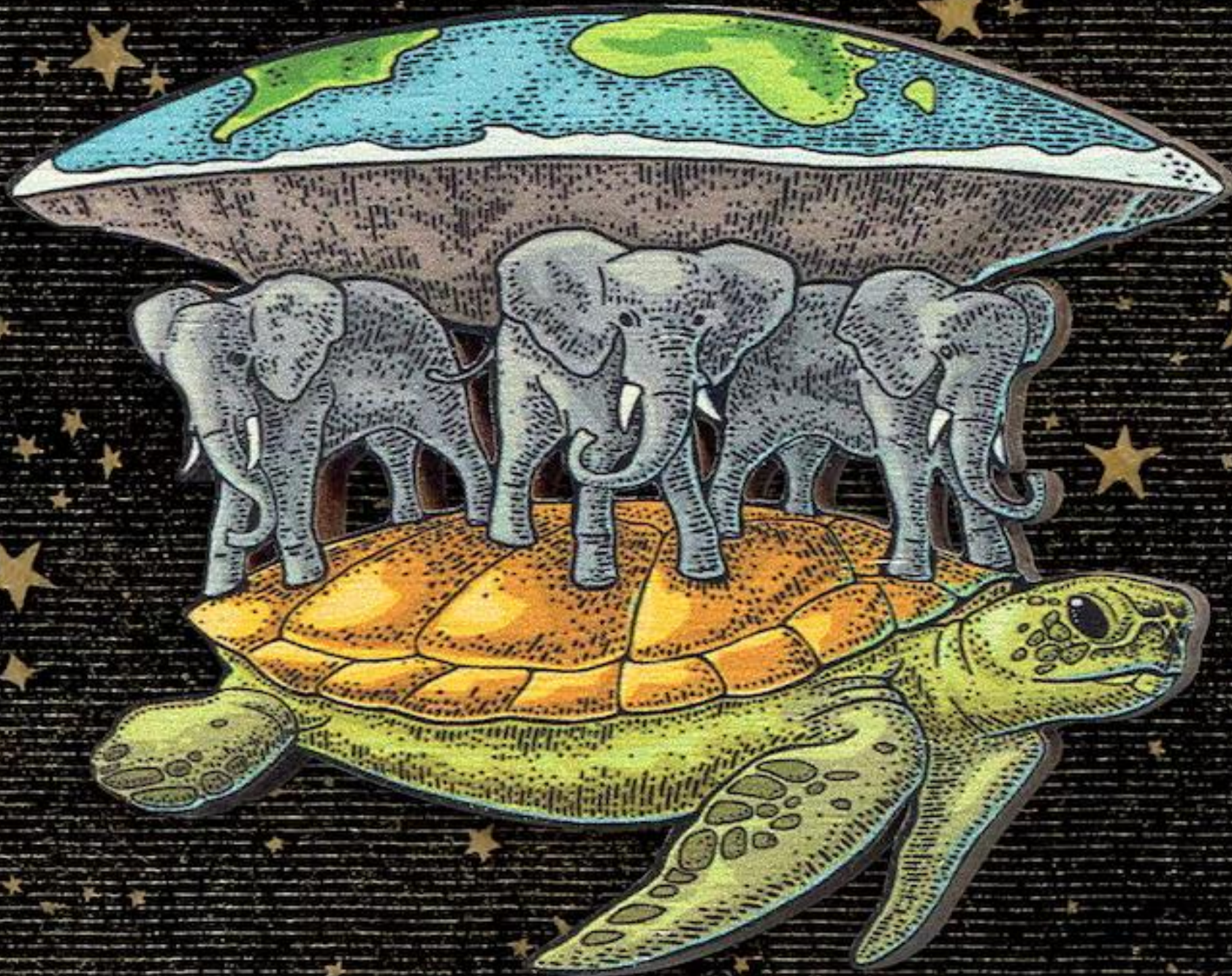




**Лекция 1**  
**Введение**  
**ФФ НГУ, 2024**



**Гармаш Алексей Юрьевич**

**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН**

**ГАРМАШ ФФ НГУ 2024**

## I Введение

### 1. Астрометрия:

системы звездных координат, и времени  
элементы сферической тригонометрии, астрометрия  
астрономические масштабы расстояний

### 2. Оптическая астрономия:

спектр ЭМ излучения, видимый диапазон  
основные типы и характеристики оптических телескопов  
оптические искажения и методы и борьбы с ними  
методы регистрации света

### 3. Всеволновая астрономия:

расширение ЭМ спектра, окна прозрачности атмосферы  
астрономия в радио, ИК, УФ, рентгеновском диапазонах

### 4. Многоканальная астрономия:

космические частицы (заряженные + гамма)  
нейтринная астрономия  
гравитационные волны

## II Физика звезд

### 1. Мир звезд:

источник энергии, внутреннее строение, уравнение Саха  
спектральная классификация, основные физические характеристики  
диаграмма Герцшпрунга - Расселла, главная последовательность

### 2. Эволюция звезд:

эволюционные треки на диаграмме Герцшпрунга - Расселла  
время жизни звезды, диаграмма Герцшпрунга – Расселла для скоплений  
измерение возраста и расстояния до скоплений

### 3. Жизнь вне главной последовательности:

заключительные этапы эволюции  
область неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга - Расселла  
переменные звезды, цефеиды, соотношение период-светимость

### 4. Межзвездная среда и образование звезд:

молекулярные облака  
неустойчивость Джинса, фрагментация  
треки Хаяши на диаграмме Герцшпрунга - Расселла



### III Планетные системы

#### 1. Солнечная система:

структура, классификация планет  
эволюция Солнечной системы, миграция планет

#### 2. Планетные системы других звезд – экзопланеты:

история открытия  
основные методы обнаружения  
текущее состояние и перспективы исследования

## IV Космология

### 1. Компактные объекты:

белые карлики  
классификация сверхновых, нейтронные звезды и черные дыры  
двойные звезды.

### 2. Галактическая астрономия:

население I, II, III типа  
классификация галактик  
скопления галактик

### 3. Космология:

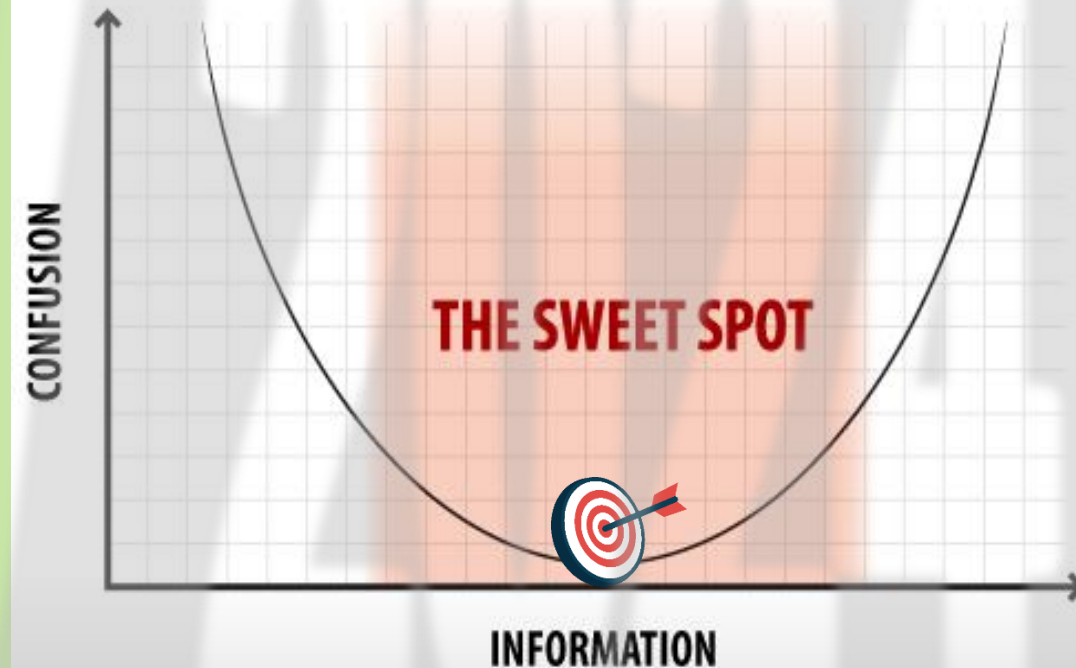
крупномасштабная структура Вселенной  
космологические модели, микроволновое излучение  
темная материя, темная энергия  
рождение Вселенной, инфляция, Большой взрыв  
первичный бариогенезис, формирование крупномасштабной структуры  
эволюция вселенной



# Цели и методы курса

1) Данный Курс является лишь введением в современную астрономию, служит для ознакомления с основными **методами и результатами** наблюдательной астрономии.

2) В Курсе сделана попытка избежать крайностей – чрезмерная научно-популярность с множеством «красивых картинок» и излишнее углубление в очень частные вопросы. Продемонстрировать, что уже на основе общих физических соображений уровня курса общей физики можно на качественном уровне понять многие астрофизические процессы и даже делать количественные оценки, которые возможно сравнить с наблюдениями.



3) В Курсе будут использоваться сведения практически из всех разделов общей физики и немного «матана».

# Рекомендованная литература

An Introduction to Modern Astrophysics

Bradley W. Carroll Dale A. Ostlie  
Second Edition

Pearson New International Edition

МГУ, Физический факультет  
Государственный астрономический институт  
им. П. К. Штернберга

А.В. Засов, К.А. Постнов

Общая  
АСТРОФИЗИКА

Фрязино  
2011

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

СОЛНЕЧНАЯ  
СИСТЕМА

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

ЗВЁЗДЫ

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

ГАЛАКТИКИ

Лекции С.Б. Попова в МГУ:

<http://xray.sai.msu.ru/~polar/>



Cornell University

arXiv

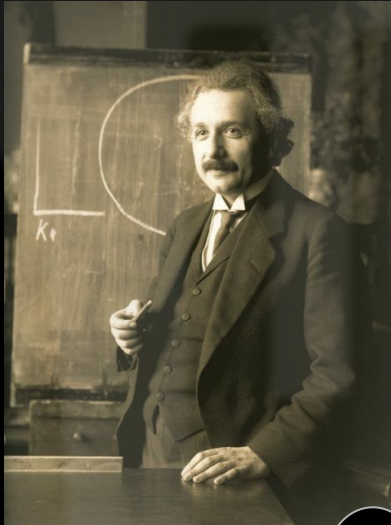
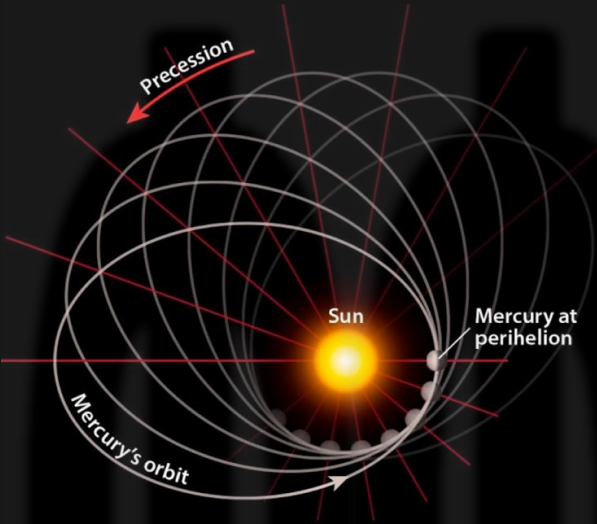
<https://arxiv.org/archive/astro-ph>

публикуется ~1000 статей в месяц!

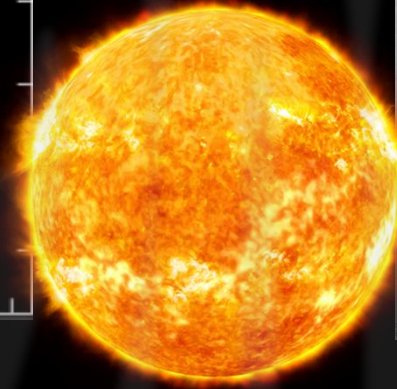
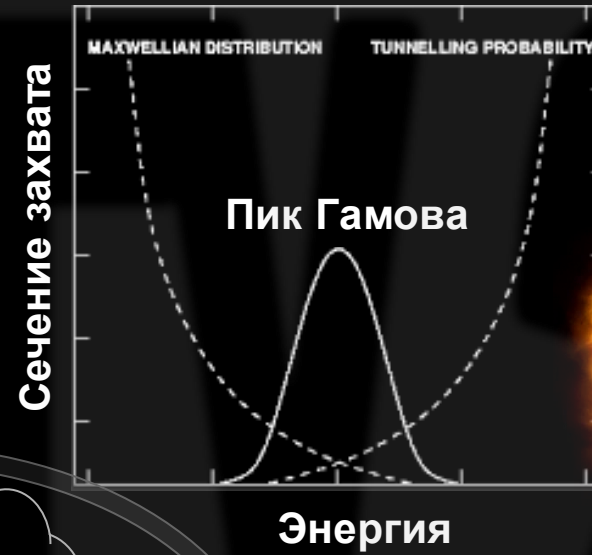


# Астрономия: вопросы и ответы

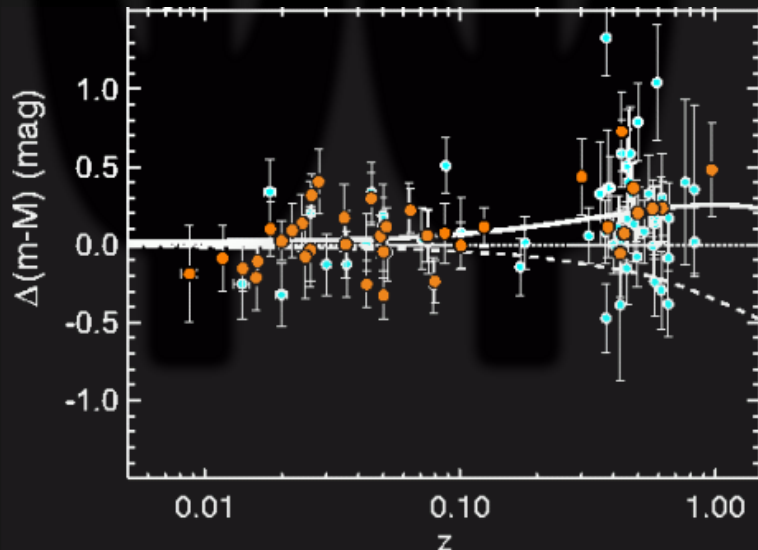
Проблема прецессии Меркурия → ОТО



Проблема источника энергии звезд → квантовая механика



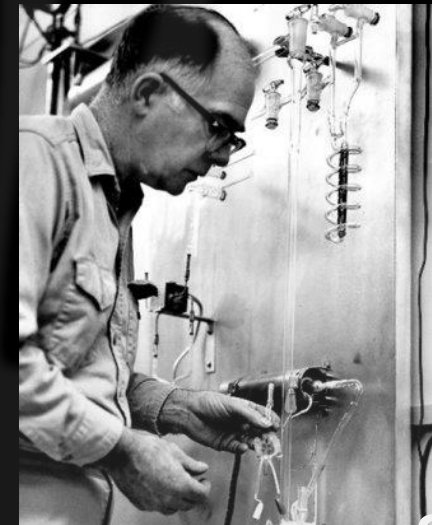
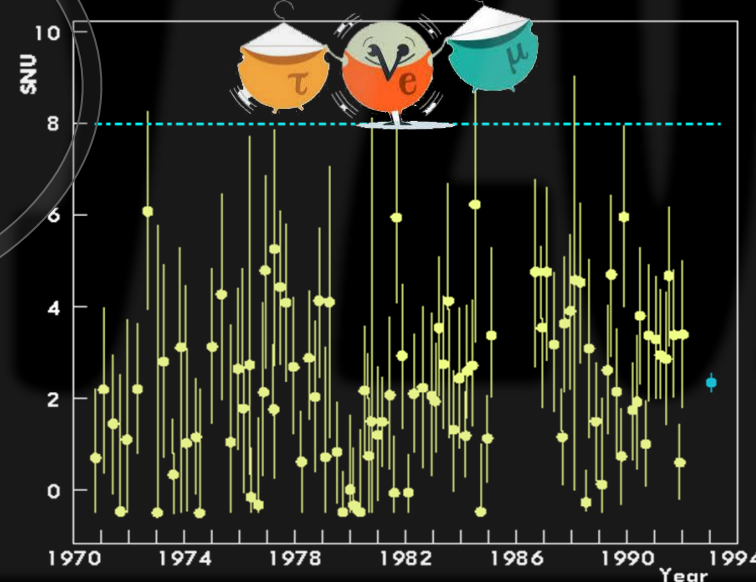
Ускорение расширения Вселенной → ???



Темная энергия  
???

Темная материя  
???

Проблема солнечных нейтрино → осцилляции





Где я?



**ФФНГУ 2024**



## Астеризм Ориона









# Современные границы созвездий



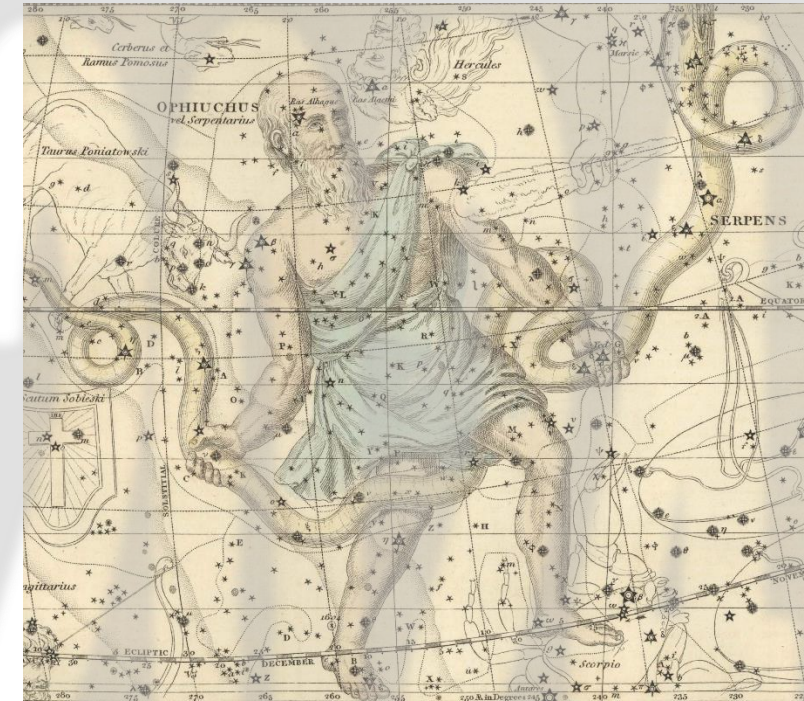
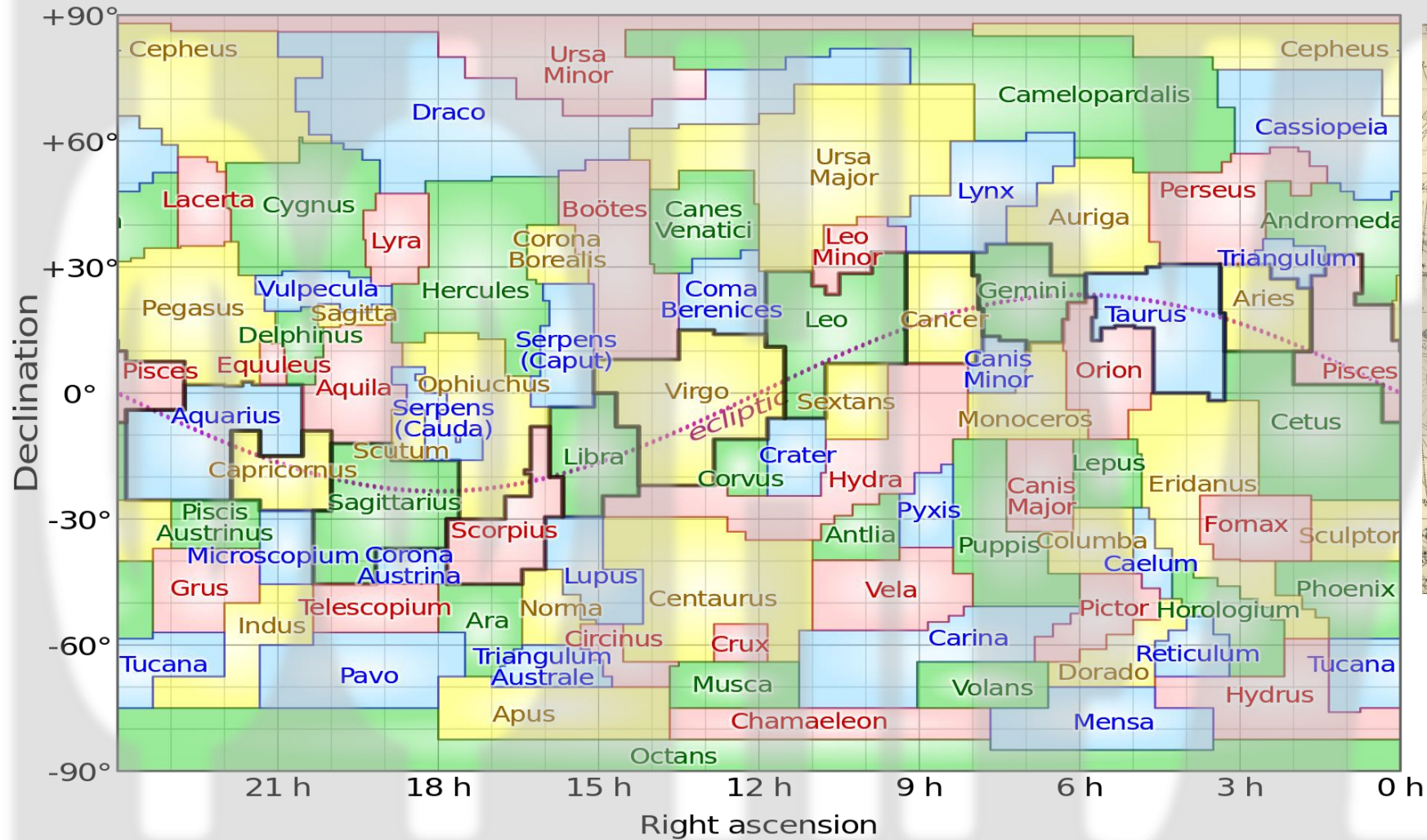
**Созвездие** – фиксированная область на небе.

**Астеризм** – легко определяемая группа ярких звезд из одного или разных созвездий.

Зафиксированы Международным астрономическим союзом в 1930 году.

Имена созвездий пишутся на латыни и для краткости имеют фиксированные трехбуквенные сокращения.

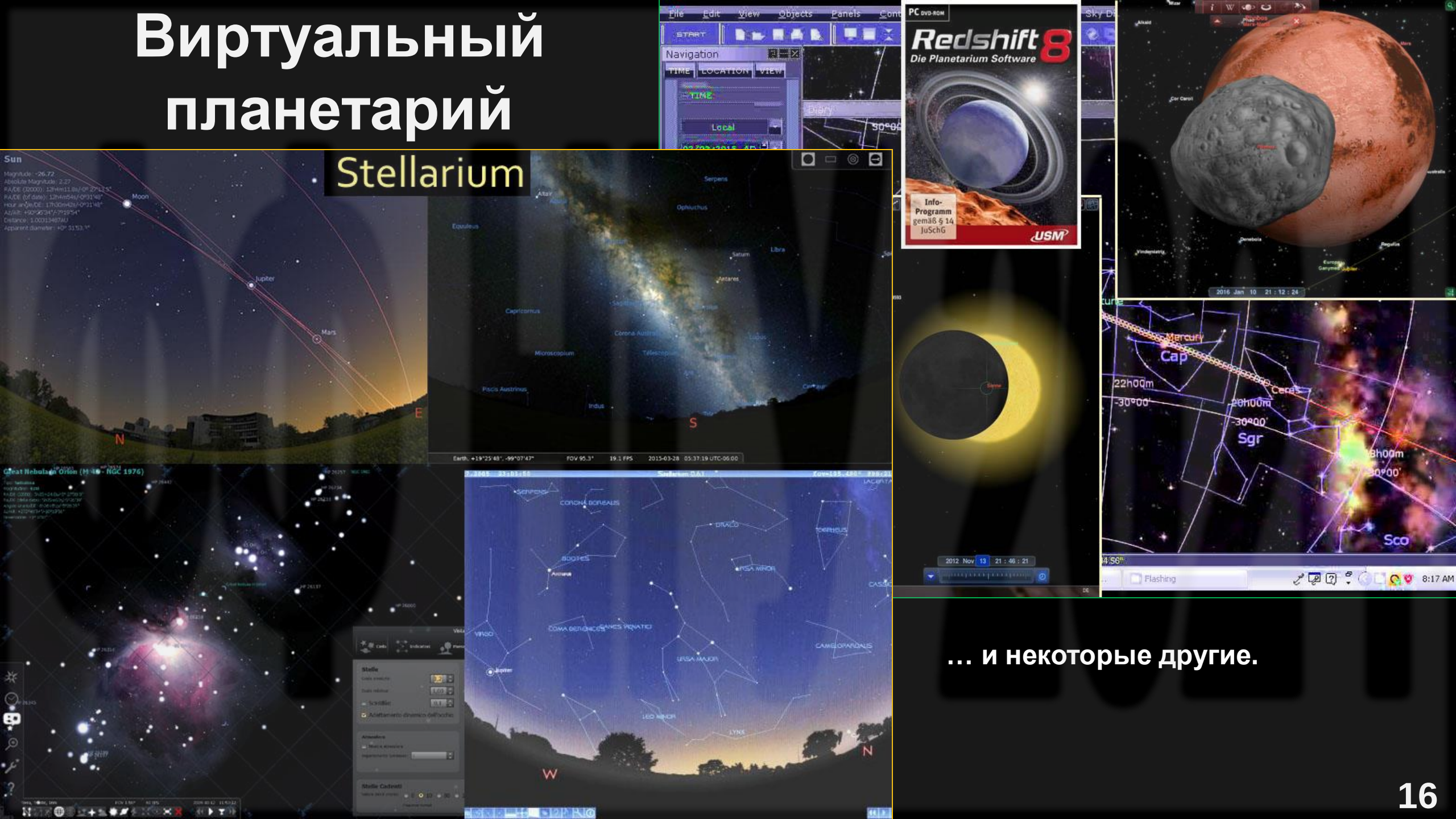
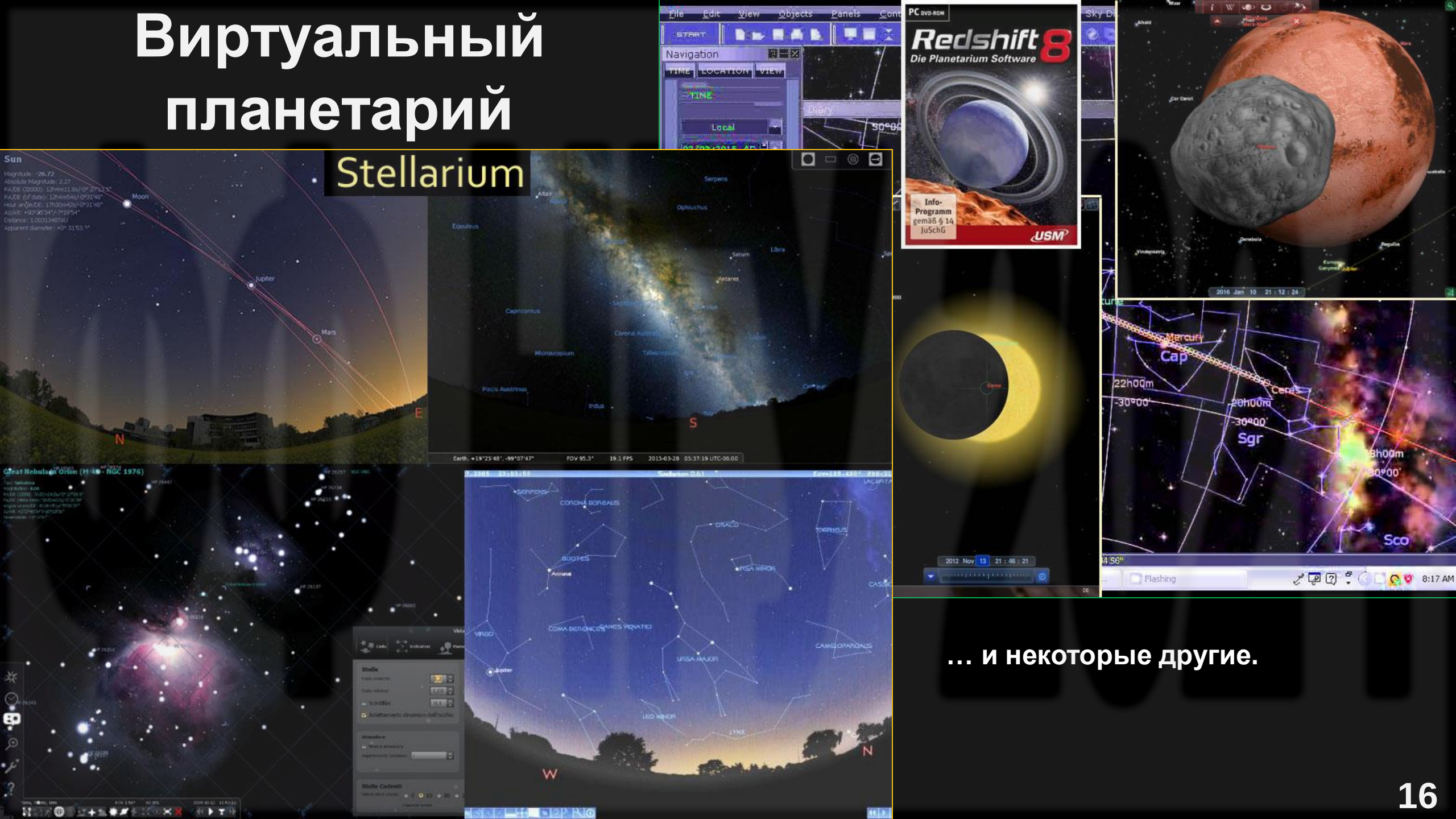
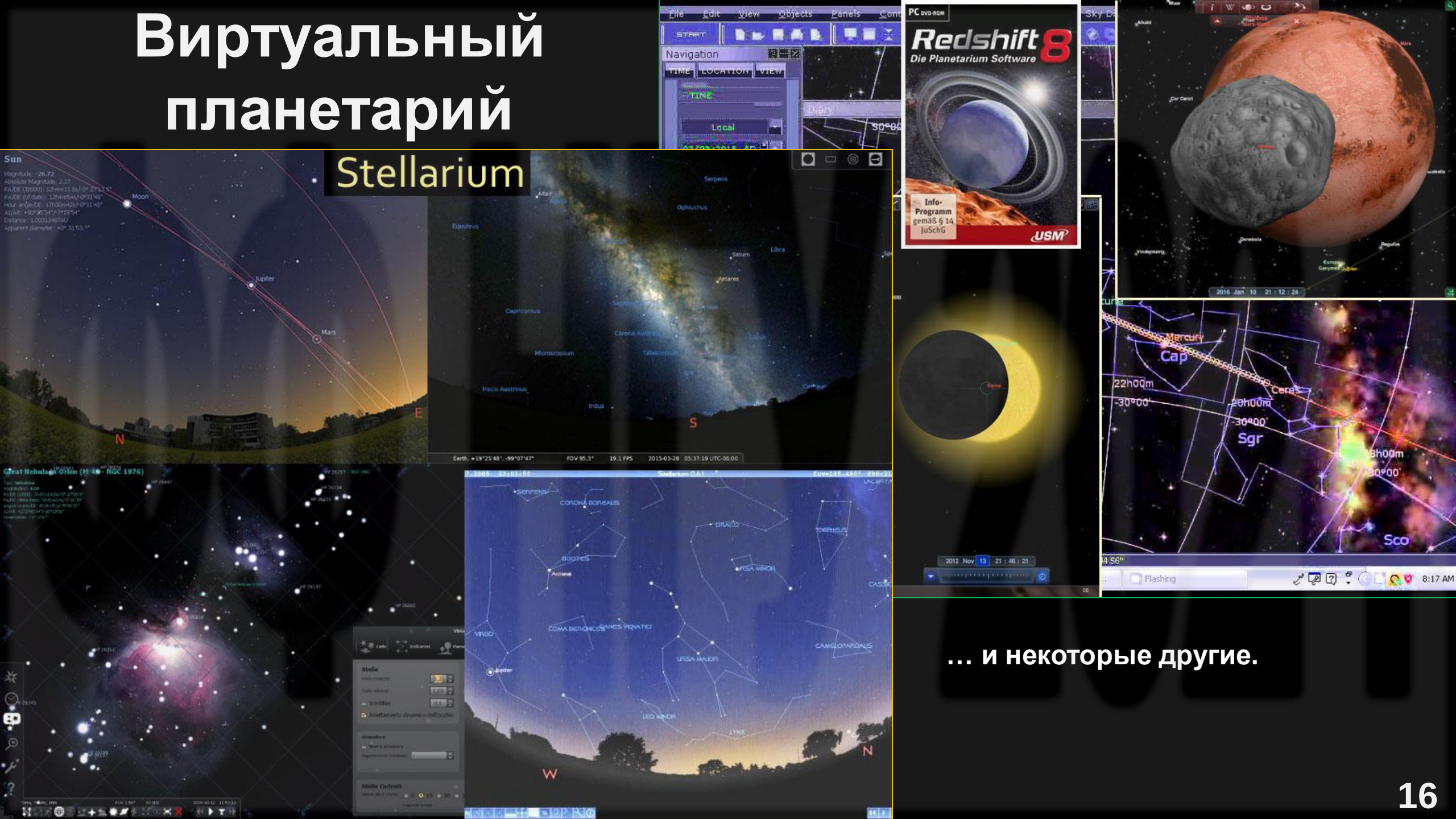
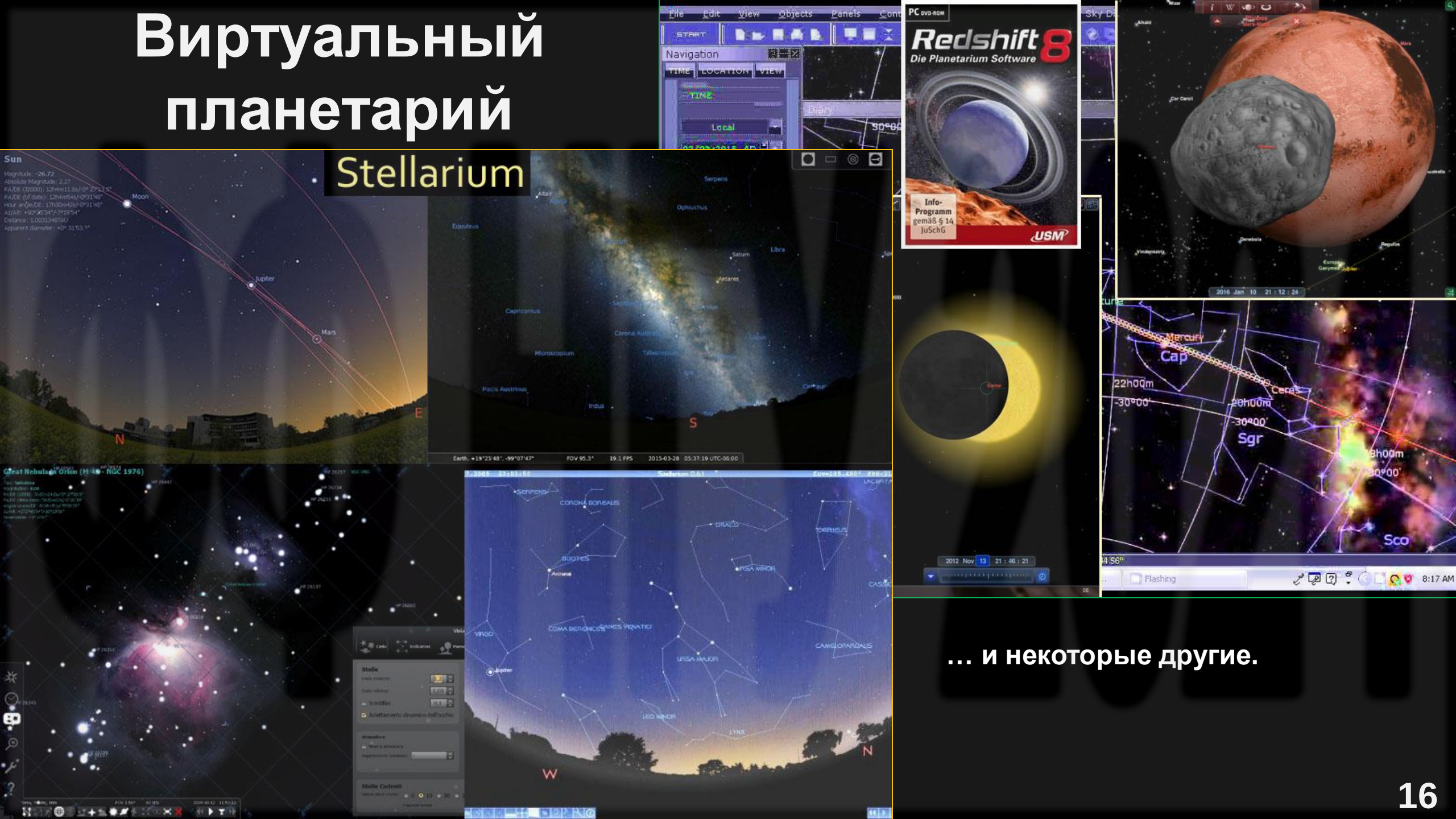
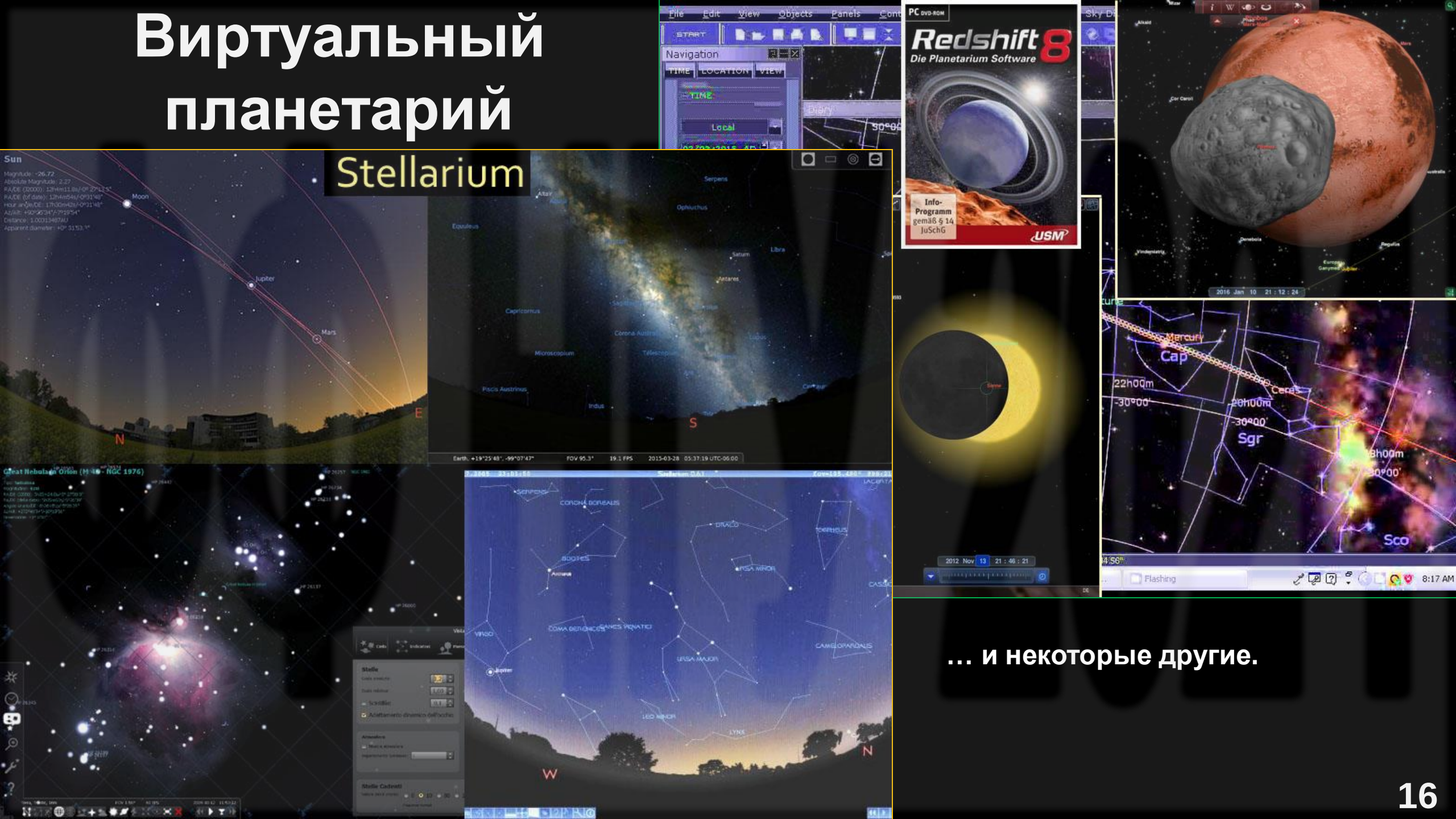
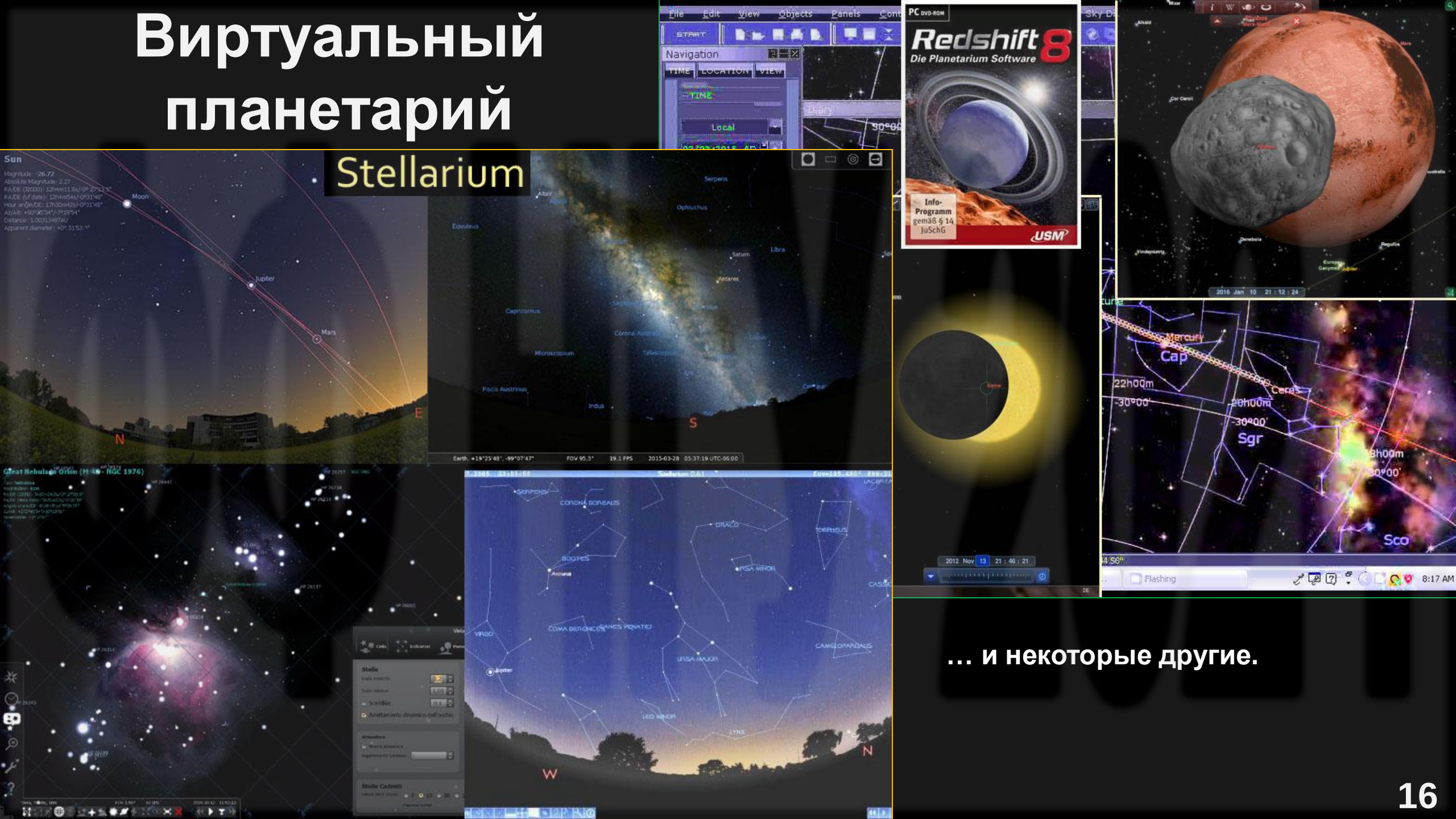
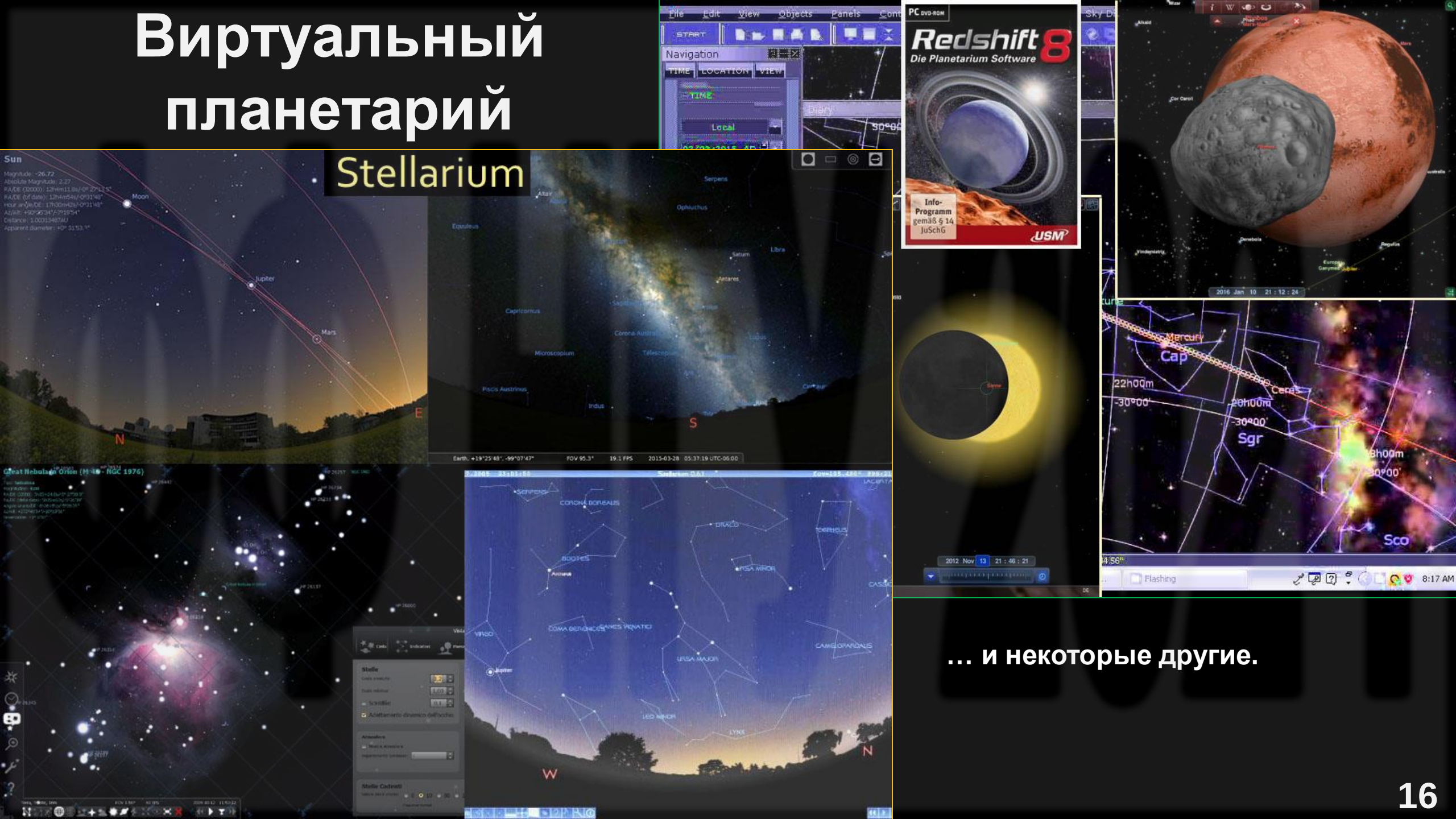
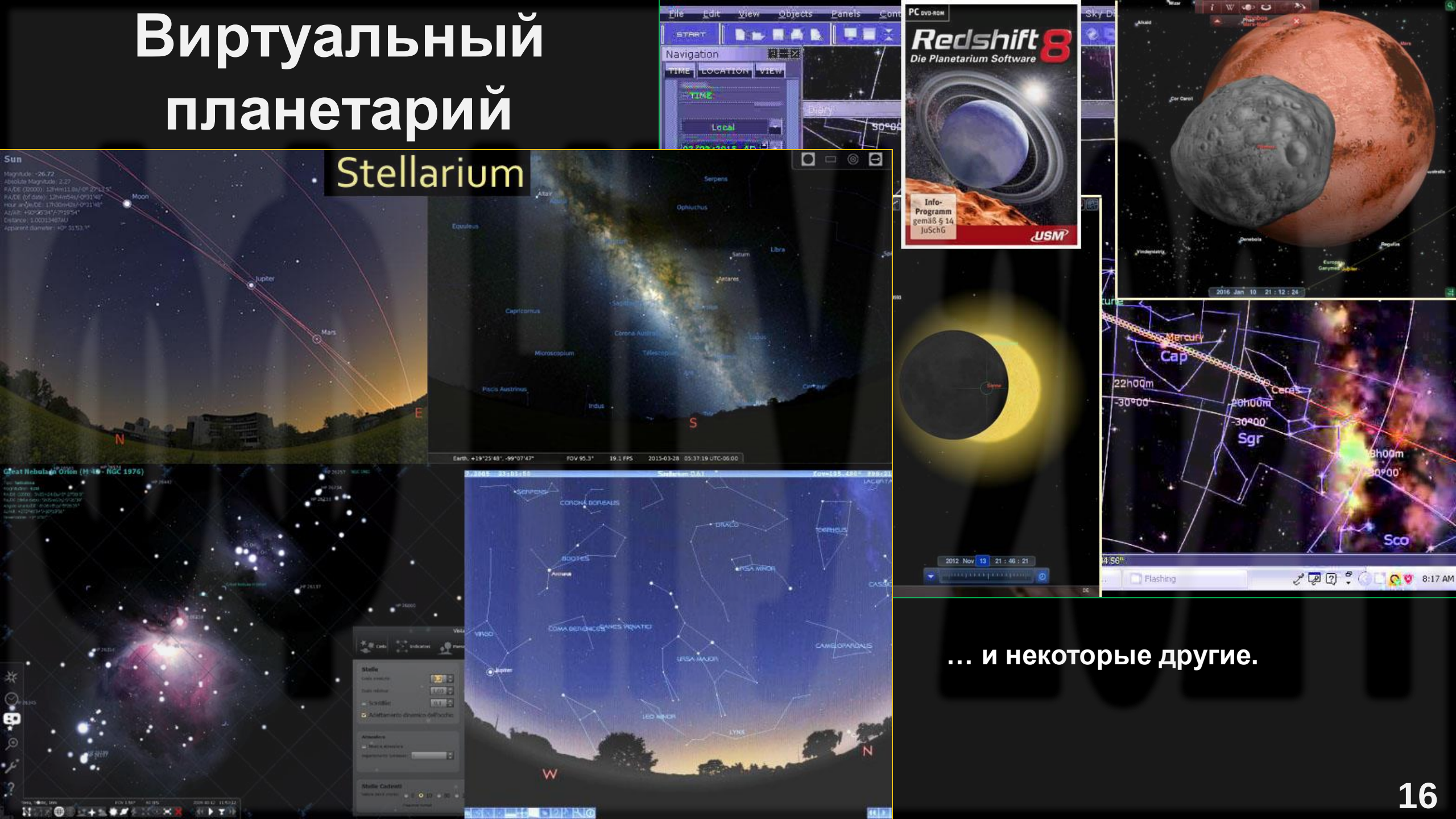
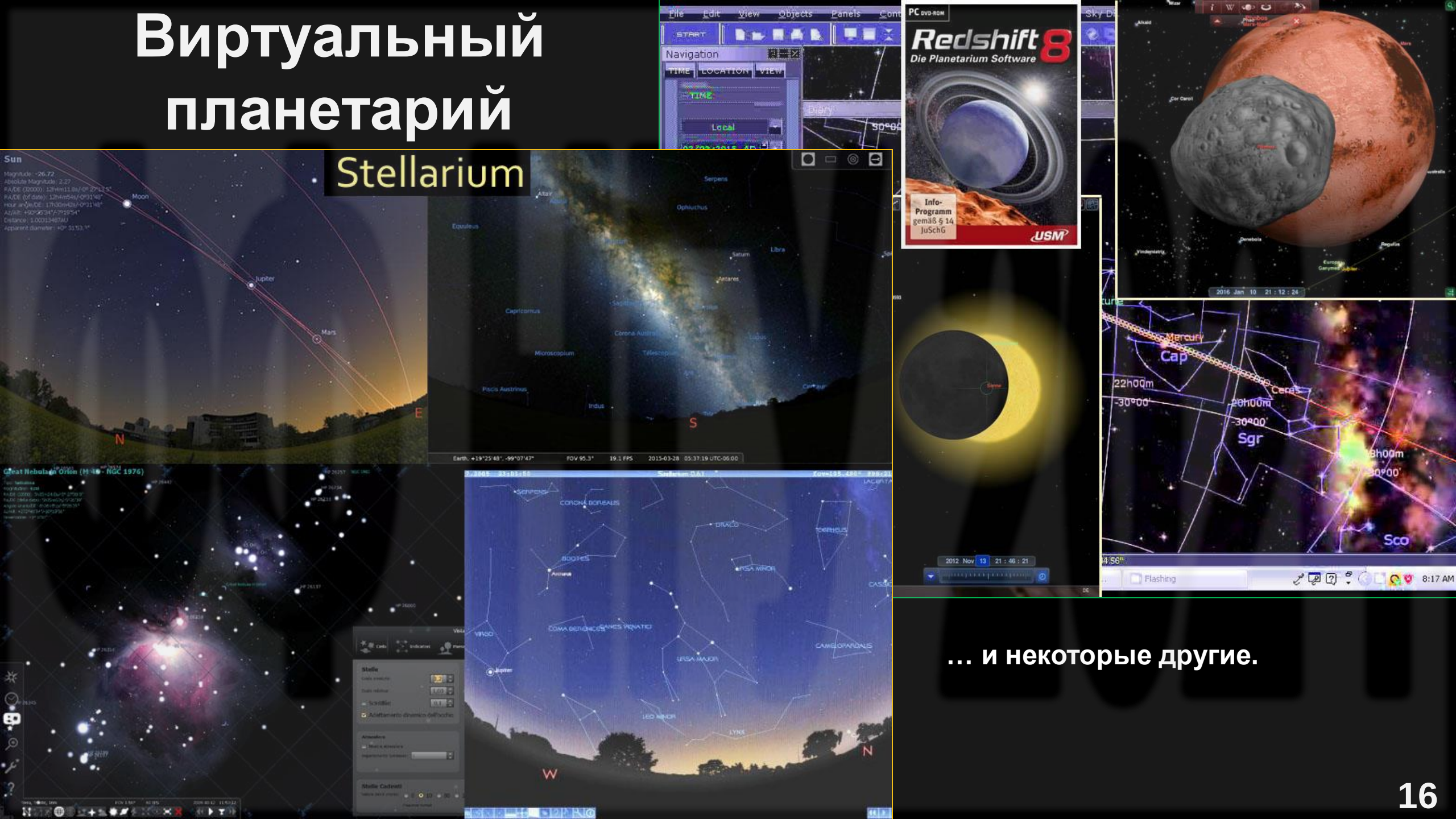
# Современные границы созвездий



**Созвездие Змея (Serpens)  
состоит из двух не связанных  
областей**

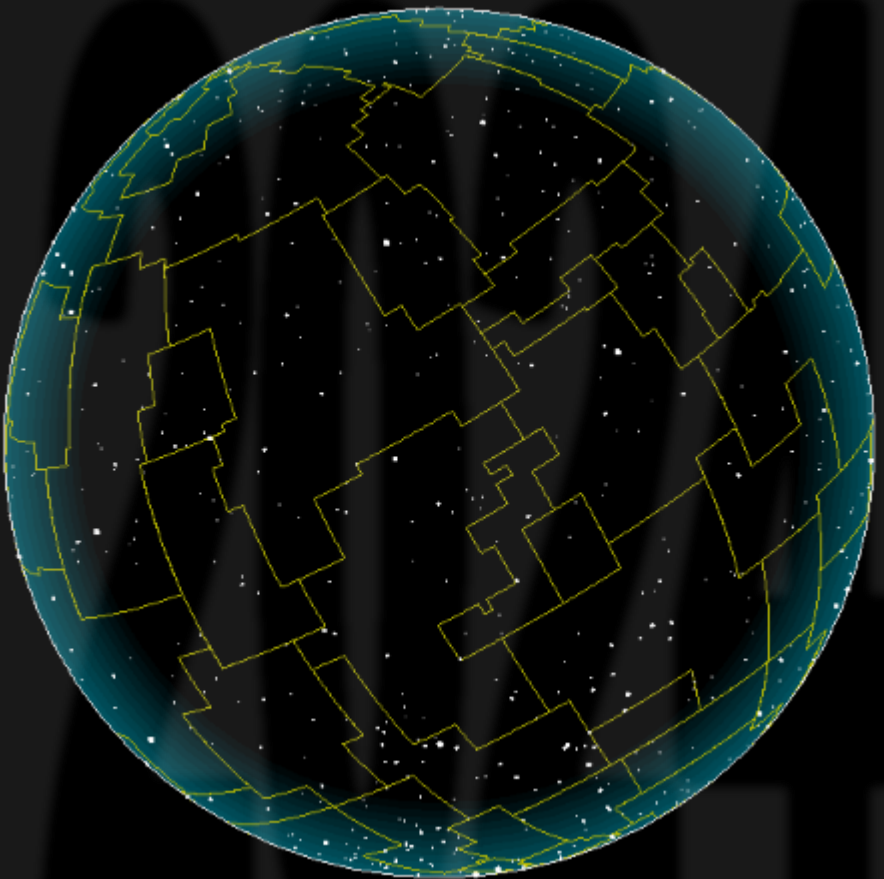
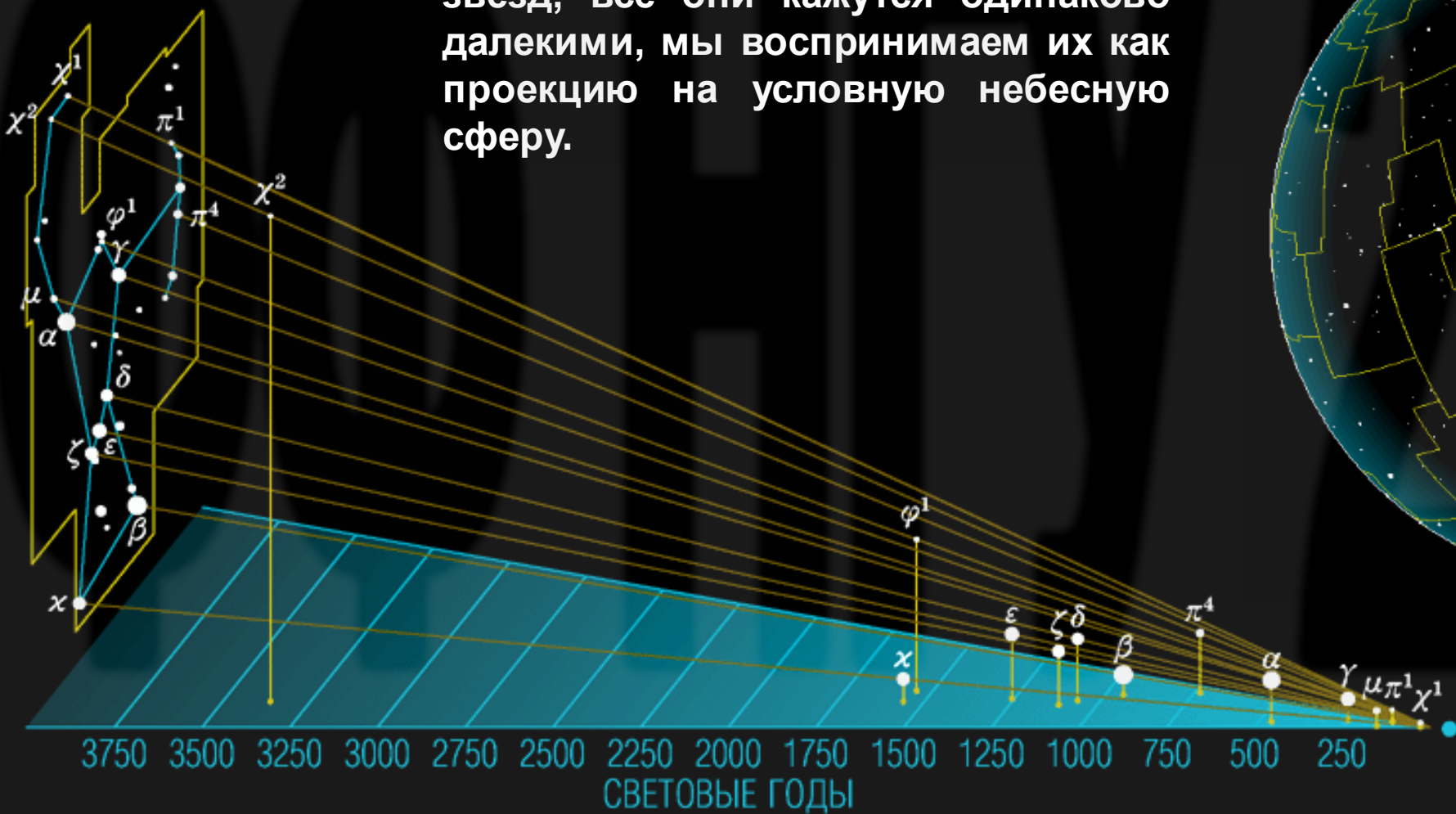
**88 созвездий, но 89 областей!**





Принадлежность звезд к одному астеризму или созвездию вообще говоря не имеет отношения к их реальной близости этих звезд в пространстве!

Ввиду огромности расстояний до звезд, все они кажутся одинаково далекими, мы воспринимаем их как проекцию на условную небесную сферу.





# Астеризм «Большой ковш»



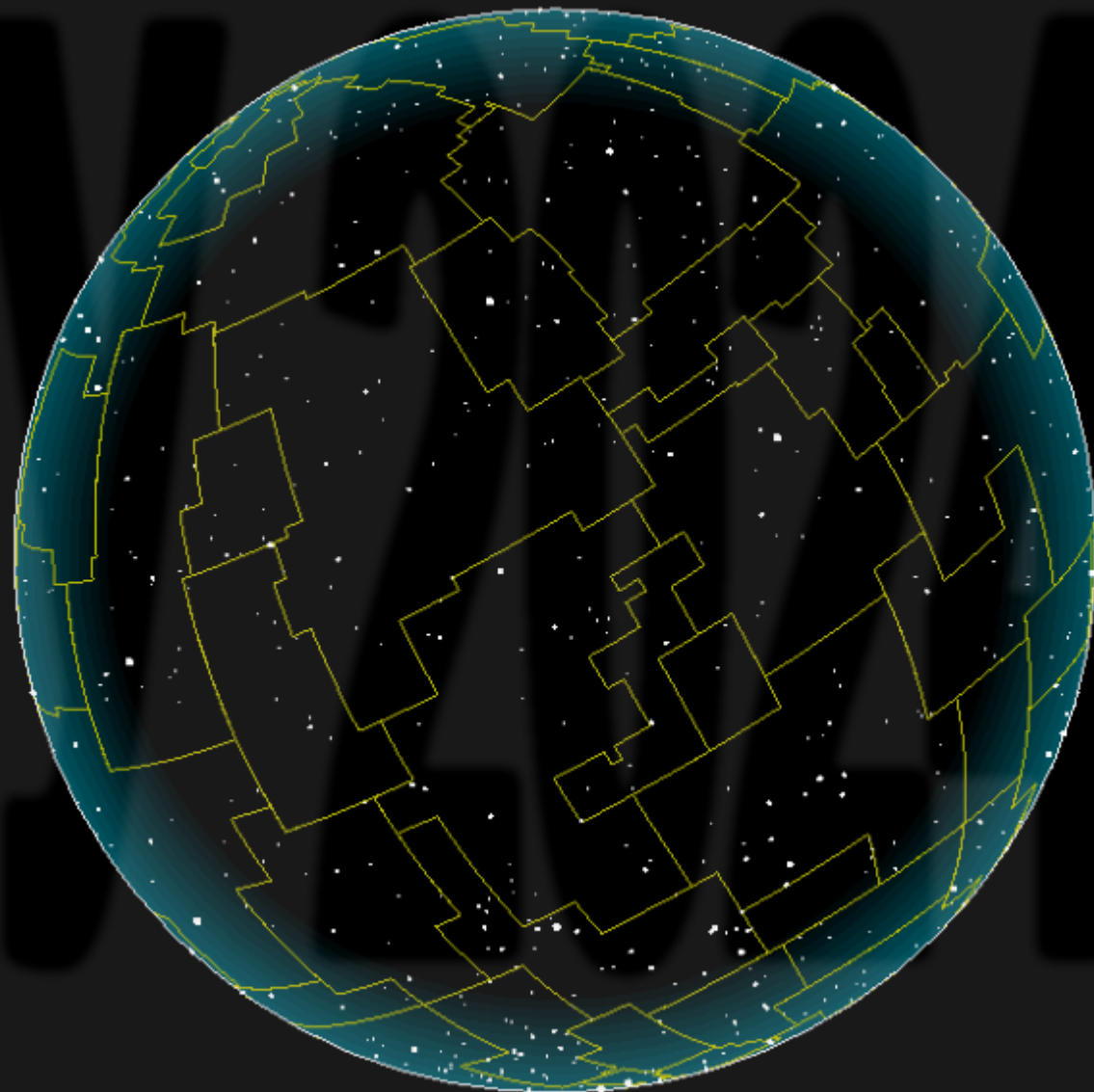
# Основные системы координат

Азимутальная

Экваториальная

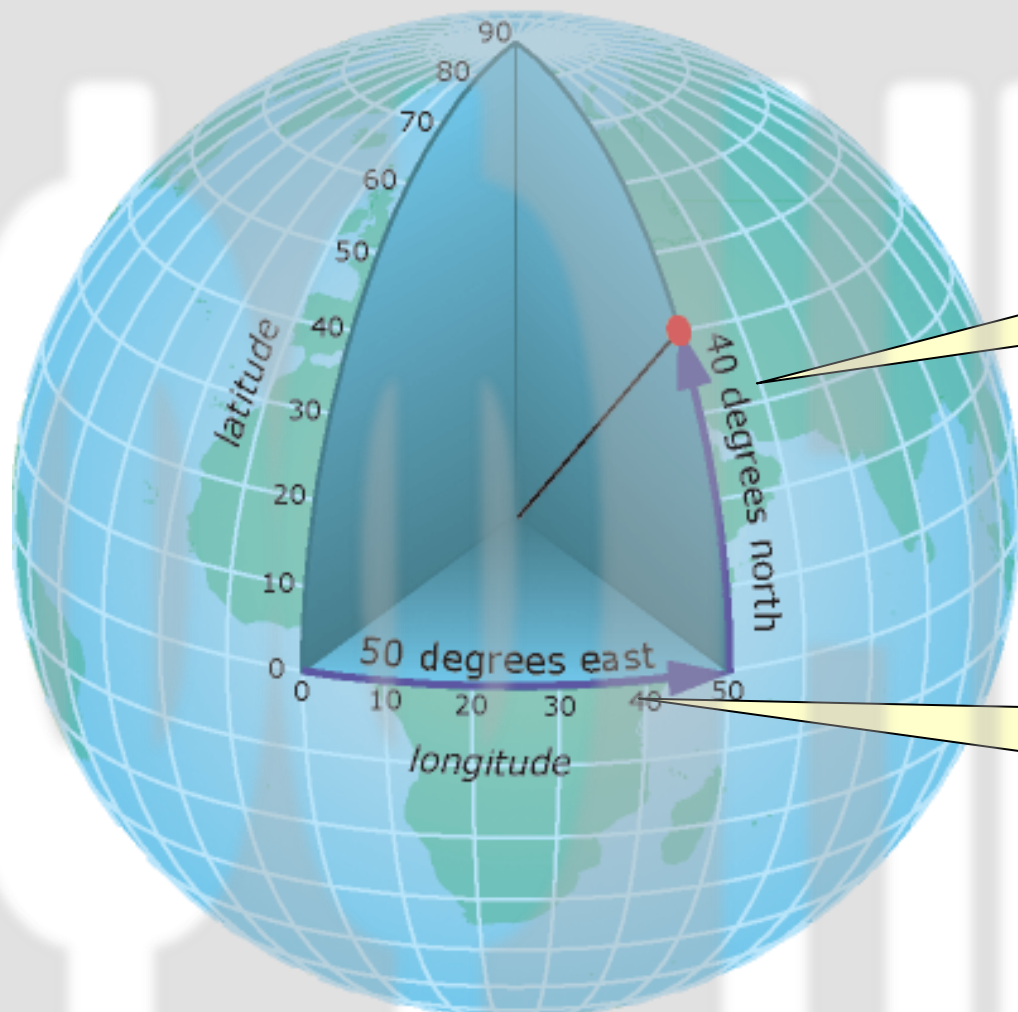
Эклиптическая

Галактическая





# Географические координаты



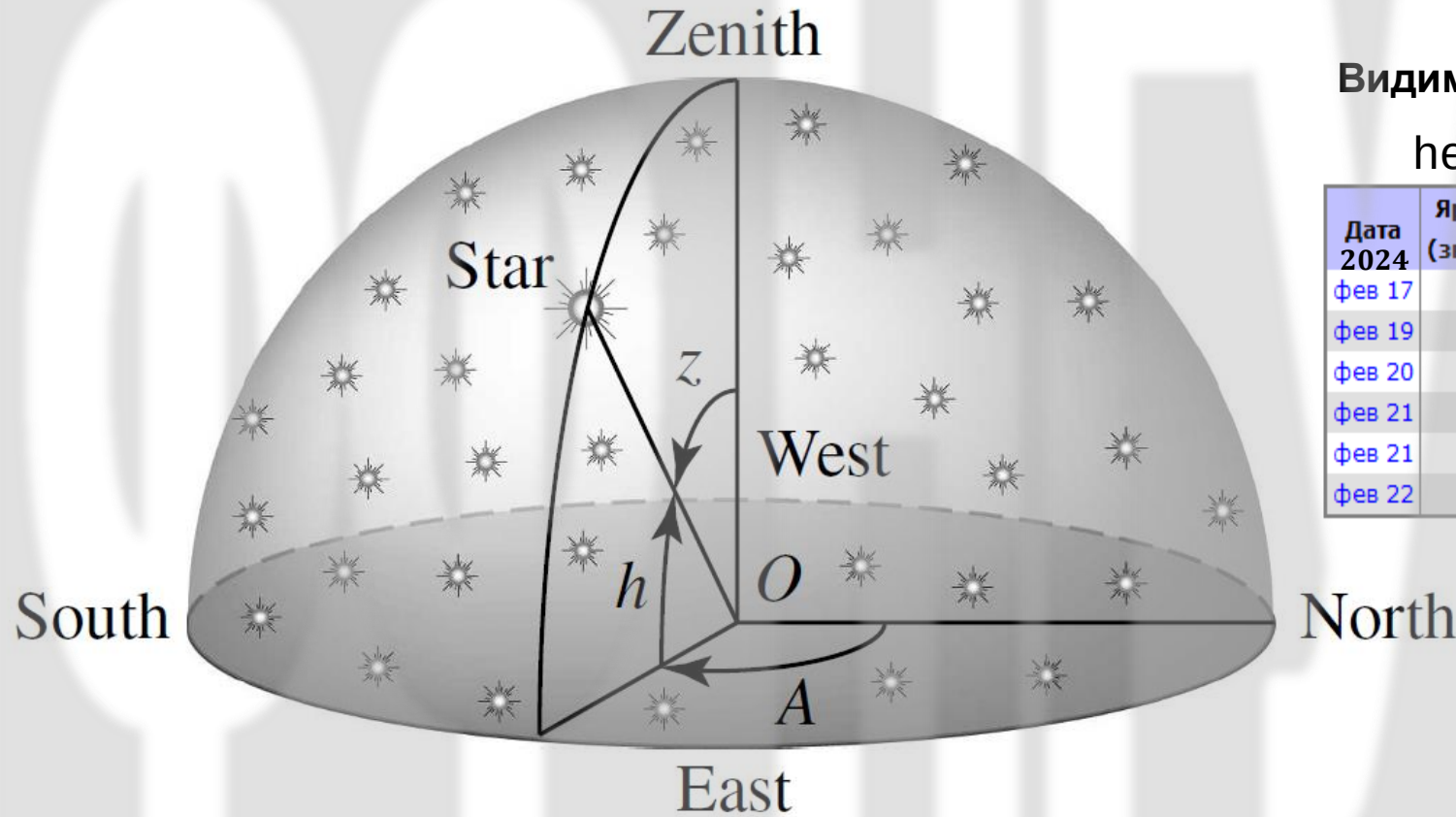
Широта  $\phi$  – угол от плоскости экватора и направлением на объект из центра Земли

Долгота  $\lambda$  – двугранный угол между плоскостью меридиана, проходящего через объект и плоскостью Гринвичского меридиана.

Для Новосибирска:  $\phi = 55^{\circ}01'$  с.ш.;  $\lambda = 82^{\circ}55'$  в.д.

# Азимутальная система координат

Удобны для определений положения объекта относительно ориентиров, привязанных к земле. Используется в геодезии, авиации...



Видимость МКС в Новосибирске:

[heavens-above.com](https://heavens-above.com)



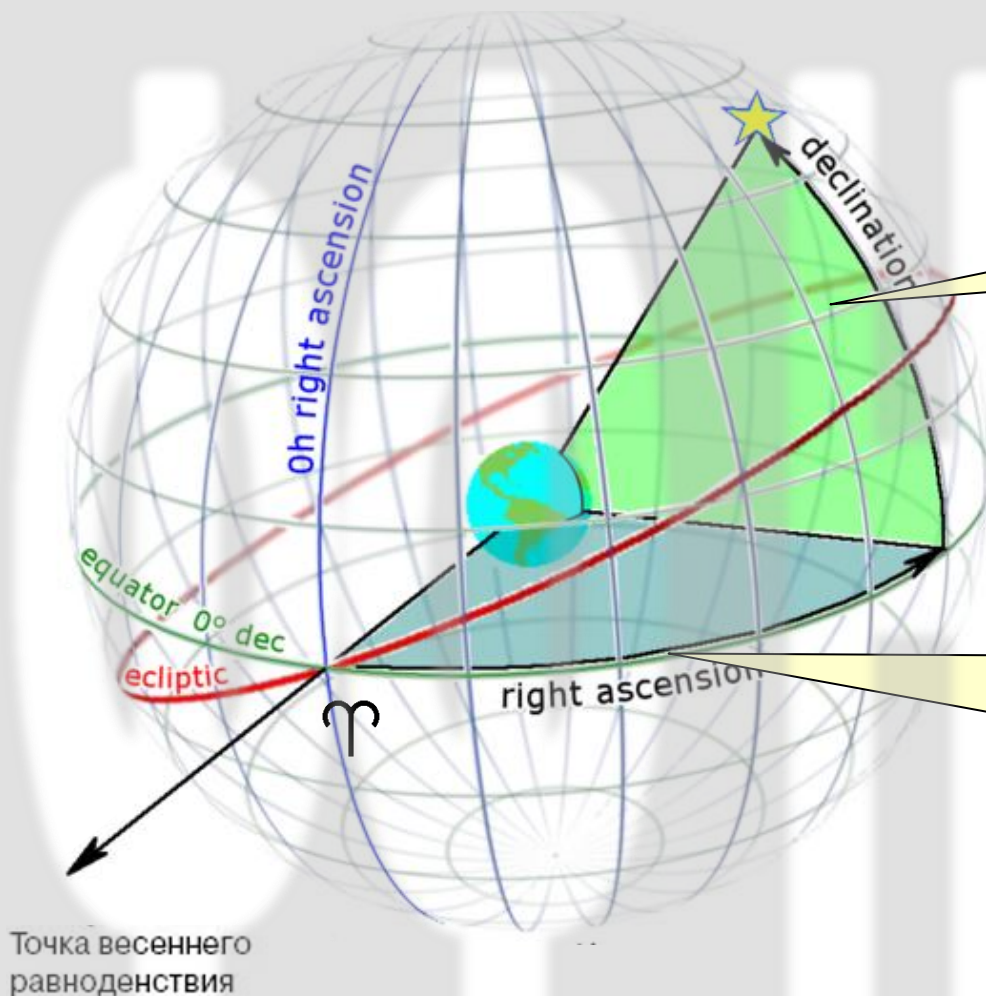
| Дата<br>2024 | Яркость<br>(зв. вел.) | Начало  |        |        | Наибольшая высота |        |        | Конец   |        |        |
|--------------|-----------------------|---------|--------|--------|-------------------|--------|--------|---------|--------|--------|
|              |                       | Время   | Высота | Азимут | Время             | Высота | Азимут | Время   | Высота | Азимут |
| фев 17       | -0,7                  | 6:31:16 | 10°    | ЮЮВ    | 6:32:28           | 11°    | ЮВ     | 6:33:40 | 10°    | ВЮВ    |
| фев 19       | -1,4                  | 6:29:41 | 10°    | ЮЮЗ    | 6:32:15           | 20°    | ЮЮВ    | 6:34:50 | 10°    | В      |
| фев 20       | -1,1                  | 5:42:05 | 10°    | Ю      | 5:44:09           | 15°    | ЮВ     | 5:46:12 | 10°    | ВЮВ    |
| фев 21       | -0,9                  | 4:55:40 | 11°    | ЮЮВ    | 4:56:03           | 11°    | ЮВ     | 4:57:02 | 10°    | ЮВ     |
| фев 21       | -2,2                  | 6:29:01 | 10°    | ЮЗ     | 6:32:03           | 32°    | ЮЮВ    | 6:35:06 | 10°    | В      |
| фев 22       | -2,0                  | 5:42:17 | 18°    | ЮЮЗ    | 5:43:50           | 25°    | ЮЮВ    | 5:46:40 | 10°    | В      |



Из-за суточного вращения Земли, положение над горизонтом астрономических объектов меняется, что делает азимутальные координаты неудобными.



# Звездные координаты



Склонение  $\delta$  (Declination, Dec) – угол (в **градусах**) между плоскостью экватора и направлением на объект из центра Земли.

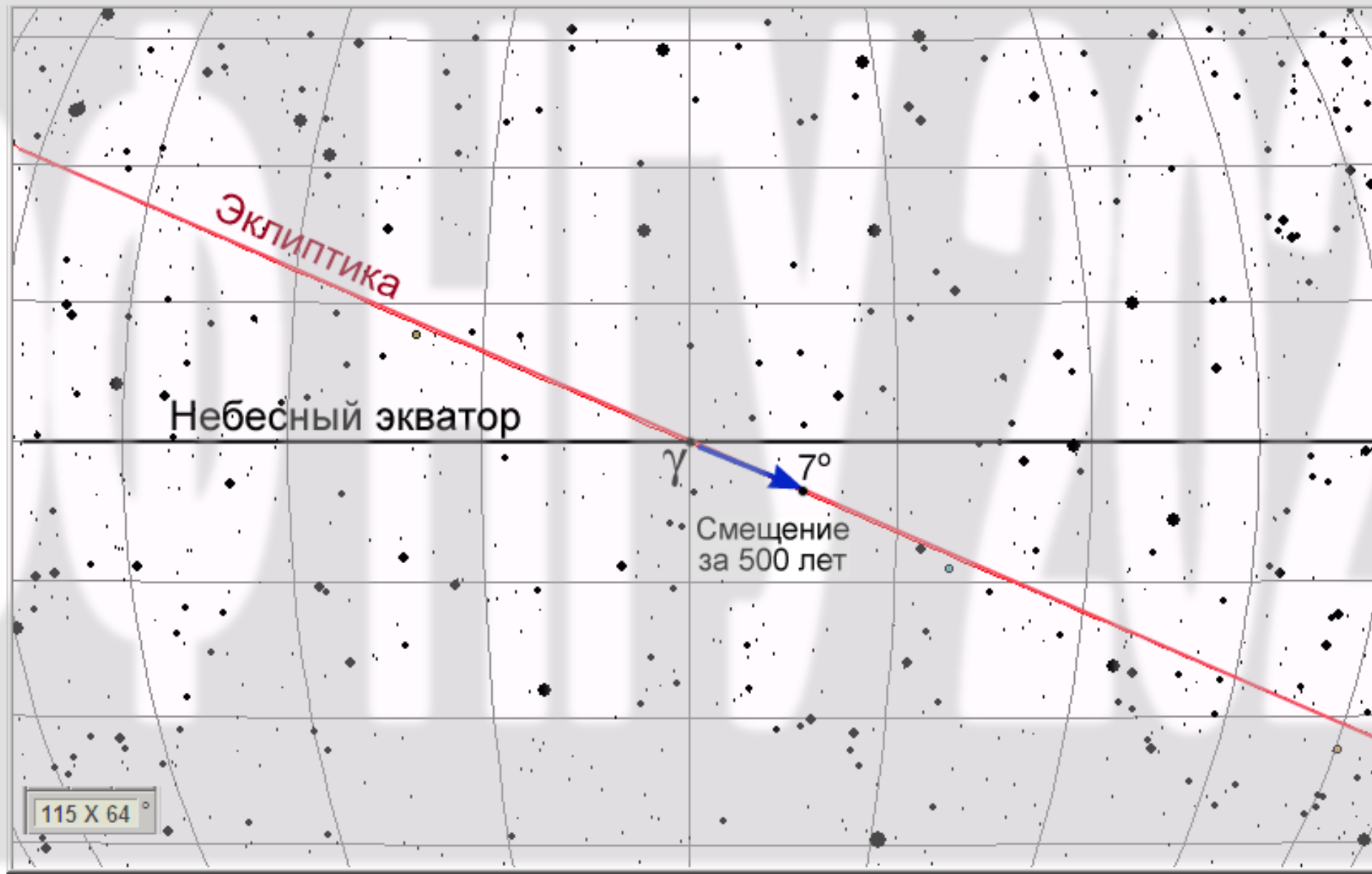
Прямое восхождение  $\alpha$  (Right Ascension, RA) – двугранный угол (в **часовых единицах**) между плоскостью меридиана, проходящего через объект и плоскостью нулевого (весеннее равноденствие) меридиана.

1h = 15°; 1m = 15'; 1s = 15''

Для Полярной звезды ( $\alpha$  UMi):

$$\alpha_{2000} = 2\text{h}31\text{m}49.09\text{s} \quad \delta_{2000} = 89^{\circ}15'50.8''$$

Прецессия земной оси смещает точки равноденствия по эклиптике в направлении суточного движения светил (т. е. навстречу годовичному движению Солнца) со скоростью около  $50''$  в год, делая более ранними (т. е. предваряя) моменты равноденствий



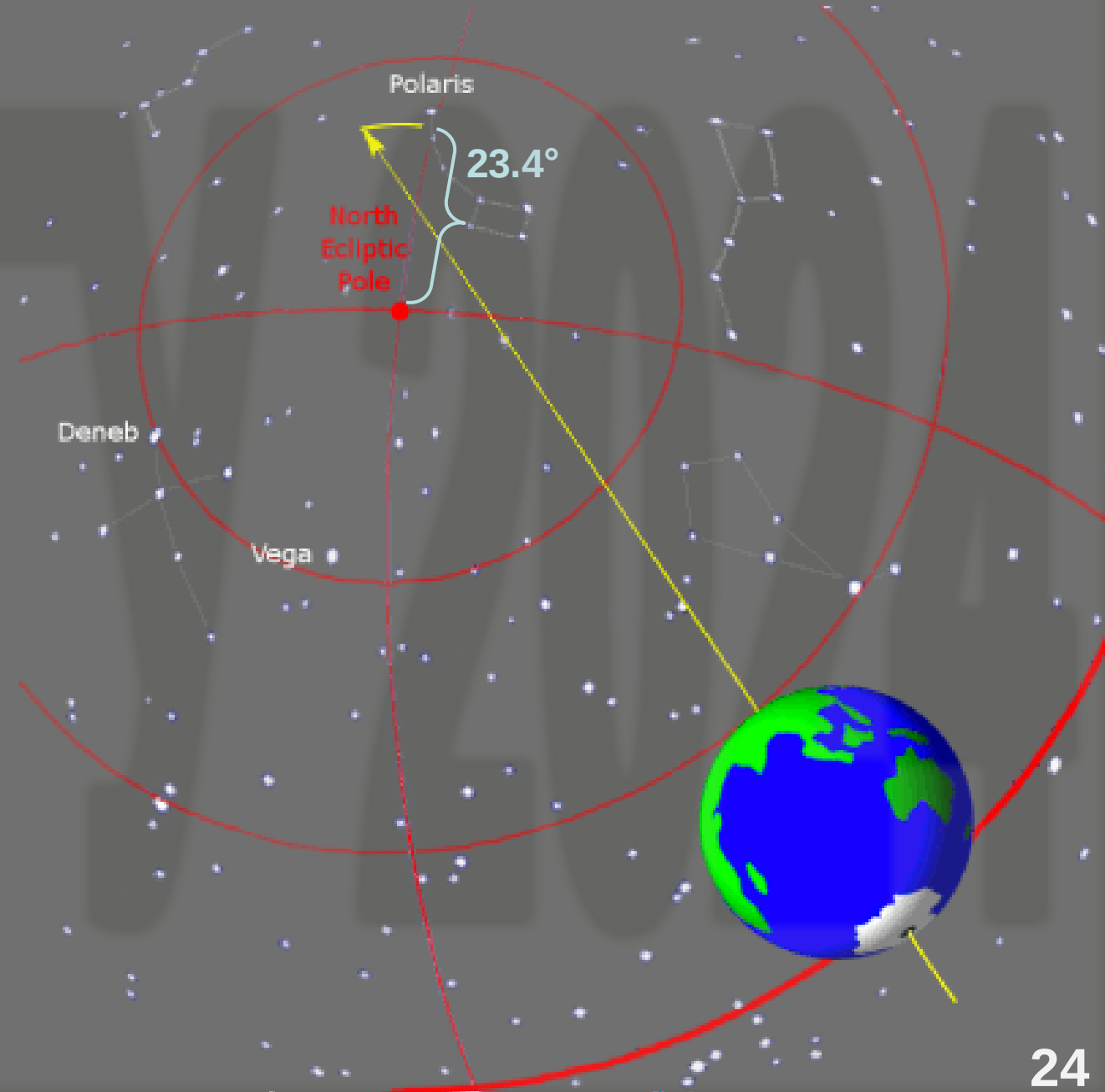


# Прецессия земной оси

Под воздействием Луны, Солнца и других планет Солнечной системы, точка равноденствия сдвигается к западу на  $50.29''$  в год.

Период прецессии: 25770 лет

Из-за наклона ( $\sim 5^\circ$ ) орбиты Луны к плоскости эклиптики, воздействие Луны на Землю периодически (18.6 лет) меняется, что приводит к дополнительным небольшим колебаниям оси.



1814

## H O R A III.

| STELLARUM |                               |                                  | ASCENSIO RECTA |                                     |                                         |                      |              | DECLINATIO                        |                              |                      |       |             |
|-----------|-------------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------|-------|-------------|
| NUMERUS   | NOMINA<br>ET<br>MAGNITUDINES. | PROXI-<br>ME IN<br>TEMPO-<br>RE. | IN ARCU.       | ANNUA<br>PRÆCES-<br>SIO IN<br>ARCU. | MOTUS<br>PROPRIUS<br>ANNUUS<br>IN ARCU. | NUMERUS<br>OBSERVAT. |              | ANNUA<br>PRÆCES-<br>SIO B +<br>A— | MOTUS<br>PROPRIUS<br>ANNUUS. | NUMERUS<br>OBSERVAT. |       |             |
|           |                               |                                  |                |                                     |                                         |                      |              |                                   |                              |                      | H. M. | G. M. S. 10 |
|           |                               |                                  | 55             | * I, o Tauri 4.5                    | 3. 14                                   |                      | 48.30.58,2   | 48,24                             | —0,24.M.P.                   |                      | 18    | 8.18.56,1 B |
| 56        | Persei . . . 7                | 15                               | 48.38.54,7     | 63,45                               |                                         | 5                    | 49. 8.27,1 B | 13,25                             |                              | 5                    |       |             |
| 57        | Camel. 4 Hev. 5.6             | 15                               | 48.42.34,5     | 67,37                               |                                         | 6                    | 54.44.45,7 B | 13,24                             |                              | 5                    |       |             |
| 58        | * Camelopardi . 8             | 15                               | 48.45.39,6     | 67,32                               |                                         | 10                   | 54.40. 8,5 B | 13,23                             |                              | 5                    |       |             |
| 59        | 34 Persei . . . 5.6           | 15                               | 48.46.58,5     | 63,28                               |                                         | 6                    | 48.48.12,6 B | 13,22                             |                              | 7                    |       |             |
| 60        | Tauri . . . . 7               | 16                               | 48.54.54,9     | 50,97                               |                                         | 7                    | 18. 2.45,3 B | 13,19                             |                              | 7                    |       |             |

# A New Popular Star Atlas (Epoch 1950)

## NORTON's 2000.0

STAR ATLAS AND  
REFERENCE HANDBOOK

EDITED BY  
IAN RIDPATH

(Epoch 2000.0) Eighteenth Edition



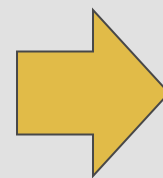
Published in the United States with  
John Wiley & Sons, Inc., New York

Прецессия, т. е. постоянное изменение ориентации небесного экватора и перемещение точки весеннего равноденствия вызывает изменение экваториальных координат всех небесных светил.

Поэтому в астрономических каталогах и атласах указывается эпоха, для которой приведены координаты звёзд:

$$\alpha_{1950.0} = 00^{\text{h}} 00^{\text{m}} 00^{\text{s}}$$

$$\delta_{1950.0} = 00^{\circ} 00' 00''$$



$$\alpha_{2000.0} = 00^{\text{h}} 02^{\text{m}} 34^{\text{s}}$$

$$\delta_{2000.0} = 00^{\circ} 16' 42''$$



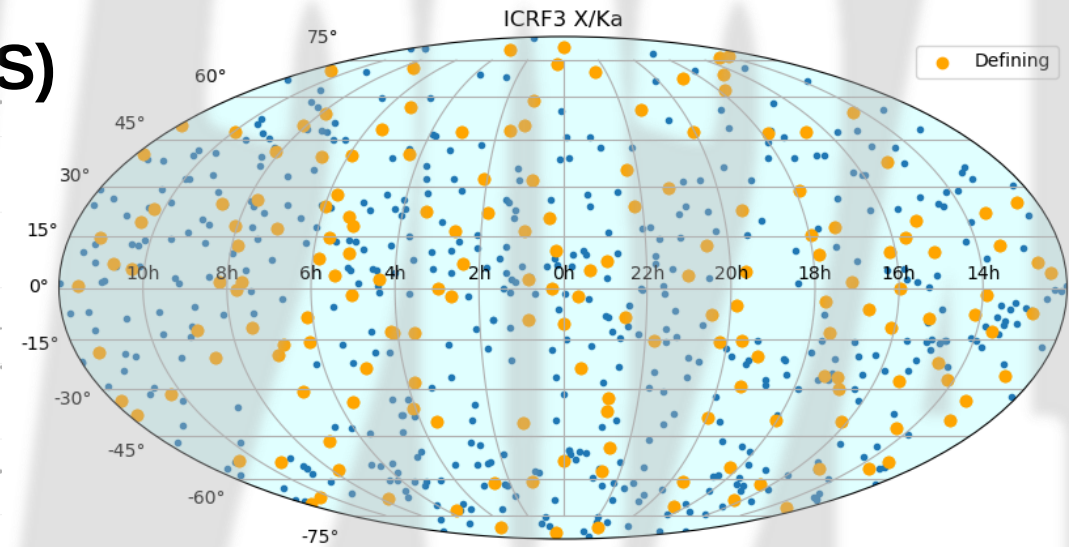
# Система координат ICRS

Астрономы всегда стремились построить «идеальную» систему координат, связанную с такими небесными объектами, которые можно считать «неподвижными». Лучшим вариантом таких объектов на сегодня являются квазары.

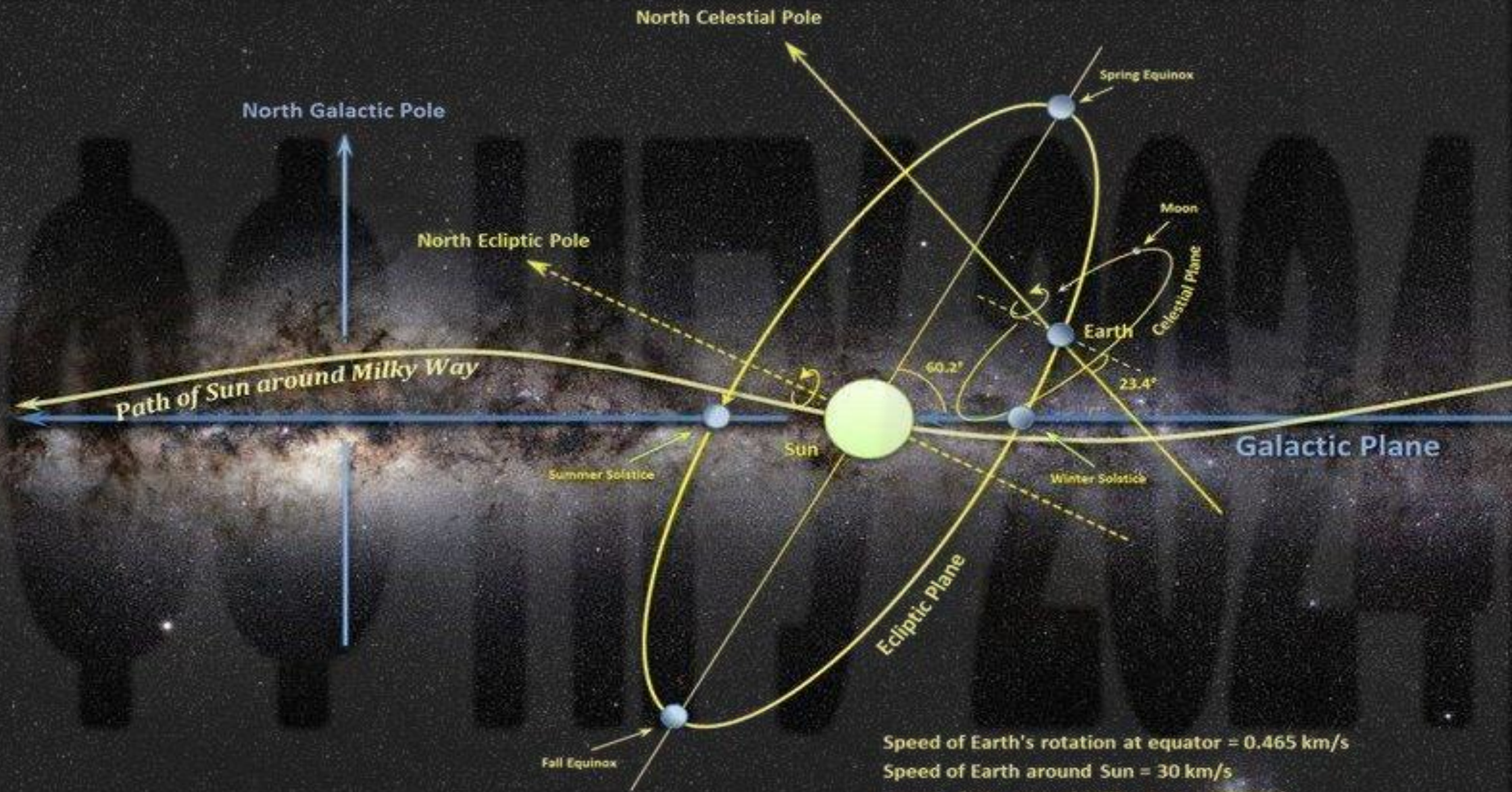
## International Celestial Reference System (ICRS)

ICRS уже не связана с вращением Земли вокруг своей оси и движением вокруг Солнца. Для обеспечения обратной совместимости, новую систему привязали к экваториальной системе на эпоху J2000.

Конкретный набор квазаров привязки для построения ICRS называют International Celestial Reference Frame (ICRF). В связи с уточнением измерений, в августе 2018 года была принята новая реализация ICRF3, использующая несколько тысяч квазаров.







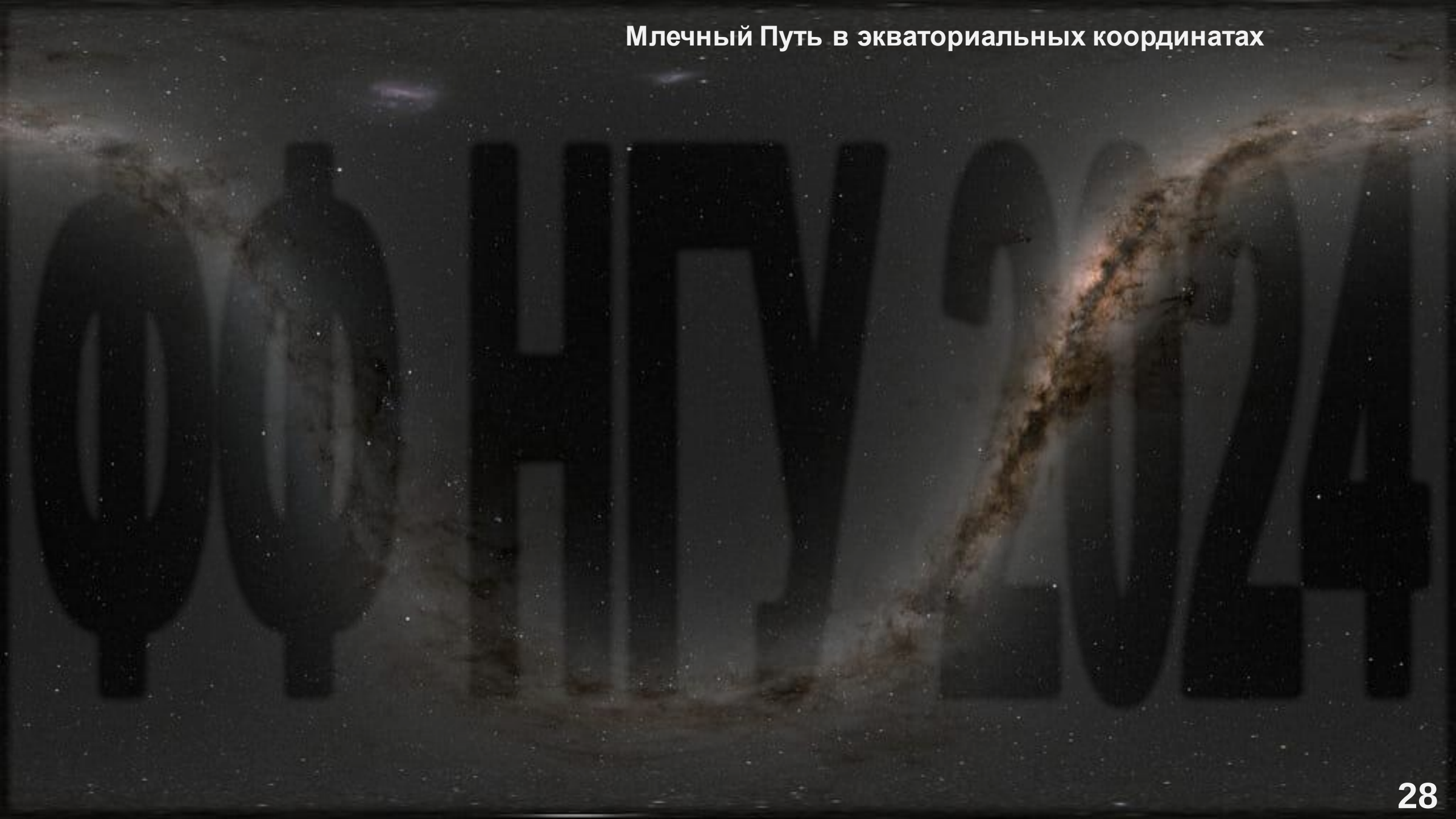
Speed of Earth's rotation at equator = 0.465 km/s

Speed of Earth around Sun = 30 km/s

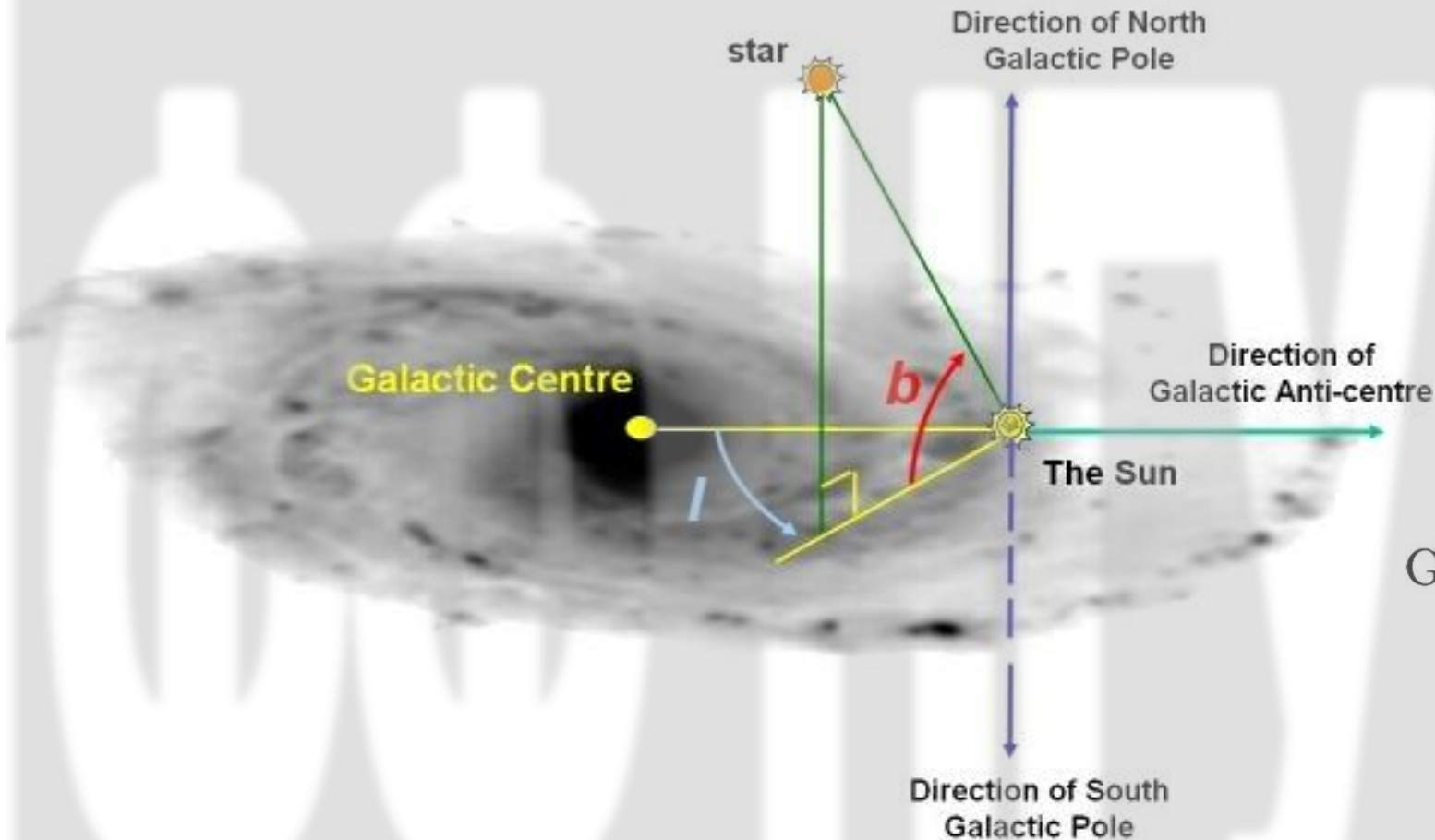
Speed of Sun around Milky Way = 230 km/s

Sun is approximately 26,000 light years from Galactic Center



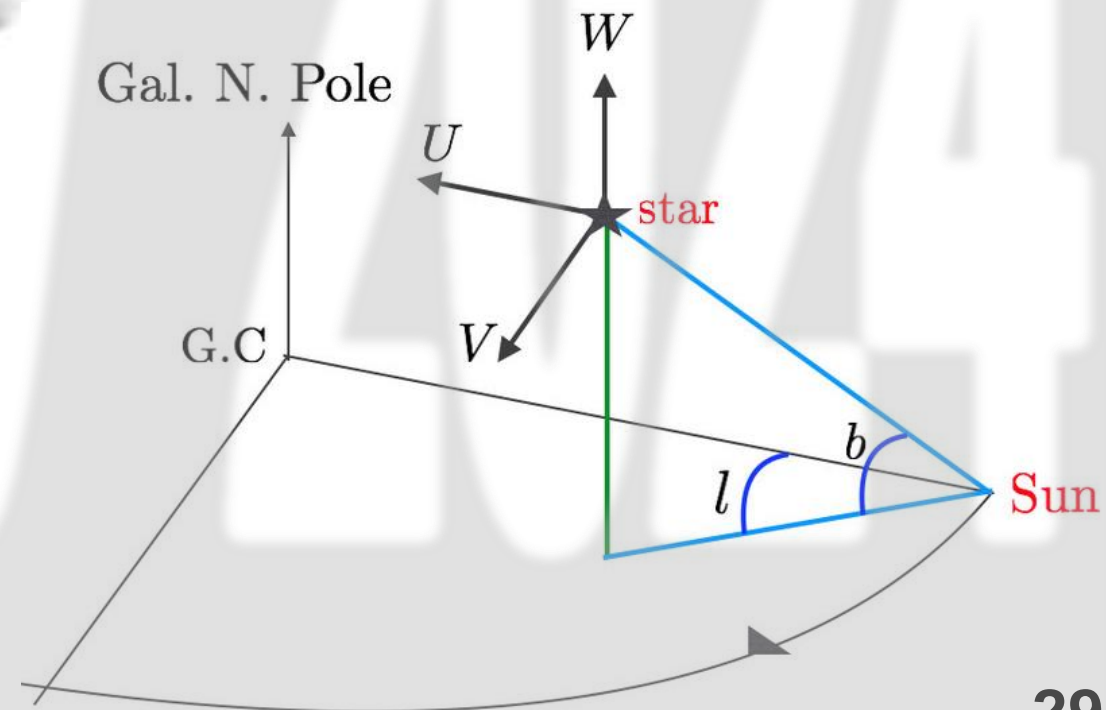


# Галактическая система координат



При изучении структуры нашей Галактики удобнее пользоваться галактической системой координат.

Направление на центр Галактики имеет долготу  $l = 0^\circ$ .



Широта  $b$  – угол от галактической плоскости на объект. При этом «+» для северной полуплоскости и «-» для южной.

Компоненты скорости объекта обозначаются (U,V,W).



Млечный Путь в экваториальных координатах



Млечный Путь в галактических координатах





# Измерение времени

В быту мы используем **Григорианский календарь**, введенный Папой Григорием XIII в 1582 году, который определяет рецепт добавления (или пропуска) високосных лет. Однако в астрономии нас (почти) всегда интересуют интервалы времени между событиями, а не точная дата.

В связи с этим в астрономии было выбрано некоторое начало отсчета времени, и момент каждого события определяется как время (в юлианских годах), прошедшее с этого момента. В качестве начала используется дата – **полдень** (по Гринвичу) 1 января (понедельник) 4713 до н.э. (по Юлианскому календарю), и обозначается JD 0.0.

$$1\text{JD} \equiv 86400 \text{ секунд}$$

$$1\text{JY} \equiv 365.25 \text{ JD}$$

Например наша лекция началась: 12:40 (UTC+7) 05.02.2024 = JD 2460345.73611 (<https://www.aavso.org/jd-calculator>)

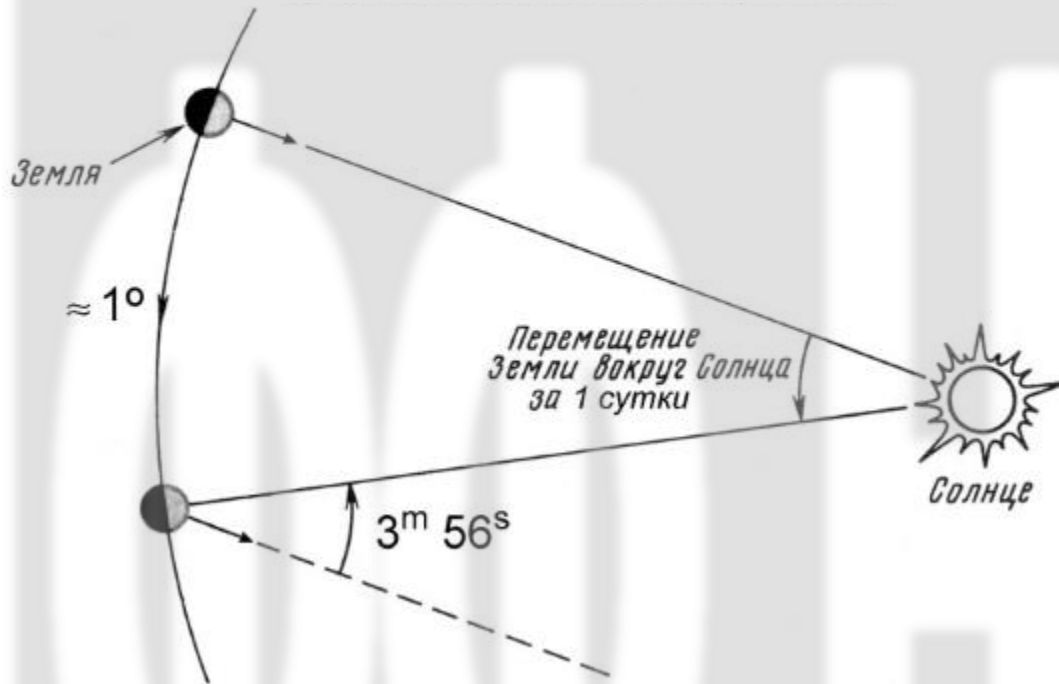
Также используются некоторые модификации JD:

**Modified Julian Date**  $\text{MJD} = \text{JD} - 2400000.5$

**Barycentric Julian Date** = BJD с пересчетом в центр масс Солнечной системы.



# Измерение времени



В быту нам удобно ориентироваться на цикличность смены дня и ночи, то есть определять основной промежуток времени (сутки) между двумя кульминациями (максимальной высотой над горизонтом) Солнца.

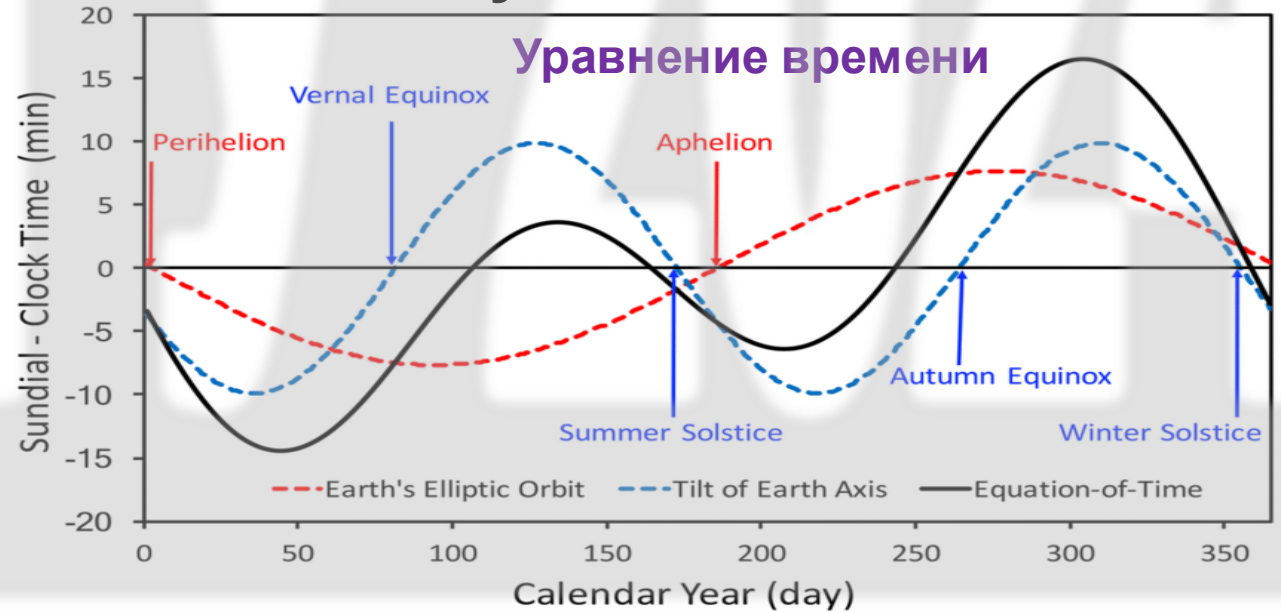
Однако из-за годичного вращения Земли солнечные сутки не равны звездным суткам – интервалу между двумя кульминациями одной и той же звезды.

**Средние солнечные сутки = 24 ч**

**Звездные сутки = 23 ч 56 м 04 с**

Кроме того, из-за эллиптичности орбиты Земли и наклона оси вращения Земли к плоскости своей орбиты, продолжительность солнечных суток меняется ( $\pm 15$  минут) в течение года.

Измеряя момент кульминации Солнца в течение года, можно определить параметры орбиты Земли.



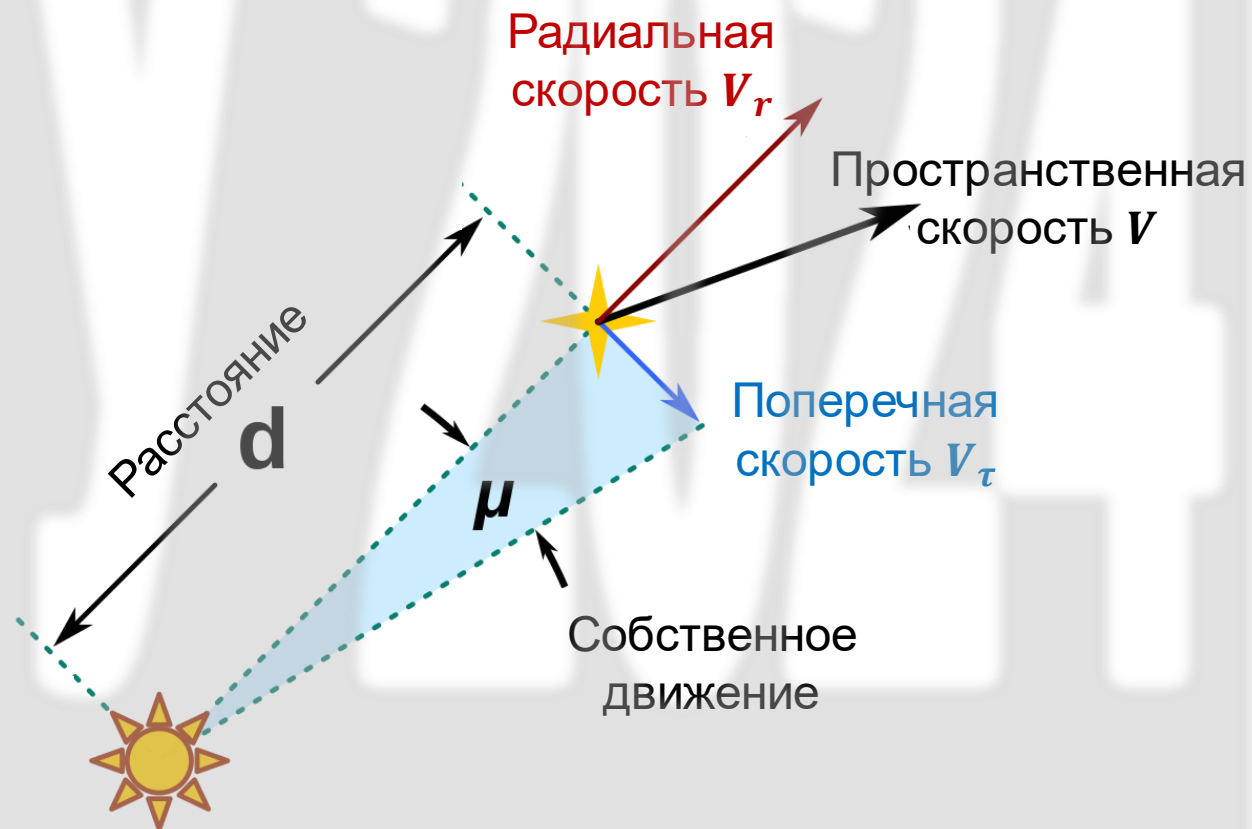
# Собственное движение

**Собственное движение (proper motion)** – изменения координат звёзд на небесной сфере, вызванные относительным движением звёзд и Солнечной системы. В них не включают периодические изменения, вызванные движением наблюдателя: движение Земли вокруг Солнца (годовой параллакс, абберация света), и движение, вызванное прецессией экваториальной системы координат.

Собственное движение измеряется в **угловых миллисекундах в год**.

Звезды с большим собственным движением

| # | Star                           | Proper motion                              |                          |
|---|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
|   |                                | $\mu_\alpha \cdot \cos \delta$<br>(mas/yr) | $\mu_\delta$<br>(mas/yr) |
| 1 | Barnard's Star                 | -798.58                                    | 10328.12                 |
| 2 | Kapteyn's Star                 | 6505.08                                    | -5730.84                 |
| 3 | Groombridge 1830               | 4003.98                                    | -5813.62                 |
| 4 | Lacaille 9352                  | 6768.20                                    | 1327.52                  |
| 5 | Gliese 1 (CD -37 15492) (GJ 1) | 5634.68                                    | -2337.71                 |
| 6 | HIP 67593                      | 2118.73 <sup>[28]</sup>                    | 5397.57 <sup>[28]</sup>  |
| 7 | 61 Cygni A & B                 | 4133.05                                    | 3201.78                  |
| 8 | Lalande 21185                  | -580.27                                    | -4765.85                 |
| 9 | Epsilon Indi                   | 3960.93                                    | -2539.23                 |



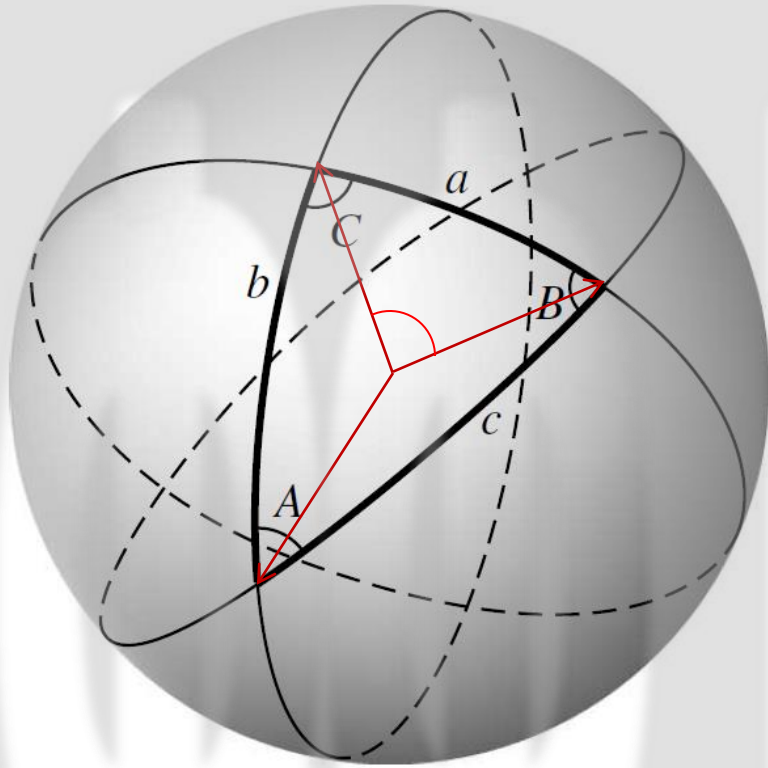


# Собственное движение

100 000 лет тому назад



# Элементы сферической тригонометрии



Пусть на сфере задан треугольник ABC, с углами  $A$ ,  $B$  и  $C$ , и со сторонами  $a$ ,  $b$  и  $c$ , соответственно. Причем стороны так же измеряются в угловой мере. Тогда

## 1) Закон синусов:

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}$$

## 2.1) Закон косинусов для сторон:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

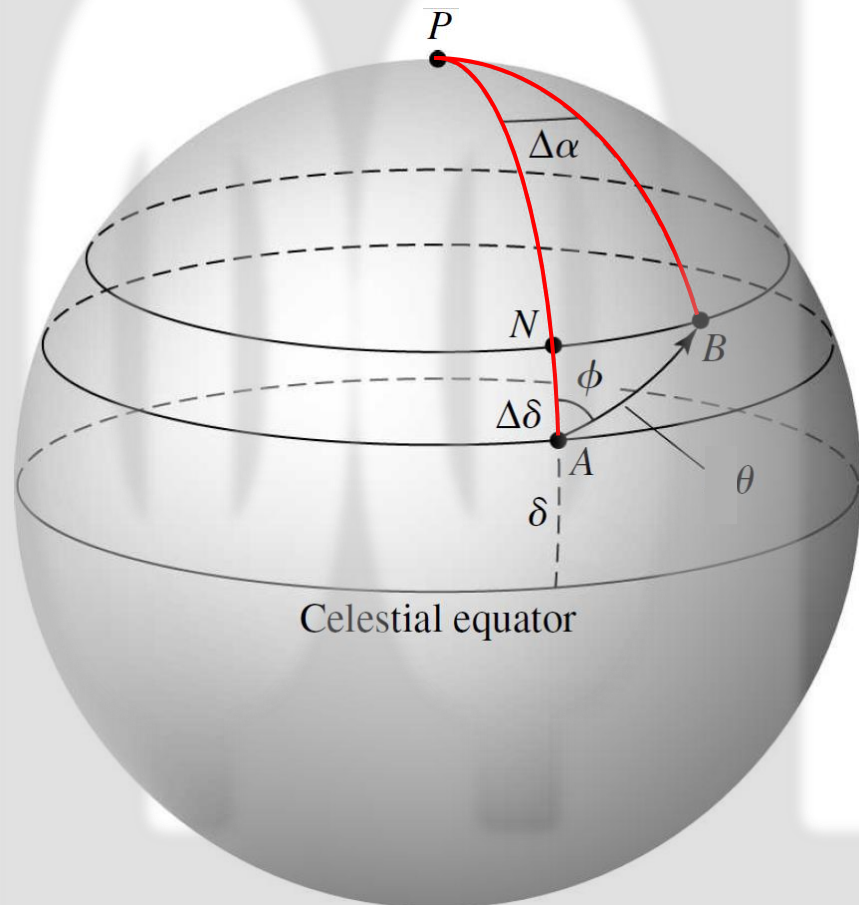
## 2.2) Закон косинусов для углов:

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a$$



# Вычислительный пример

Определить угловое расстояние между объектами с координатами  $A(\alpha_1; \delta_1)$  и  $B(\alpha_2; \delta_2)$ .



Применяя теорему косинусов для сторон (2.1) сферического треугольника  $PAB$ , где  $P$  – северный полюс, получаем:

$$\cos(AB) = \cos(PA) \cos(PB) + \sin(PA) \sin(PB) \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$$

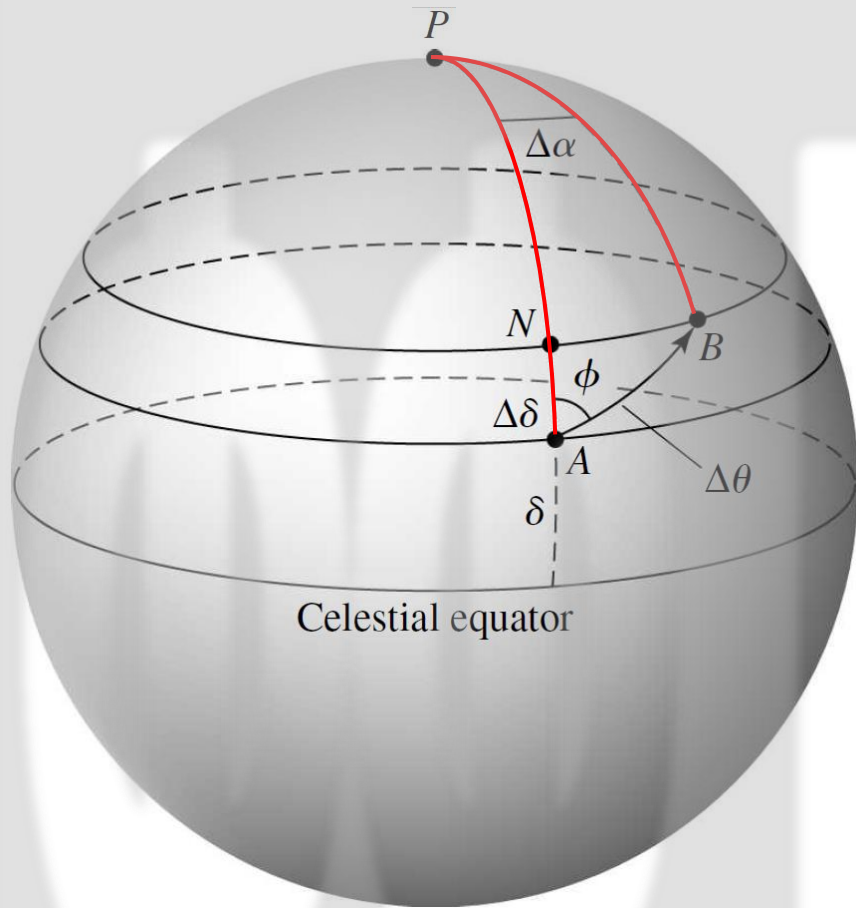
$$\cos(\theta) = \cos(90 - \delta_1) \cos(90 - \delta_2) + \\ + \sin(90 - \delta_1) \sin(90 - \delta_2) \cos \Delta\alpha$$

В общем виде искомый угол можно найти по формуле:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta_1) \sin(\delta_2) + \cos(\delta_1) \cos(\delta_2) \cos \Delta\alpha$$

Если угол  $\theta$  мал, то в таком виде формула неудобна для использования.

# Элементы сферической тригонометрии



Пусть в результате своего движения относительно Солнца (собственного движения) звезда за промежуток времени  $\Delta t$  сместилась из точки  $A(\alpha, \delta)$  в точку  $B(\alpha + \Delta\alpha, \delta + \Delta\delta)$ .

Вычислим скорость её собственного движения.

$$\mu \equiv \frac{d\theta}{dt} \simeq \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

**Для этого рассмотрим сферический треугольник  $APB$**

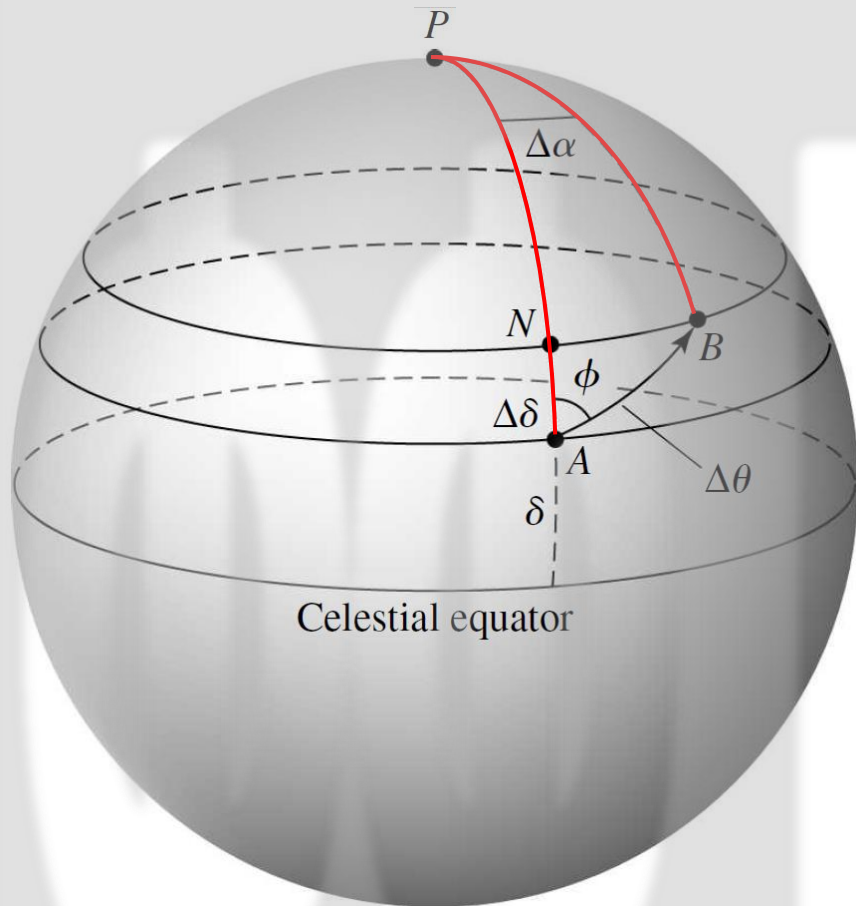
$P$  – северный полюс,

$\phi$  – вспомогательный угол (позиционный угол).

Будем считать, что  $\Delta\alpha, \Delta\delta, \Delta\theta \ll 1$ .



# Элементы сферической тригонометрии



Тогда по закону синусов:

$$\frac{\sin(\Delta\theta)}{\sin(\Delta\alpha)} = \frac{\sin(90 - (\delta + \Delta\delta))}{\sin \phi}$$

сторона АВ      сторона РВ

Принимая во внимание, что:

$$\sin(\Delta\theta) \simeq \Delta\theta$$

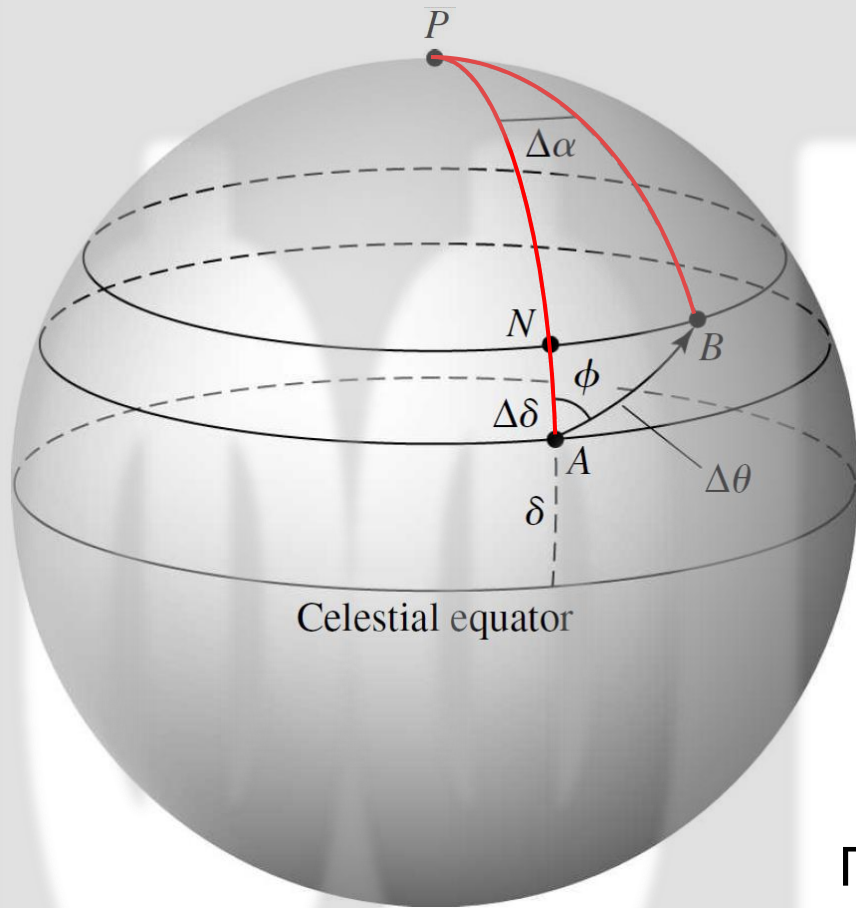
$$\sin(\Delta\alpha) \simeq \Delta\alpha$$

$$\sin(90^\circ - \delta - \Delta\delta) = \cos(\delta + \Delta\delta) \simeq \cos \delta$$

Отсюда получаем:

$$\Delta\alpha \cos \delta \simeq \Delta\theta \sin \phi$$

# Элементы сферической тригонометрии



По закону косинусов для сторон:

$$\cos(PB) = \cos(PA) \cos(AB) + \sin(PA) \sin(AB) \cos \phi$$

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - (\delta + \Delta\delta)) &= \cos(90^\circ - \delta) \cos(\Delta\theta) + \\ &+ \sin(90^\circ - (\delta + \Delta\delta)) \sin(\Delta\theta) \cos \phi \end{aligned}$$

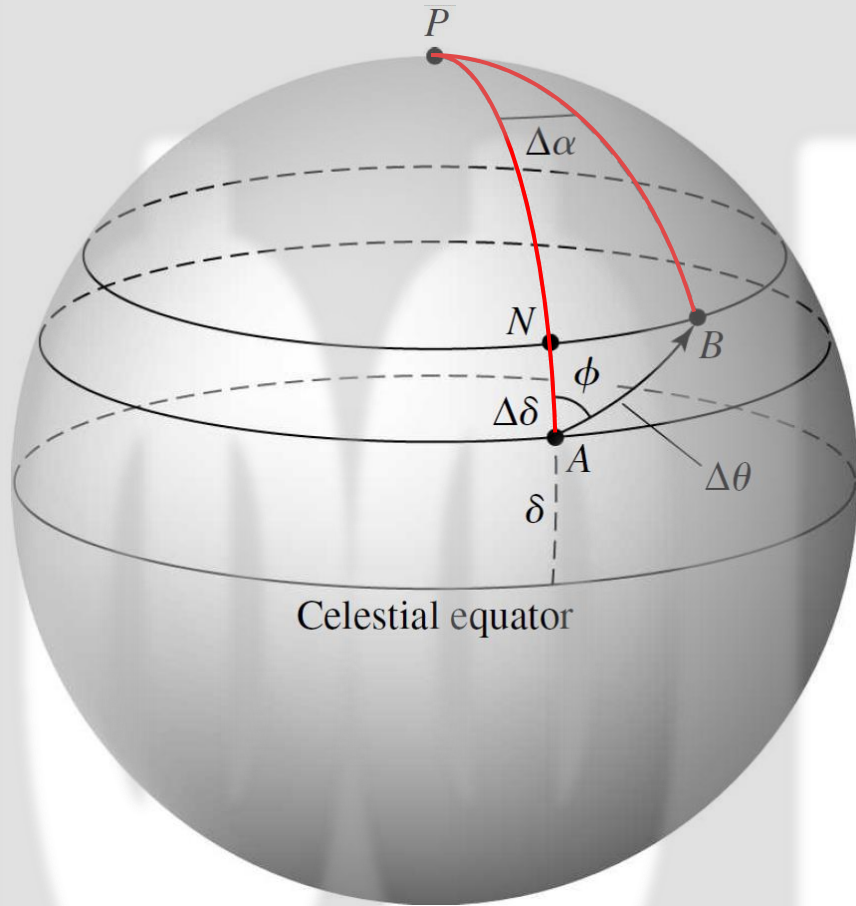
Принимая во внимание, что  $\cos(\Delta\theta) \simeq 1$

+ формулы приведения, получаем

$$\Delta\delta \simeq \Delta\theta \cos \phi$$



# Элементы сферической тригонометрии



Треугольник ANB можно считать плоским ввиду малости величин  $\Delta\delta$  и  $\Delta\alpha$  и угол ANB – прямой. Тогда по теореме Пифагора:

$$(AB)^2 = (AN)^2 + (NB)^2$$

или

$$\begin{aligned} (\Delta\theta)^2 &= (\Delta\theta \cos \phi)^2 + (\Delta\theta \sin \phi)^2 \\ &= (\Delta\alpha \cos \delta)^2 + (\Delta\delta)^2 \end{aligned}$$

$$\Delta\delta \simeq \Delta\theta \cos \phi$$

$$\Delta\alpha \cos \delta \simeq \Delta\theta \sin \phi$$

Поделив на  $(\Delta t)^2$ , получаем:

$$\mu^2 = (\mu_\alpha^*)^2 + (\mu_\delta)^2$$

$$\mu_\delta \simeq \frac{\Delta\delta}{\Delta t}$$

$$\mu_\alpha^* \simeq \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \cos \delta = \mu_\alpha \cos \delta$$

# Вычислительный пример

При измерении координат «летающей» звезды Барнарда 08.06.2021 (JD 2459373.26) были получены значения  $\alpha = 17^{\text{h}}57^{\text{m}}47.3590^{\text{s}}$  и  $\delta = 4^{\circ}45'18.4532''$ , а по измерениям 04.06.2022 (JD 2459734.31) координаты были  $\alpha = 17^{\text{h}}57^{\text{m}}47.3067^{\text{s}}$  и  $\delta = 4^{\circ}45'28.7038''$ . Вычислить собственное движение звезды Барнарда.

---

$$\Delta t = 361.05 \text{ JD} = 0.9885 \text{ JY}$$

$$\Delta \alpha = -0.0523^{\text{s}} = -0.0523^{\text{s}} * 15''/^{\text{s}} = -0.785''$$

$$\Delta \delta = 12.34'' = 10.251''$$

$$\mu_{\alpha}^* = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} \cos \delta = -\frac{0.785}{0.9885} \times \cos(4.75^{\circ}) \simeq -0.791''/\text{год}$$

$$\mu_{\delta} = \frac{\Delta \delta}{\Delta t} = \frac{10.251}{0.9885} \simeq 10.370''/\text{год}$$

# Измерительный пример: «Летящая» звезда Барнарда

08.2021





# Измерительный пример: «Летящая» звезда Барнарда

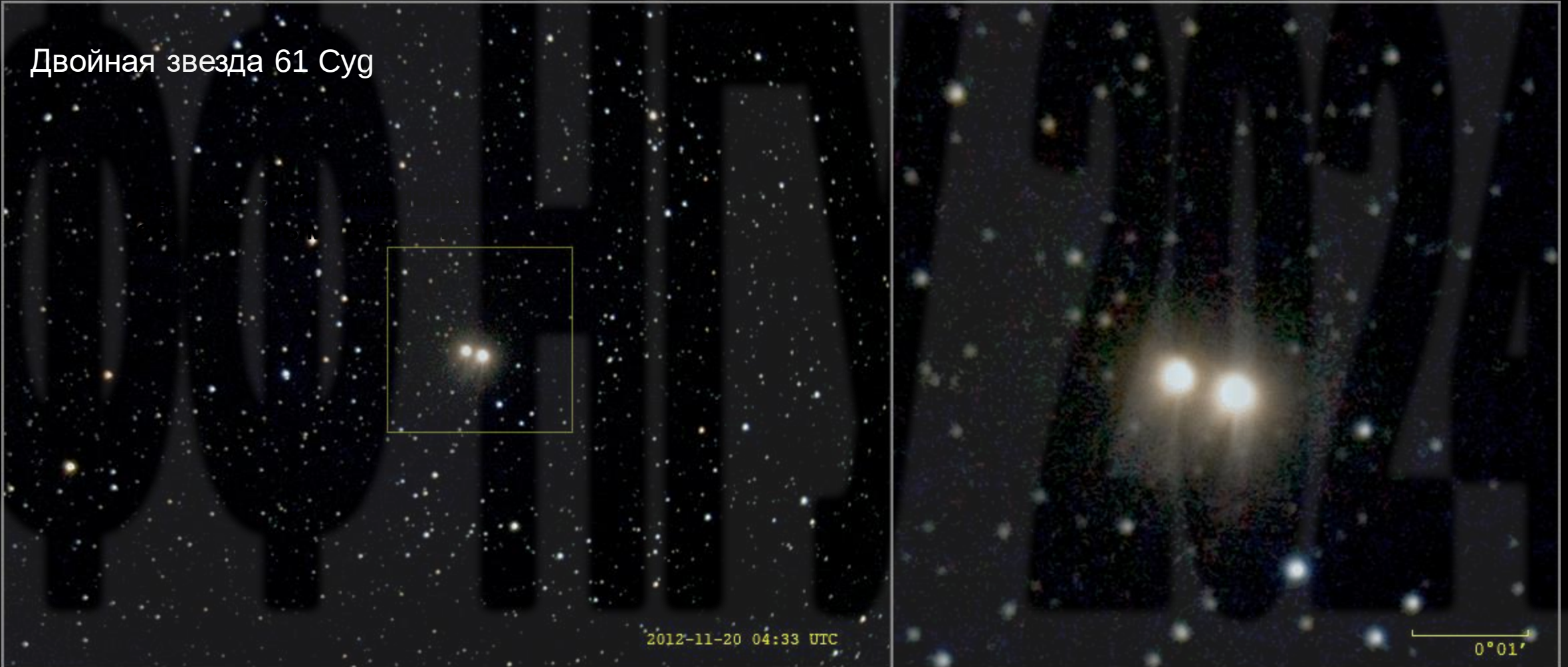
05.2023



# Собственное движение

По общему собственному движению можно установить принадлежность звезд к одной системе.

Двойная звезда 61 Суг



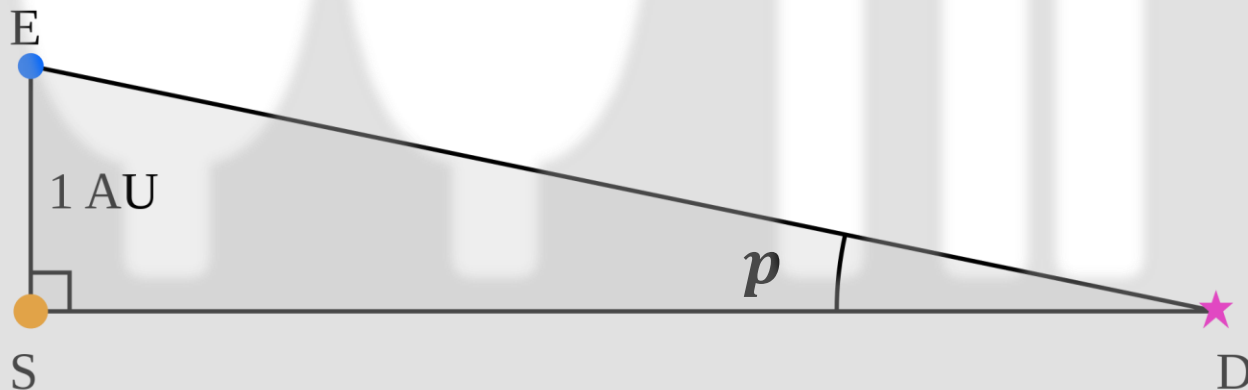
# Астрономические расстояния

Единицы измерения астрономических расстояний:

**Астрономическая единица** (а.е., au) = 149,597,870,700 м – среднее расстояние от Земли до Солнца;

**Световой год** (св.г., ly) =  $c \cdot \text{JY} \approx 63241 \text{ а.е.} \approx 9.46 \times 10^{12} \text{ км}$  – расстояние, проходимое светом за один Юлианский год;

**Парсек** (пк, pc)  $\approx 206265 \text{ а.е.} \approx 3.26 \text{ св.г.}$  – расстояние, с которого отрезок в 1 а.е. виден под углом 1".



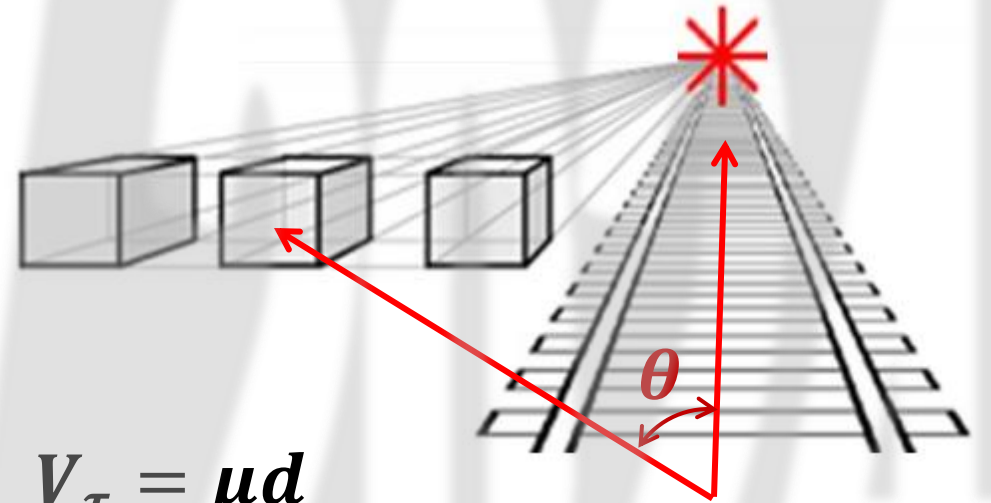
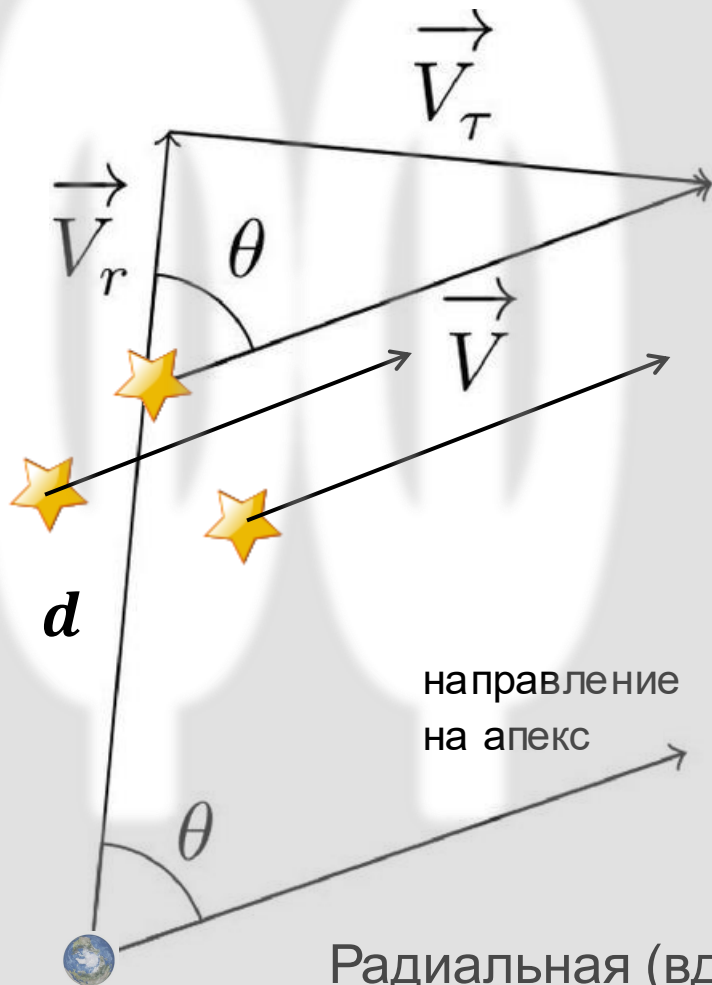
$$D = \frac{1}{\tan(p)} \approx \frac{1}{p} \text{ а.е.} \quad p \text{ – в радианах}$$

$$D \approx \frac{1}{p} \text{ ПК} \quad p \text{ – в угловых секундах}$$



# Измерение расстояния до скопления

Если группа звезд имеют общее направление движения (движение звездного скопления как целое относительно Солнца), то векторы их собственного движения «сходятся» в одной точке – эффект перспективы.



$$\tan \theta = \frac{V_{\tau}}{V_r}$$

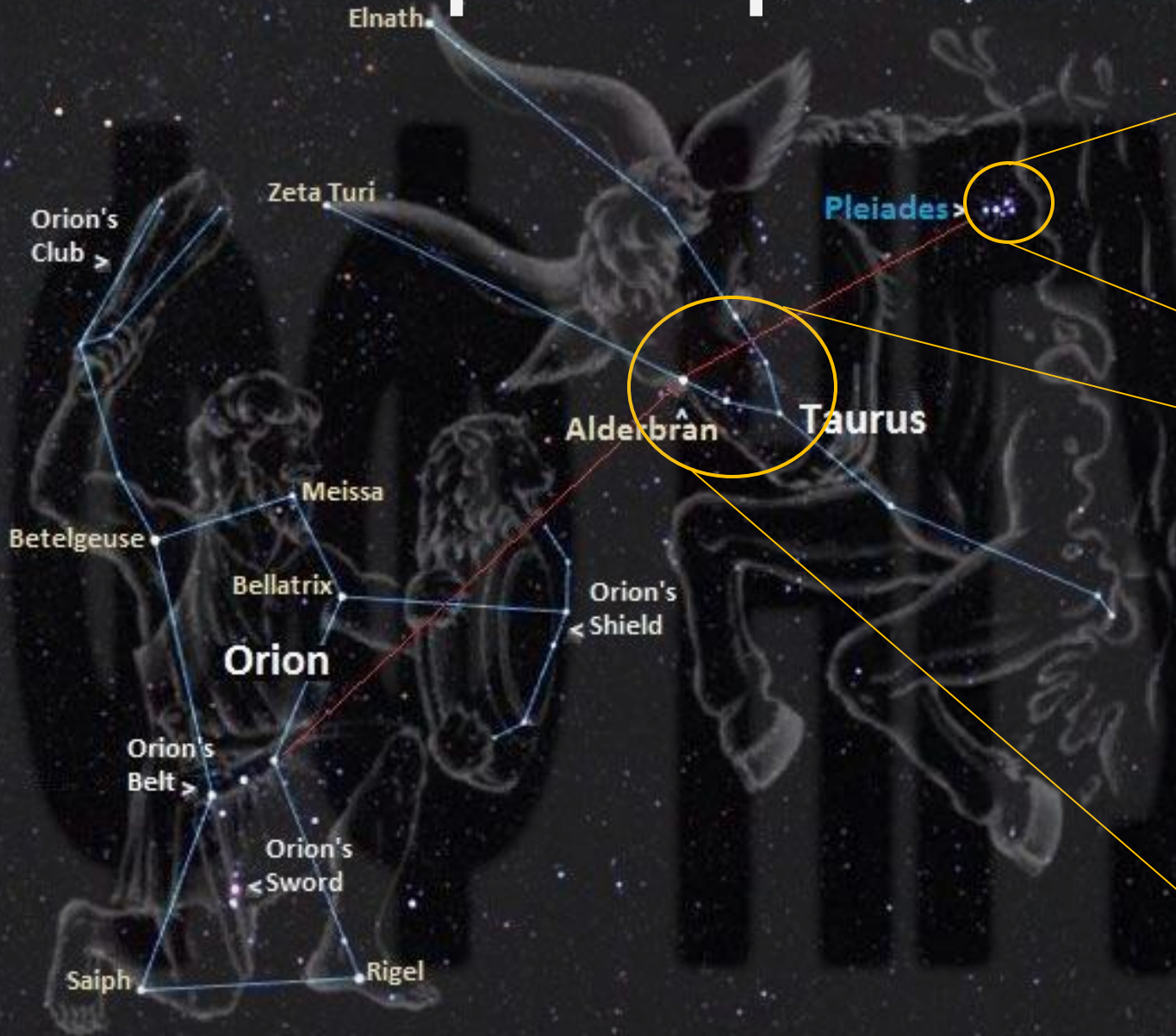
$$V_{\tau} = \mu d$$

$$d = \tan(\theta) \frac{V_r}{4.74 \mu}$$

|              |         |
|--------------|---------|
| $[V_{\tau}]$ | = км/с  |
| $[\mu]$      | = "/год |
| $[d]$        | = пк    |

Радиальная (вдоль луча зрения) скорость  $V_r$  измеряется по эффекту Доплера.

# Измерение расстояния до скопления



Плеяды

Subaru

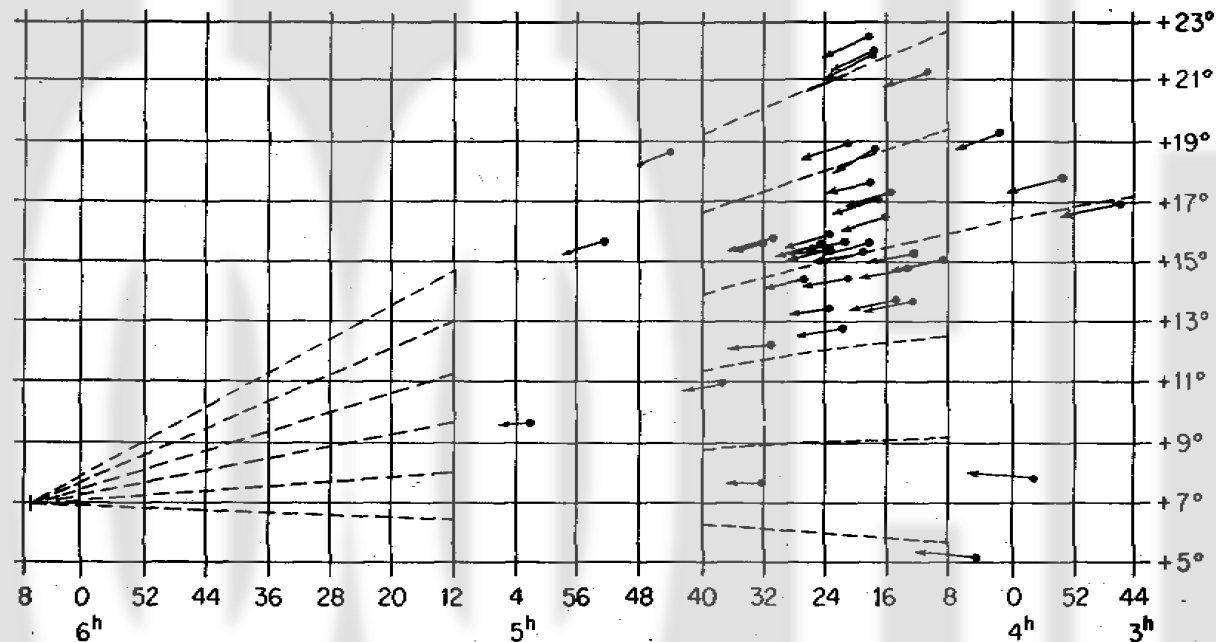


Гиады

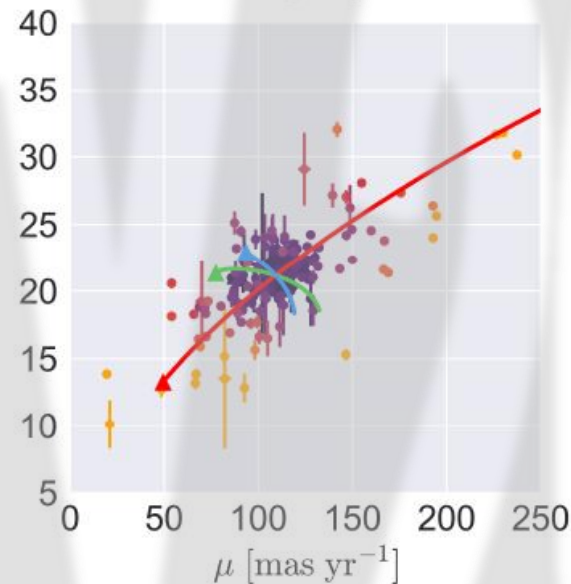


# Измерение расстояния до скопления

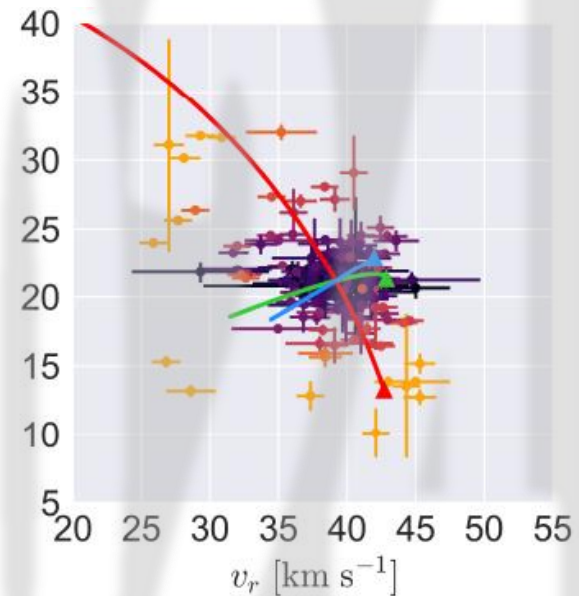
Результаты измерений собственного движения звезд скопления Гиады:



$$\mu \simeq 0.11''/\text{год}$$



$$V_r \simeq 39 \text{ км/с}$$



Угол между направлением на центр скопления и точку схождения  $\theta \simeq 32^\circ$ .

$$d = \tan(\theta) \frac{V_r}{4.74\mu} = \tan(32^\circ) \frac{39}{4.74 \cdot 0.11} \simeq 46.8 \text{ пк}$$

Этот метод применим только для ближайших к нам скоплений и в настоящее время практически не используется.

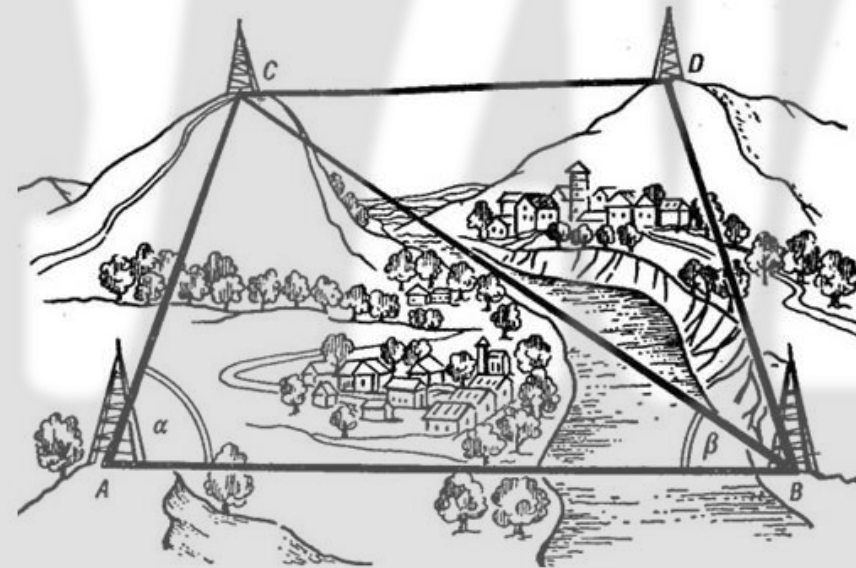


# Измерение расстояний

Измерение расстояний до астрономических объектов – одна из важнейших и сложнейших задач астрономии.

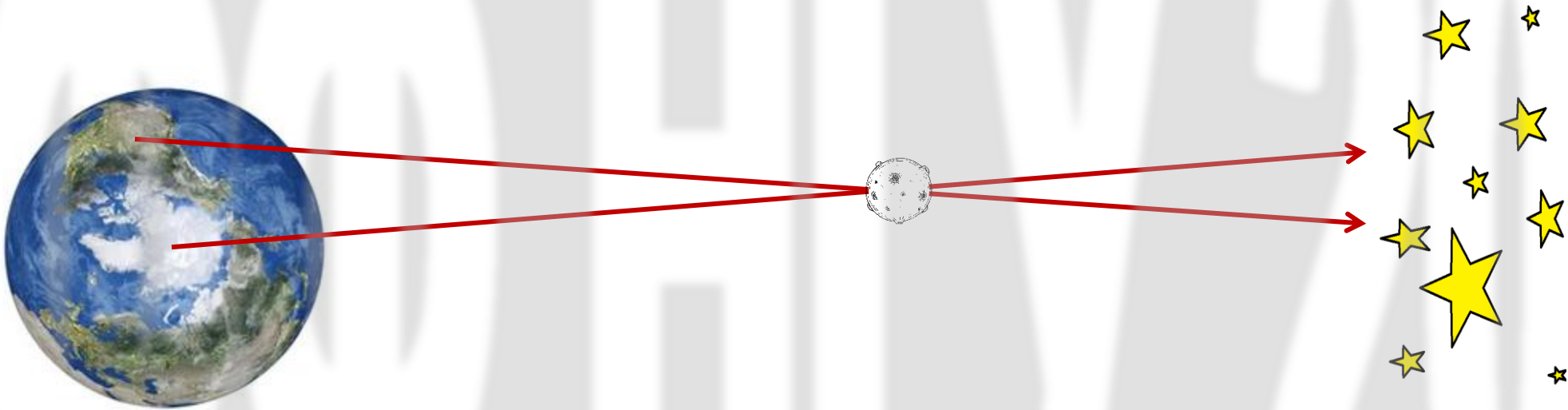
Не существует универсального метода, применимого на всех масштабах, поэтому было разработано множество (более десятка) методик и постоянно разрабатываются новые. Разнообразие методов позволяет проводить перекрестные проверки и калибровки, что повышает точность измерений.

Первым методом, примененным для измерения расстояний до астрономических объектов был аналогичен классическому методу триангуляции в геодезии.



# Суточный параллакс

**Суточный параллакс** (геоцентрический параллакс, diurnal parallax) — разница в направлениях (угол) на одно и то же светило из центра масс Земли (геоцентрическое направление) и из заданной точки на поверхности Земли (топоцентрическое направление).



**Горизонтальный параллакс** — максимальное значение суточного параллакса. Достигается при нулевой высоте, когда светило наблюдается прямо на горизонте. База параллакса при этом равна радиусу Земли (около 6400 км).

# Суточный параллакс

Может быть использован для измерения расстояний до объектов Солнечной системы (планет, астероидов...).

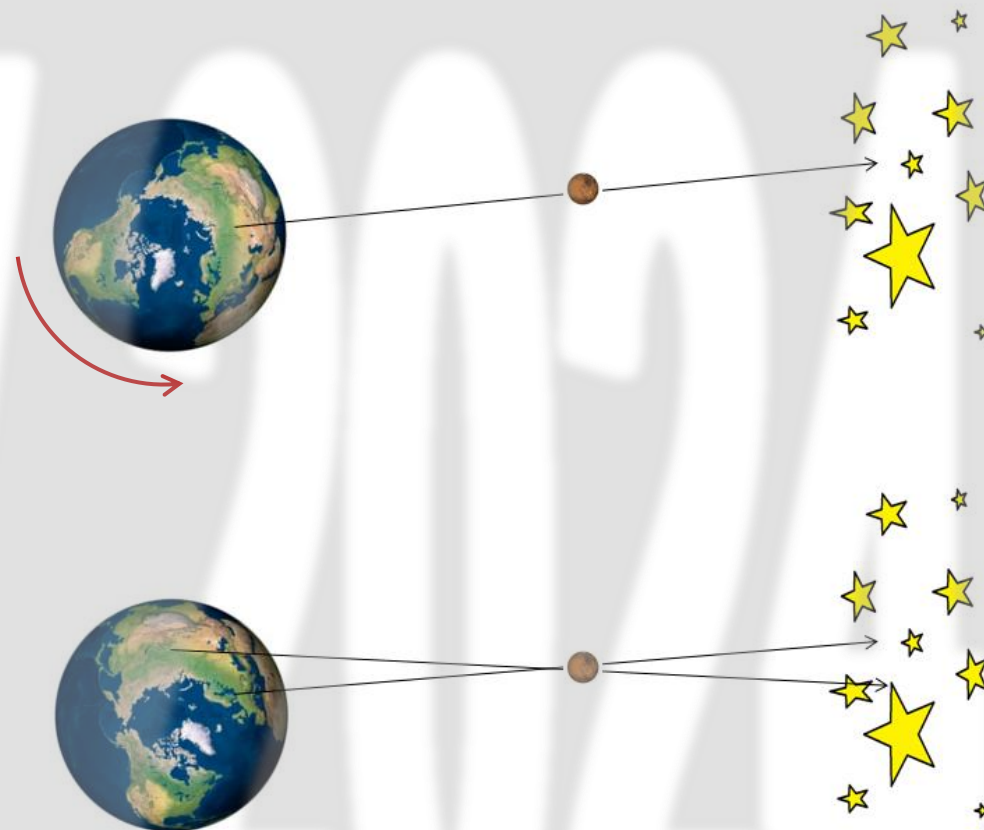
Из-за вращения Земли вокруг своей оси положение наблюдателя относительно центра Земли и, соответственно, параллактический угол циклически изменяются.

При этом меняется только прямое восхождение объекта.

Оценка масштаба величины:

$$p \simeq \frac{R_{\oplus}}{1 \text{ au}} \simeq \frac{6400 \cdot 206265}{150000000} \simeq 8.8''$$

Угловое смещение  $\sim 1''$  измерить не сложно. То есть даже с любительскими инструментами таким методом можно измерять расстояния масштаба  $\approx 10$  а.е.





# Измерительный пример

Астероид 216 Клеопатра.



2022.08.11

# Измерительный пример

Астероид 216 Клеопатра.



2022.08.12

# Измерительный пример

Астероид 216 Клеопатра.

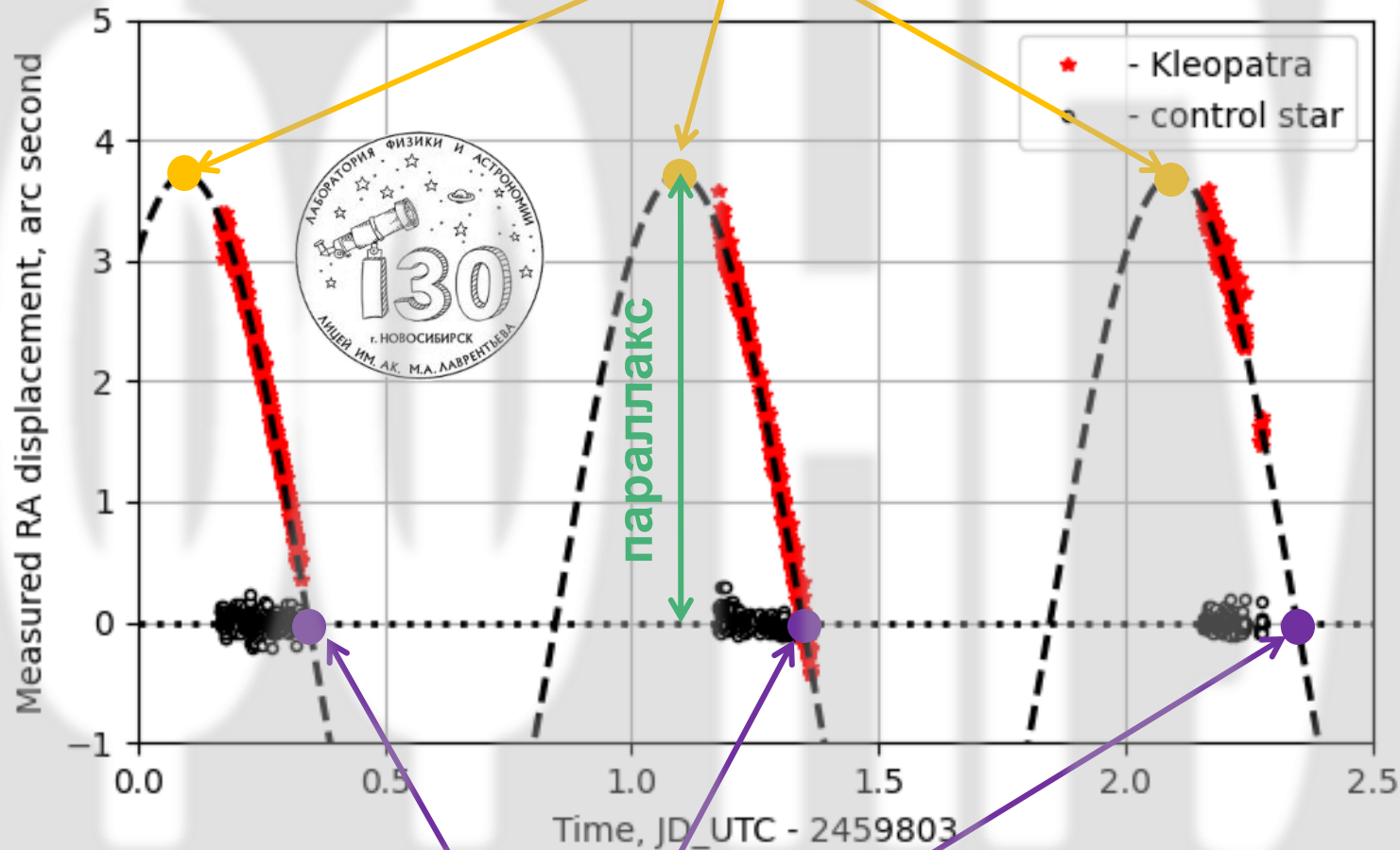


2022.08.13



# Измерительный пример

Астероид вблизи горизонта



Суточный (diurnal) параллакс  $p_d$  зависит от радиуса Земли, широты места наблюдения  $\varphi$ , склонения  $\delta$  и расстояния до объекта:

$$p_d \cos \delta = \frac{R_{\oplus} \cos \varphi}{r}$$

Для нашего примера:

$\varphi = 54^\circ.8$  – широта Новосибирска

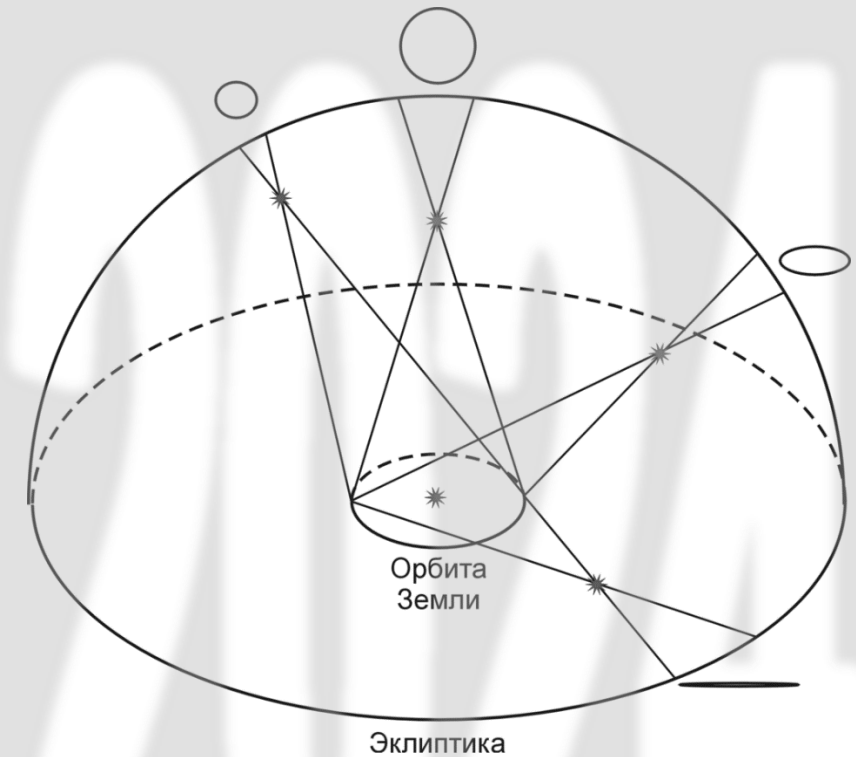
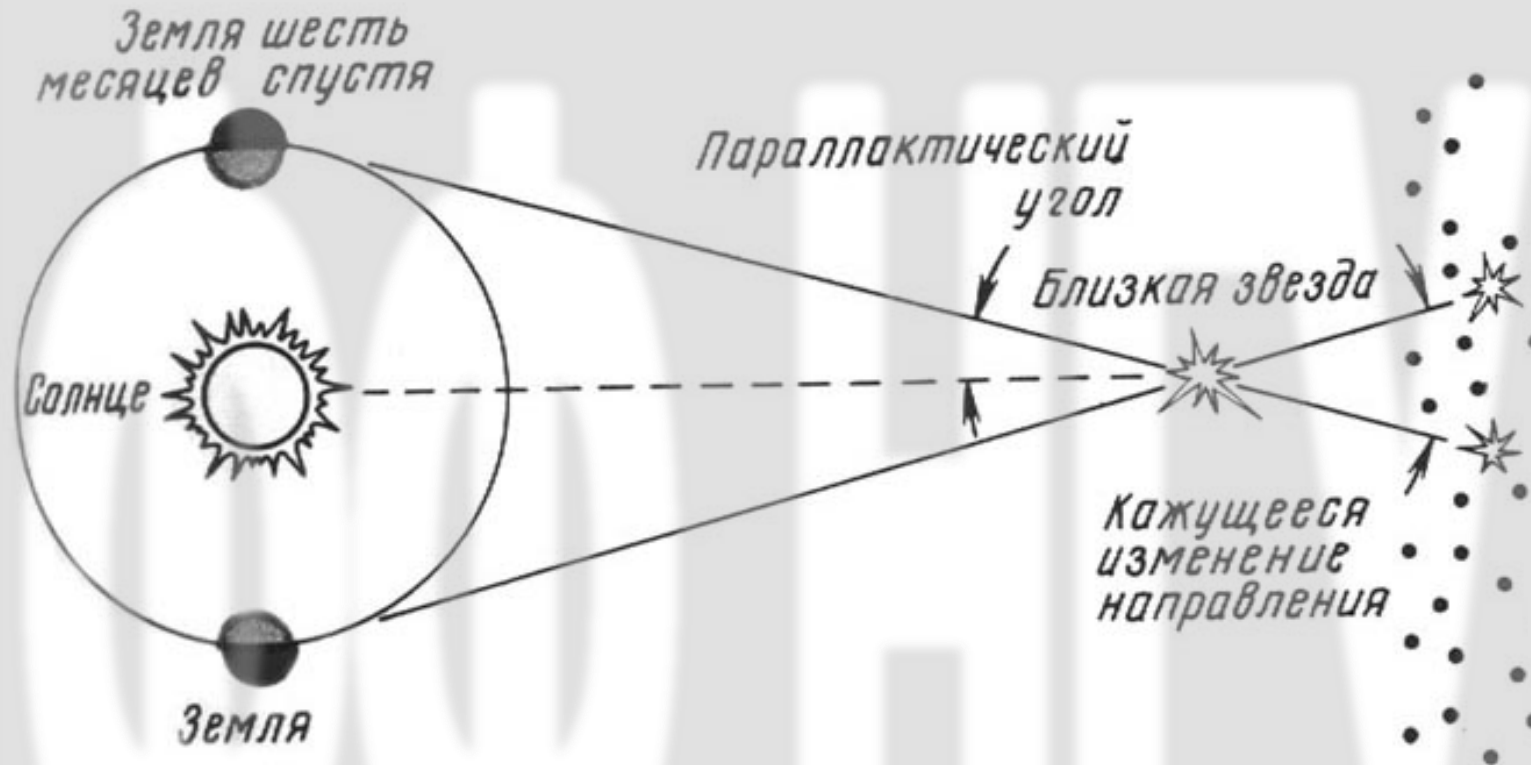
$\delta = 14^\circ.1$  – склонение астероида

$p_d = 3''.71$  – измеренный параллакс

$$r = \frac{R_{\oplus} \cos \varphi}{p_d \cos \delta} \simeq 1.413 \text{ a. e.}$$

По эфемеридам:  $r = 1.433 \text{ a. e.}$

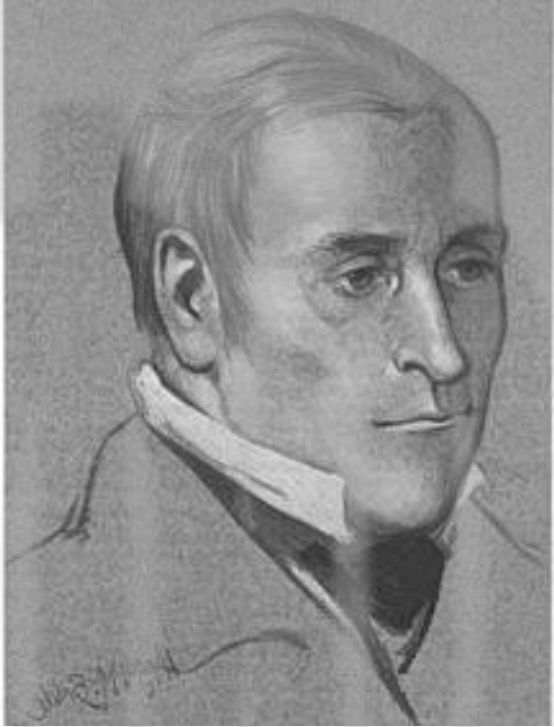
# Годичный параллакс



На практике, **КАК ПРАВИЛО**, измеряется не абсолютный (изменение координат объекта), а относительный параллакс, то есть смещение изучаемого объекта относительно далеких «неподвижных» звезд фона.

При этом траектория «движения» более близкой звезды зависит от ее положения относительно эклиптики.

# Годичный параллакс



Thomas Henderson



Friedrich Georg Struve



Friedrich Wilhelm Bessel

## Первые измерения годичного параллакса:

1832-1833: Томас Хендерсон (Шотландия),  $\alpha$  Кентавра: 1" (0.751");

1835-1836: Фридрих (Василий Яковлевич) Струве (Российская Империя),  $\alpha$  Лирь: 0.2" (0.130");

1837-1838: Фридрих Бессель (Германия), 61 Лебедя: 0.314" (0.286").

После внедрения фотографии в астрономию, к концу 1920-ых  
параллакс был измерен уже для почти 2000 звезд!



# Годичный параллакс

Размер «пятна», создаваемого изображением звезды на фото, определяется параметрами телескопа и искажениями атмосферы (подробнее на следующей лекции), и составляет  $\sim 1-3''$ .

Типичный масштаб изображения  $\sim 0.5-1''/\text{пиксел}$ . Таким образом «изображение» звезды «размазано» на круг радиусом 5-10 пикселей.

При этом величина параллакса даже для ближайших звезд  $\sim 0.5''$ , то есть изменение положения в течение года  $< 1$  пиксела!

Таким образом, для того чтобы измерить параллакс звезды, необходимо определить положение пятна диаметром  $\sim 15$  пикселей с точностью  $\sim 0.05$  пиксела!

# Измерительный пример: «Летящая» звезда Барнарда



# Измерительный пример: «Летящая» звезда Барнарда

| #   | Дата  |     |     | JD            | Пр. восх. α |   |        | Склонение δ   |   |   | Пр. восх. α |   |        | Склонение δ   |   |   | Точность |        |
|-----|-------|-----|-----|---------------|-------------|---|--------|---------------|---|---|-------------|---|--------|---------------|---|---|----------|--------|
|     |       |     |     |               | h           | m | s      | °             | ' | ″ | h           | m | s      | °             | ' | ″ | α        | δ      |
| 1;  | 2021; | 06; | 08; | 2459373.2588; | 17:57:47    |   | .3590; | 4:45:18.4531; |   |   | 17:57:24    |   | .4046; | 4:36:09.8910; |   |   | 0.024;   | 0.031; |
| 2;  | 2021; | 08; | 27; | 2459454.1799; | 17:57:47    |   | .3028; | 4:45:20.6260; |   |   | 17:57:24    |   | .4049; | 4:36:09.9117; |   |   | 0.023;   | 0.034; |
| 3;  | 2021; | 09; | 28; | 2459485.1009; | 17:57:47    |   | .2954; | 4:45:21.3578; |   |   | 17:57:24    |   | .4054; | 4:36:09.9024; |   |   | 0.022;   | 0.025; |
| 4;  | 2021; | 10; | 16; | 2459503.0788; | 17:57:47    |   | .2956; | 4:45:21.7774; |   |   | 17:57:24    |   | .4053; | 4:36:09.8988; |   |   | 0.024;   | 0.032; |
| 5;  | 2021; | 11; | 10; | 2459528.0386; | 17:57:47    |   | .3008; | 4:45:22.4083; |   |   | 17:57:24    |   | .4064; | 4:36:09.9078; |   |   | 0.025;   | 0.039; |
| 6;  | 2022; | 03; | 03; | 2459641.4339; | 17:57:47    |   | .3454; | 4:45:25.6919; |   |   | 17:57:24    |   | .4034; | 4:36:09.9308; |   |   | 0.029;   | 0.030; |
| 7;  | 2022; | 03; | 28; | 2459665.4168; | 17:57:47    |   | .3439; | 4:45:26.5062; |   |   | 17:57:24    |   | .4052; | 4:36:09.9118; |   |   | 0.023;   | 0.026; |
| 8;  | 2022; | 04; | 07; | 2459676.3470; | 17:57:47    |   | .3415; | 4:45:26.8594; |   |   | 17:57:24    |   | .4052; | 4:36:09.9178; |   |   | 0.022;   | 0.035; |
| 9;  | 2022; | 04; | 27; | 2459696.3695; | 17:57:47    |   | .3323; | 4:45:27.4844; |   |   | 17:57:24    |   | .4044; | 4:36:09.9237; |   |   | 0.023;   | 0.029; |
| 10; | 2022; | 05; | 01; | 2459700.3294; | 17:57:47    |   | .3300; | 4:45:27.6089; |   |   | 17:57:24    |   | .4045; | 4:36:09.9311; |   |   | 0.025;   | 0.025; |
| 11; | 2022; | 05; | 11; | 2459710.3114; | 17:57:47    |   | .3237; | 4:45:27.9421; |   |   | 17:57:24    |   | .4049; | 4:36:09.9242; |   |   | 0.021;   | 0.027; |
| 12; | 2022; | 05; | 20; | 2459719.3413; | 17:57:47    |   | .3175; | 4:45:28.2530; |   |   | 17:57:24    |   | .4051; | 4:36:09.9252; |   |   | 0.023;   | 0.024; |
| 13; | 2022; | 05; | 24; | 2459723.3489; | 17:57:47    |   | .3156; | 4:45:28.3456; |   |   | 17:57:24    |   | .4040; | 4:36:09.9013; |   |   | 0.021;   | 0.030; |
| 14; | 2022; | 06; | 04; | 2459734.3077; | 17:57:47    |   | .3067; | 4:45:28.7038; |   |   | 17:57:24    |   | .4054; | 4:36:09.9274; |   |   | 0.020;   | 0.025; |
| 15; | 2022; | 06; | 24; | 2459754.2456; | 17:57:47    |   | .2915; | 4:45:29.2575; |   |   | 17:57:24    |   | .4045; | 4:36:09.9076; |   |   | 0.025;   | 0.027; |
| 16; | 2022; | 07; | 09; | 2459769.2334; | 17:57:47    |   | .2806; | 4:45:29.6854; |   |   | 17:57:24    |   | .4053; | 4:36:09.9132; |   |   | 0.026;   | 0.021; |
| 17; | 2022; | 07; | 29; | 2459789.1970; | 17:57:47    |   | .2646; | 4:45:30.2534; |   |   | 17:57:24    |   | .4054; | 4:36:09.9174; |   |   | 0.027;   | 0.024; |
| 18; | 2022; | 08; | 24; | 2459816.1290; | 17:57:47    |   | .2513; | 4:45:30.8880; |   |   | 17:57:24    |   | .4058; | 4:36:09.9127; |   |   | 0.027;   | 0.024; |
| 19; | 2022; | 10; | 03; | 2459856.1057; | 17:57:47    |   | .2412; | 4:45:31.8029; |   |   | 17:57:24    |   | .4050; | 4:36:09.9236; |   |   | 0.027;   | 0.024; |

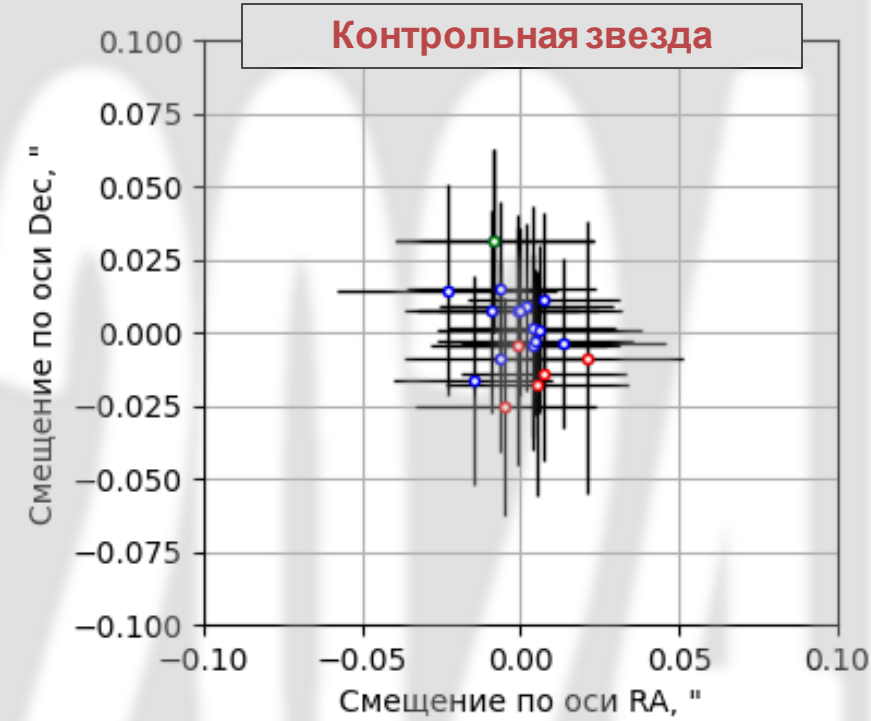
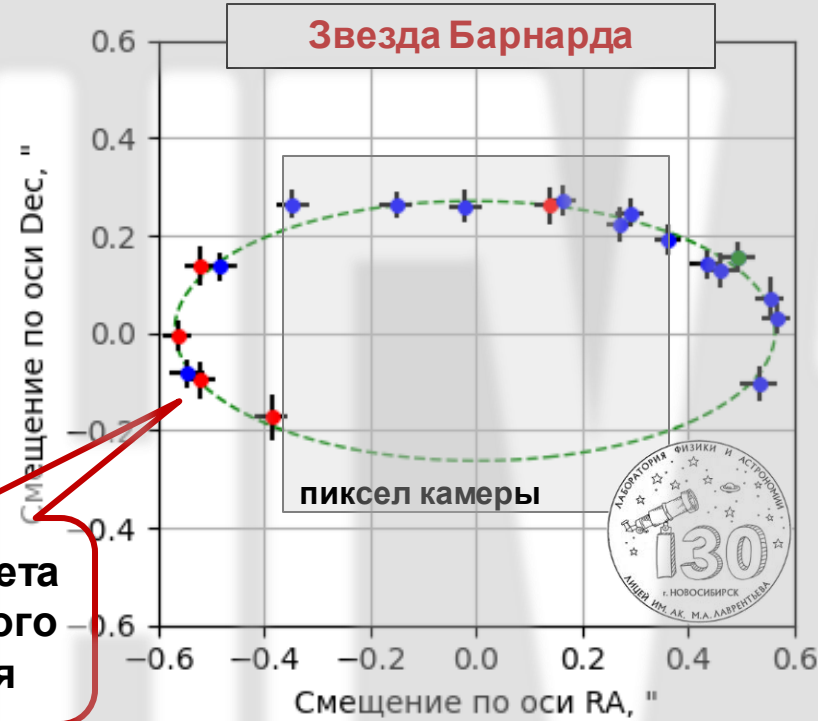
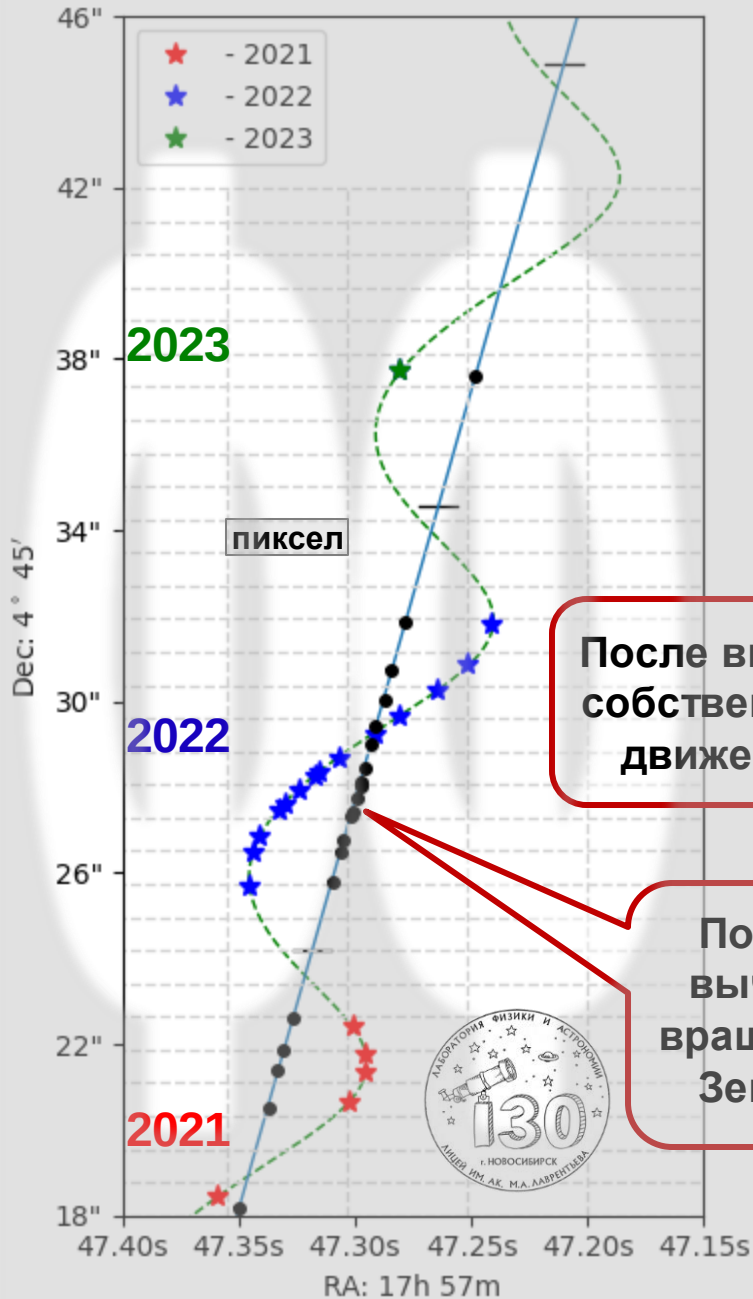
Звезда Барнарда

Контрольная звезда



# «Летающая» звезда Барнарда

Видимое движение звезды Barnard



$$V_{\alpha} = -813 \pm 12 \text{ уг. мсек./год}$$
$$V_{\delta} = 10358 \pm 12 \text{ уг. мсек./год}$$
$$p = 565 \pm 17 \text{ уг. мсек}$$

Измерения спутника GAIA:

$$V_{\alpha} = -801.55 \pm 0.03 \text{ mas/yr}$$

$$V_{\delta} = 10362.39 \pm 0.04 \text{ mas/yr}$$

$$p = 546.98 \pm 0.04 \text{ mas}$$

Точность измерений в ~400 раз выше!!!

# Миссия HIPPARCOS (ESA)

**H**igh  
**P**recision  
**PAR**allax  
**C**ollecting  
**S**atellite

Диаметр телескопа: 29 см

Первый орбитальный телескоп для высокоточной астрометрии. Запущен на орбиту в 1989 году. Завершил работу в 1993 году.

Каталог 118,200 звезд (HIP 12345).

Каталог 2,500,000 звезд (TYC 12345).

Достигнутая точность 0.7 – 1.0 mas

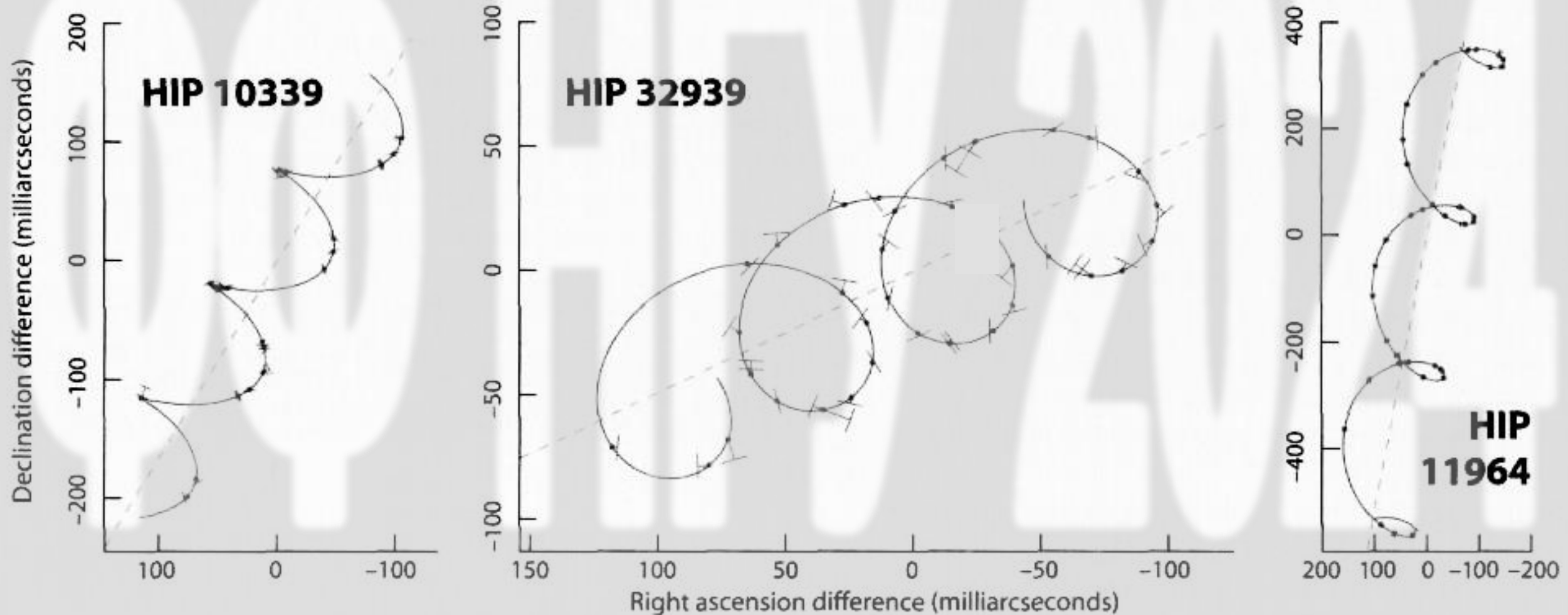


Фотон 2024



# Миссия HIPPARCOS (ESA)

Видимый путь звезд в течение трех лет по измерениям спутника HIPPARCOS. Видимая траектория звезды является комбинацией ее собственного движения (прямая линия) и параллакса (эллипс).





# Миссия GAIA (ESA)

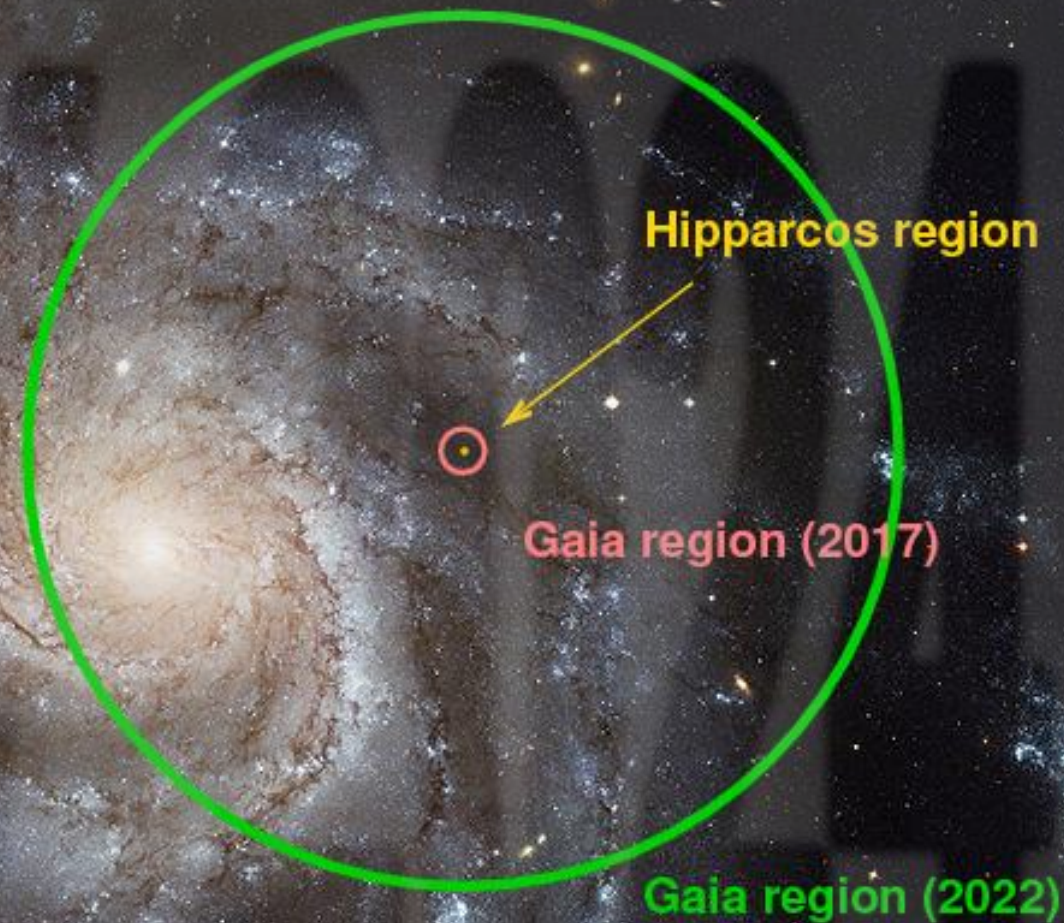
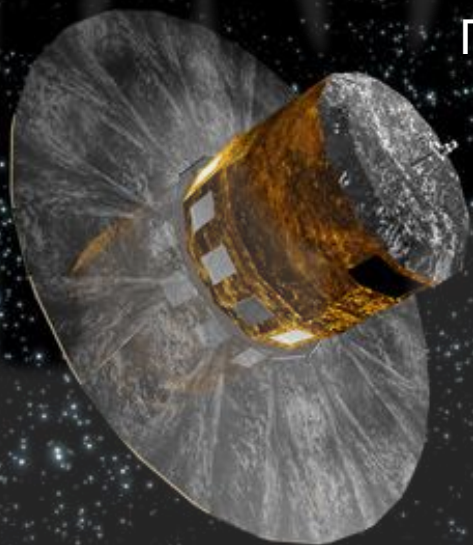
40,000 pc

**G**lobal  
**A**strometric  
**I**nterferometer for  
**A**strophysics



Запущен на орбиту в 2013 году.  
Союз 2-1В из Фр. Гвианы.  
Точка Лагранжа L2.

Главное зеркало 1.45x0.5 м.



Астрометрия 2,000,000,000 звезд для составления 3D карты нашей Галактики, измерение расстояний и движения звезд, изучения эволюции Галактики...

**Достигнутая точность 20 – 200  $\mu$ as !!!**