ньютон — закон всемирного тяготения (1687)

- Все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:  $F = G \frac{Mm}{r^2}$
- В задаче двух тел движение происходит:
  - по замкнутым траекториям — окружности ( $e = 0$ ), эллипсу ( $0 < e < 1$ )
  - по незамкнутым траекториям — параболе ( $e = 1$ ) или гиперболе ( $e > 1$ )

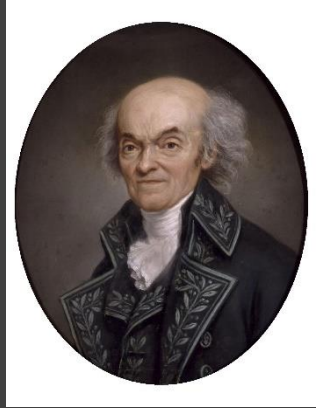
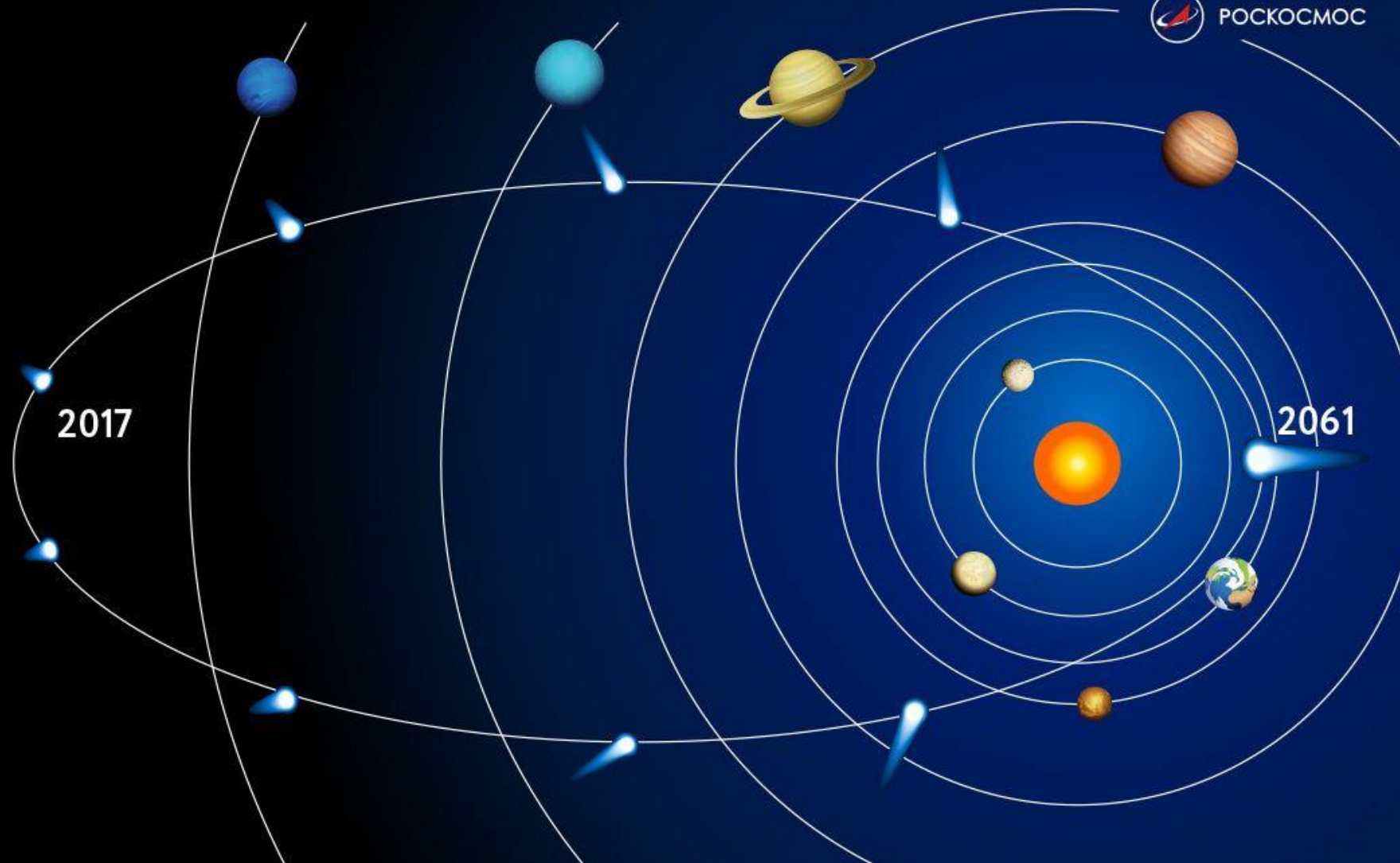
Не только математика развивала астрономию, но и астрономия подтягивала математику!





# Комета Галлея

Орбита кометы 1P/Галлея



## Поверить алгеброй гармонию

*Величественная Книга Вселенной всегда открыта нашему взору, но читать её может лишь тот, кто сначала освоит язык и научится понимать знаки, которыми она начертана. Написана же она на языке математики.*

Галилео Галилей

*Вы проинтегрировали орбиту звезды, о жалкий род исследователей, и звезда перестала быть для вас живым светочем.*

Один из героев Антуана де Сент-Экзюпери

# Вычисления в астрономии

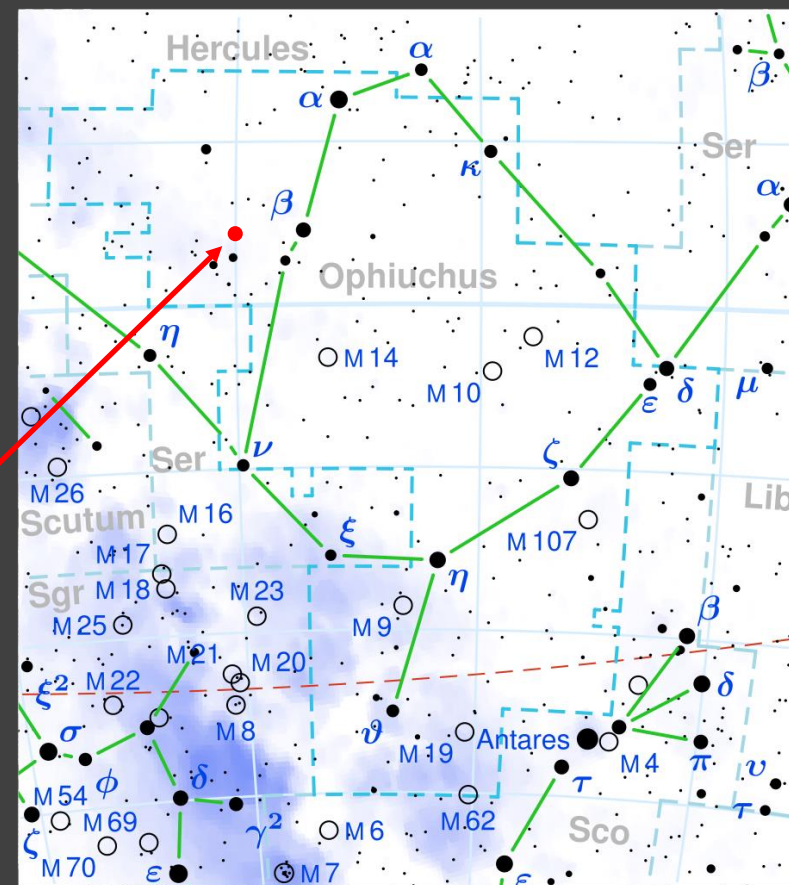
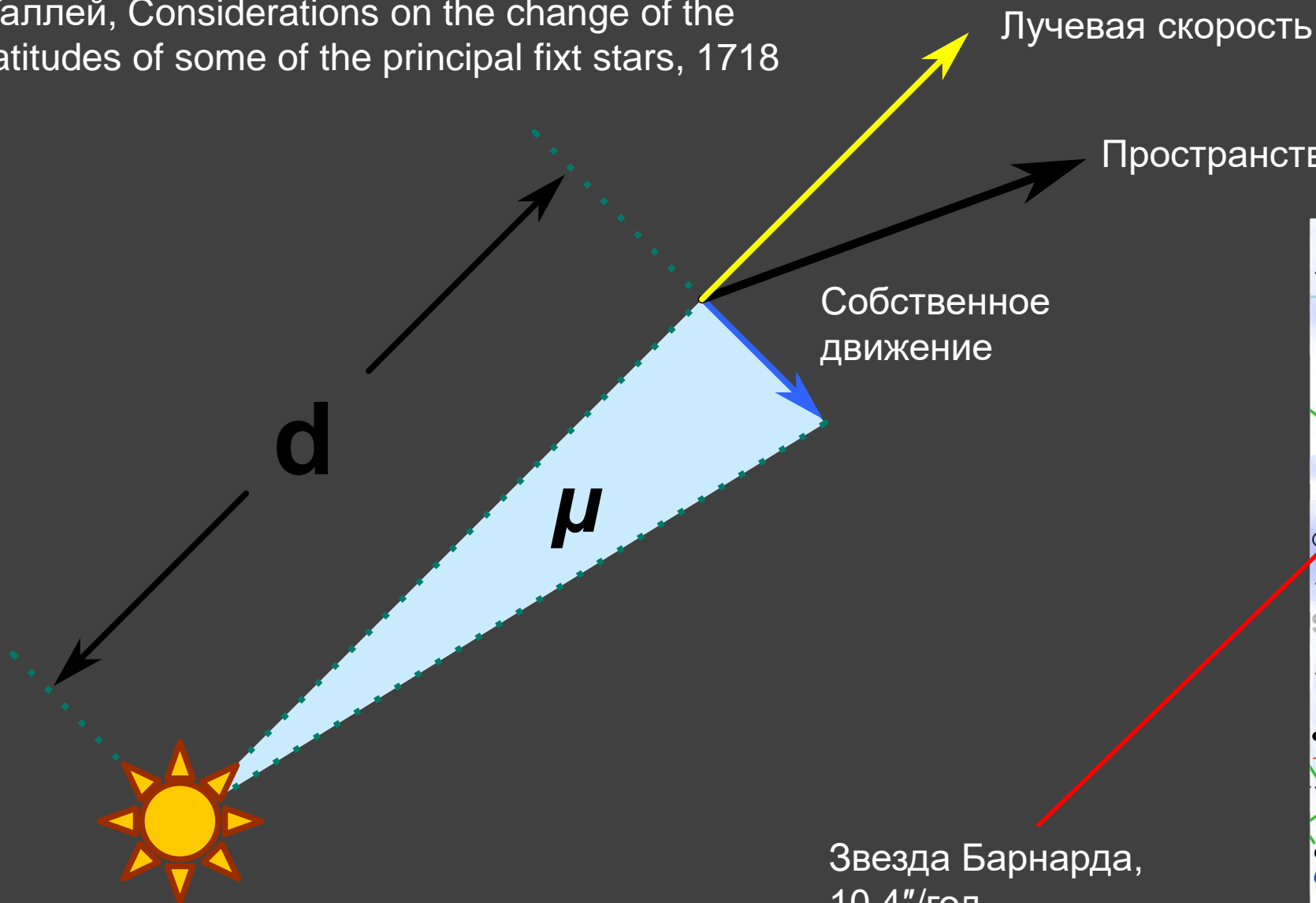
- Определение расстояний
- Техника наблюдений
  - Интерферометрия
  - Патрульные наблюдения
- Численное моделирование



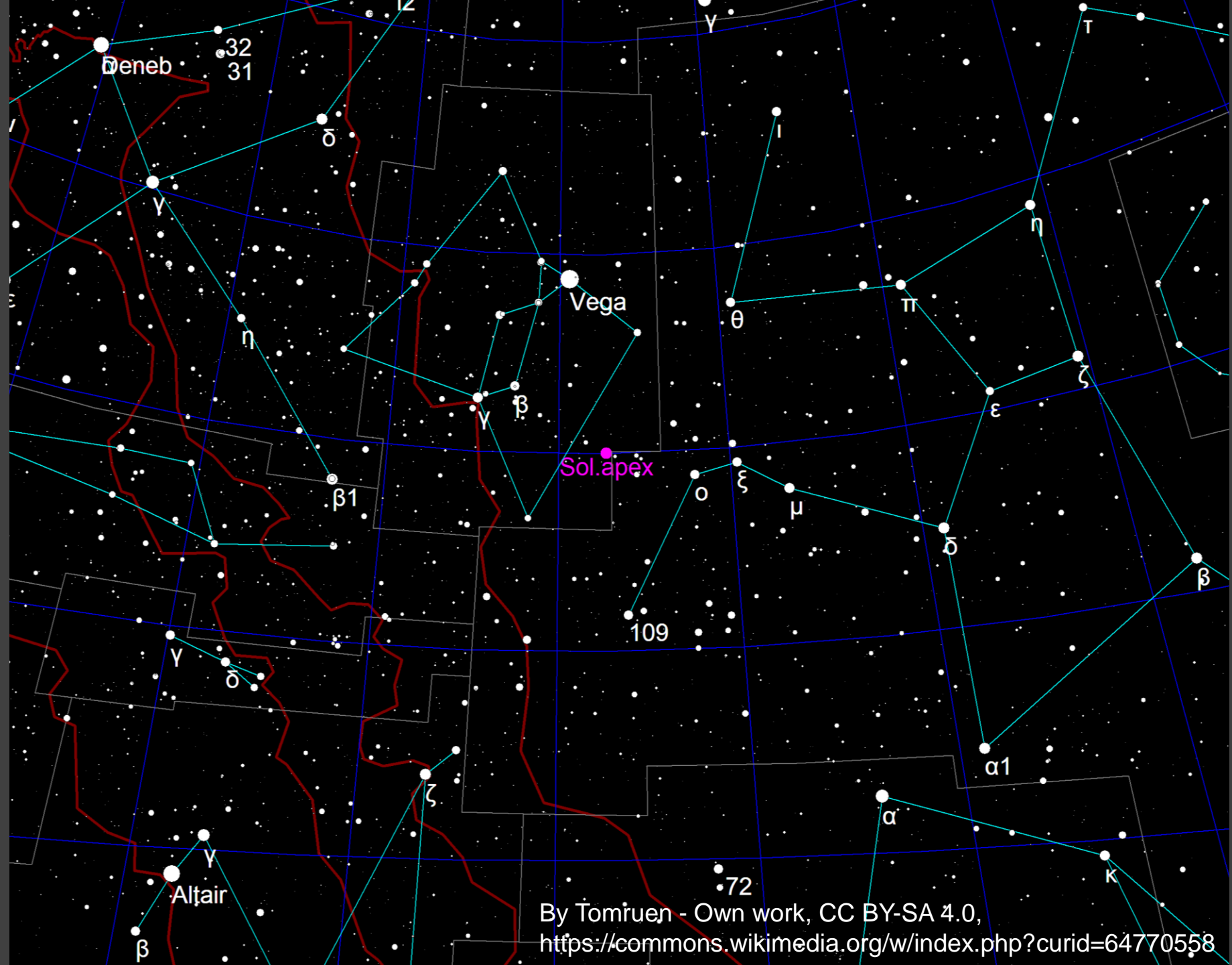


# Некоторые неподвижные звёзды не неподвижны

Галлей, Considerations on the change of the latitudes of some of the principal fixt stars, 1718



# Все звёзды ПОДВИЖНЫ

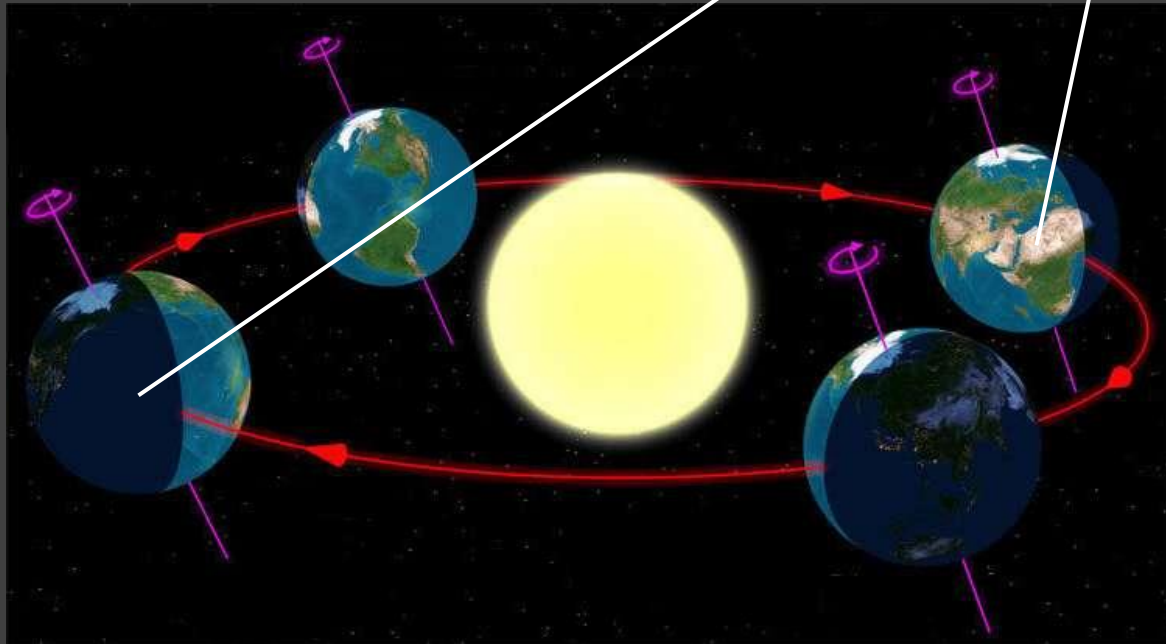


By Tomruen - Own work, CC BY-SA 4.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64770558>



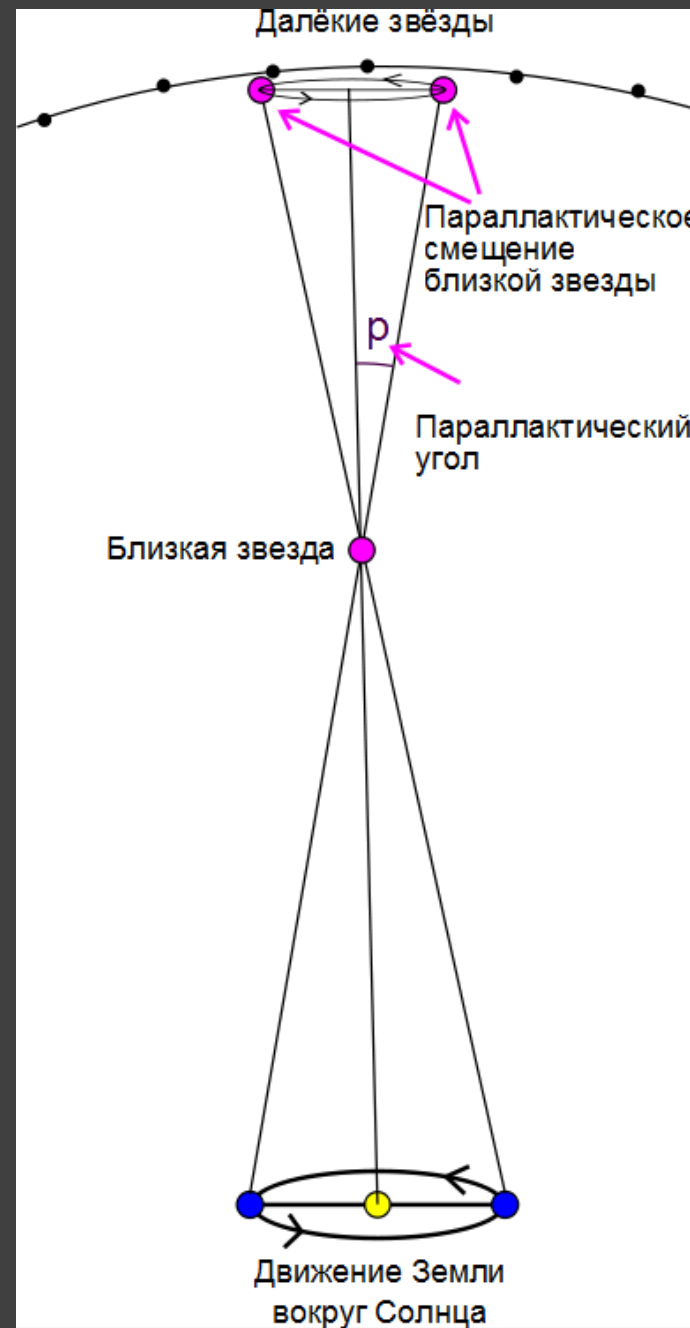
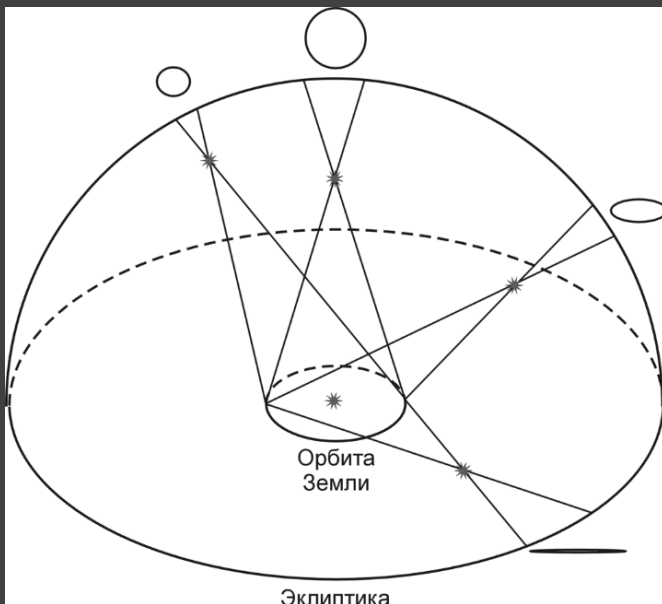
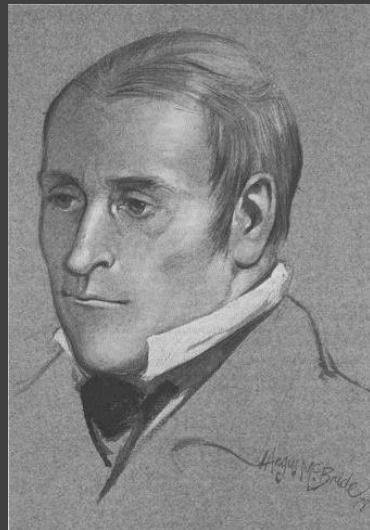
# Расстояние — ключ ко всему

- Пространственное распределение объектов
- Движение объектов
- Яркость объектов





# Стена пробита



Струве (1837, Вега ,  
0.4" в год, 0.03<sup>m</sup>) —  
параллакс 0.13"  
(современные  
данные)  
Бессель (1838,  
61 Лебеда , 5.3" в  
год, 5.21<sup>m</sup>) —  
параллакс 0.29"  
(современные  
данные)  
Гендерсон (1839,  
α Центавра, 3.7" в  
год, 0.01<sup>m</sup>) —  
параллакс 0.75"  
(современные  
данные)

Парсек  $\approx 3.26$  св.  
года  $\approx 3 \cdot 10^{18}$  см

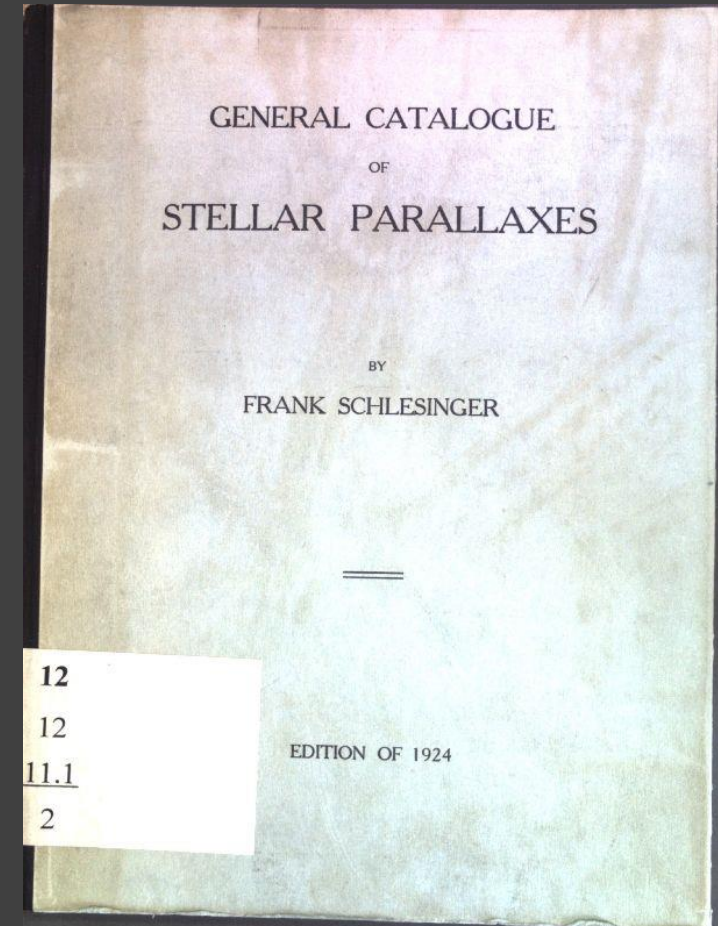
# С поверхности Земли далеко не заглянешь

- Атмосферные эффекты
- Искажения в инструментах (температурные эффекты, «гнутые трубы»)
- Ограниченные условия видимости звёзд



# С поверхности Земли далеко не заглянешь

- Атмосферные эффекты
- Искажения в инструментах (температурные эффекты, «гнутые трубы»)
- Ограниченные условия видимости звёзд





# Космическая астрометрия

- Нахождение пяти астрометрических параметров:
  - Прямое восхождение  $\alpha$  (на определённую эпоху)
  - Склонение  $\delta$  (на определённую эпоху)
  - Собственное движение по прямому восхождению,  $\mu_\alpha$
  - Собственное движение по склонению,  $\mu_\delta$
  - Параллакс  $\varpi$

$$\alpha = \alpha_0 + \mu_\alpha(t - t_0) + P_\alpha(\varpi, \alpha, \delta, t)$$

$$\delta = \delta_0 + \mu_\delta(t - t_0) + P_\delta(\varpi, \alpha, \delta, t)$$

- Измерения углов между звёздами

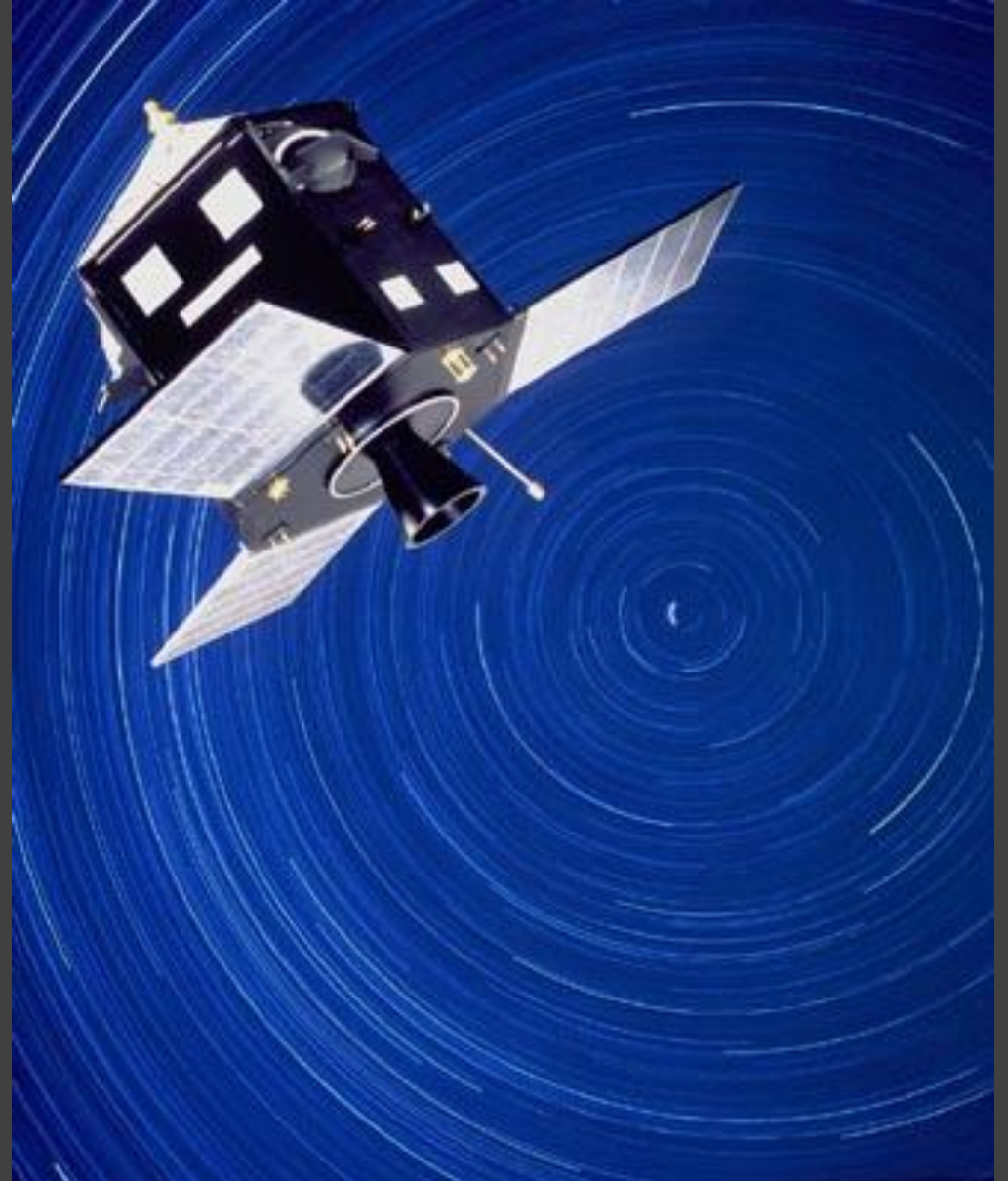


# Компоненты решения

- Глобальные параметры (например, конструкция инструмента)
- Локальные параметры (ориентация инструмента и другие переменные параметры)
- Результаты наблюдений
- Астрометрические данные

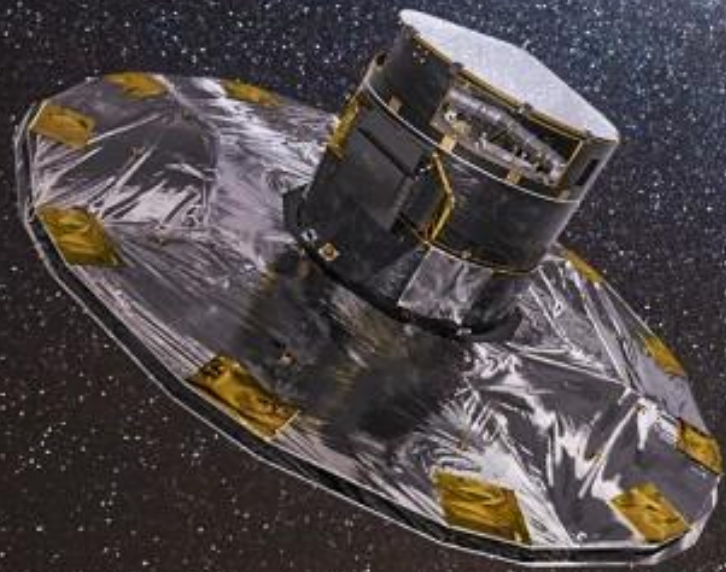
# HiPParCoS

- 1989–1993 (1997)
- Зеркало 29 см
- Параллаксы и собственные движения 117955 звёзд и кратных систем с ошибкой 0.001"
- Полнота примерно до 9<sup>m</sup>
- Три звезды на квадратный градус





# GAIA → Gaia



Два главных зеркала размером 1.45 м × 0.5 м, расположенных под углом 106.5°

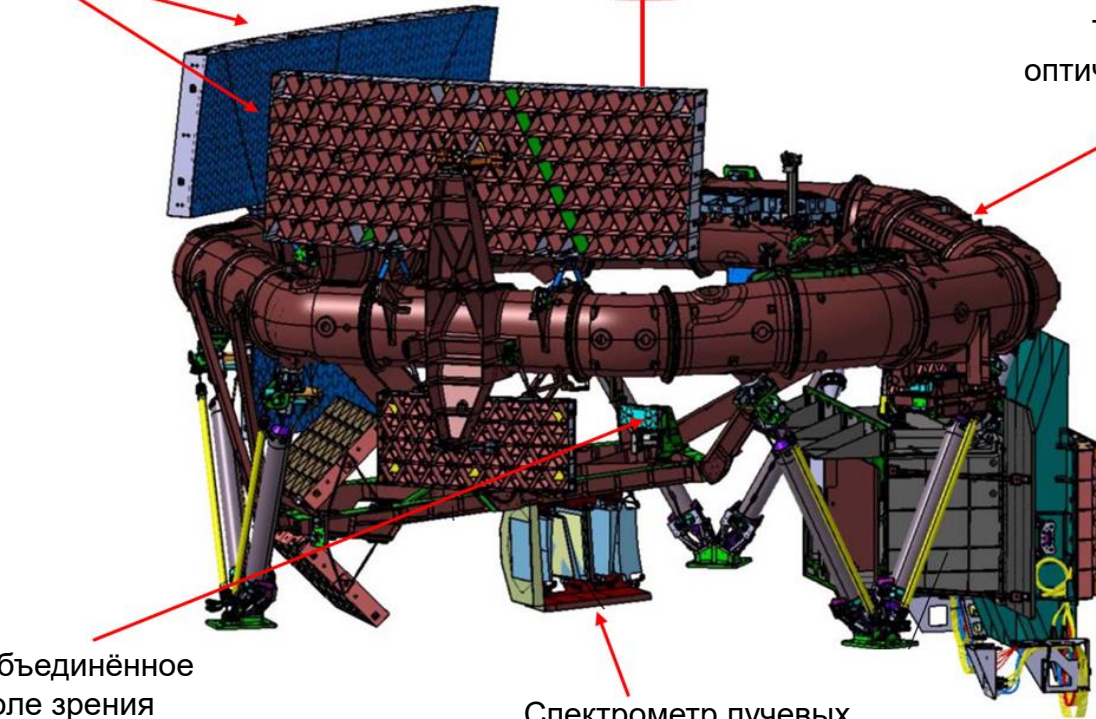
Ось вращения

Тороидальная оптическая скамья

Комбинированная фокальная плоскость со 106-ю ПЗС-детекторами

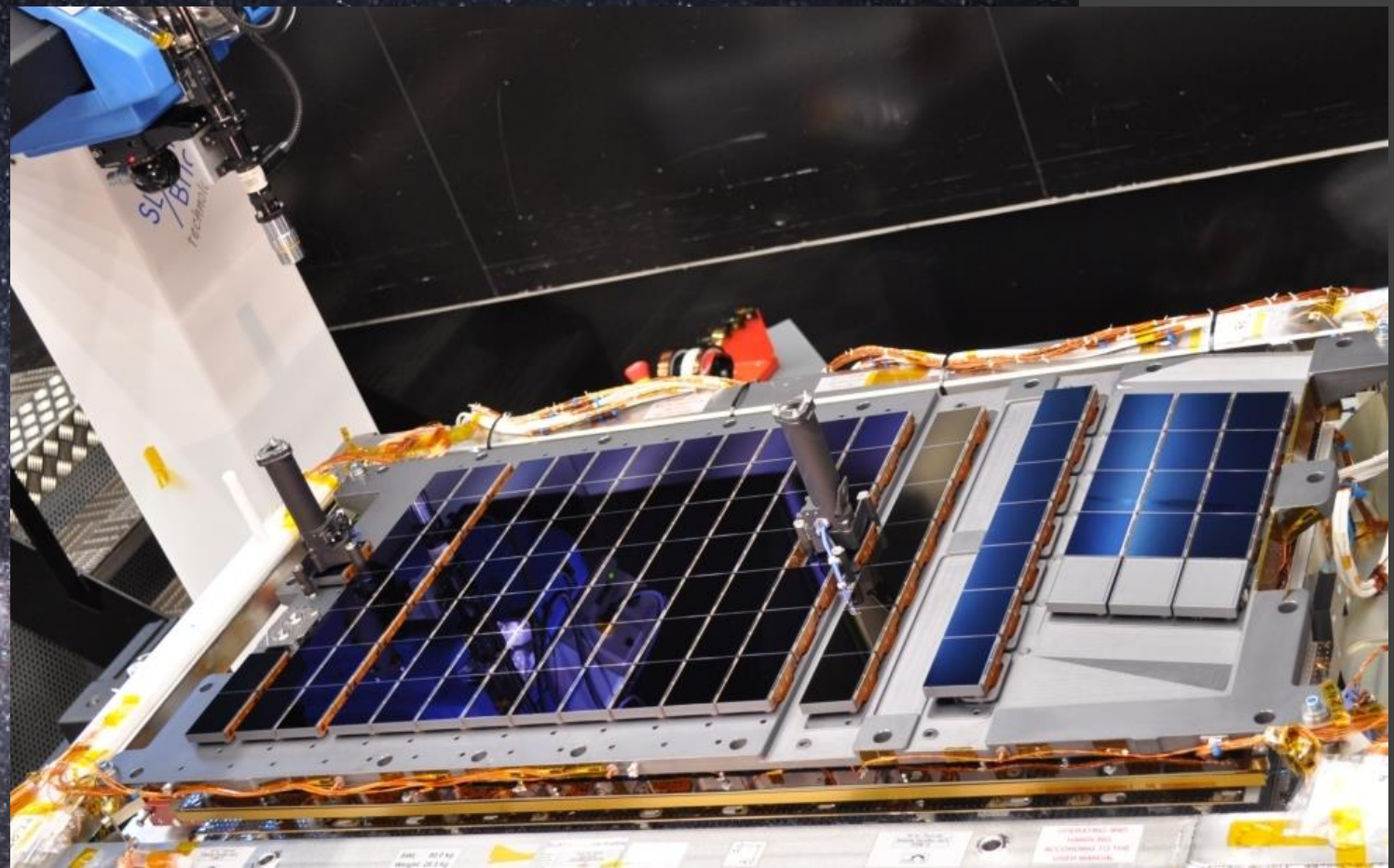
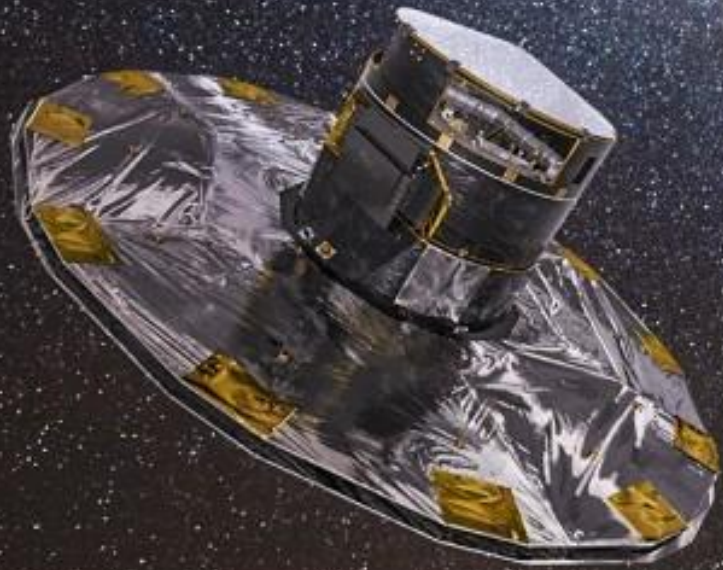
Объединённое поле зрения

Спектрометр лучевых скоростей





# GAIA → Gaia



- ❑  $10^8$  опорных источников
- ❑  $5 \cdot 10^8$  неизвестных
- ❑ 100 глобальных параметров
- ❑  $10^{11}$  элементарных наблюдений

# Каталоги (Data Releases) Gaia

- Запуск 19 декабря 2013 года, Союз-Фрегат, космодром Куру
- DR1 — 14 сентября 2016 года, 14 месяцев наблюдений
- DR2 — 25 апреля 2018 года, 22 месяца наблюдений
- EDR3 + DR3 — 3 декабря 2020 года и 13 июня 2022 года, 34 месяца наблюдений
- Focused Product Release — 10 октября 2023 года
- DR4 — не ранее конца 2025 года, 66 месяцев наблюдений (2014-2020)
- DR5, финальный — не ранее конца 2030 года



# Data Release 3

<b>ВСЕГО</b>	<b>1 811 709 771</b>
Источники с астрометрическими параметрами	1 467 744 818
Источники с измеренными звёздными величинами	1 806 254 432
Источники с измеренными цветами	1 542 033 472
Источники с измеренными лучевыми скоростями	33 812 183
Классические цефеиды	15 021
Кандидаты в квазары	6 649 162
Кандидаты в квазары с измеренными красными смещениями	6 375 063
Объекты Солнечной системы (орбиты, цвета)	158 152

# Цвет и температура



# Цвет = температура

Клас с	Температура	Линии	% звёзд
О	30000–60000 К	Линии H $\beta$ , HeI, HeII многократно ионизованных Si, C, N, O (SiIV, CIV, CIII, NIII и др.)	~0.00003%
В	10000–30000 К	Линии HeI, H $\beta$ , усиливающиеся к классу А. Слабые линии H и K CaII	0.13%
А	7500–10000 К	Линии H $\beta$ интенсивны; линии H и K CaII, усиливающиеся к классу F; появляются слабые линии металлов (Fe, Mg)	0.6%
F	6000–7500 К	Линии H и K CaII и линии металлов, усиливающиеся к классу G. Линии H $\beta$ ослабевают. Появляется линия CaI, а также полоса G, образуемая линиями Fe, Ca и Ti	3%
G	5000–6000 К	Линии H и K CaII интенсивны. Довольно интенсивны линия CaI и линии FeI и FeII. Многочисленны линии других металлов. Интенсивна полоса G. Линии H $\beta$ слабеют к классу K	8%
K	3500–5000 К	Линии H и K CaII достигают наибольшей интенсивности, интенсивны линия CaI, линии металлов и полоса G. С подкласса K5 становятся видимыми полосы поглощения TiO	13%
M	2000–3500 К	Интенсивны полосы поглощения TiO и других молекулярных соединений. Заметны линии металлов, H и K CaII, линия CaI, полоса G слабеет.	>78%

Коричневые карлики

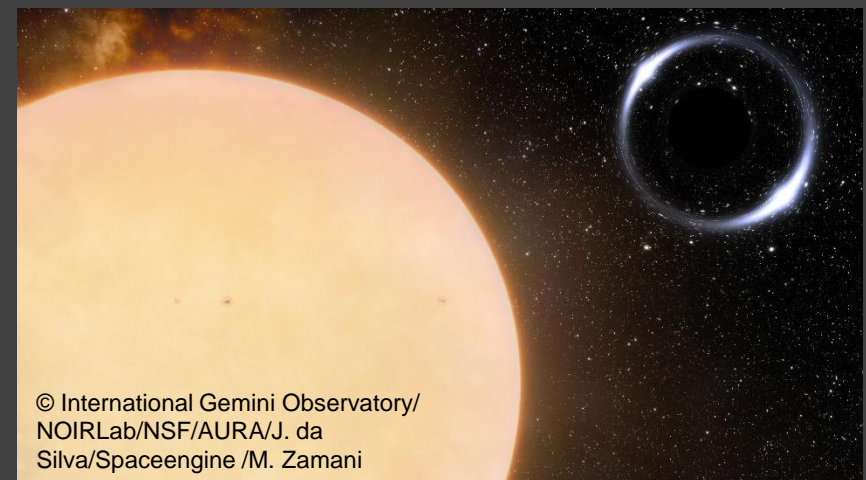
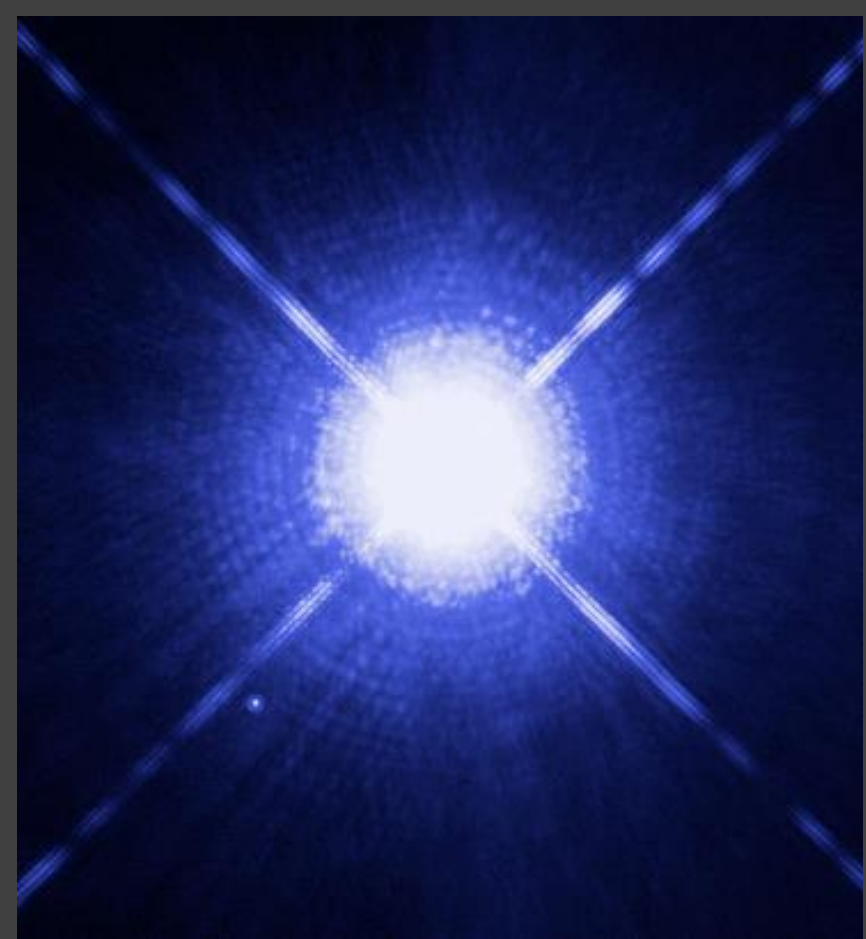


# Перепись звёздного населения в 10 пк от Солнца

Всего в пределах 10 пк известно 540 объектов, в т. ч.:

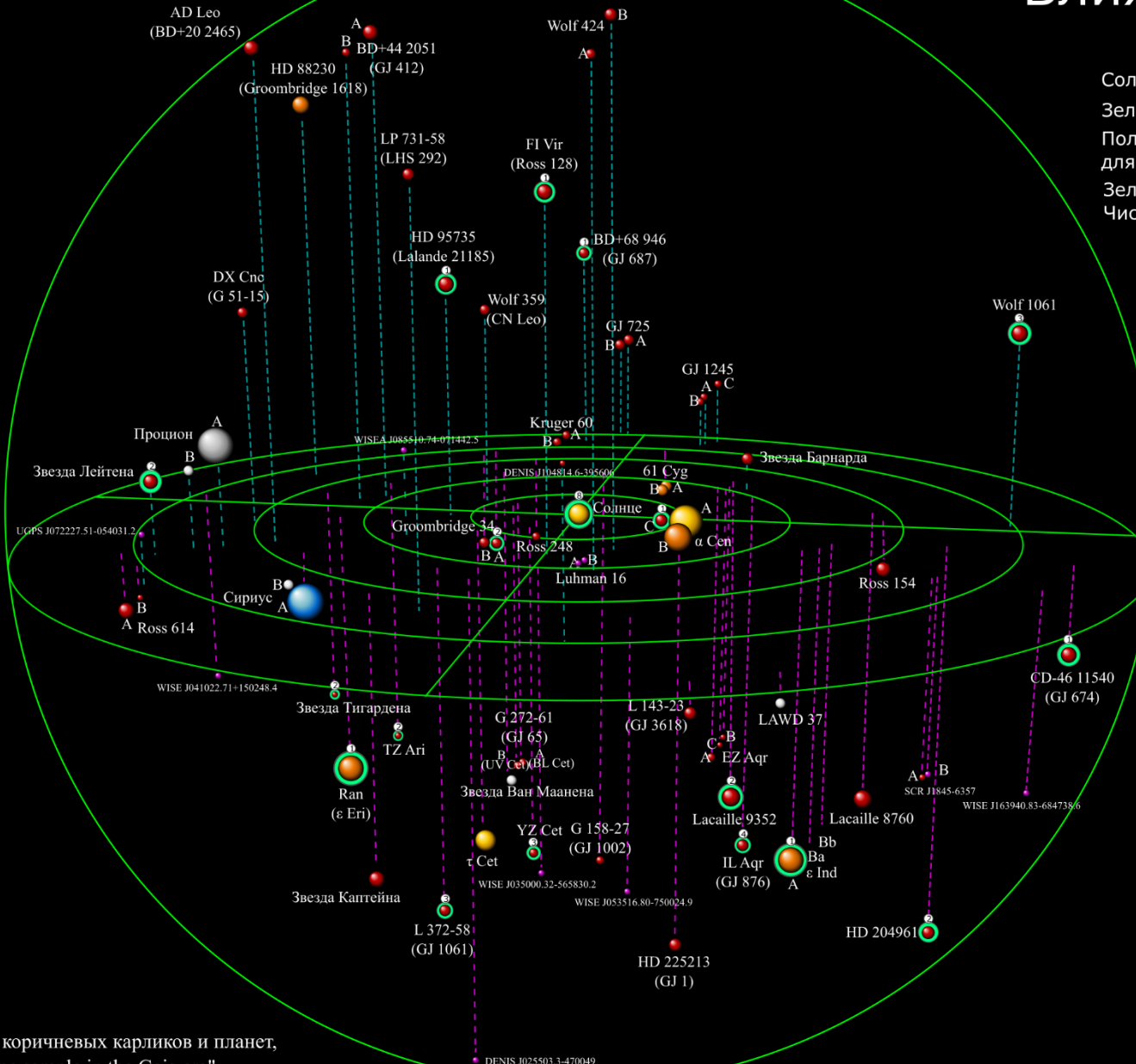
- ❑ 317 звёзд
  - класс M — 249
  - класс K — 38
  - класс G — 18
  - класс F — 8
  - класс A — 4 (Сириус, Альтаир, Фомальгаут, Вега)
  - **классы O и B — нет**
- ❑ 21 белый карлик
- ❑ 85 коричневых карликов

Ближайшая чёрная дыра Gaia BH1 — 478 пк



# Ближайшие звёзды

Солнце и звёздные системы в пределах 5 пк от него  
Зелёные круги лежат в плоскости Галактики через 1 пк  
Положения звёзд немного корректировались  
для ясности изображения.  
Зелёными кружками обведены звёзды с планетами.  
Число планет указано над кружком



Центр Галактики

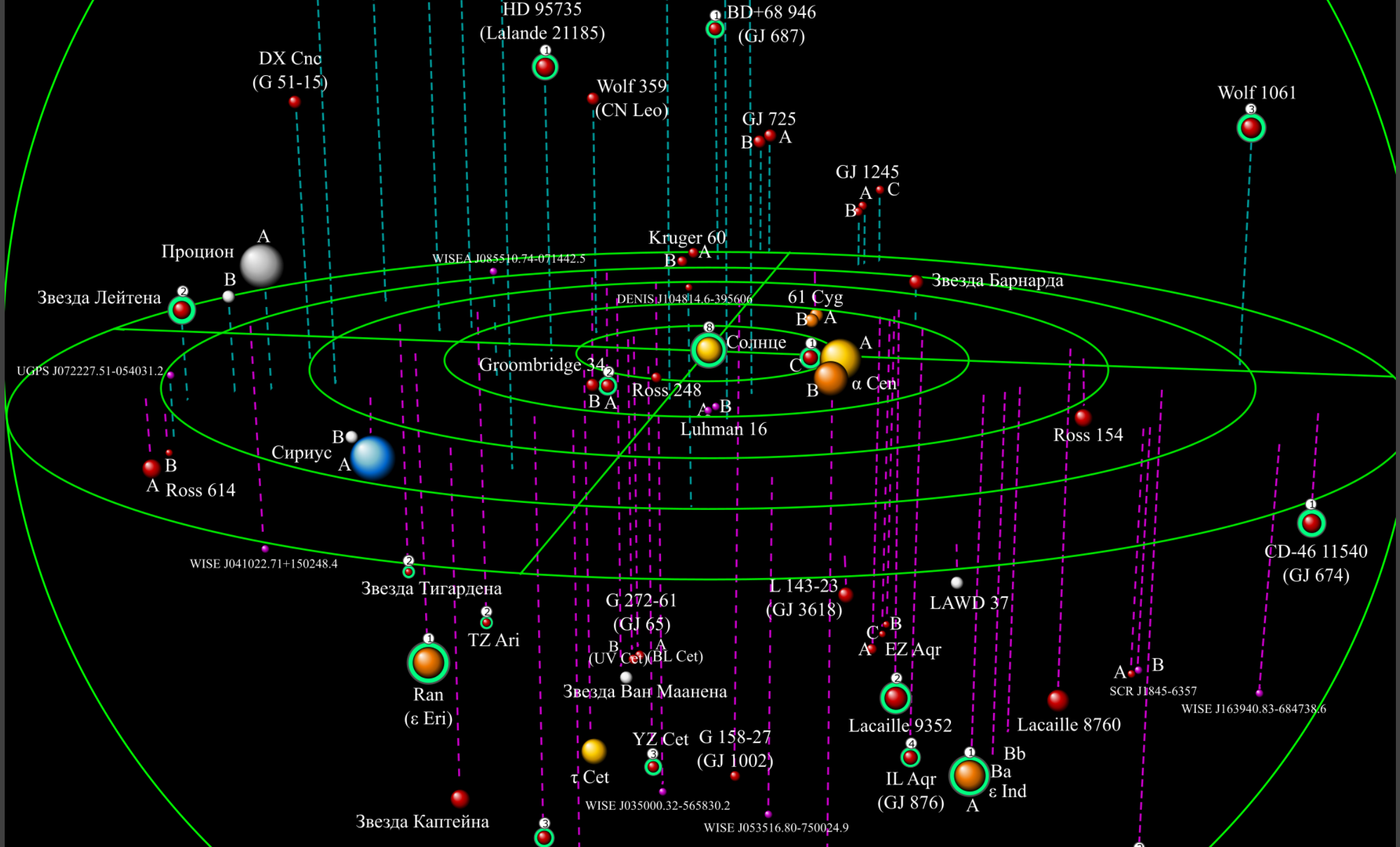
- Класс A
- Класс F
- Класс G
- Класс K
- Класс M
- Коричневый карлик
- Белый карлик

Основано на каталоге звёзд, коричневых карликов и планет, описанном в статье "The 10 pc sample in the Gaia era", Reylé, Jardine et al, Astronomy & Astrophysics (2021).

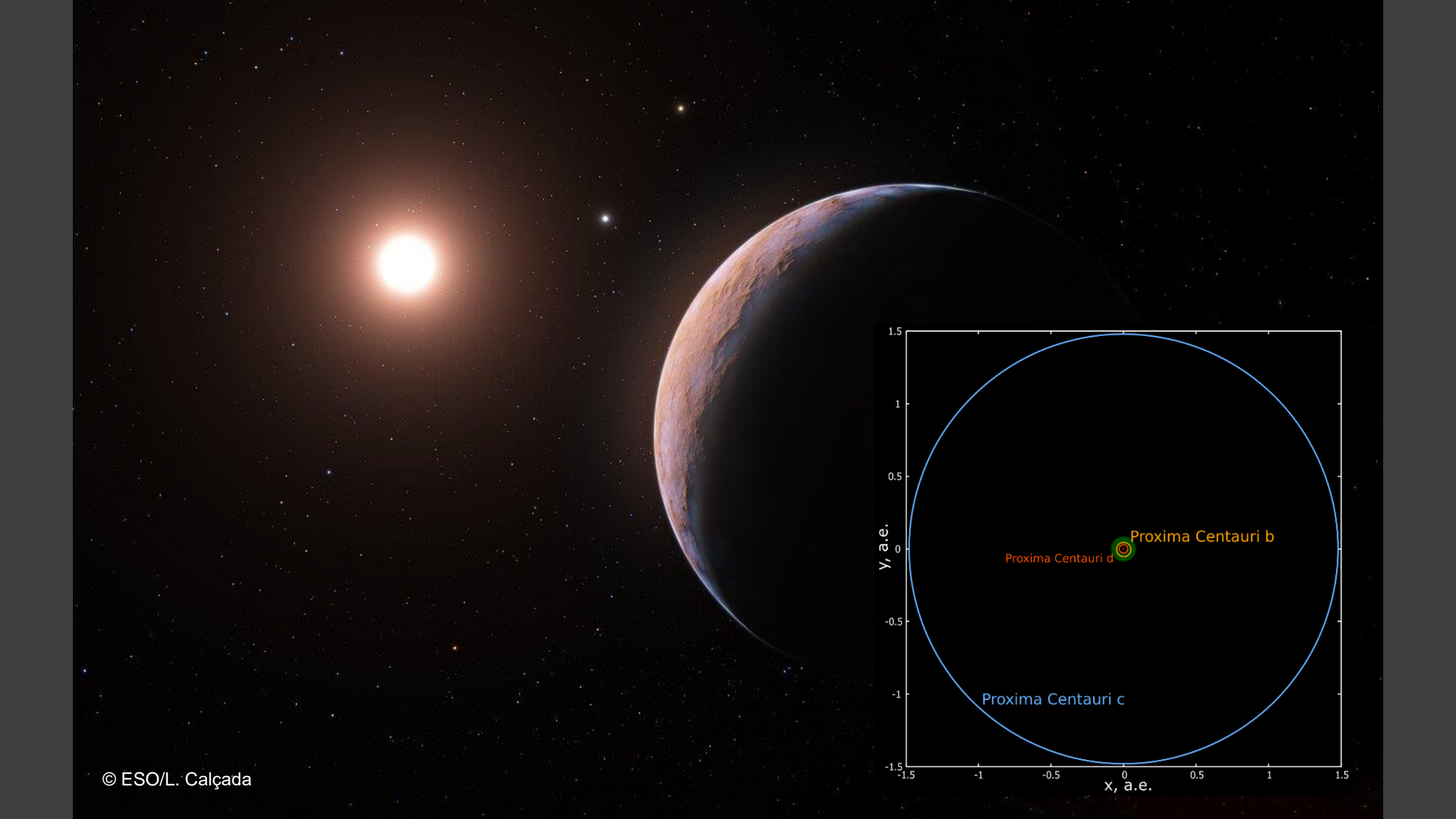
Galaxy Map  
Twitter: @galaxy\_map

License: CC BY-SA 3.0 IGO

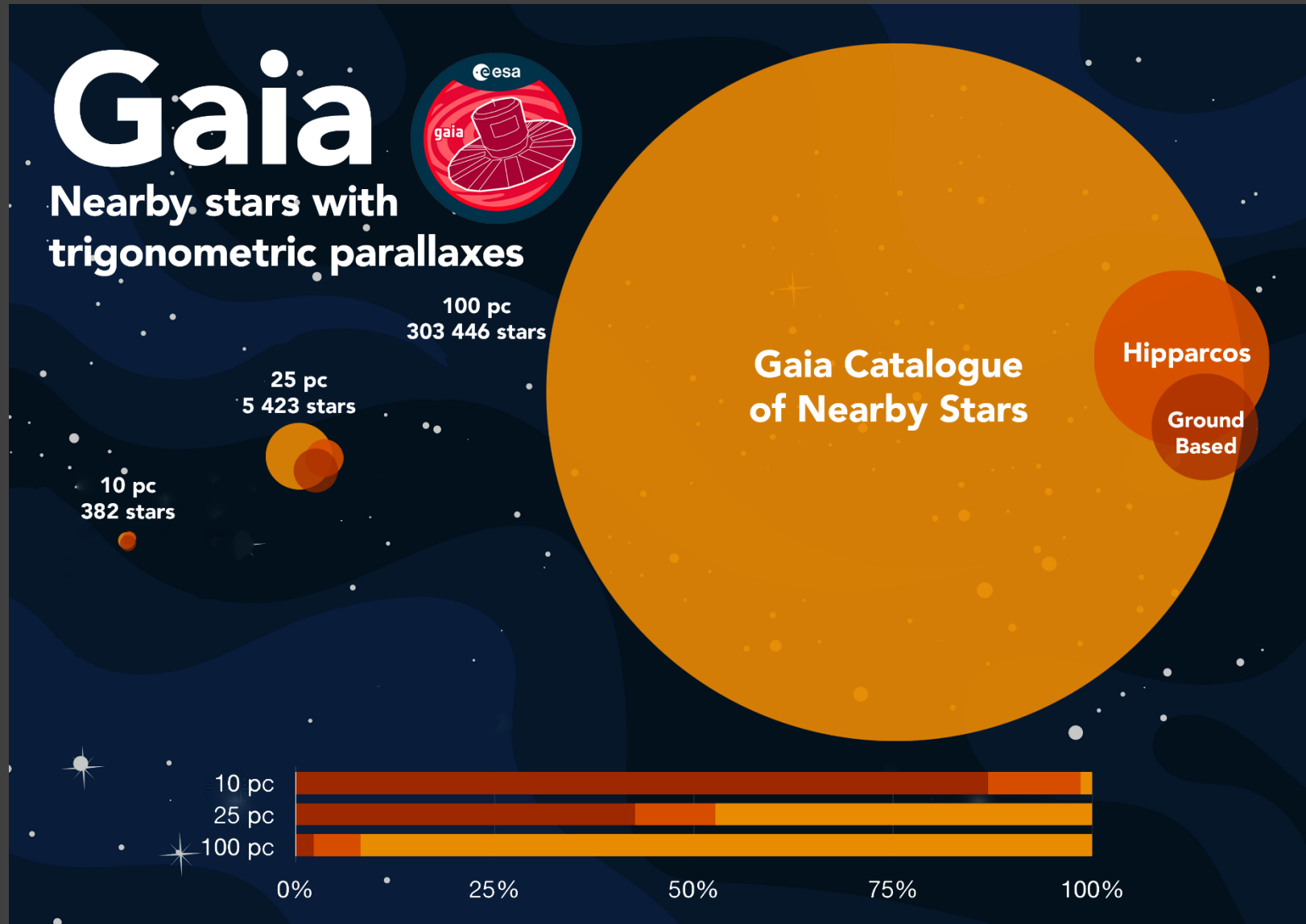
<https://gruze.org/10pc/>



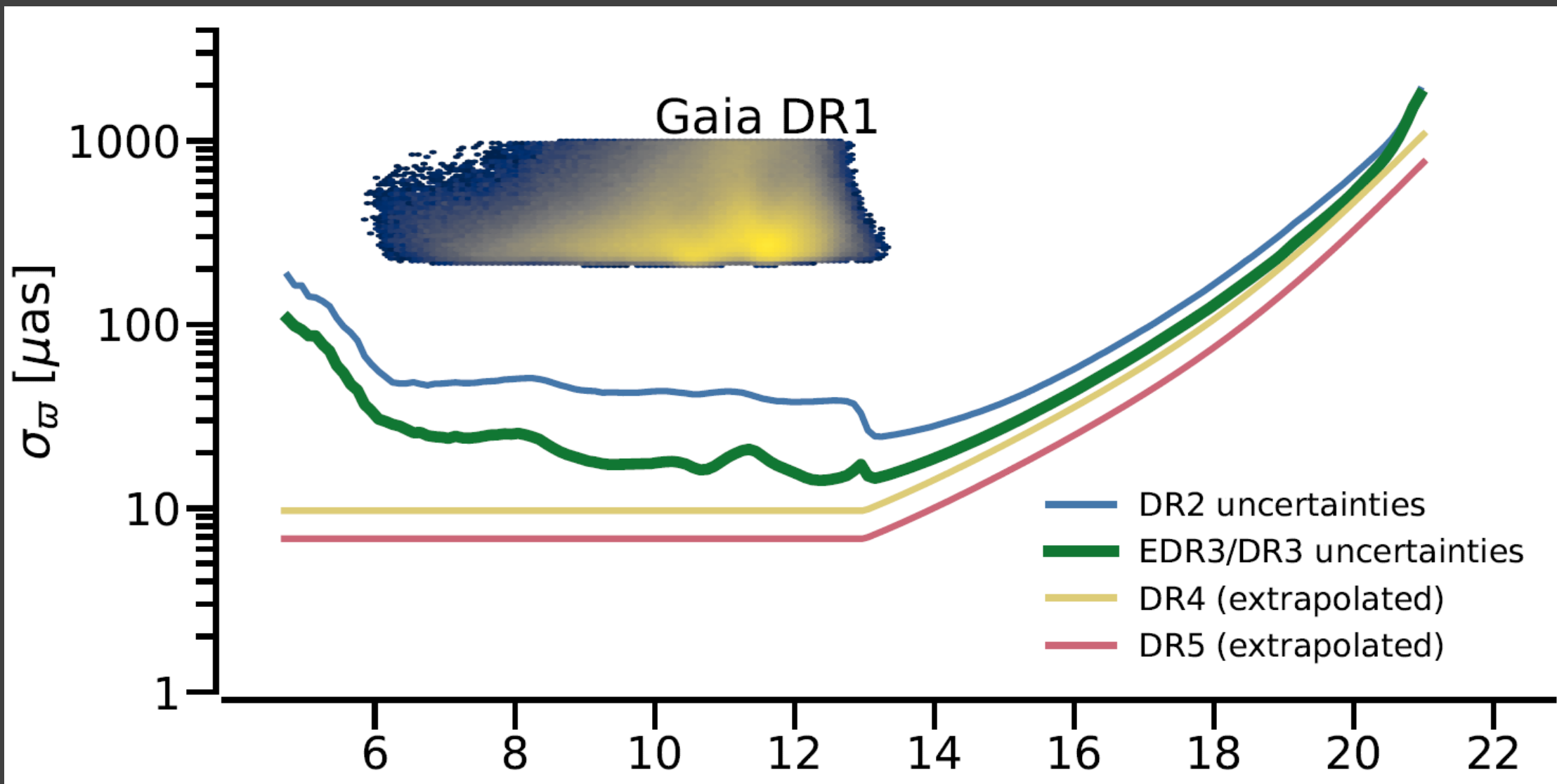




# Каталог ближайших звёзд

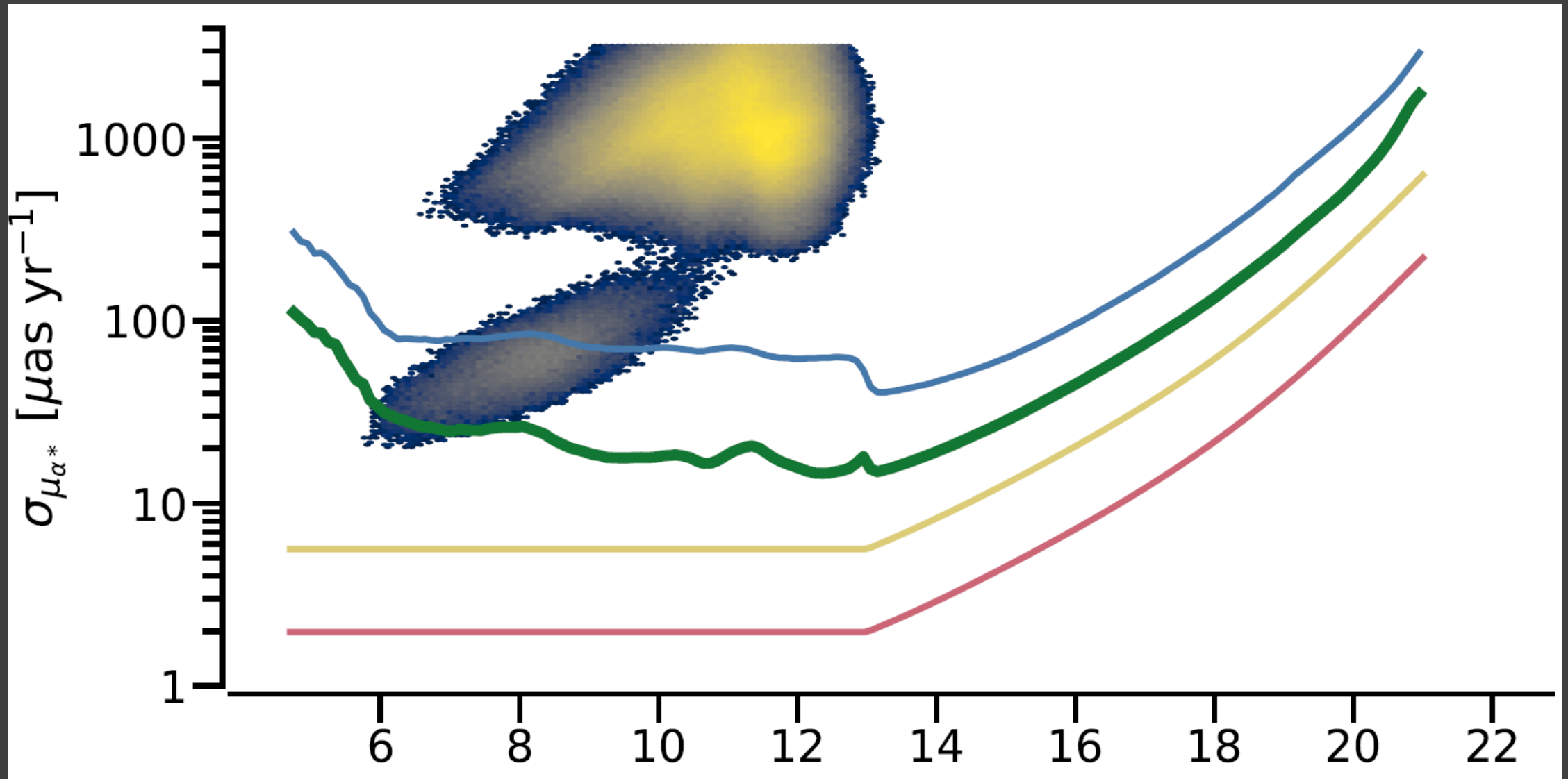


# Точность Gaia: параллаксы

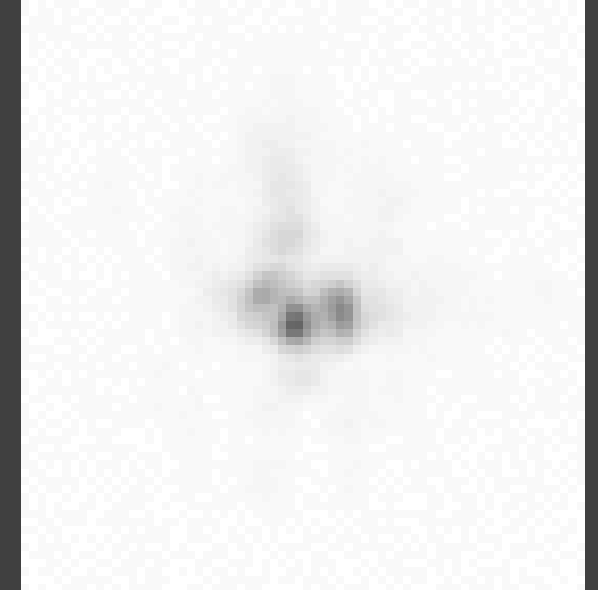
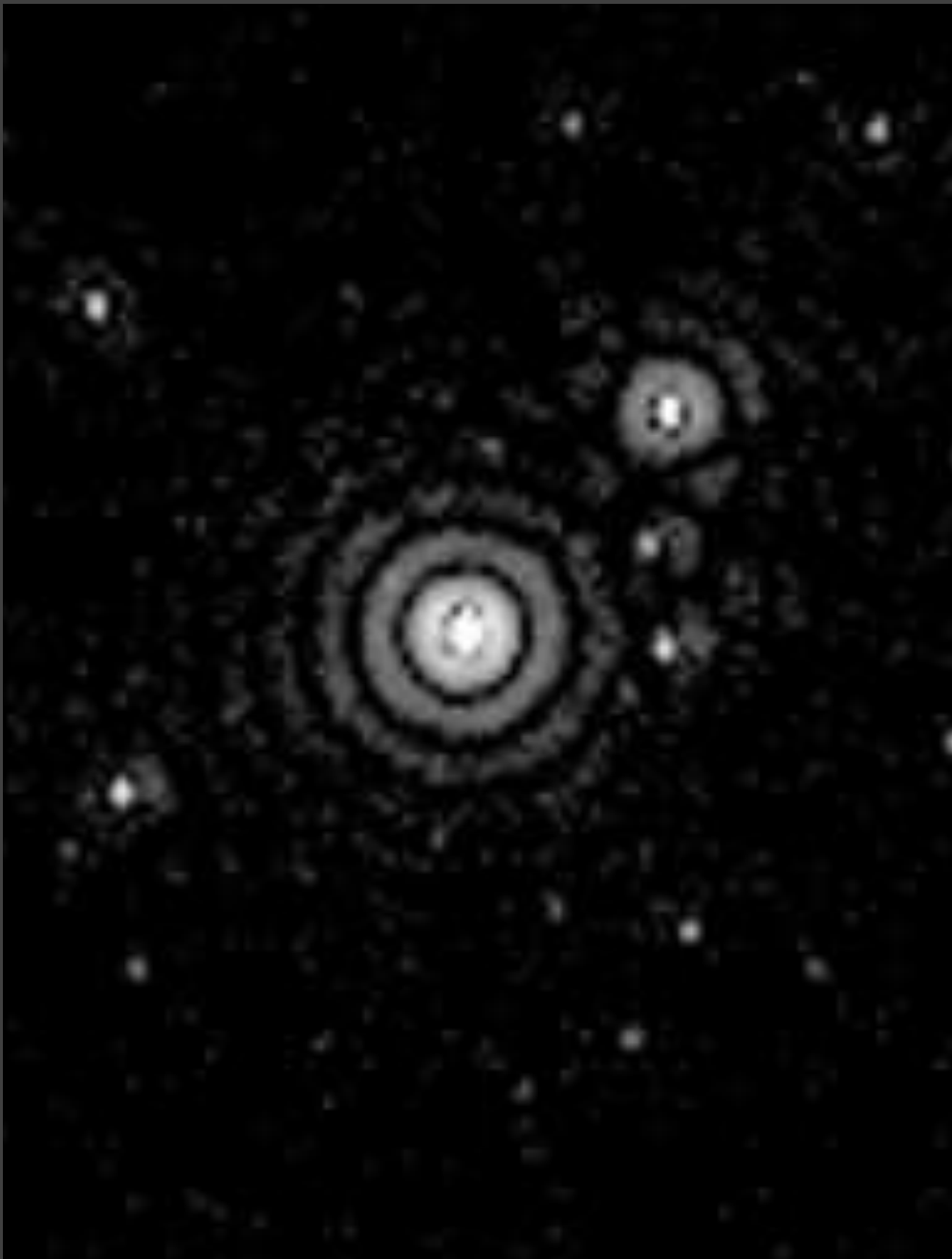




# Точность Gaia: собственные движения



# Угловое разрешение



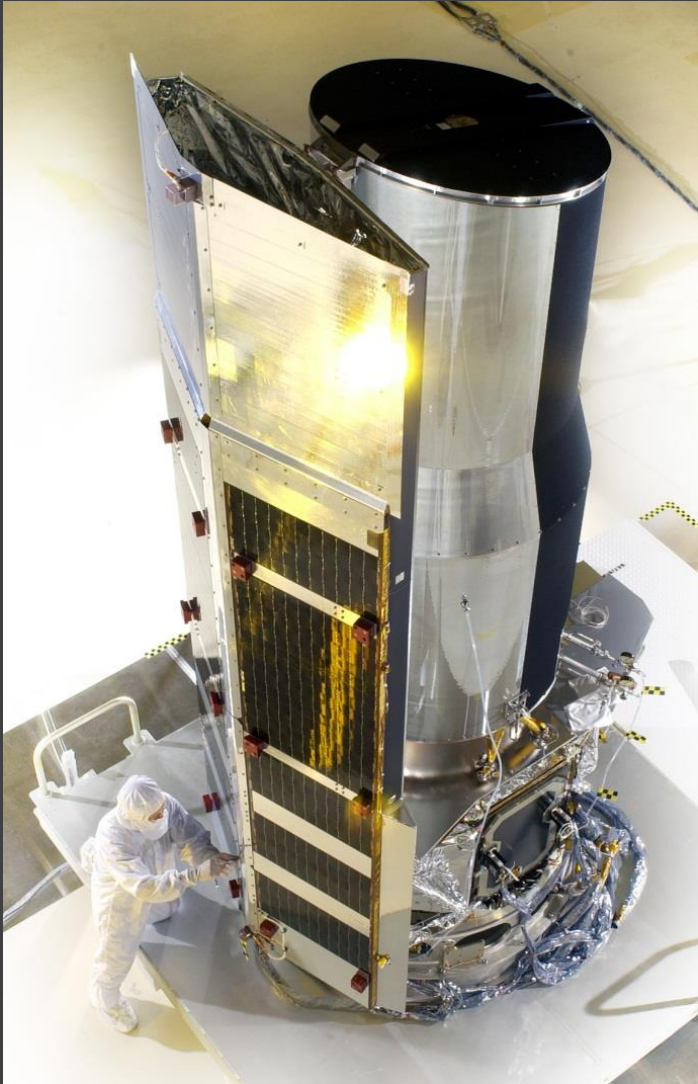
$$\sin \vartheta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

$$\vartheta'' = \frac{0.14}{D(\text{м})} \text{ для видимого света}$$

$$\vartheta'' = \frac{206}{D(\text{м})} \text{ для длины волны 1 мм}$$

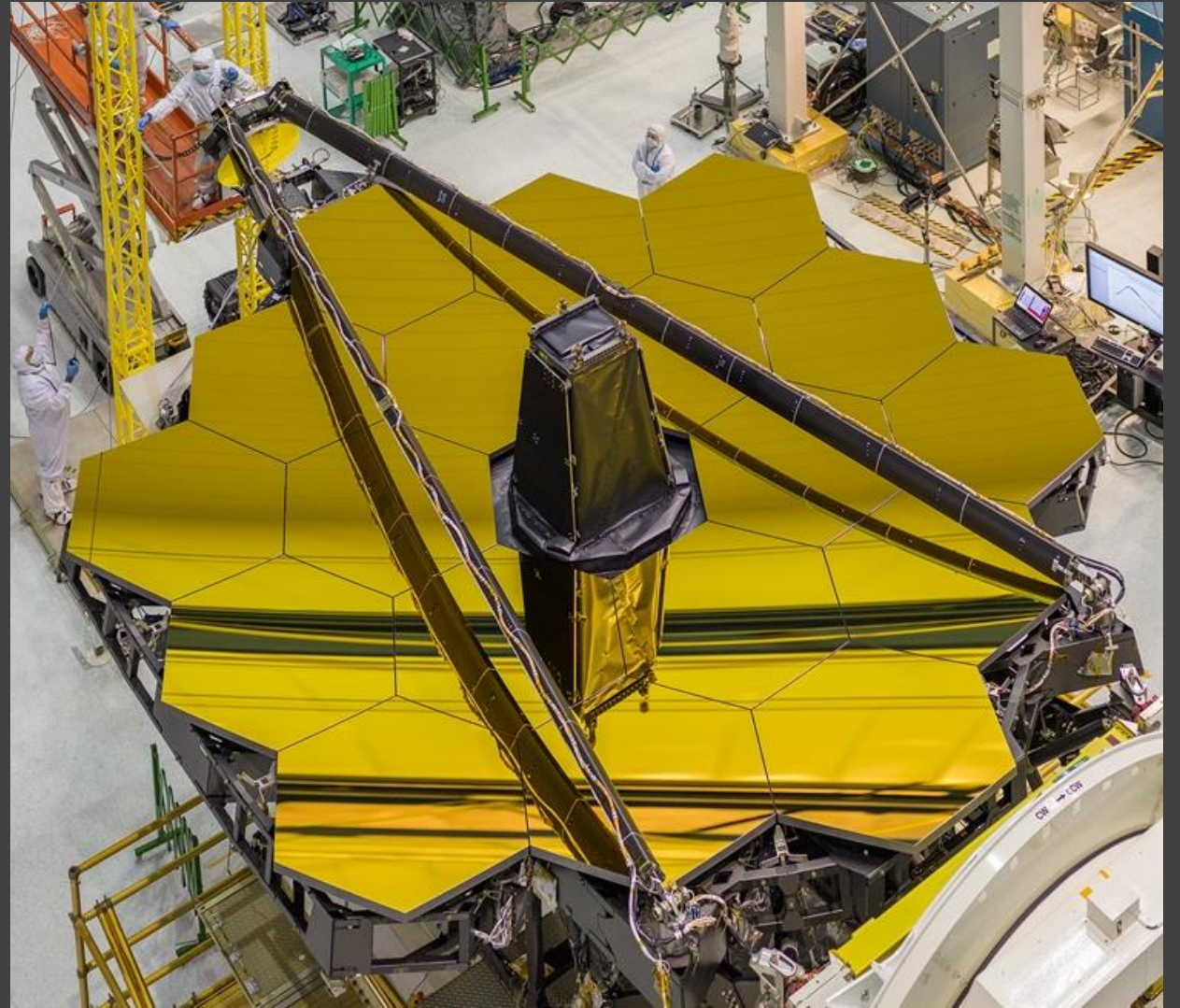
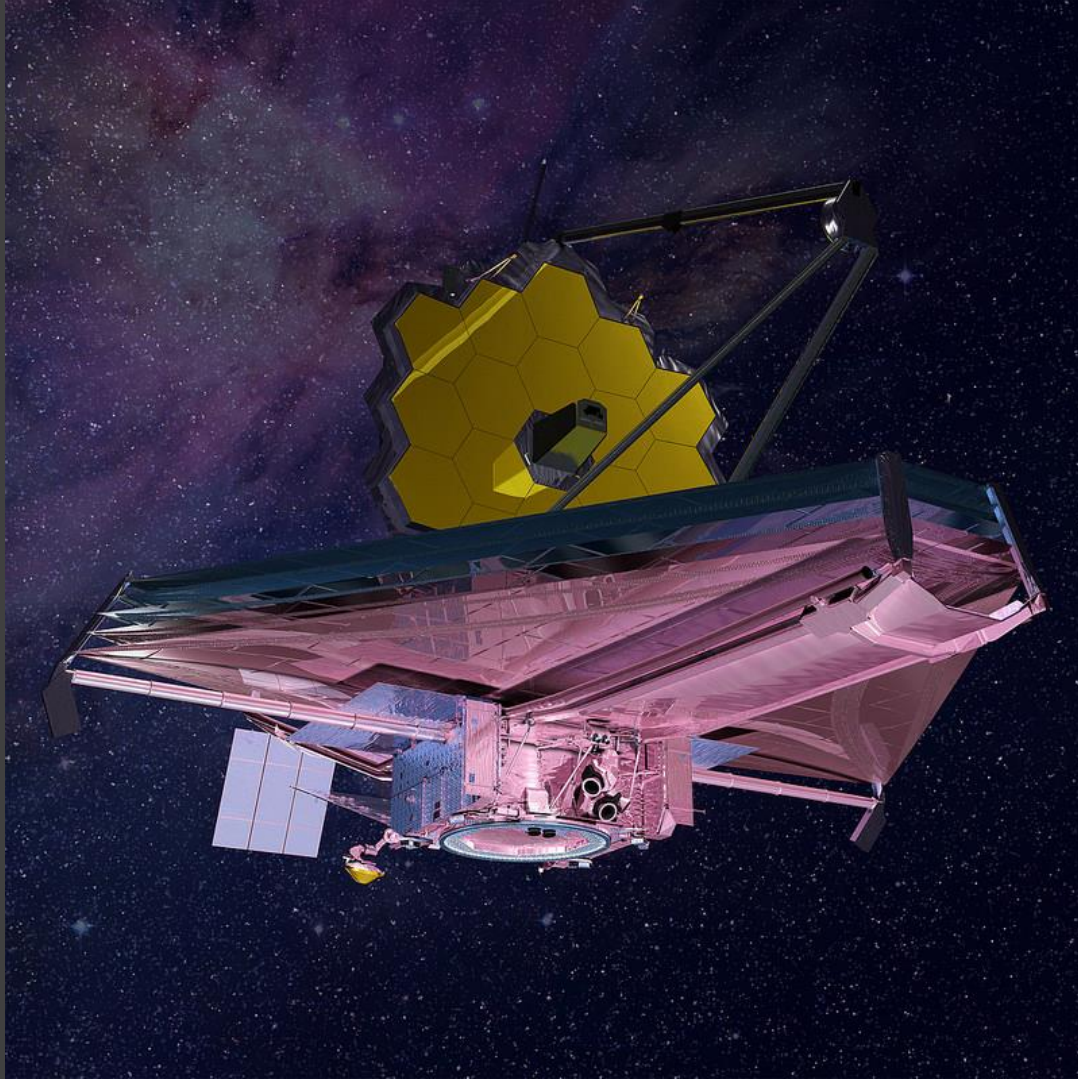


# Космический телескоп им. Спитцера

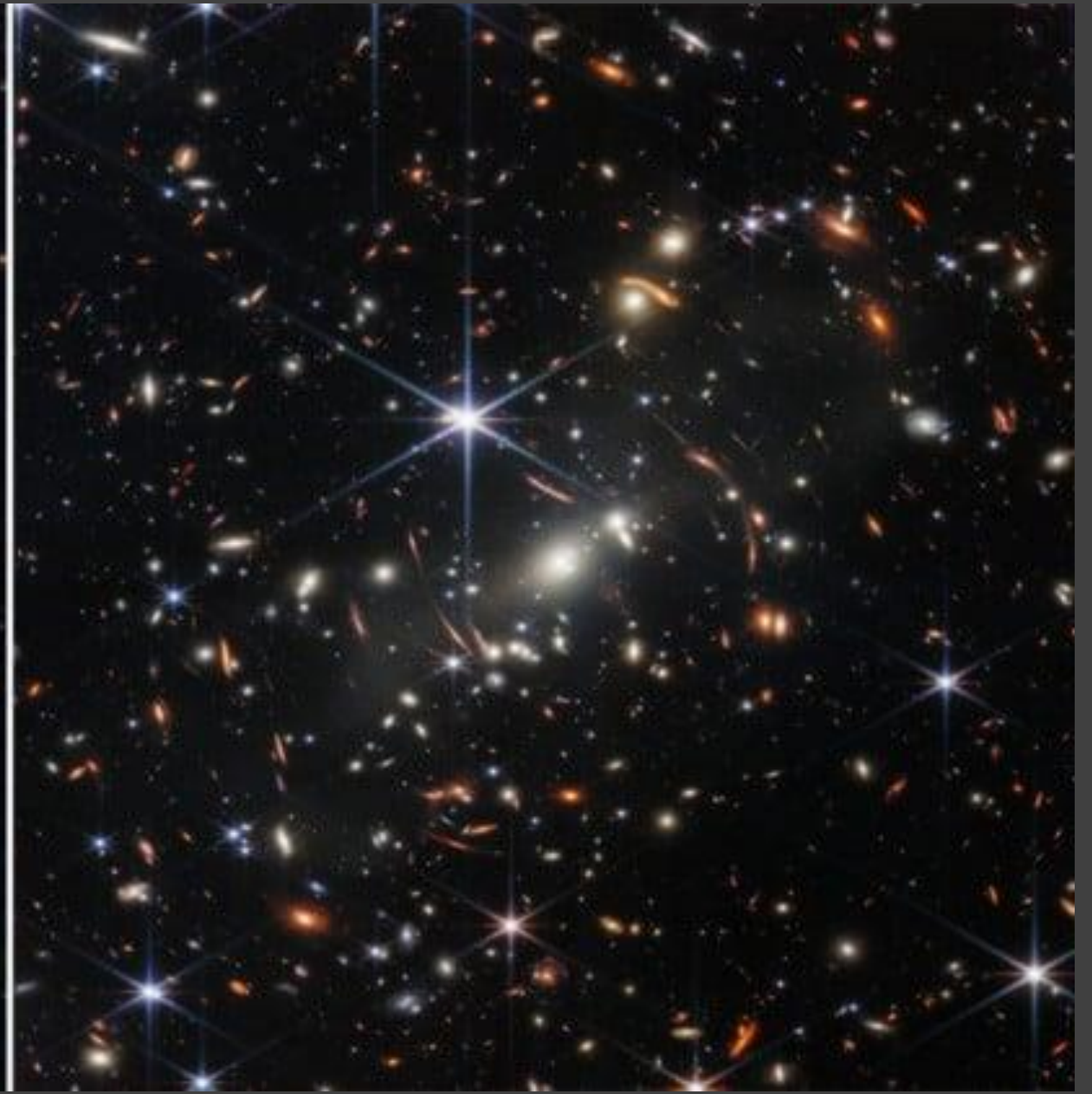




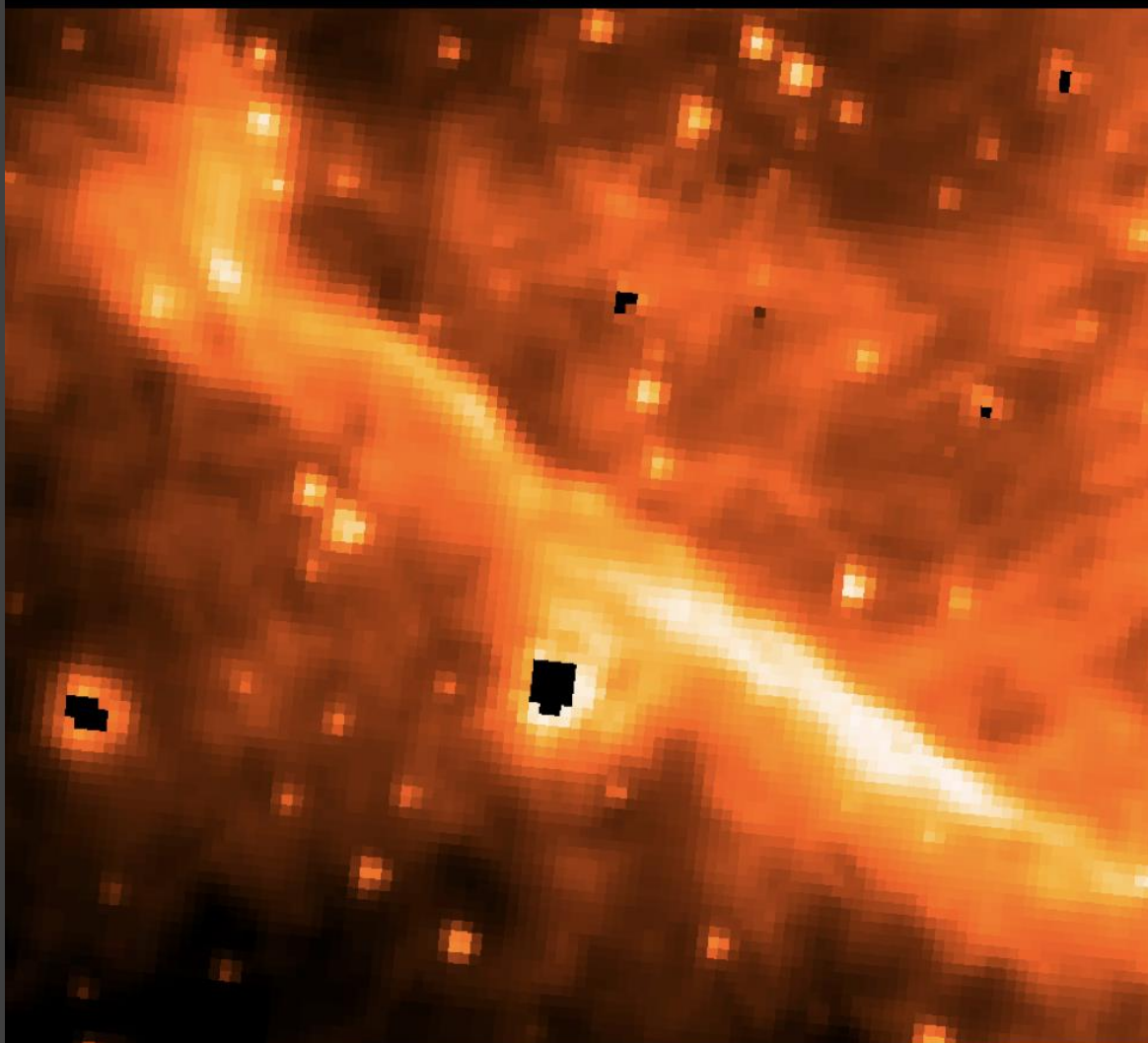
# JWST







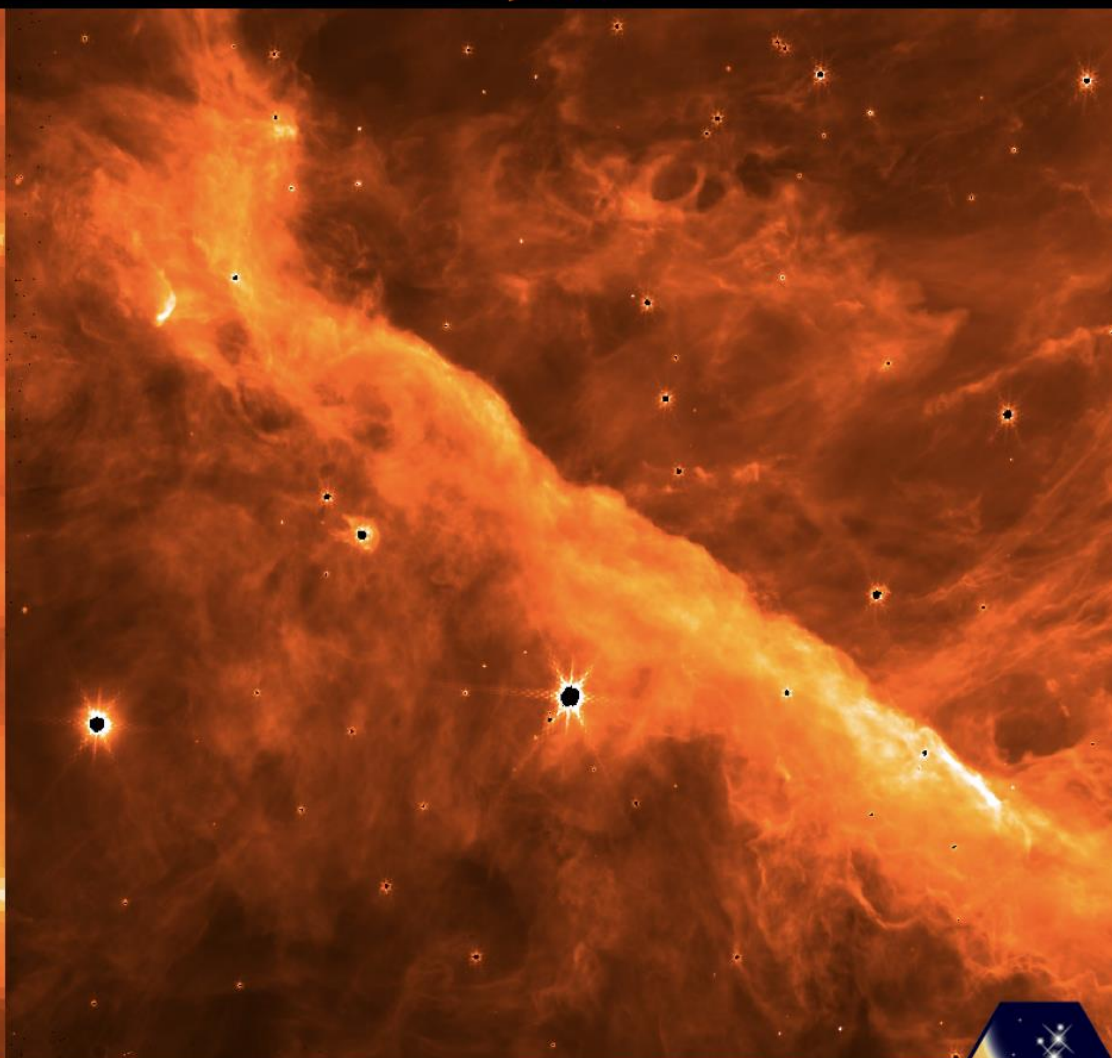
Spitzer



Credits : NASA / JPL-Caltech/S.T. Megeath

IRAC / 3.6  $\mu\text{m}$

JWST



Credits : NASA / ESA / CSA and PDRs4All team

NIRCam / 3.35  $\mu\text{m}$



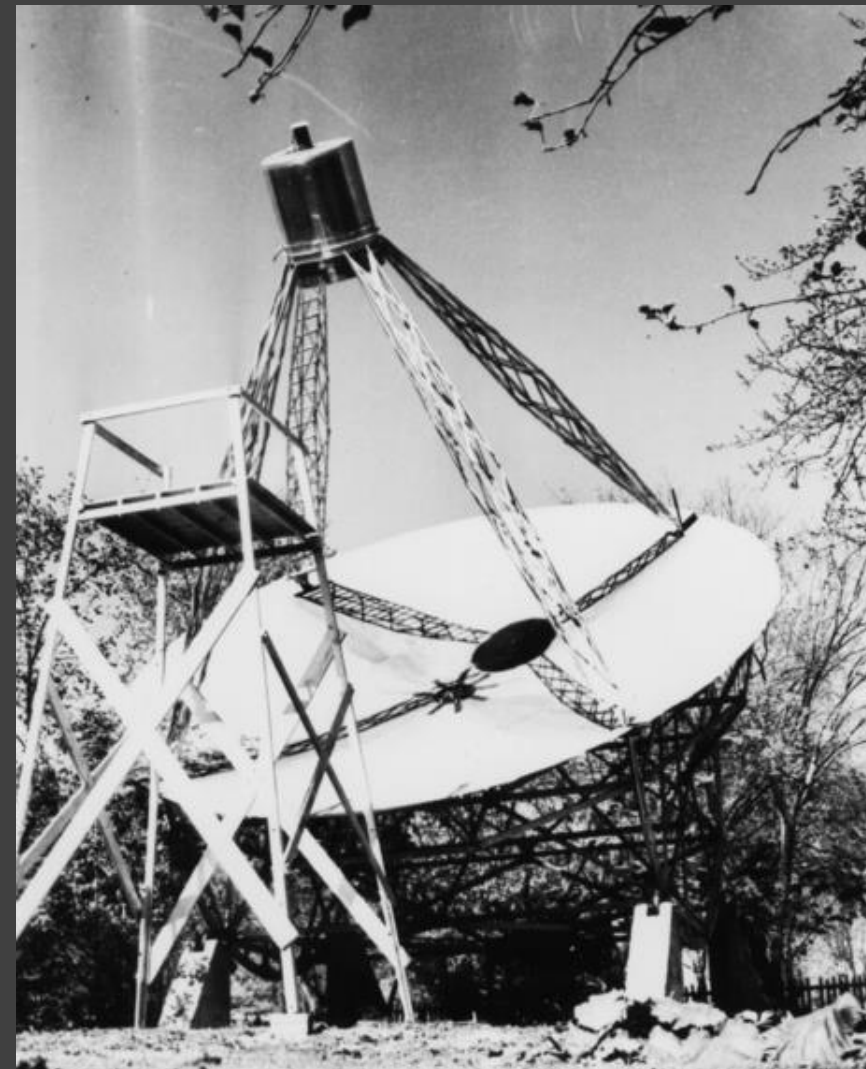
PDRs4All



# Радиоастрономия

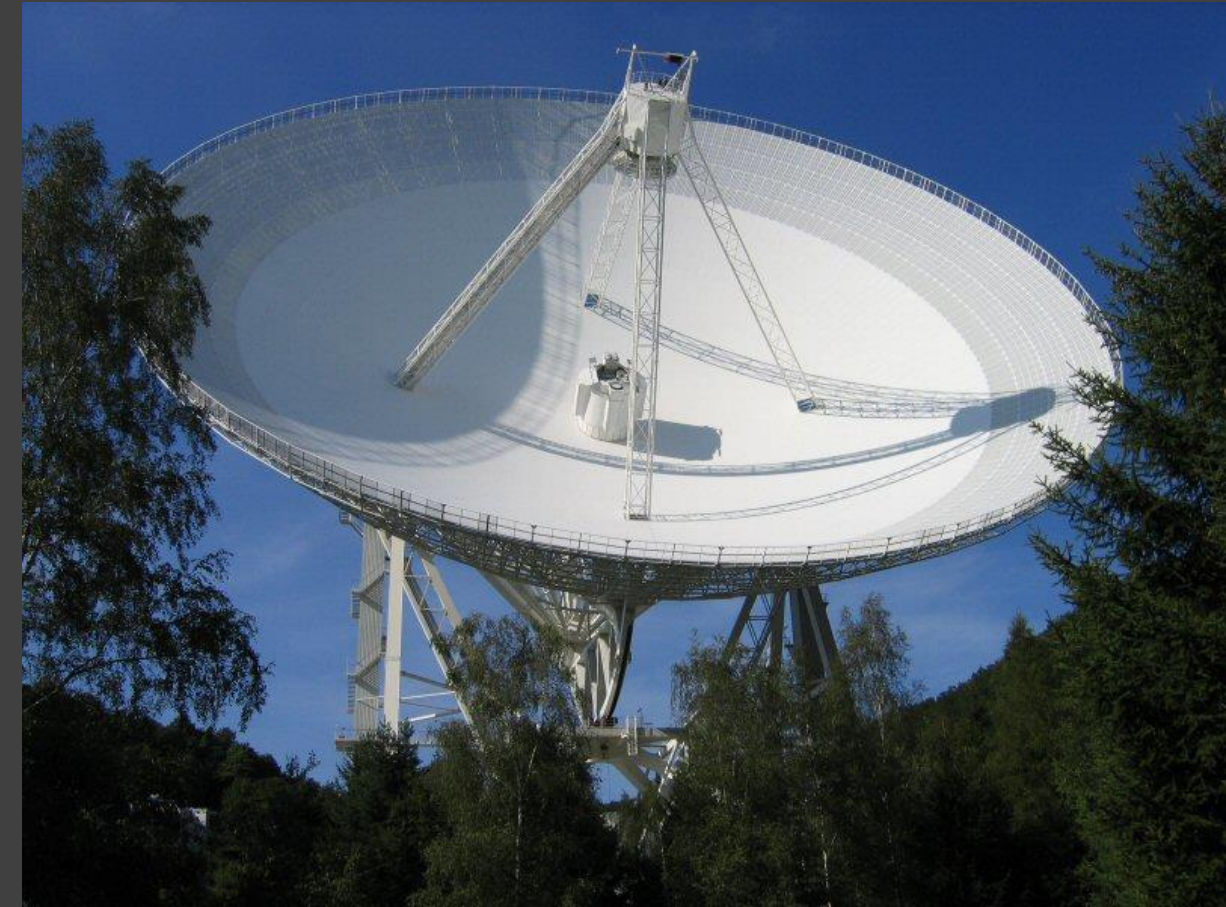
- Янский (1933)
- Ребер (1940)

«Карусель» Янского



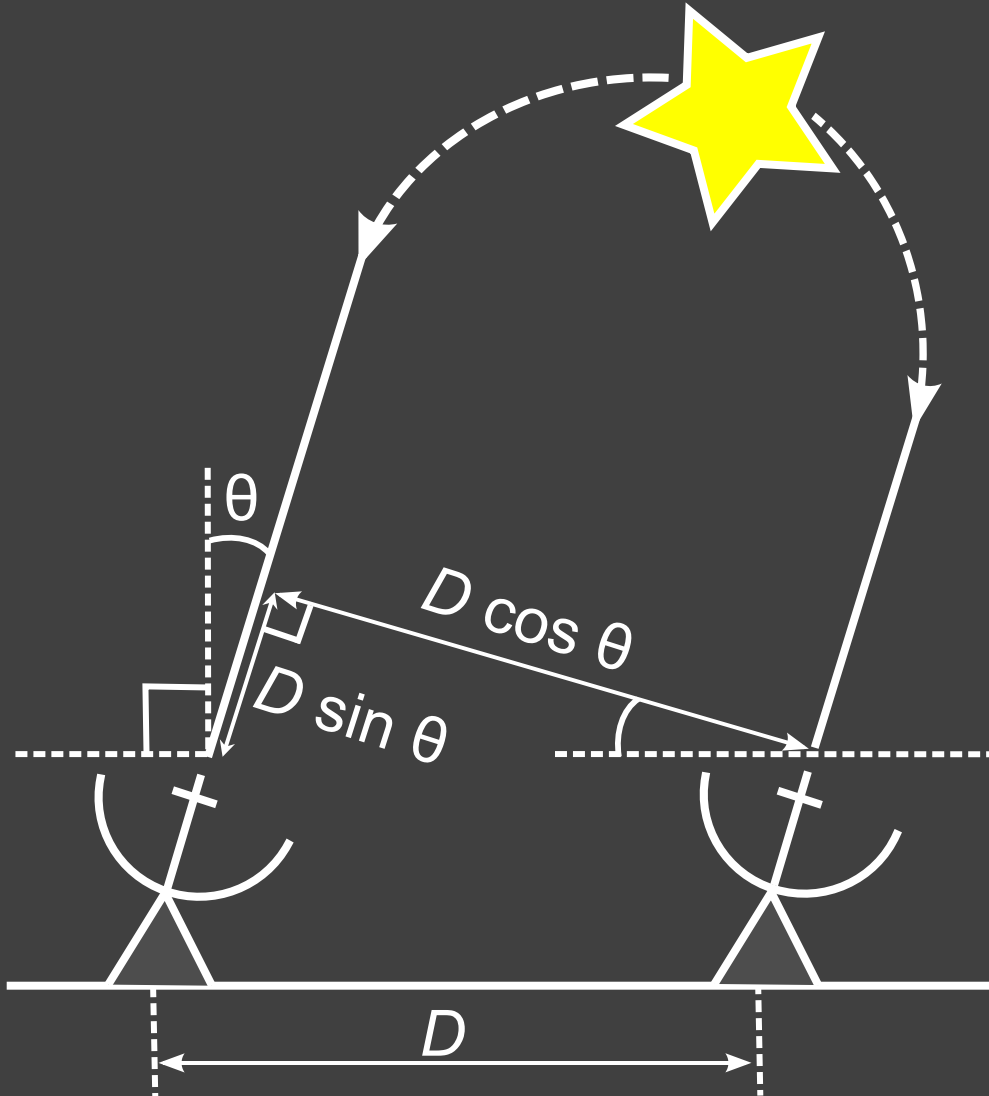


# Однозеркальные радиотелескопы





# Радиоинтерферометрия





# Радиоинтерферометры



VLA, 27 антенн по 25 м,  
максимальная база 36 км,  
0.6 см – 4 м



НОЕМА, 12 антенн по 15 м,  
максимальная база 760 м,  
0.8–3 мм

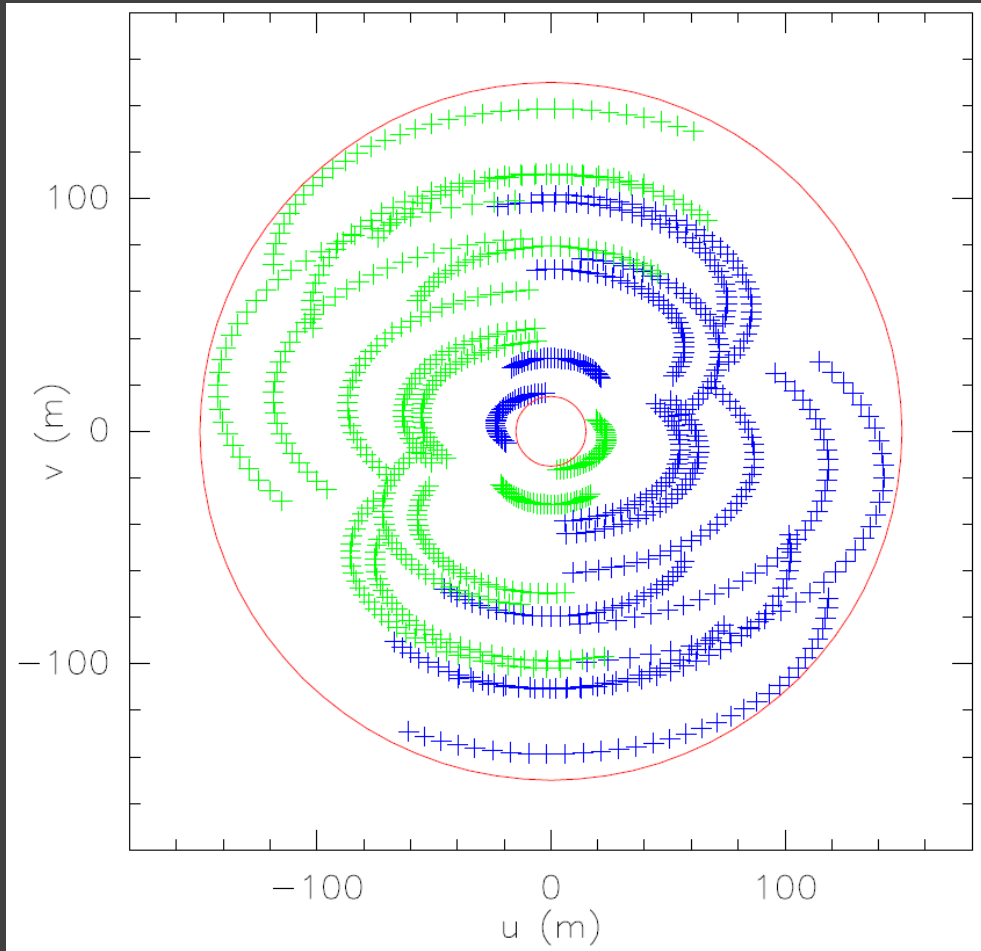
# Atacama Large Millimeter Array (ALMA)

- Диапазон 400 мкм – 3 мм
- База от 150 м до 16 км
- 54 антенны диаметром 12 м и 12 антенн диаметром 7 м





# Заполнение $uv$ -плоскости









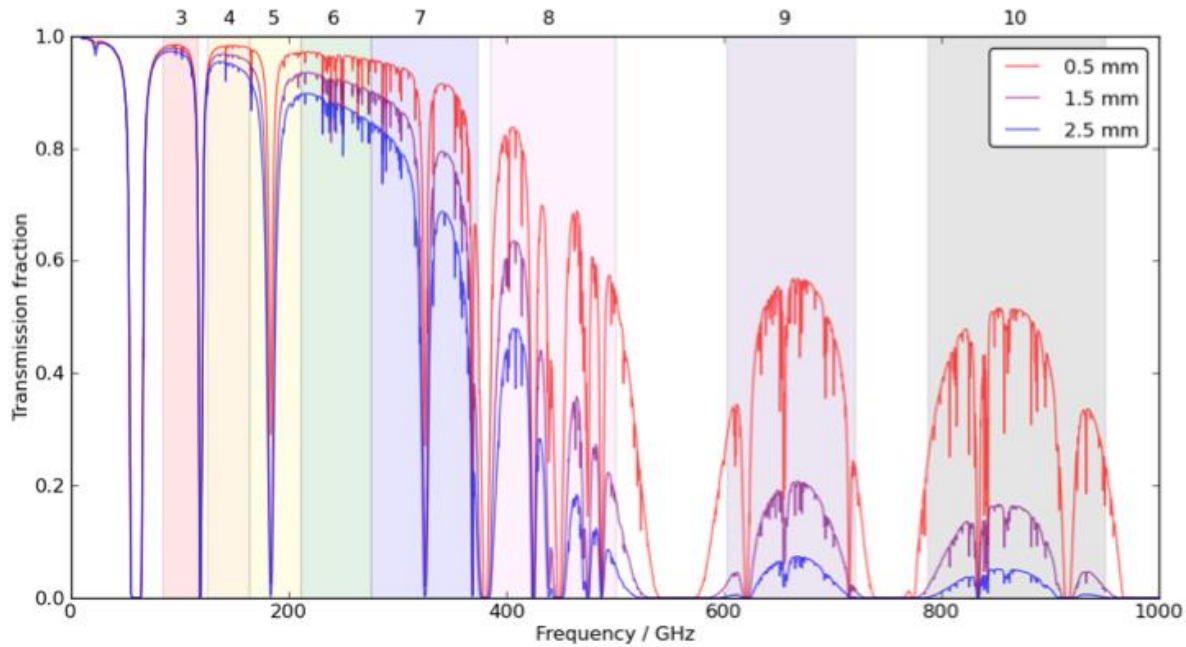
© ALMA (NRAO/ESO/NAOJ); Sergio Otarola



# Коррелятор ALMA



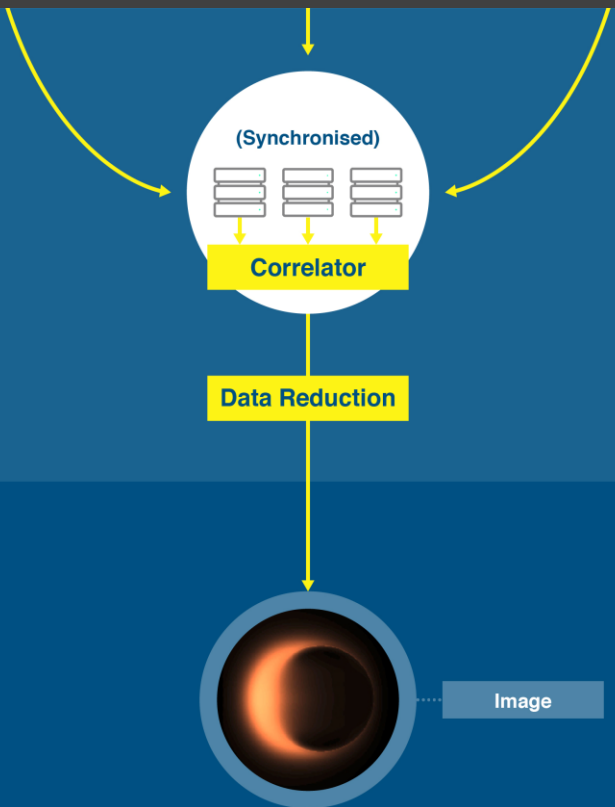
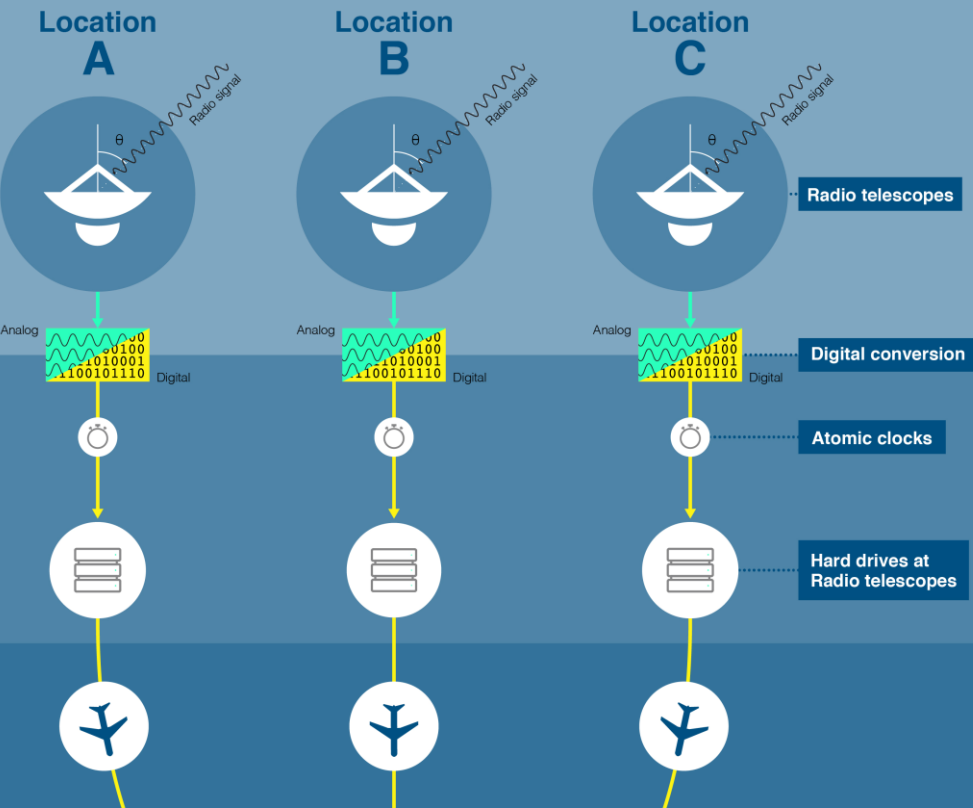
# Полосы ALMA



Полоса	Частота, ГГц	Длина волны, мм	Угловое разрешение при базе от 200 м до 16 км, угл. сек.
3	84-116	2.59-3.57	3.0-0.034
4	125-163	1.84-2.40	2.1-0.023
5	158-211	1.42-1.90	1.6-0.018
6	211-275	1.09-1.42	1.3-0.014
7	275-373	0.8-1.09	1.0-0.011
8	385-500	0.60-0.78	0.7-0.008
9	602-720	0.42-0.50	0.5-0.005
10	787-950	0.32-0.38	



# Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ)



**VLBA**





# EVN





# Система «Квазар»

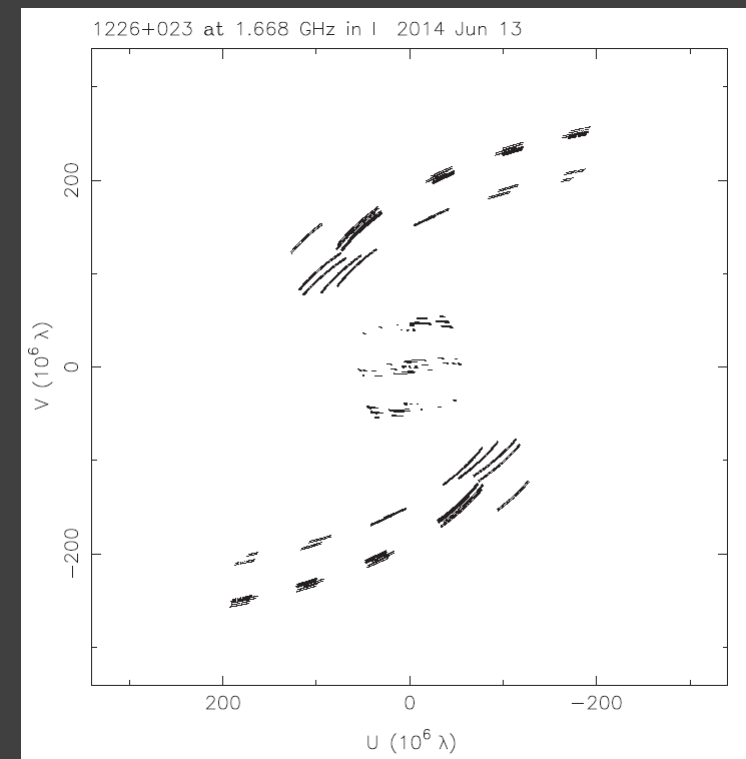
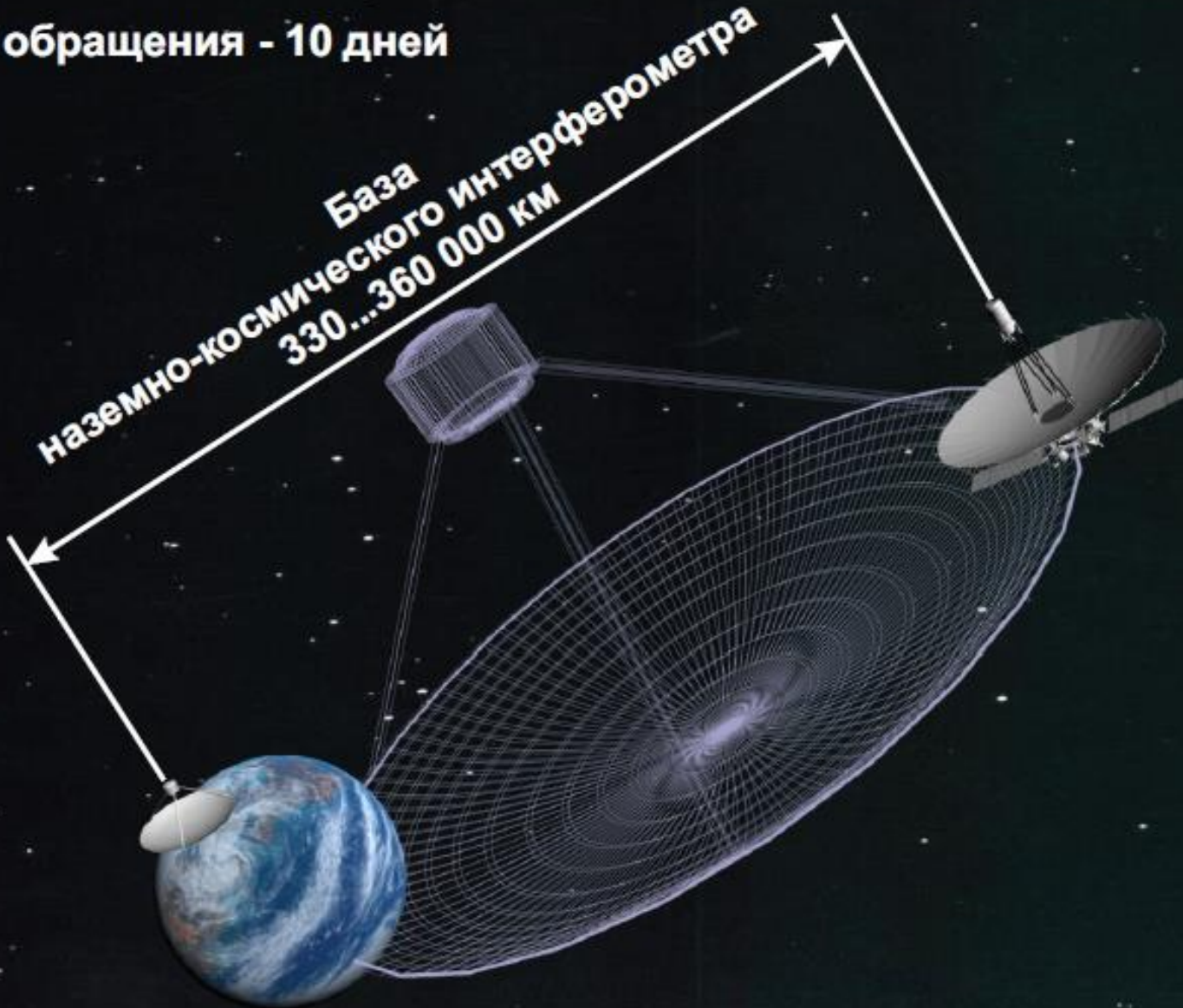




# РСДБ: «Радиоастрон» (Спектр-Р)

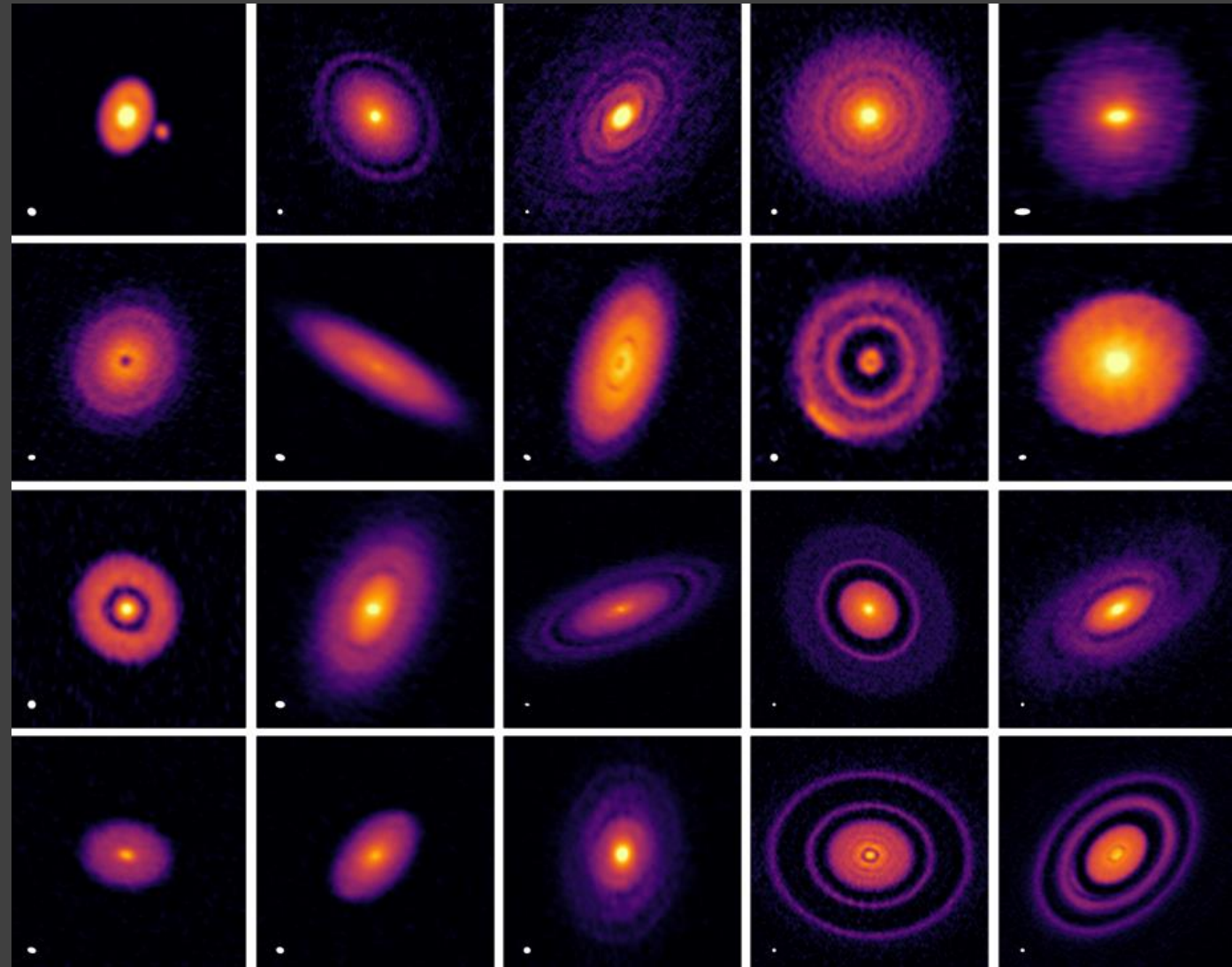
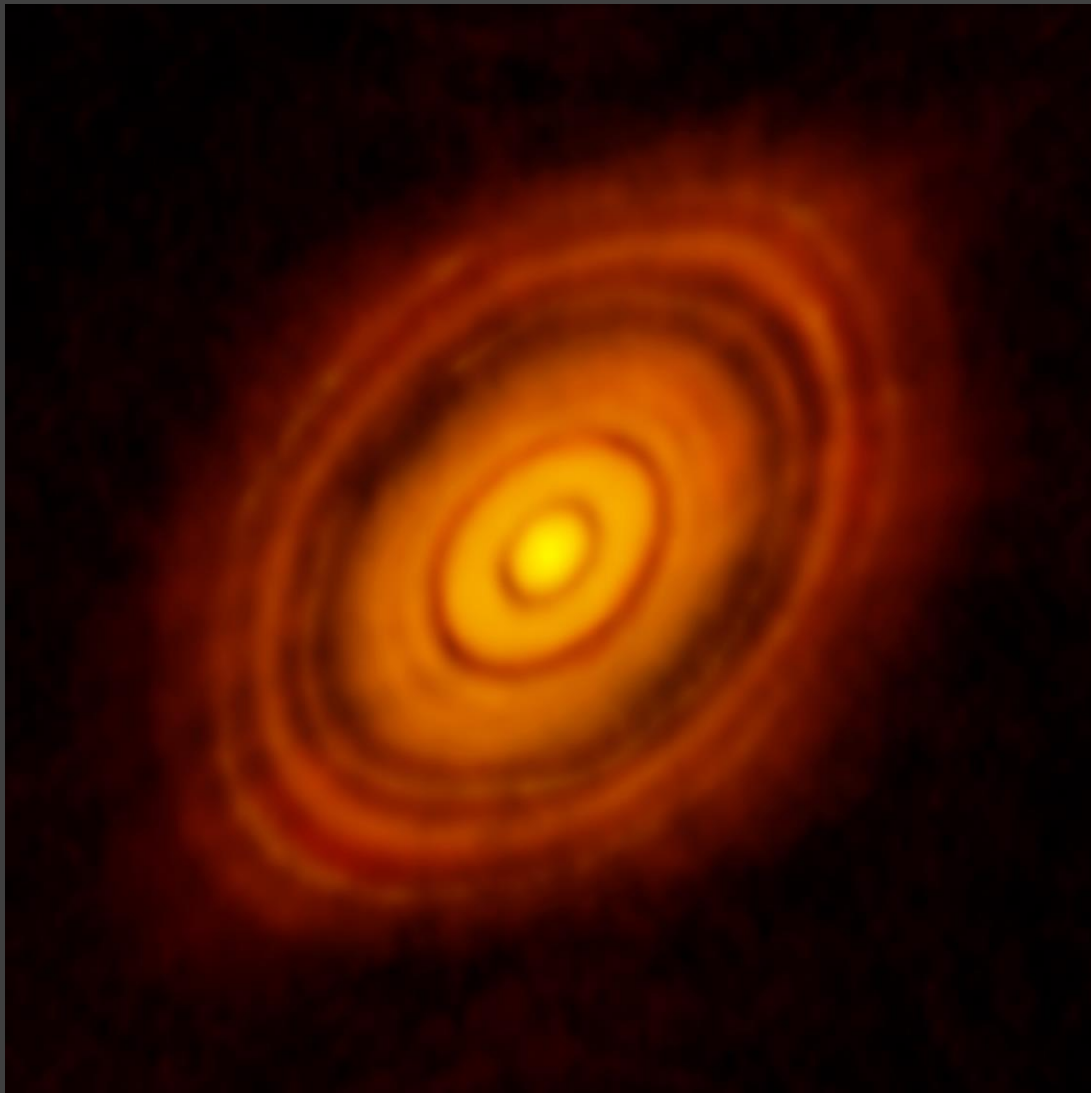
Период обращения - 10 дней

База  
Наземно-космического интерферометра  
330...360 000 км



Bruni et al. (2019)

# Протопланетные диски

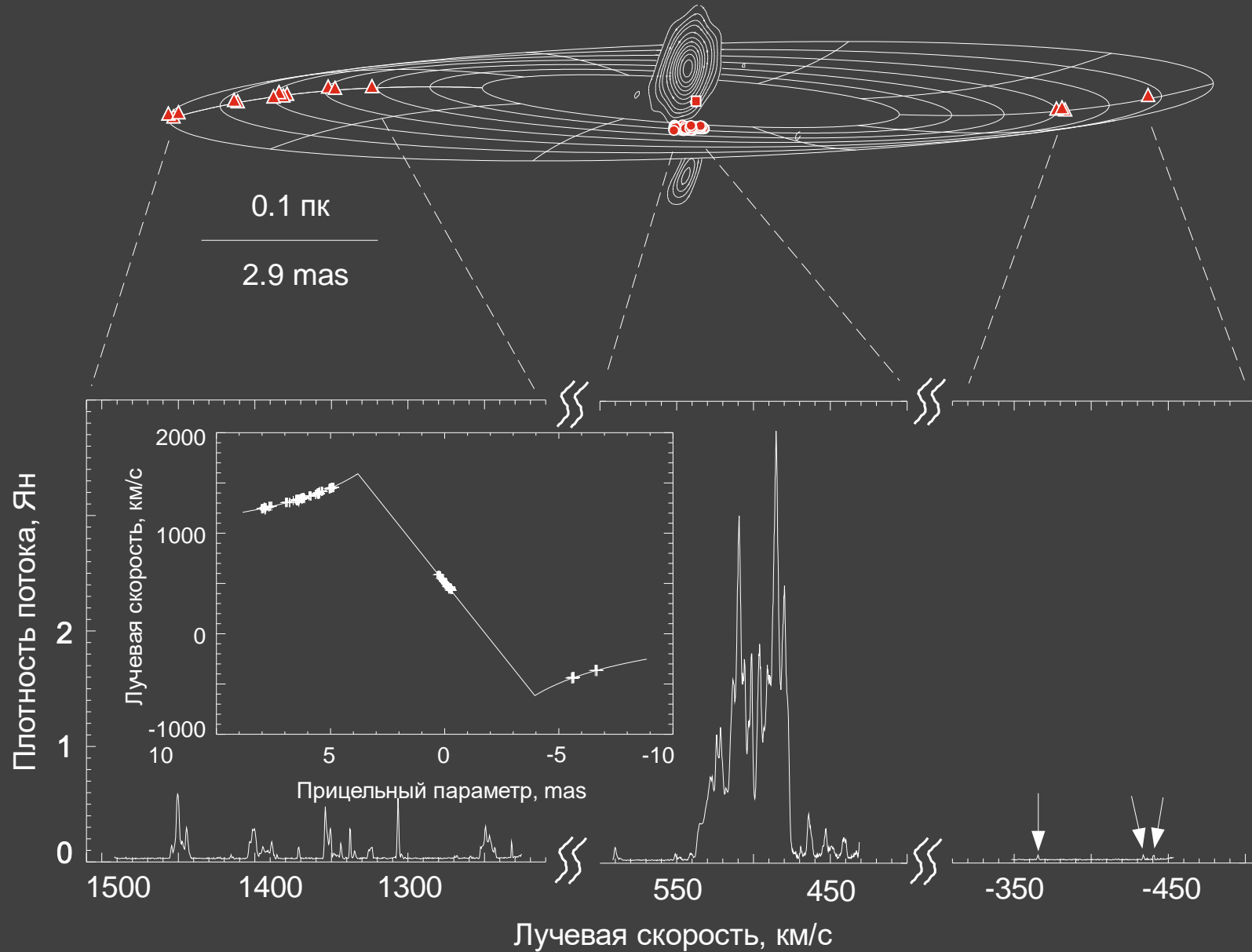




# Активные ядра галактик



# Активные ядра галактик



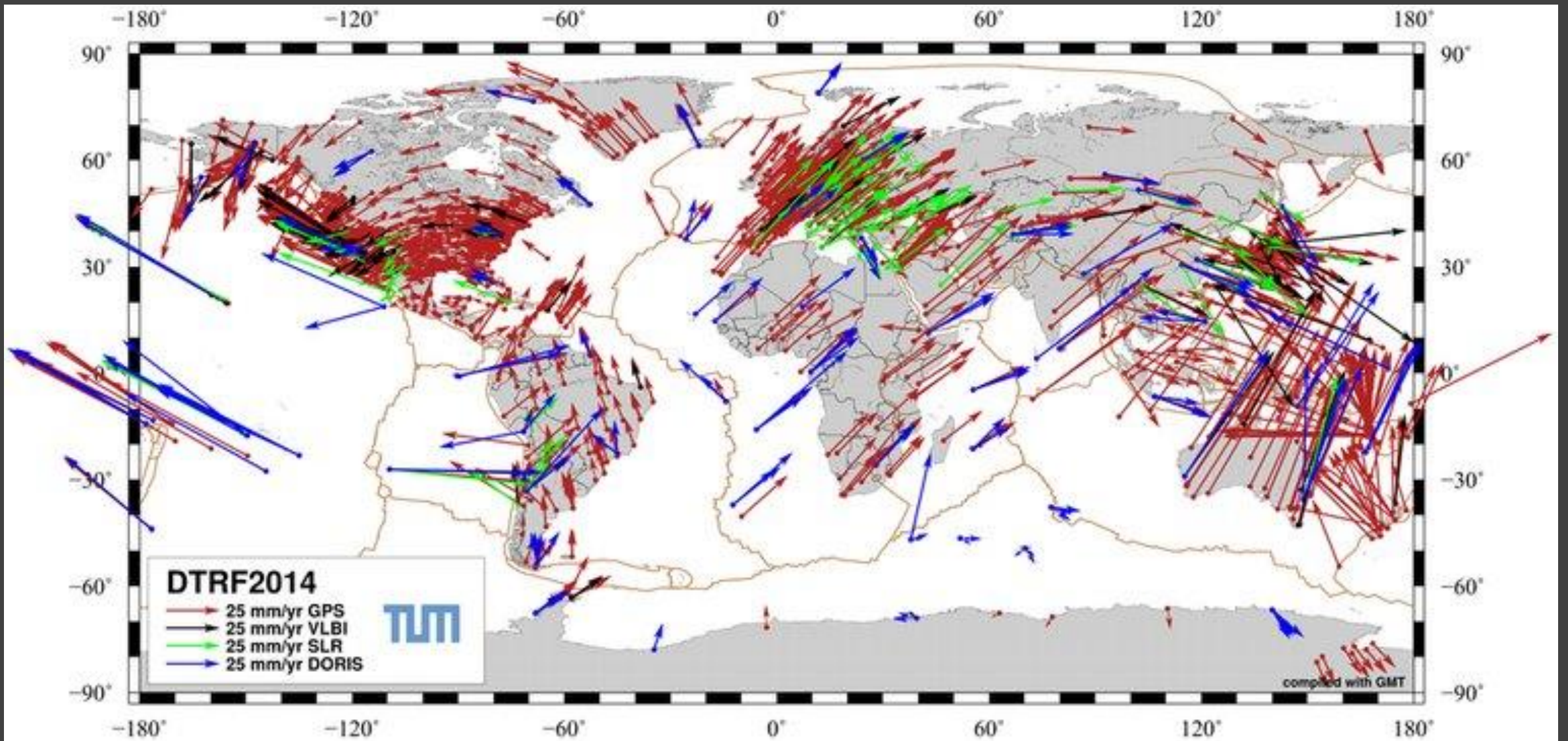
Herrnstein et al. (1999)



# КВНО

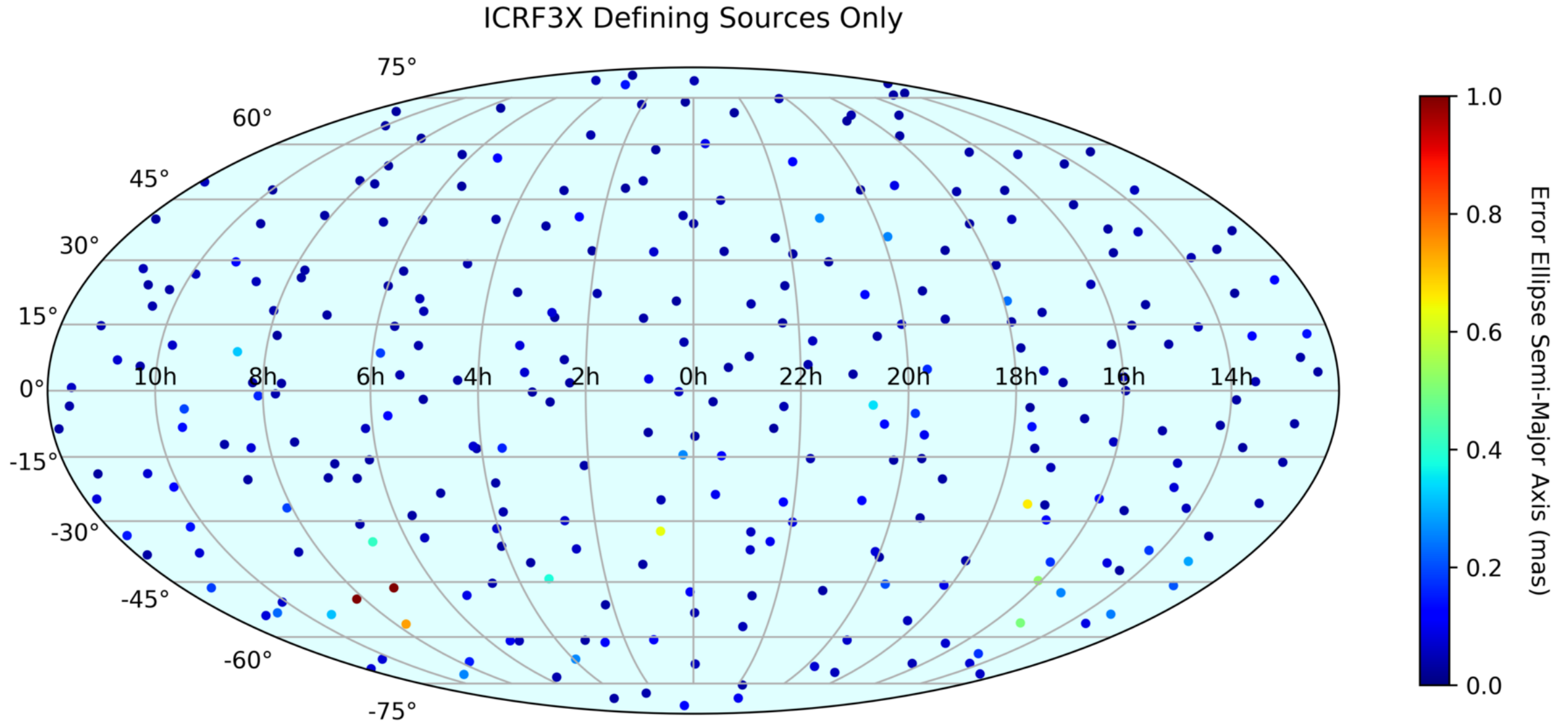
- Построение фундаментальных небесной и земной систем координат
- Определение параметров вращения Земли с высоким временным разрешением
- Исследование тектонических движений земной коры
- Синхронизация атомных шкал времени, разнесенных на большие расстояния
- Эфемеридно-временная поддержка глобальной навигационной системы ГЛОНАСС

# Движение материков





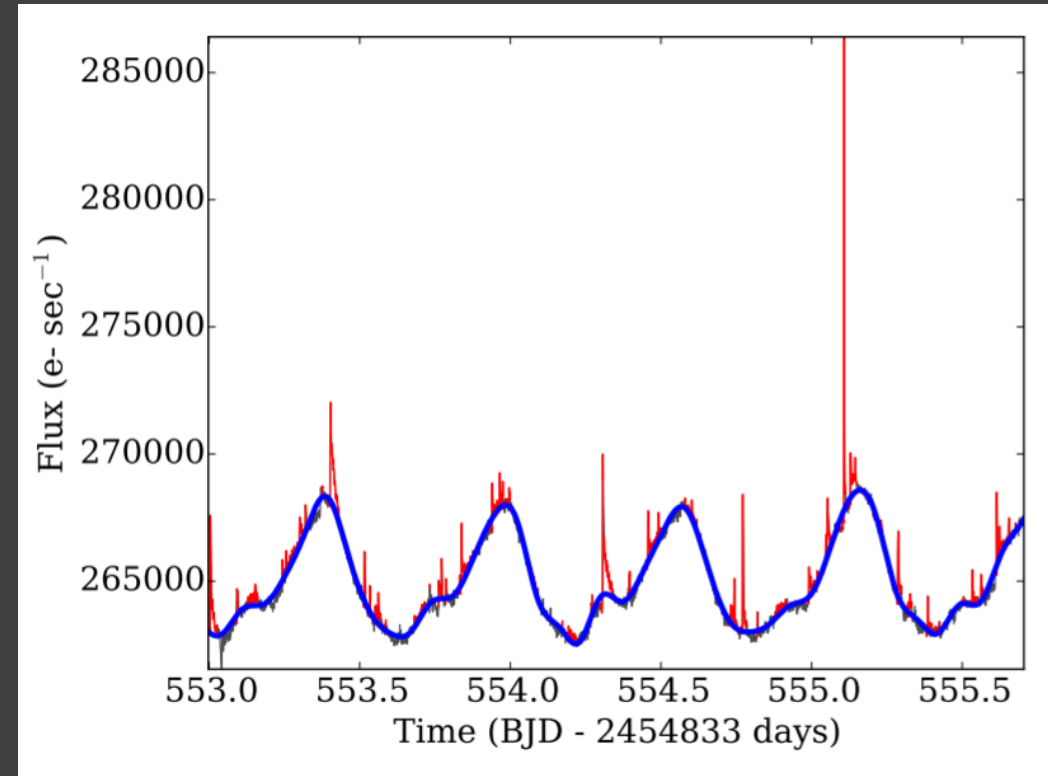
# Международная небесная система координат



Charlot et al. (2020)

## Ещё одна переменная — время

- Звёздная переменность
- Звёздная активность

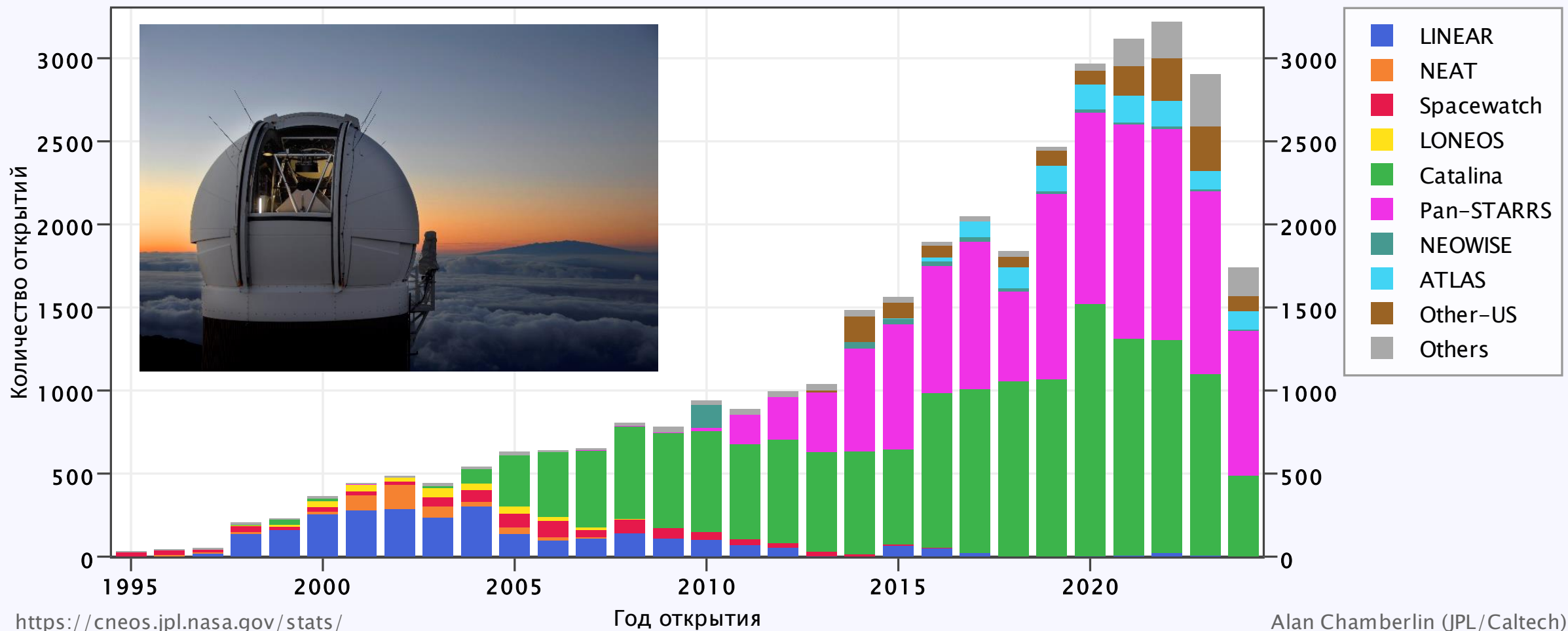




# Астероиды, сближающиеся с Землёй

Открытия АСЗ с разделением по обзорам

Все АСЗ по состоянию на 14.09.2024



# Vera Rubin Observatory (8.4 м)



Камера 3.2 гигапикселя

Поле зрения  $3.5^\circ$

200000 изображений в год  
(1.28 петабайт)

10 млн. алертов за ночь (не позже  
60 с после обнаружения)

Вычислительная мощность не  
менее 250 tflops



# Природа коварна, но не злонамеренна

- По сути, единственный источник информации о Космосе — электромагнитное излучение (+ нейтрино, космические лучи, гравитационные волны), но оно буквально переполнено информацией!
- Нам необходимо понимать, как рождается и распространяется электромагнитное излучение различных энергий
- Ключевое предположение — единство физических законов во всей Вселенной
- Законы выражаются математическими уравнениями, которые можно решить

# Моделирование

## Реальная жизнь

- Существует физический объект, в котором происходят какие-то процессы, генерирующие излучение
- Излучение распространяется от объекта к наблюдателю
- Излучение попадает на детектор телескопа порождает в нём какой-то отклик
- Отклик преобразуется в спектр

## Модельная жизнь

- Строится модель объекта, в которую среди прочего включается модель процессов, генерирующих излучение
- Строится модель распространения излучения
- Рассчитывается синтетический спектр, попадающий на детектор телескопа

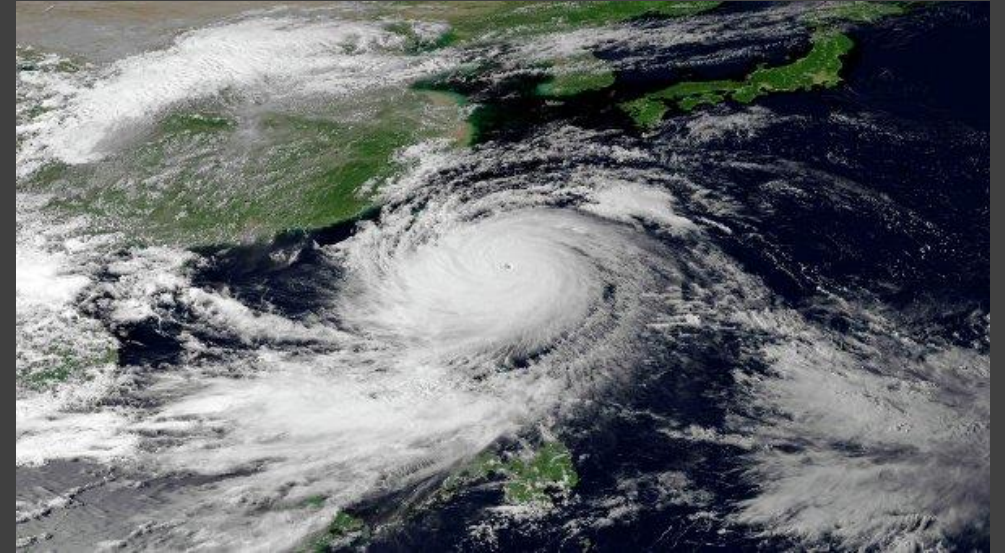


# Уравнения газодинамики

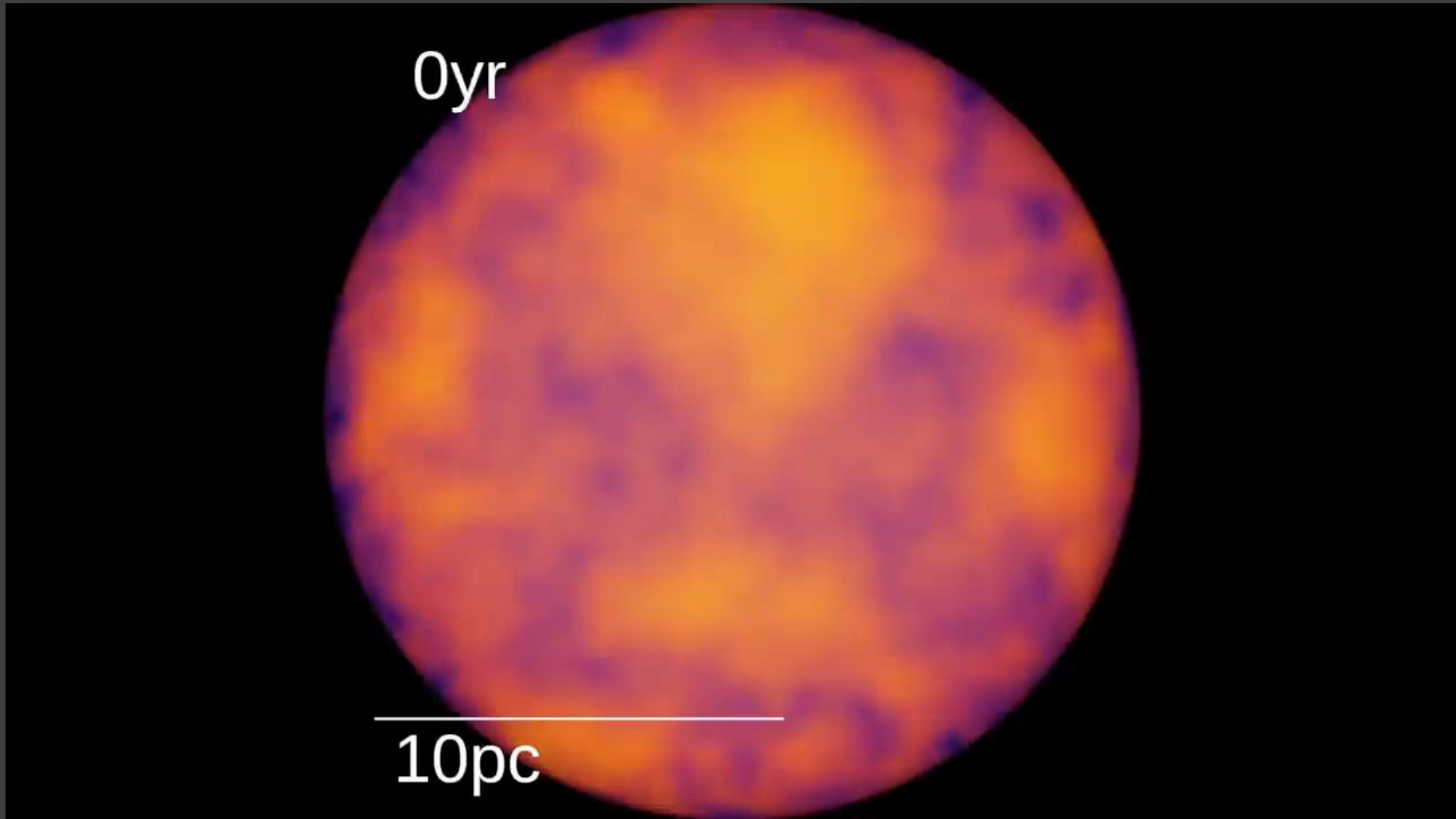
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \vec{g}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) = -\operatorname{div} \left\{ \rho \vec{v} \left( \frac{v^2}{2} + \omega \right) \right\}$$



# Модель звездообразования





# Модель = физика + математика

- Газодинамика (МГД, РГД)
- Химическая кинетика
- Релятивистские эффекты
- Механика
- Перенос излучения
  
- Квантовая физика
- Термодинамика

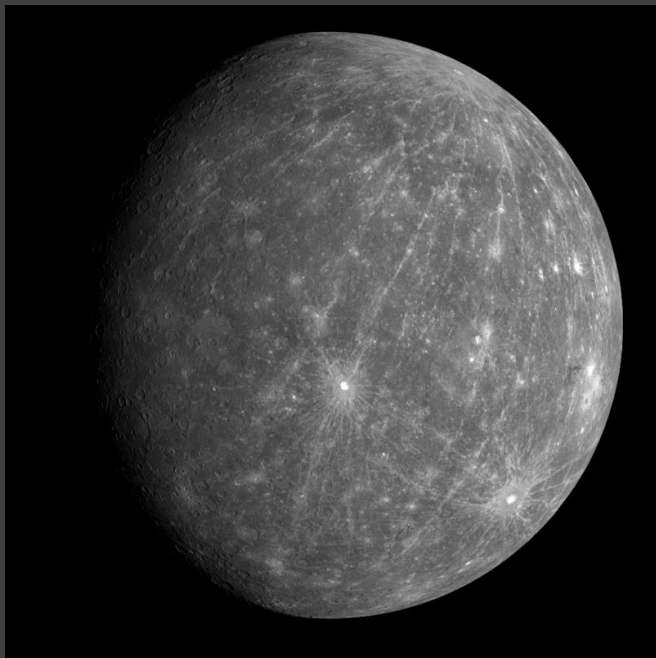
1D, 2D, 3D...



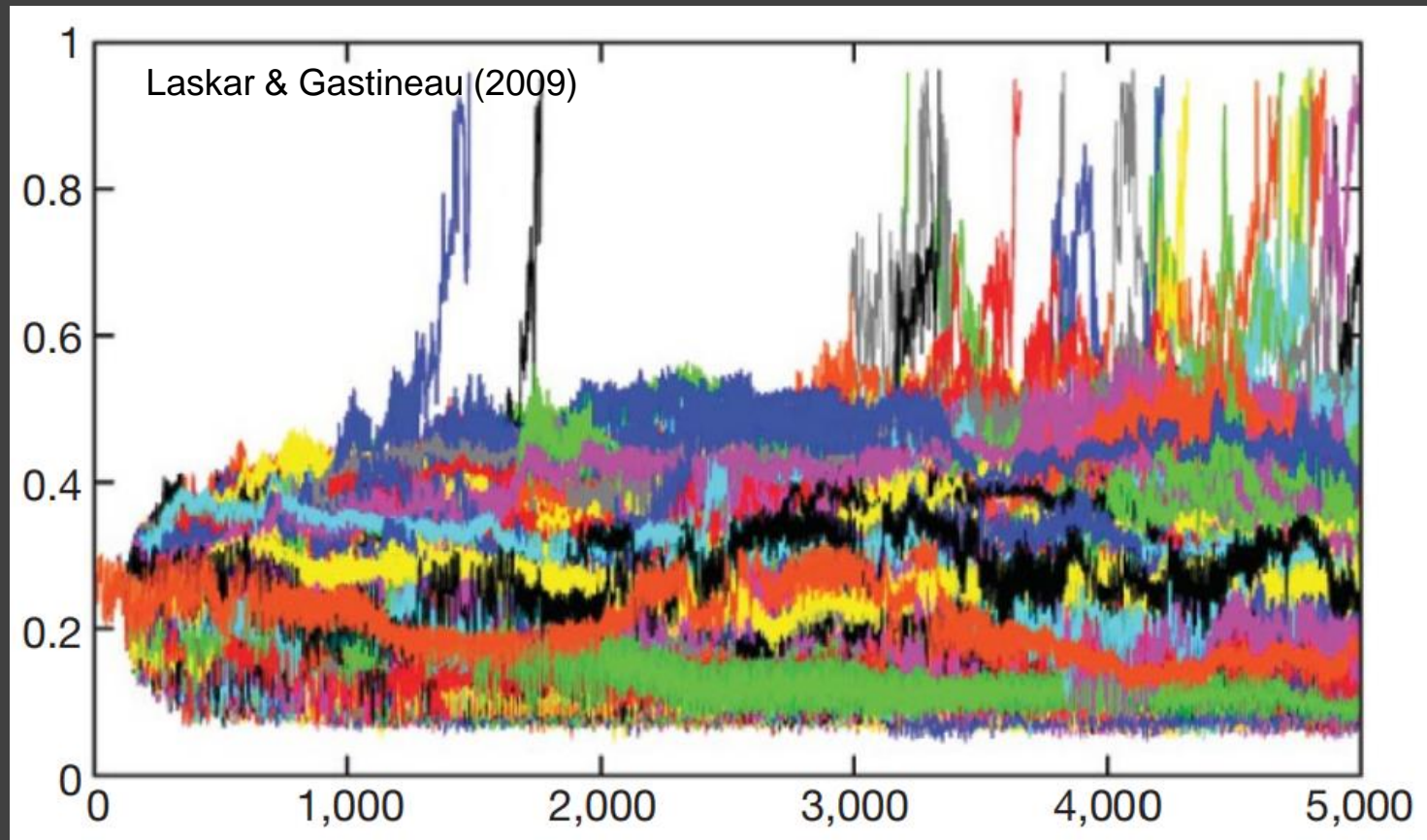
**Астрофизика опирается на все разделы физики**

# Задача N тел

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$$
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_{i \neq j}^N Gm_j \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3}$$

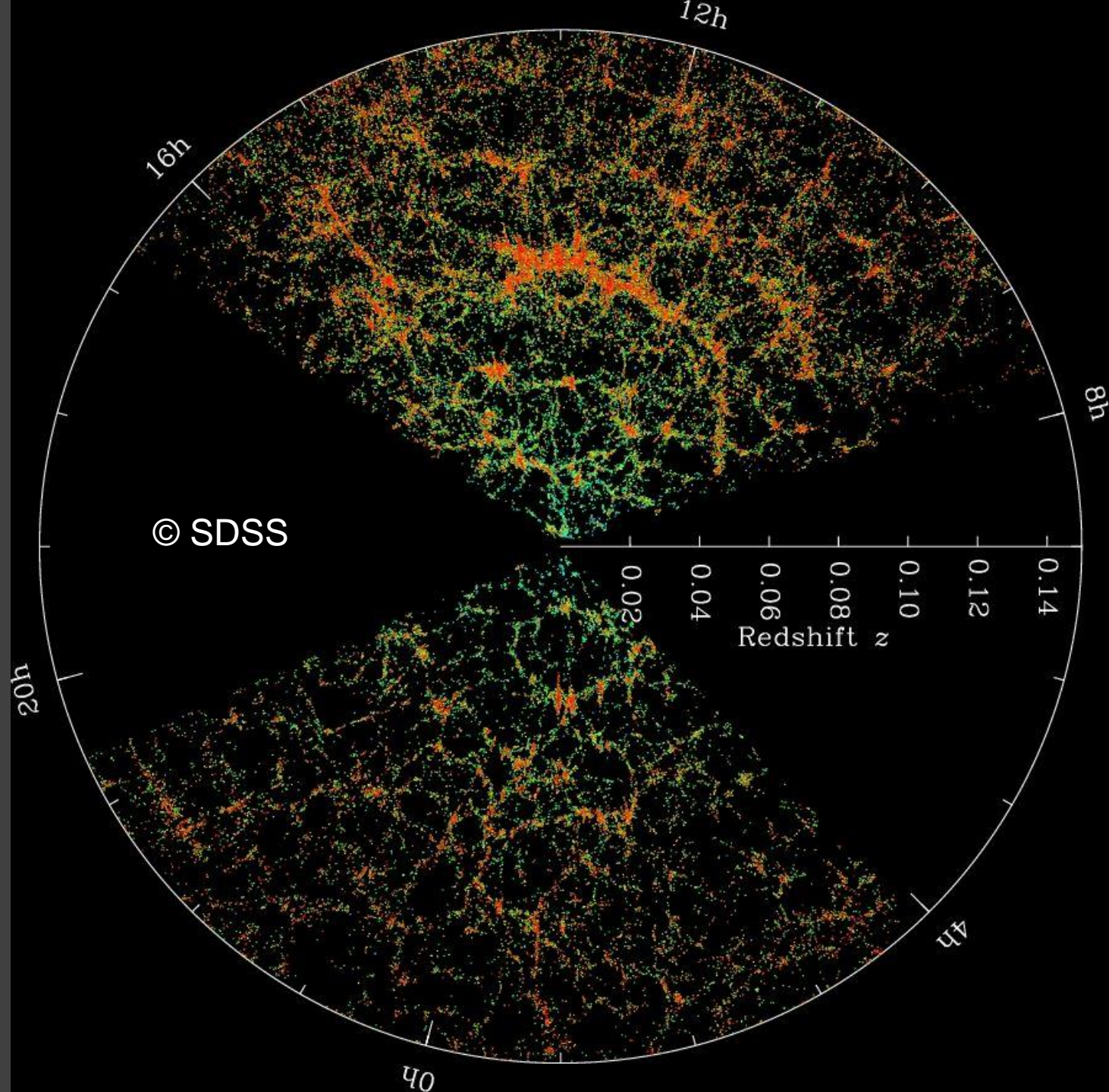


Эксцентриситет

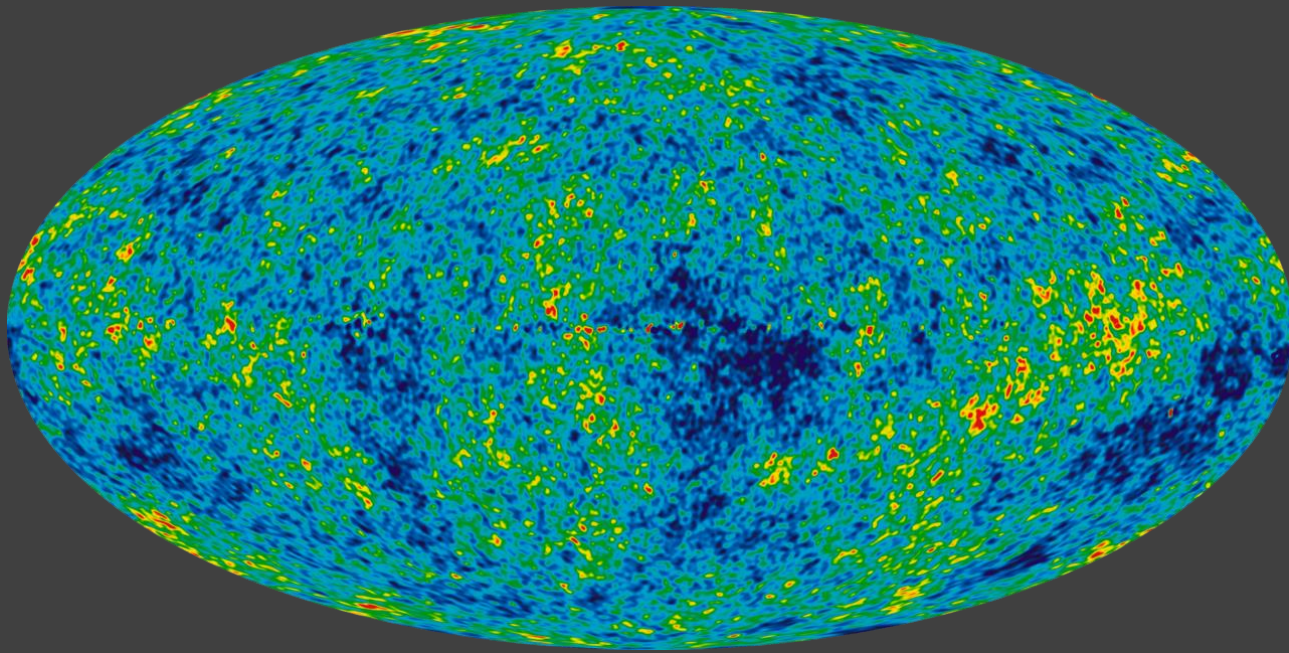




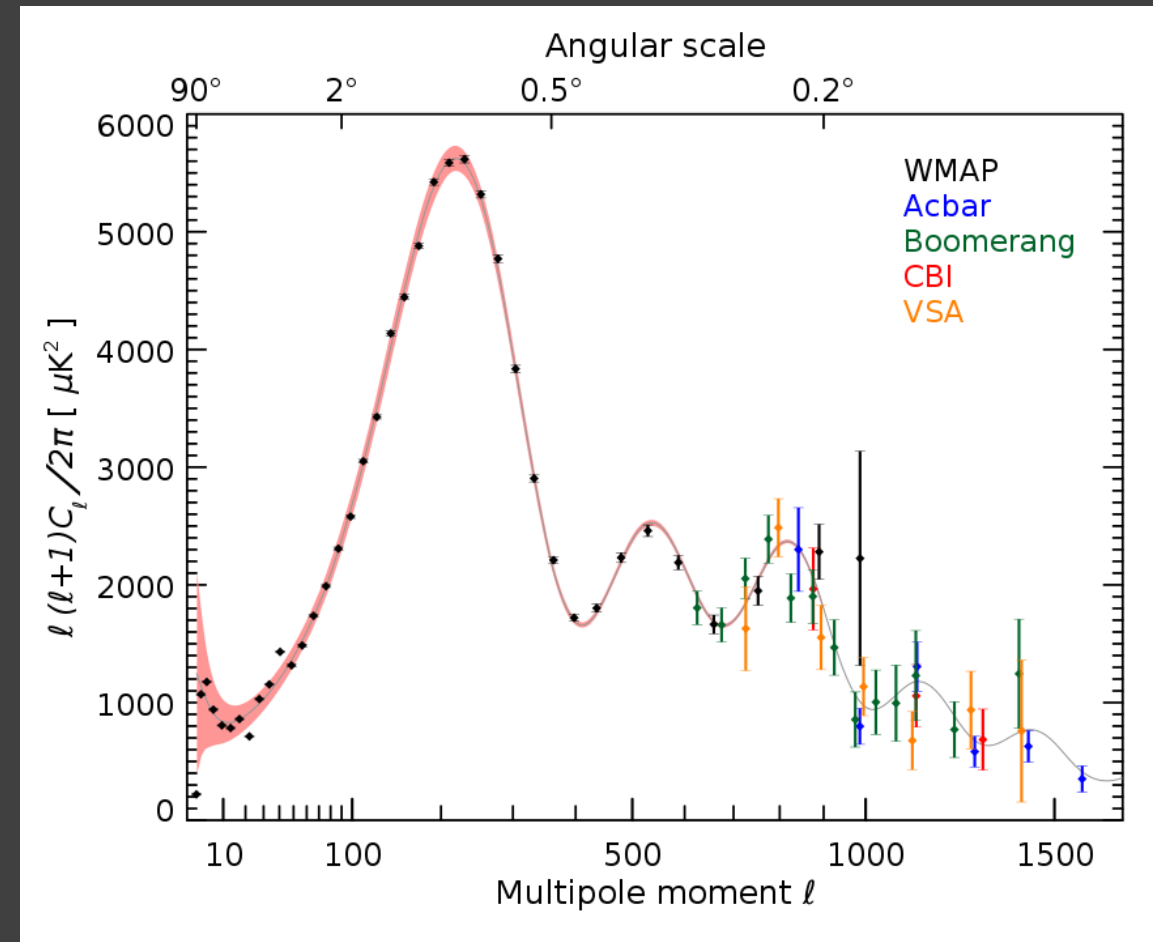
# Крупномасштабная структура Вселенной



# Реликтовый фон



Тёмное вещество создаёт «затравки» для формирования структур из обычного (барионного) вещества

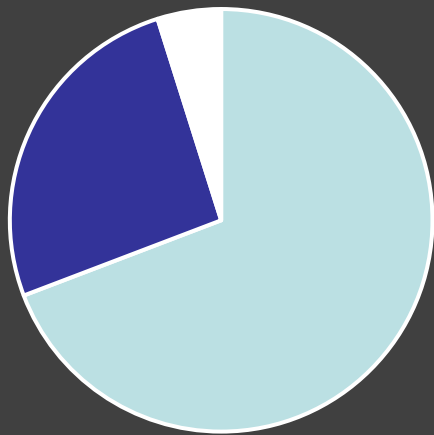




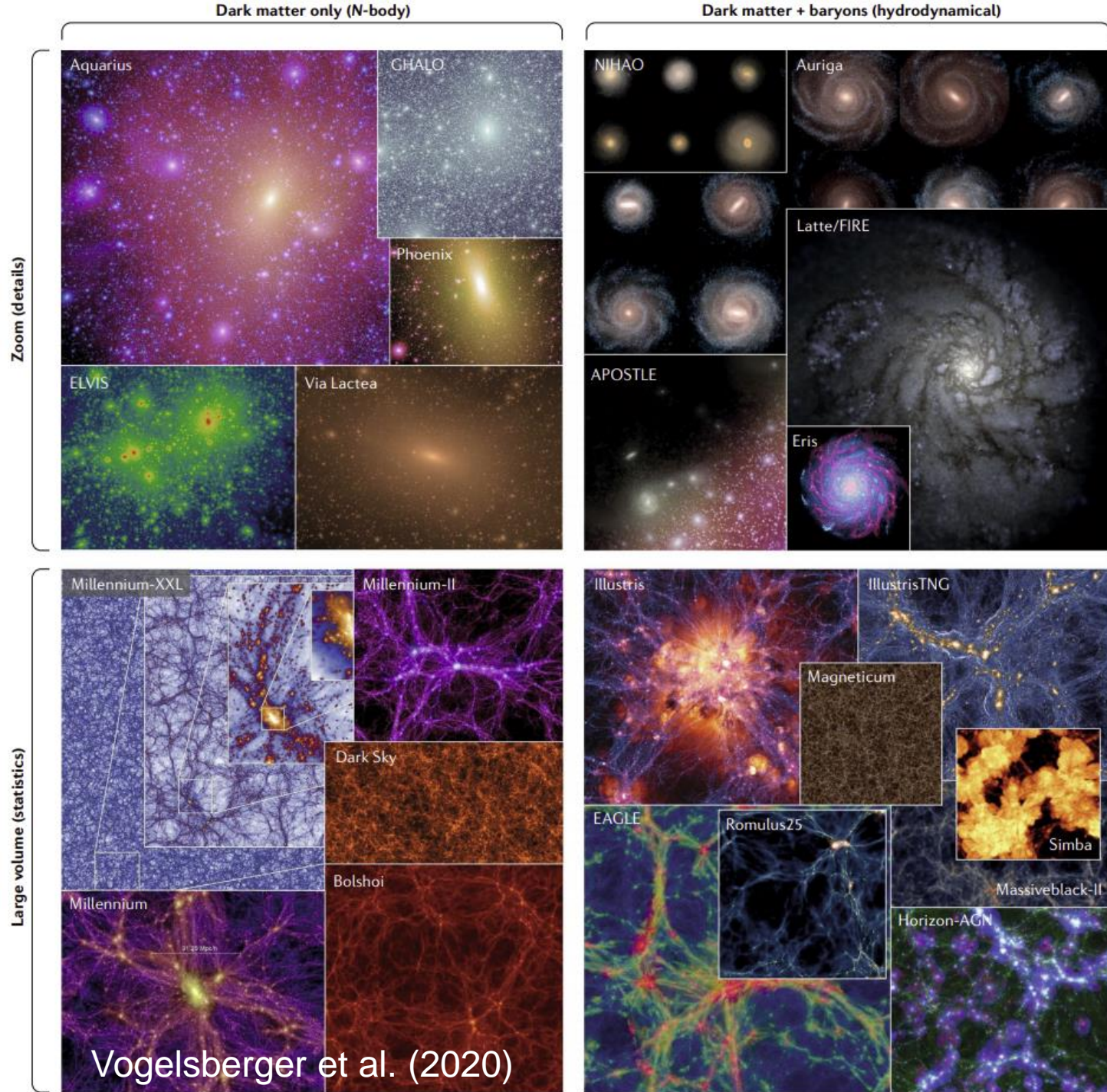
# Тёмна вода во облацех

- Тёмное (небарионное) вещество
- «Обычное» (барионное) вещество
- Тёмная энергия

Доля в полной плотности Вселенной



- Тёмная энергия
- Тёмная материя
- Обычное вещество



# Можно ли верить астрономам? Да!

Потому что:

- астрономия опирается на колоссальный объём фактической информации, который удаётся свести в **единую** картину;
- астрофизика не только объясняет существующие наблюдения, но и успешно предсказывает результаты будущих наблюдений;
- все выводы проходят многократную жёсткую проверку.

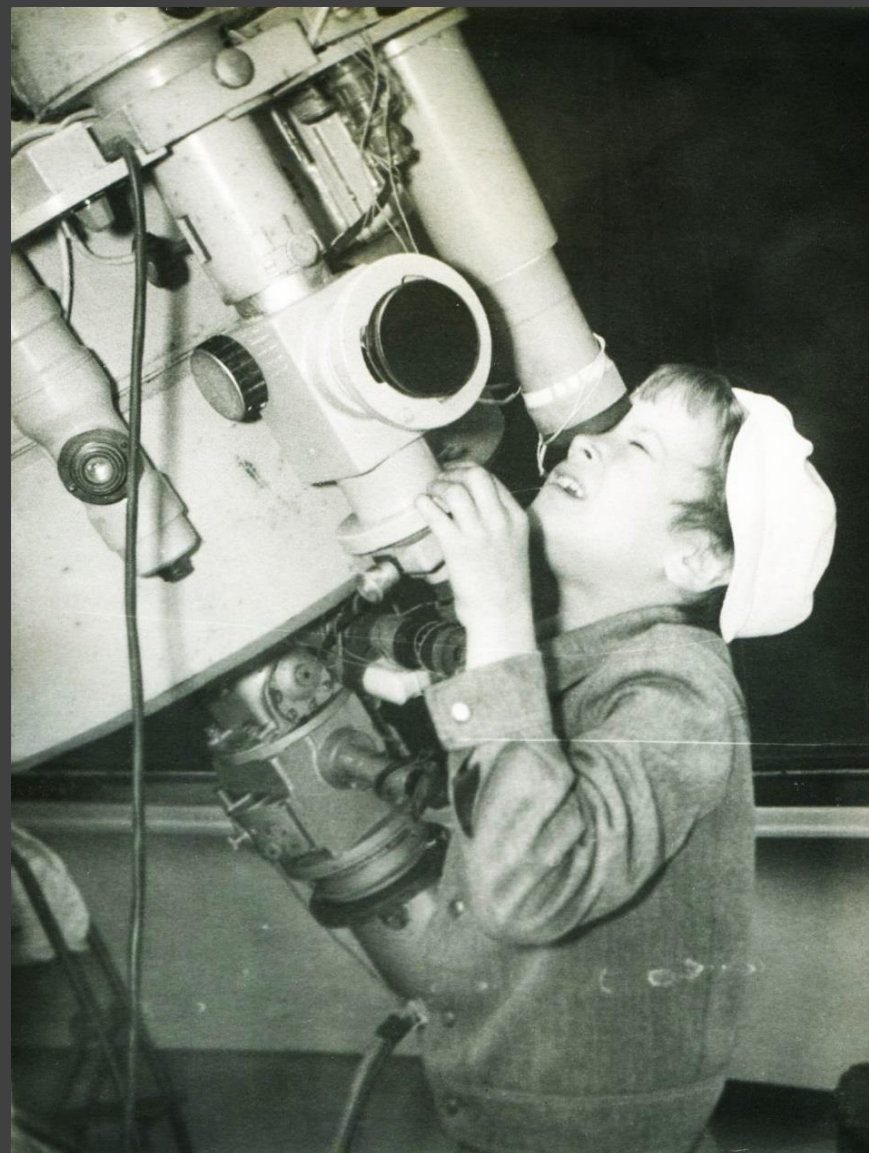


# Можно ли верить астрономам? Да!

При этом нужно помнить, что:

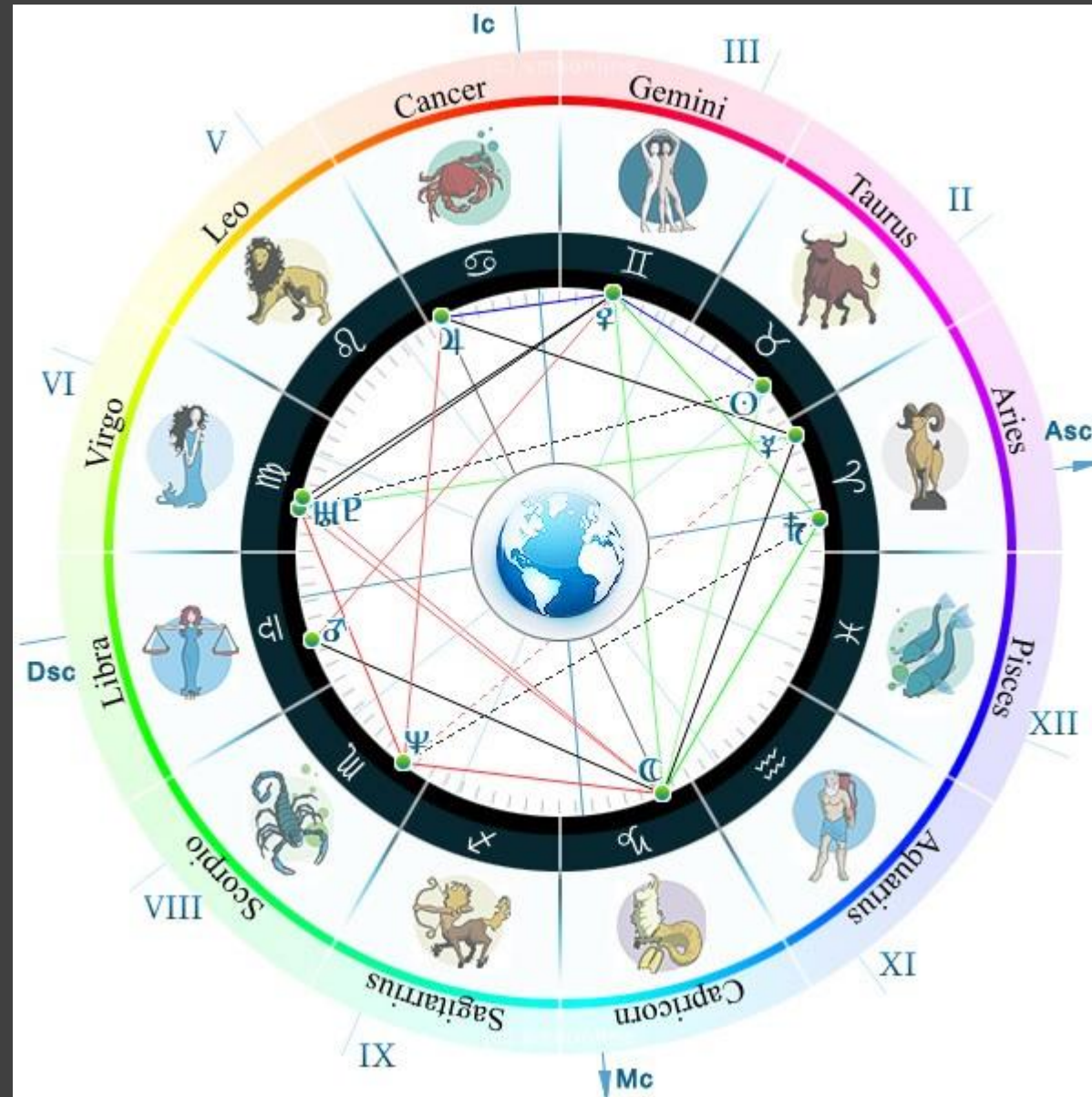
- под знанием понимается наличие хорошей модели;
- в прошлом хорошие модели неоднократно уточнялись и даже заменялись;
- нельзя изучать астрономию по газетам, ТВ-передачам, даже по **научно-популярным книгам и научно-популярным лекциям!**

# Какой мою работу видела мама





# Какой мою работу видят соседи

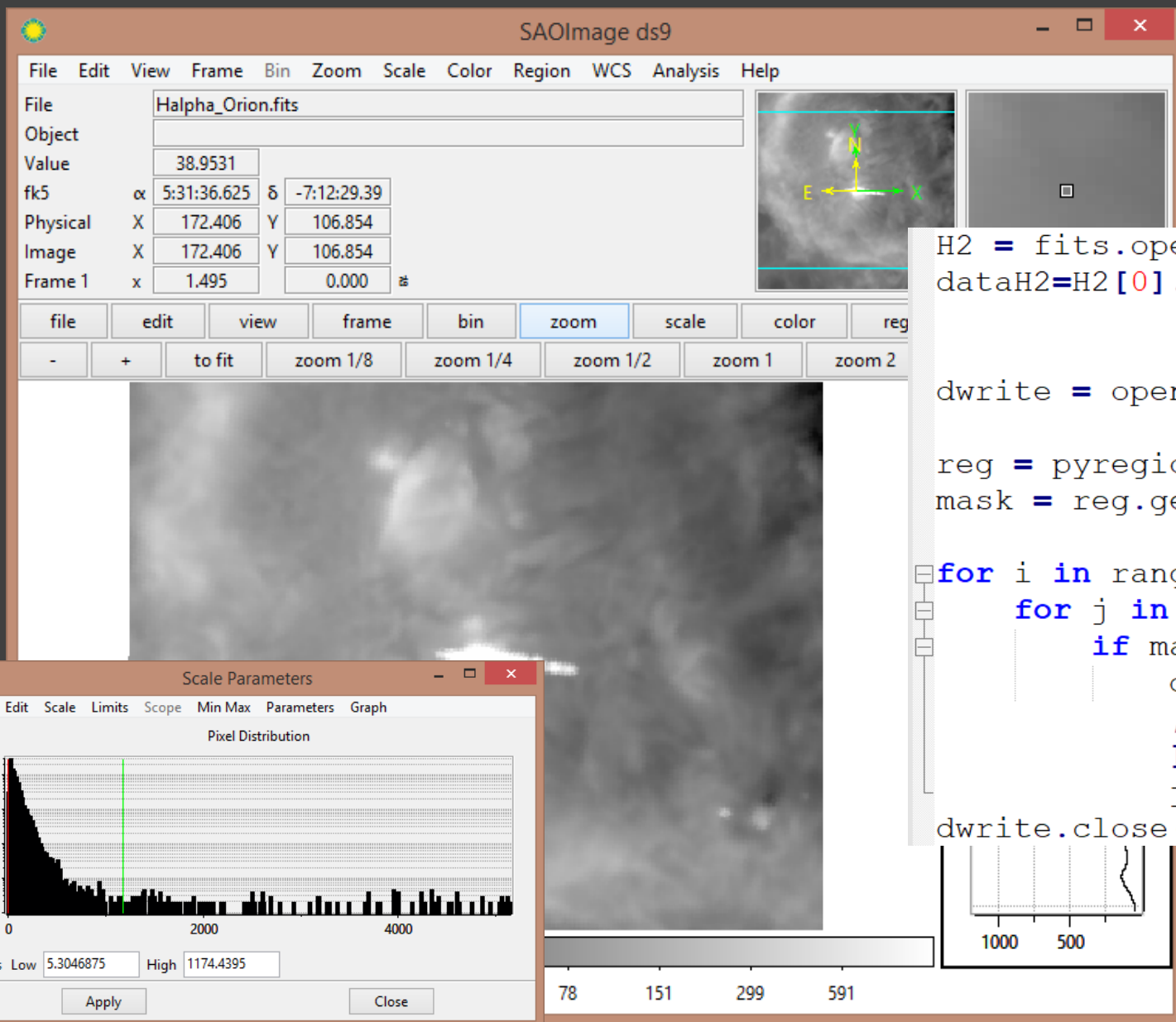


# Какой мою работу видит правительство





# Чем я на самом деле занимаюсь



```
H2 = fits.open('H2_shell.fits')
dataH2=H2[0].data
```

```
dwrite = open('vdb130_2.txt', 'w')
```

```
reg = pyregion.open('shellim2.reg')
mask = reg.get_mask(hdu=f[0])
```

```
for i in range(data.shape[0]):
    for j in range(data.shape[1]):
        if mask[i,j] == True:
            dwrite.write(str(data[i,j])+" "+str(datai2[i,
            j])+str(datai3[i,j])+str(datai4[i,j]
            ])+str(dataKcont[i,j])+str(dataH2[i,
            j])+"\n")
dwrite.close()
```

# Астрономия — это интересно!

Когда я слушал учёного астронома

И он выводил предо мною целые столбцы мудрых цифр,

И показывал небесные карты, диаграммы для измерения звёзд,

Я сидел в аудитории и слушал его, и все рукоплескали ему,

Но скоро — я и сам не пойму, отчего, — мне стало так нудно и скучно,

И как я был счастлив, когда выскользнул прочь и в полном молчании  
зашагал одинокий

Среди влажной таинственной ночи

И взглядывал порою на звёзды.

Уолт Уитмен (перев. Чуковского)