

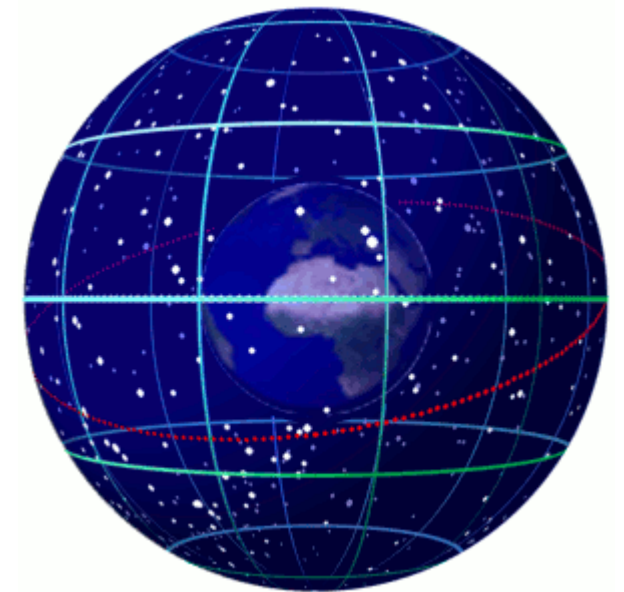
ЛЕКЦИЯ 2: АСТРОМЕТРИЯ

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВШЭ 2022/2023. БАКАЛАВРЫ, 4-Й МОДУЛЬ.

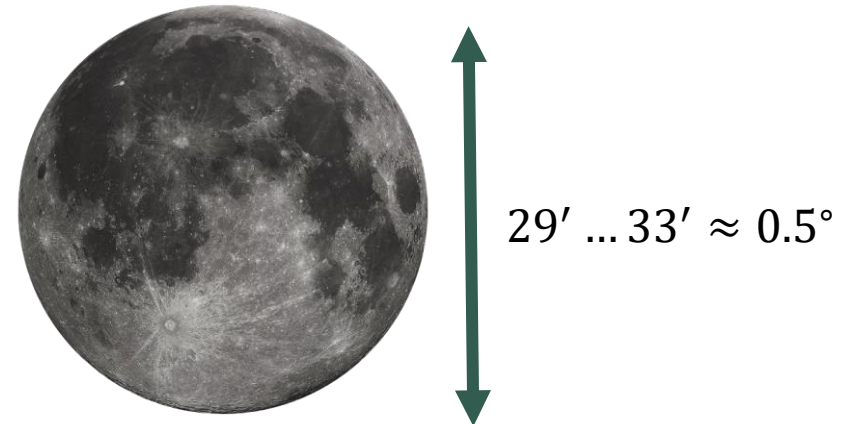
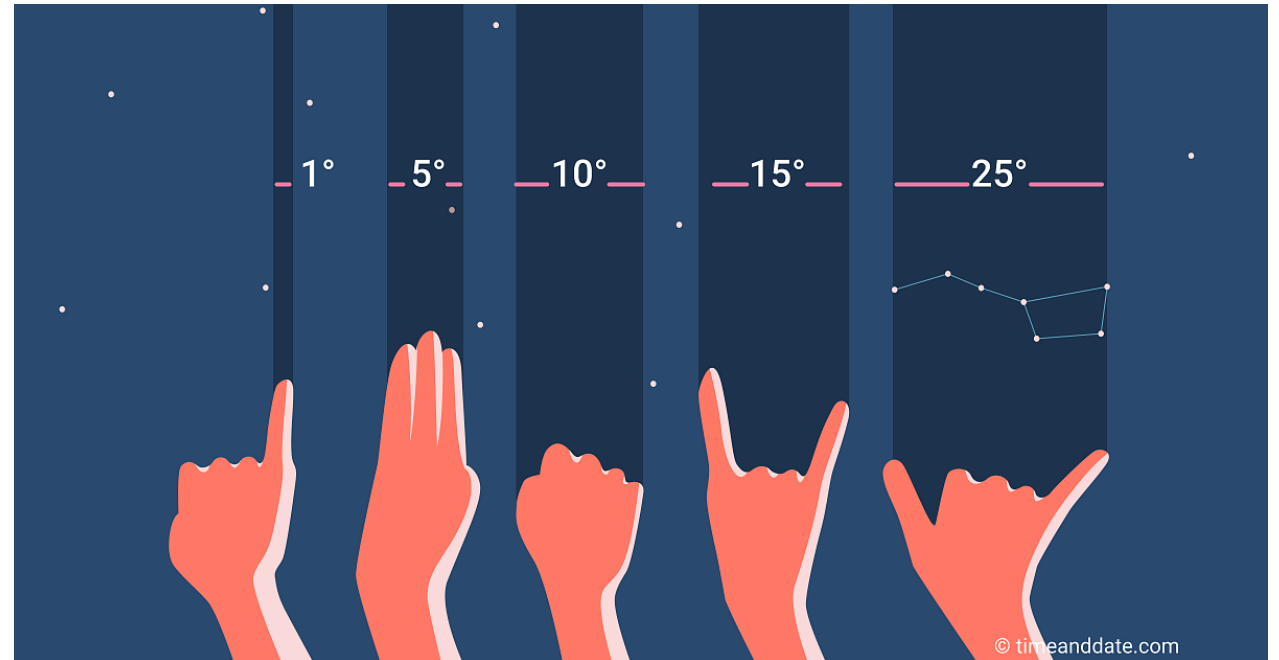
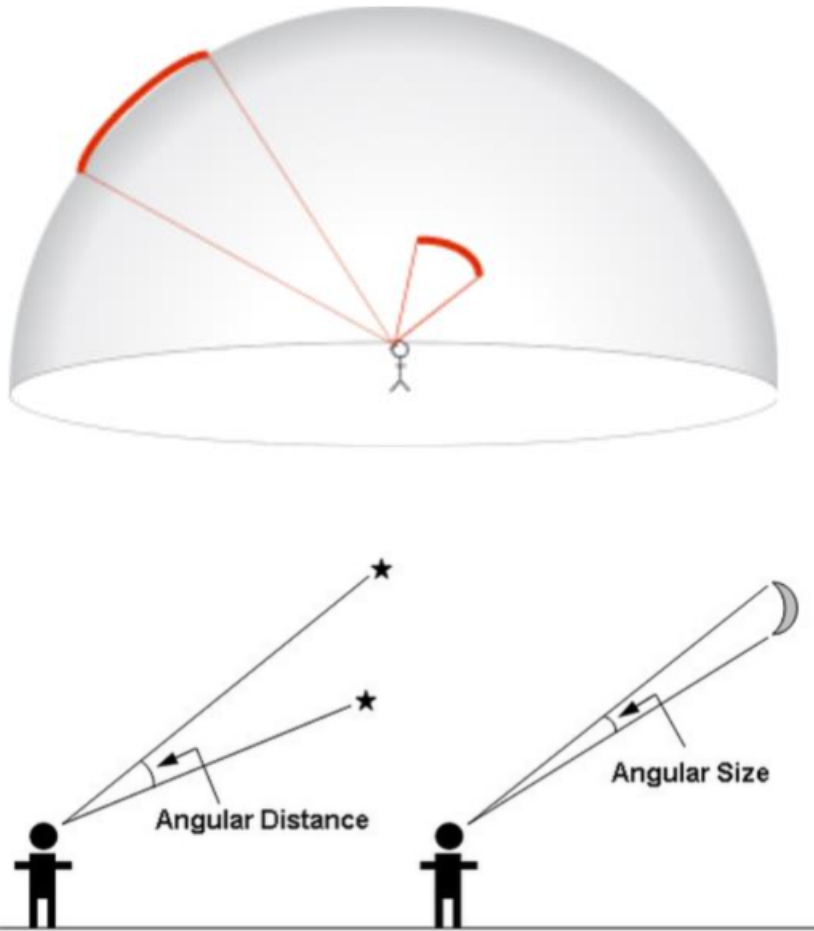
АНТОН БИРЮКОВ (АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА И ВШЭ), К.Ф.-М.Н

АСТРОМЕТРИЯ

- **Астрометрия** – набор методов задания и измерения координат небесного тела относительно наблюдателя. А также скорости изменения этих координат (то есть относительной скорости движения небесного тела).
- Чаще всего имеются ввиду просто координаты *на небесной сфере*, то есть два угла, задающих направление на небесное тело относительно начала координат. Но в общем случае используются трёхмерные системы координат.
- **Небесная сфера** – это сфера произвольного радиуса, на поверхность которой спроецированы изображения всех источников.
- Психологически она возникает потому, что мозг не может оценить расстояние до небесных объектов, поэтому располагает всех их на «одинаковом расстоянии».

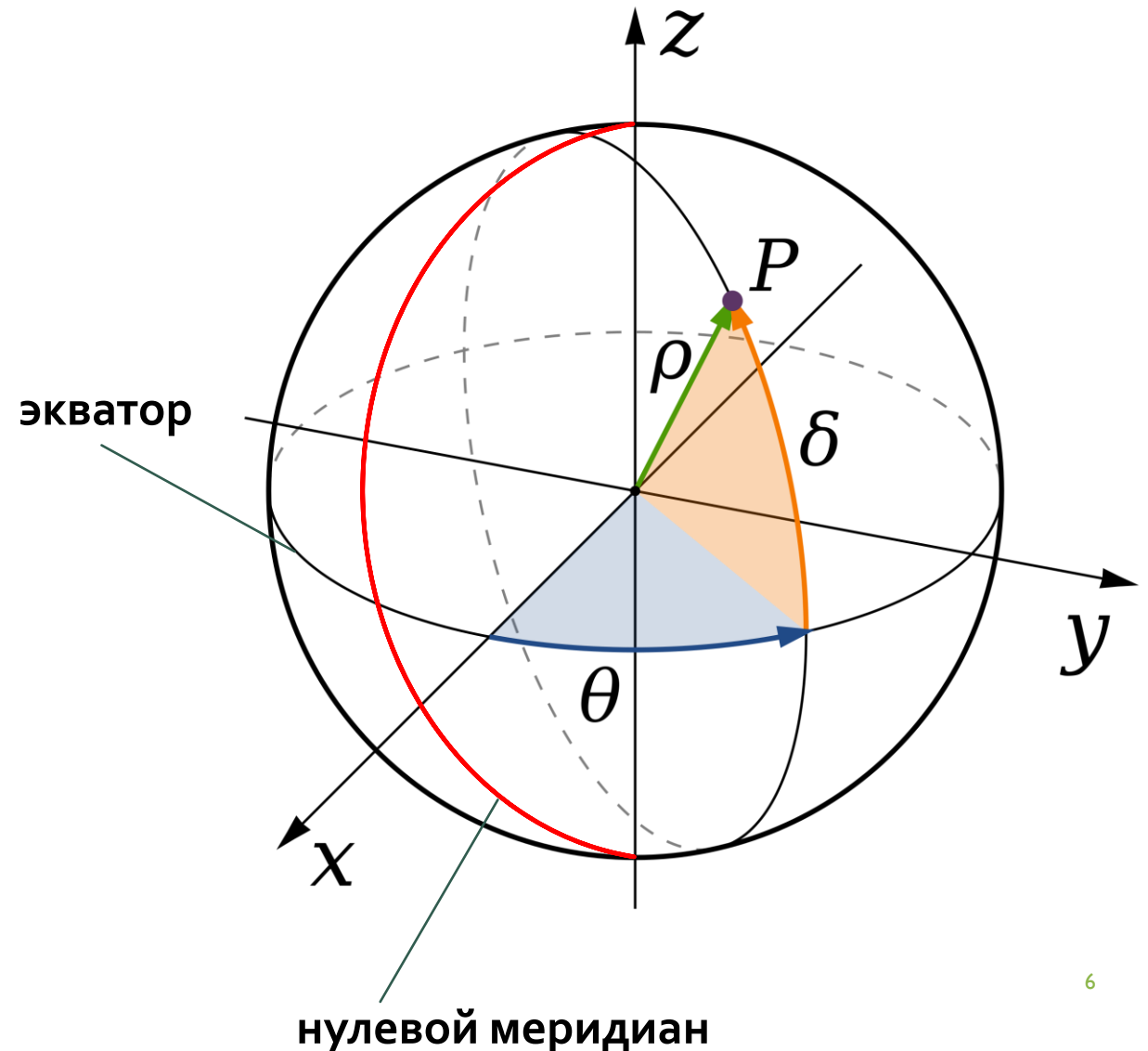


УГЛОВОЙ РАЗМЕР И УГЛОВОЕ РАССТОЯНИЕ



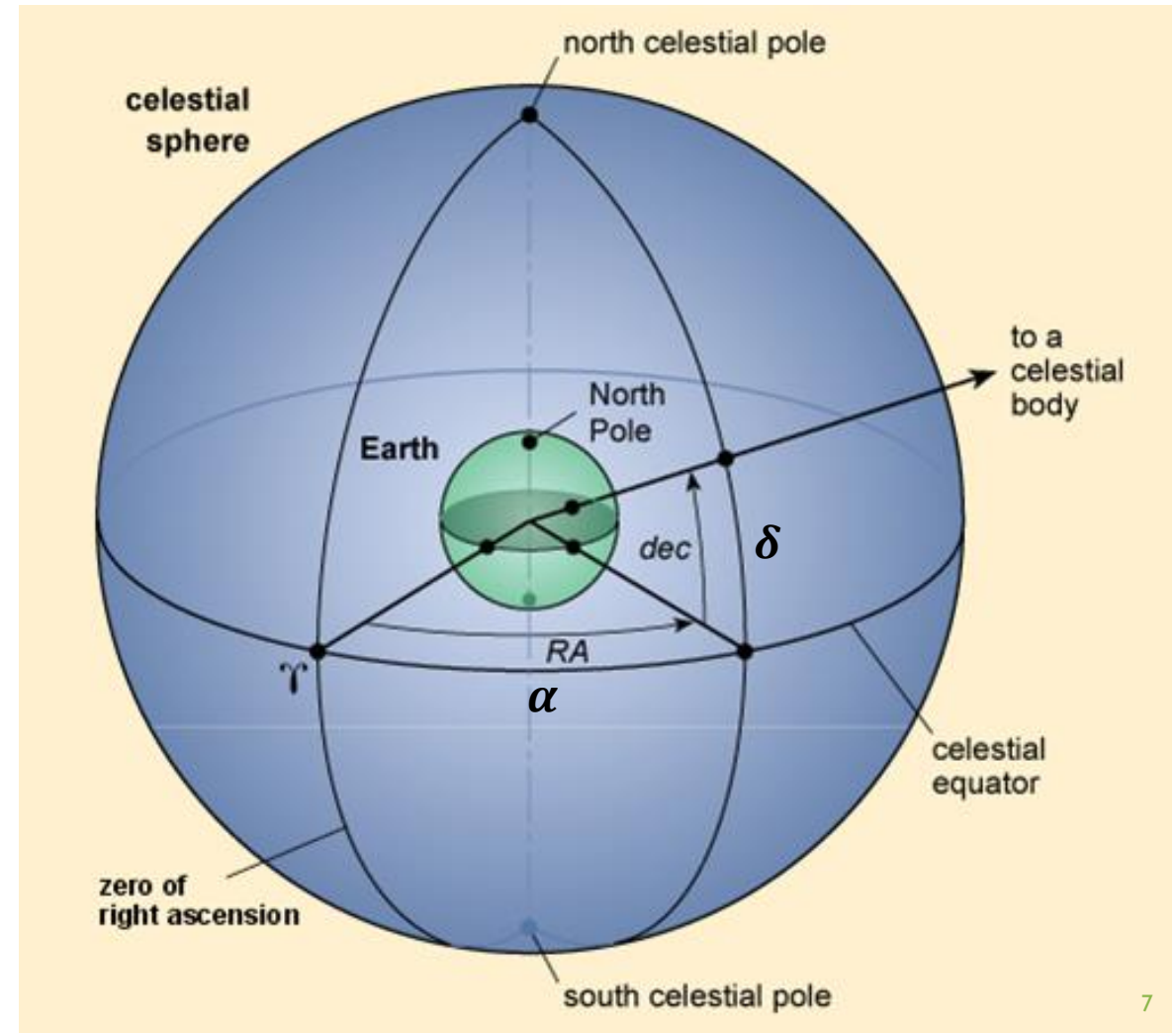
СФЕРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ

- Для задания координат на сфере необходимо задать плоскость «экватора» и плоскость «нулевого меридиана».
- В астрономии используются несколько сферических координатных систем. Они отличаются разным выбором этих двух основных плоскостей.
- Очевидно, эти системы могут быть сведены друг к другу при помощи соответствующего трёхмерного поворота.

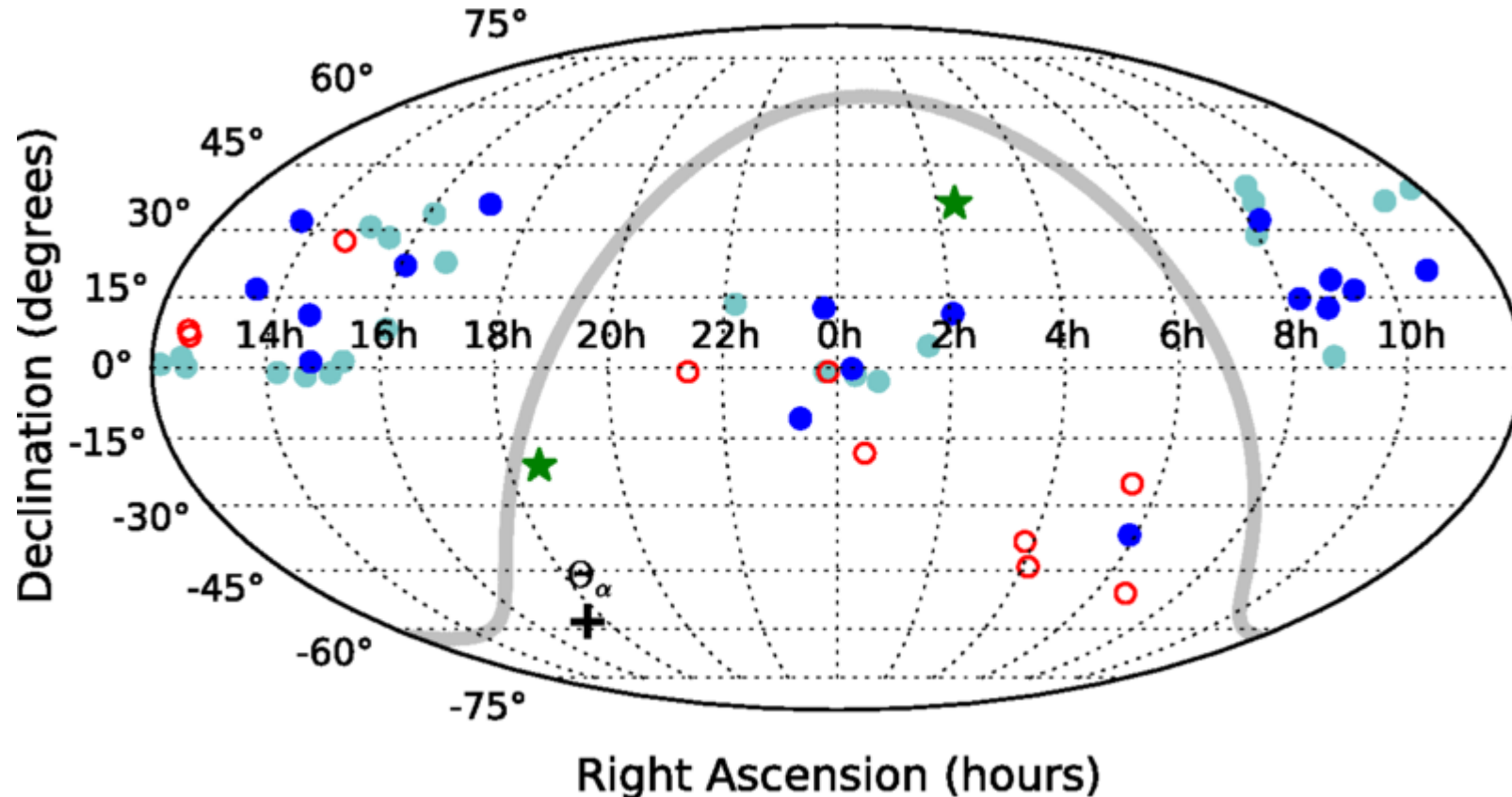


ЭКВАТОРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ

- Базовая плоскость – плоскость земного экватора (продолженная до пересечения с небесной сферой)
- Нулевой меридиан зафиксирован относительно звёзд. То есть эта система координат не вращается вместе с Землёй: она квази-инерциальна.
- Координаты: **склонение δ** (как широта) и **прямое восхождение α** (как долгота).



ЭКВАТОРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ



Склонение отсчитывается в **градусах**: от 0 на экваторе до +90 к северному полюсу мира и до -90 к южному.

Прямое восхождение отсчитывается в **часах** от 0 до 24 с запада на восток.

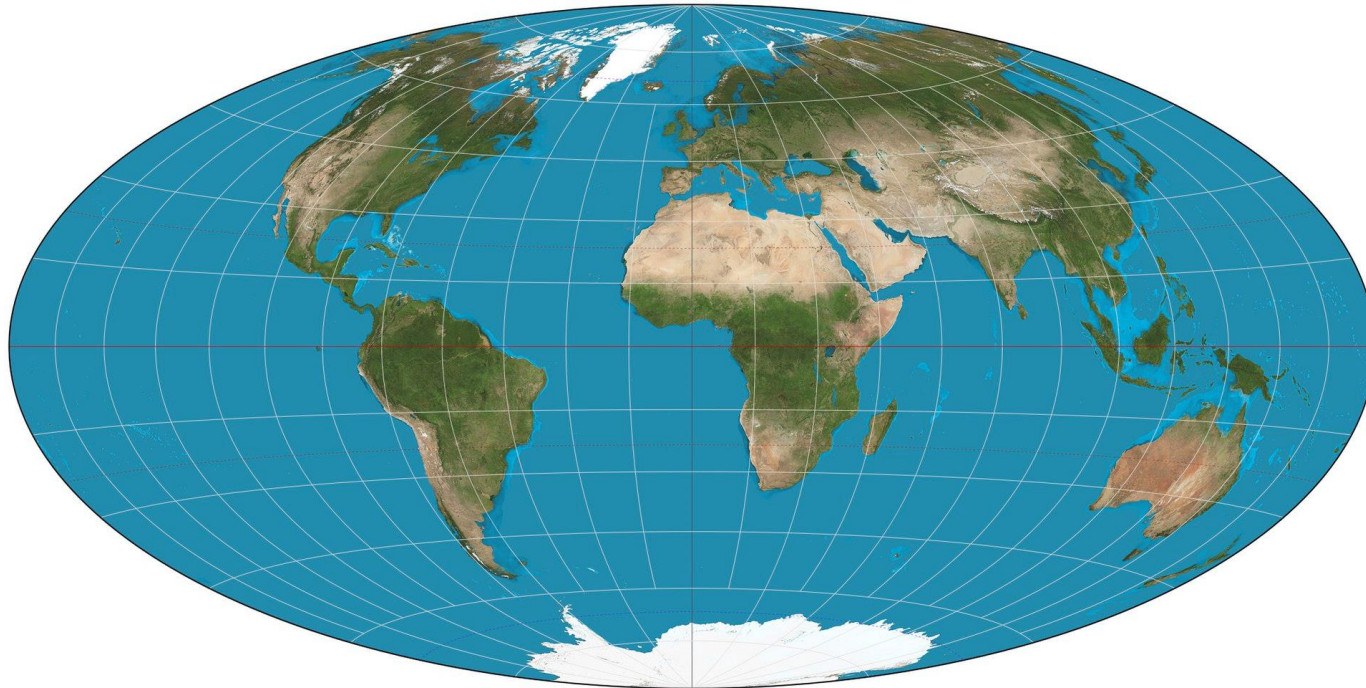
Пример:

$$\alpha = 8^{\text{h}}23^{\text{m}}44.332^{\text{s}} \approx 8.395648^{\text{h}}$$
$$\delta = -44^{\circ}32'09.12'' \approx -44.53587^{\circ}$$

Связь градусной и часовой меры угла:

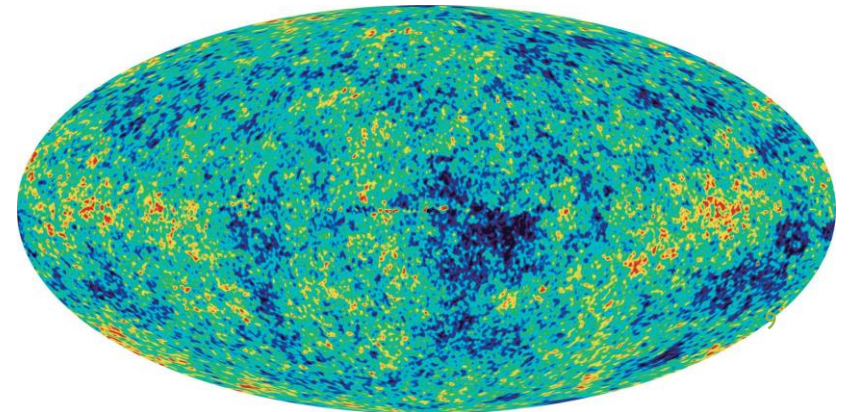
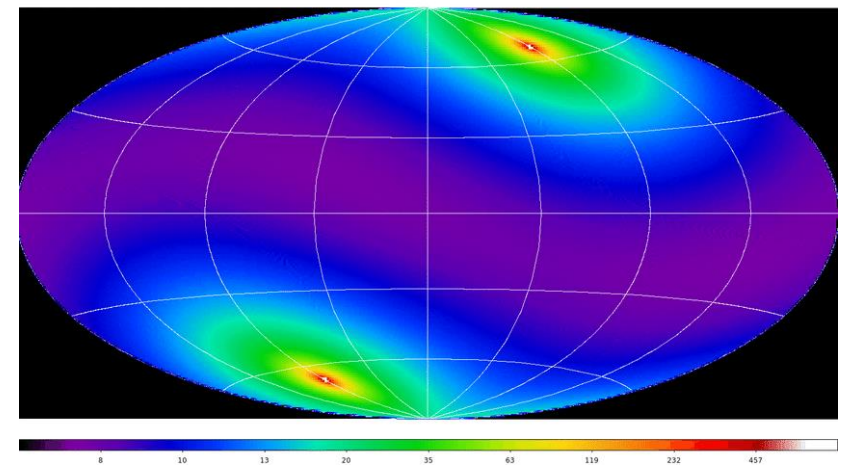
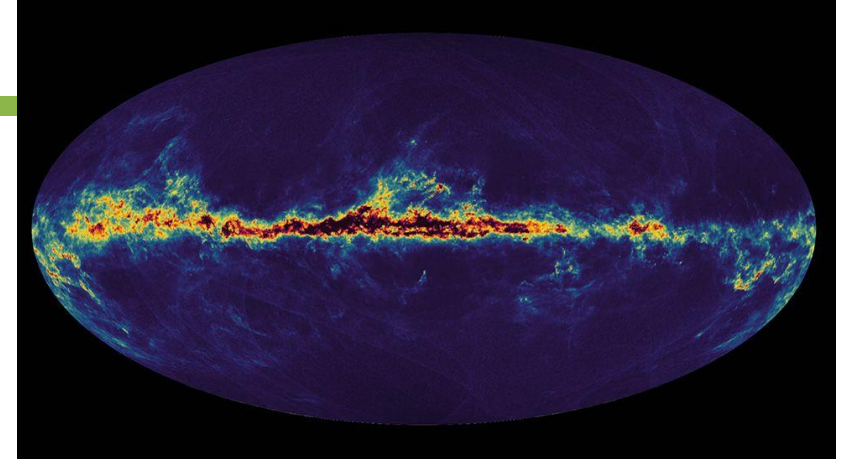
$$\begin{aligned} 1^{\text{h}} &= 15^{\circ} & 1^{\circ} &\rightarrow 4^{\text{m}} \\ 1^{\text{m}} &= 15' & 1' &\rightarrow 4^{\text{s}} \\ 1^{\text{s}} &= 15'' \end{aligned}$$

ПРОЕКЦИЯ ХАММЕРА(-АИТОВА)

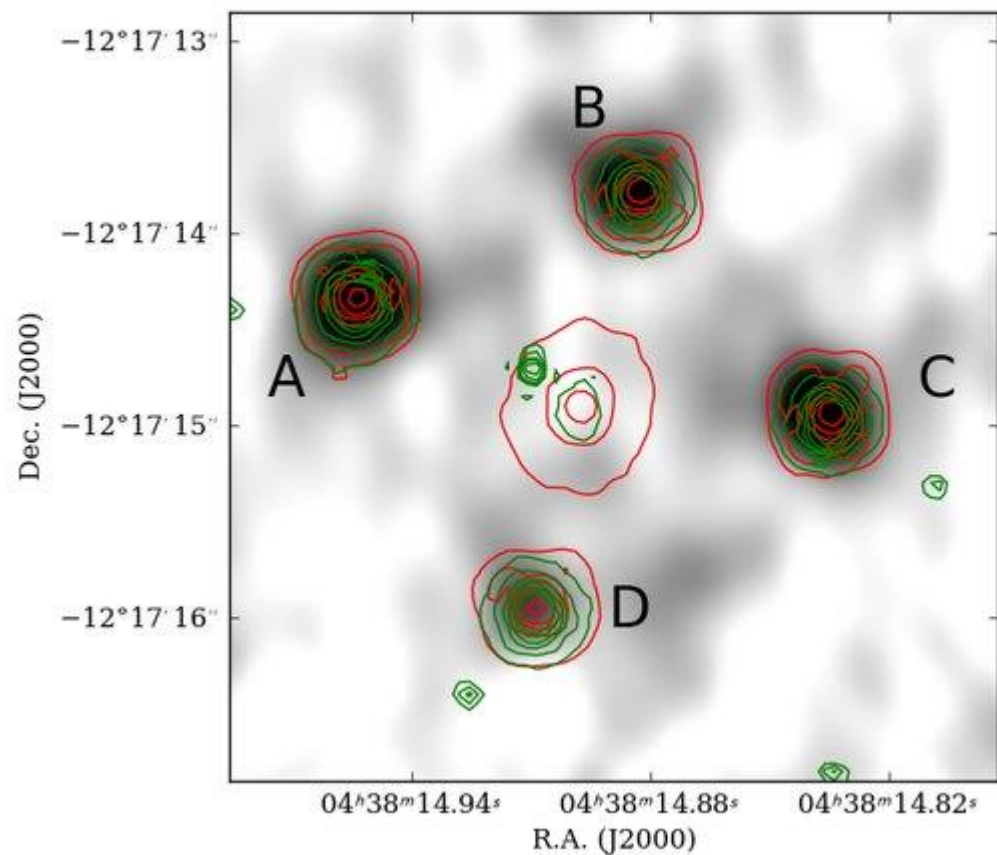


Псевдоцилиндрическая равновеликая проекция. Используется в представлении астрономических данных, пожалуй, чаще всего.

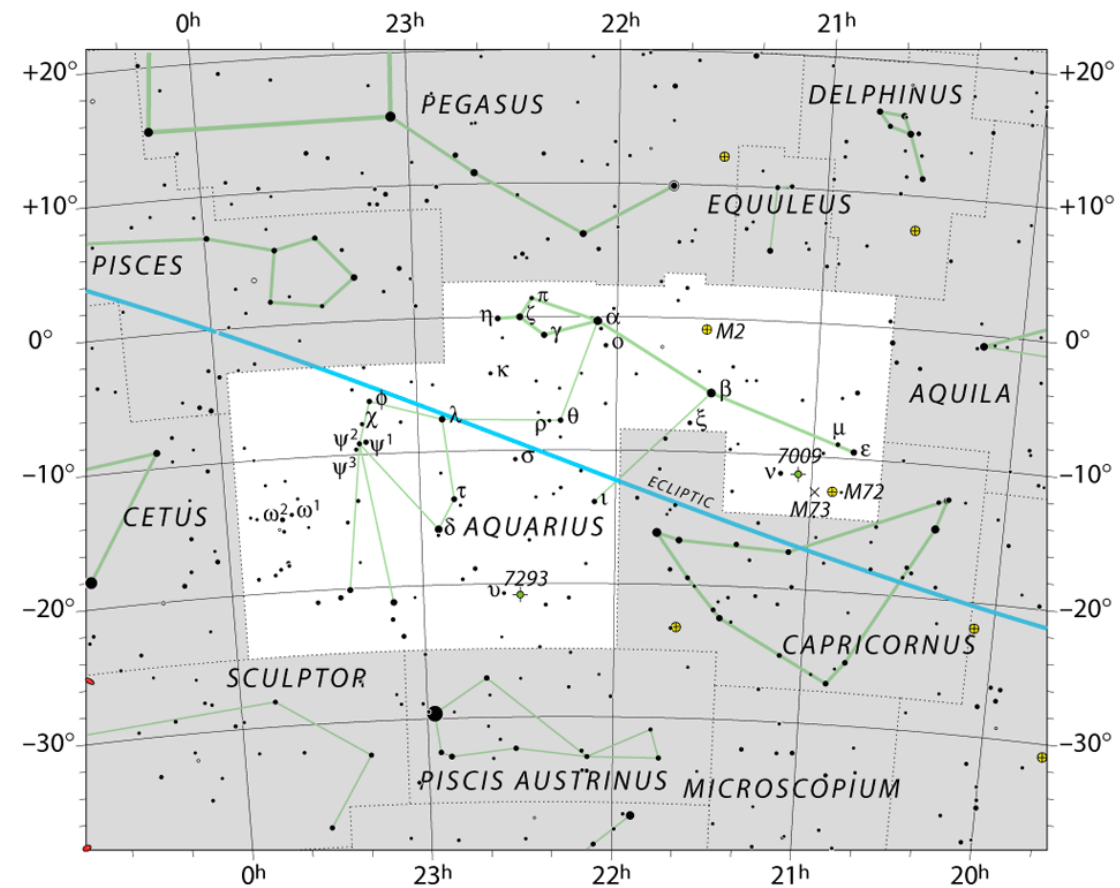
ЛЕКЦИЯ 2: АСТРОМЕТРИЯ



КАРТЫ НЕБА



arXiv:1508.05842



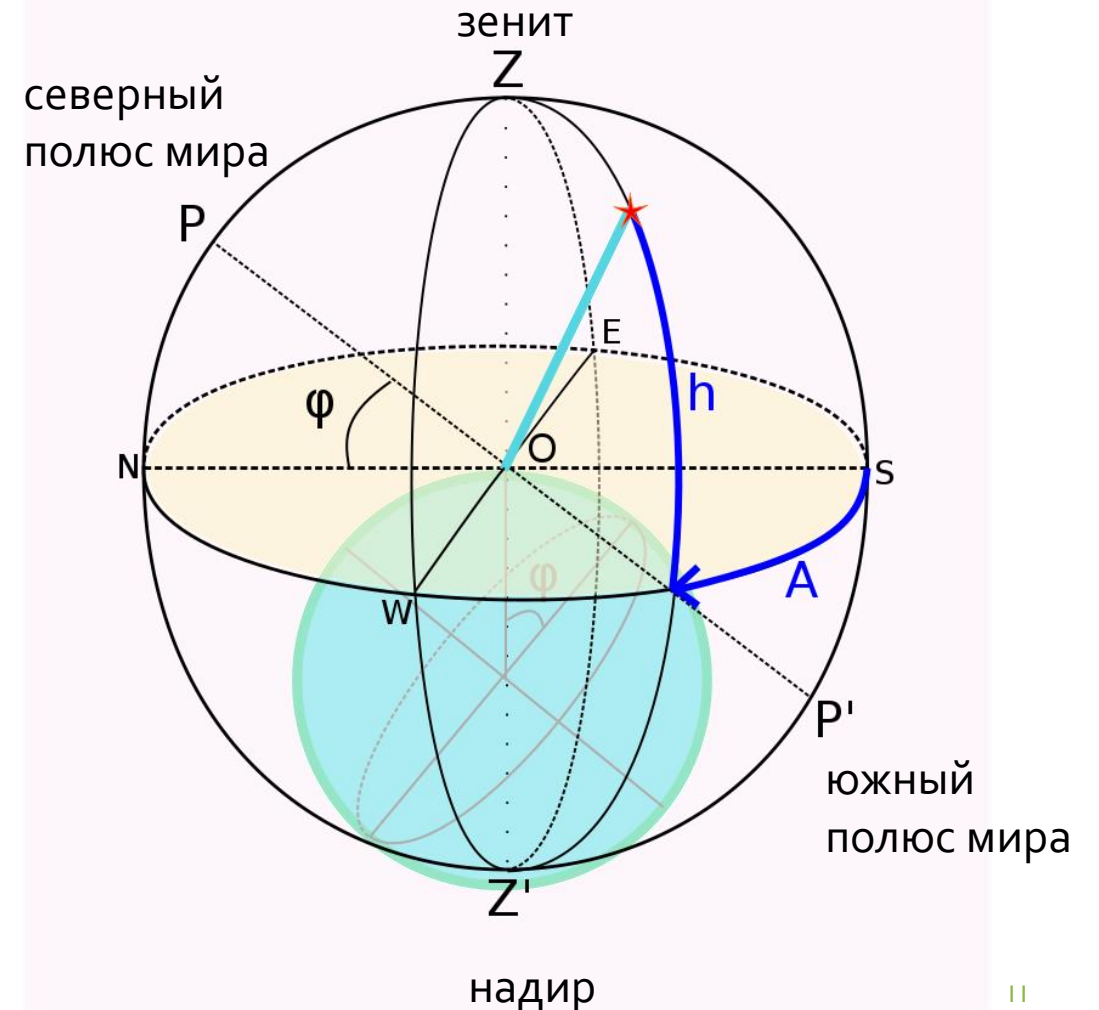
● 1 ● 2 ● 3 ● 4 ● 5 ● 6



www.iau.org

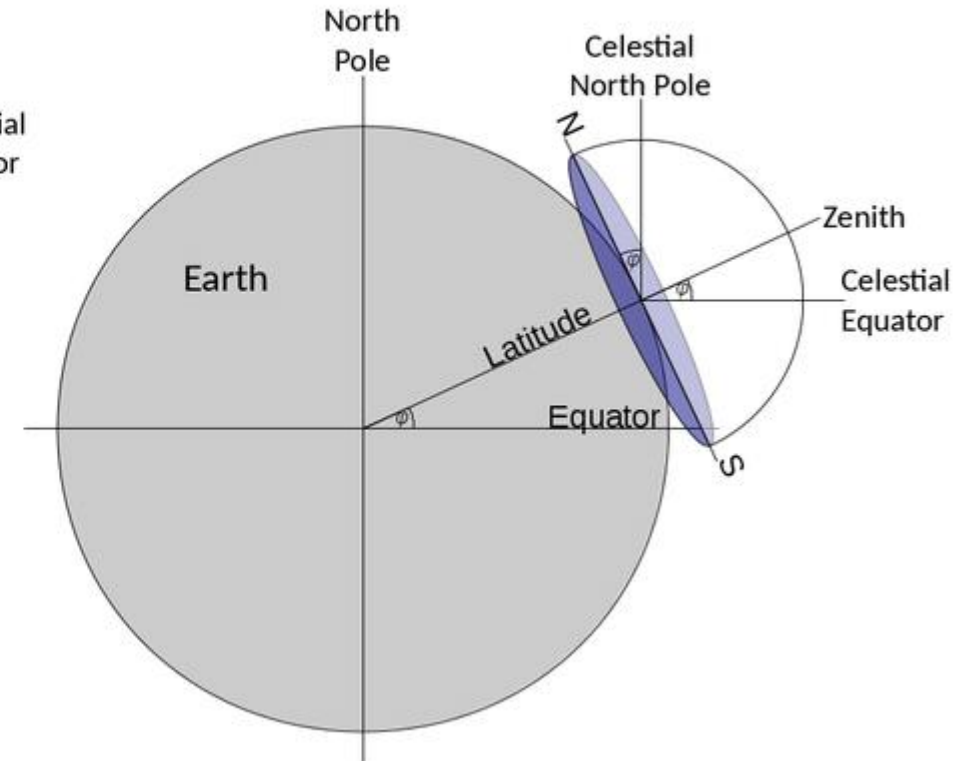
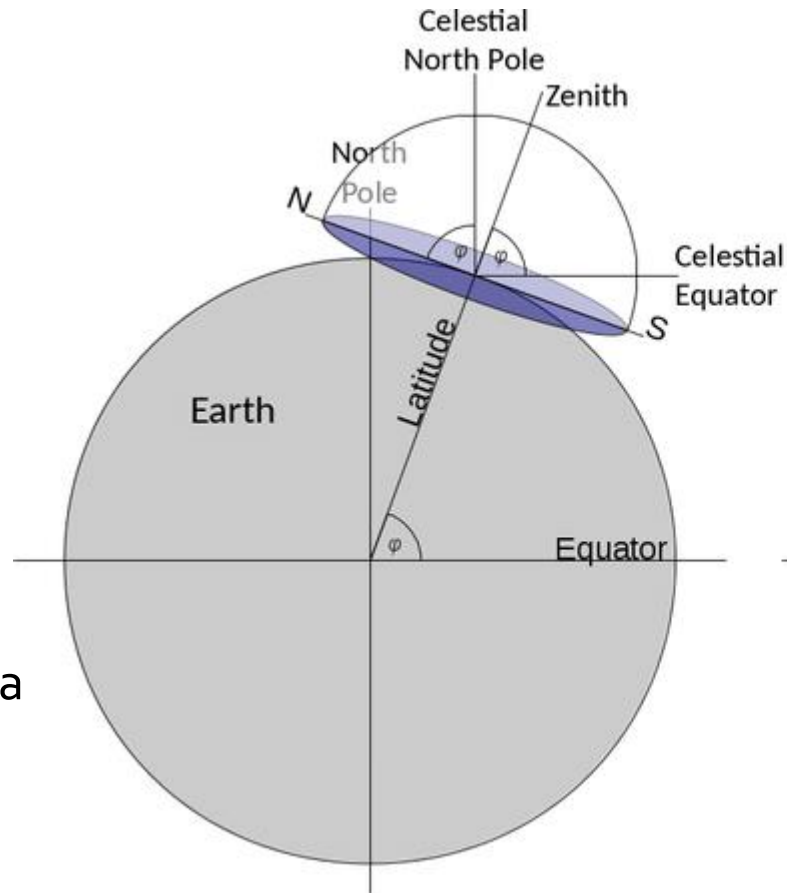
ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ

- Базовая плоскость – плоскость горизонта для конкретного наблюдателя.
- Нулевой меридиан проходит через точки юга (S) и севера (N) на горизонте. Он называется **небесным меридианом**.
- Координаты: **высота h** и **азимут A** . Они измеряются в градусах.
- Астрономический азимут отсчитывается от точки юга (S) в направлении запада (W).

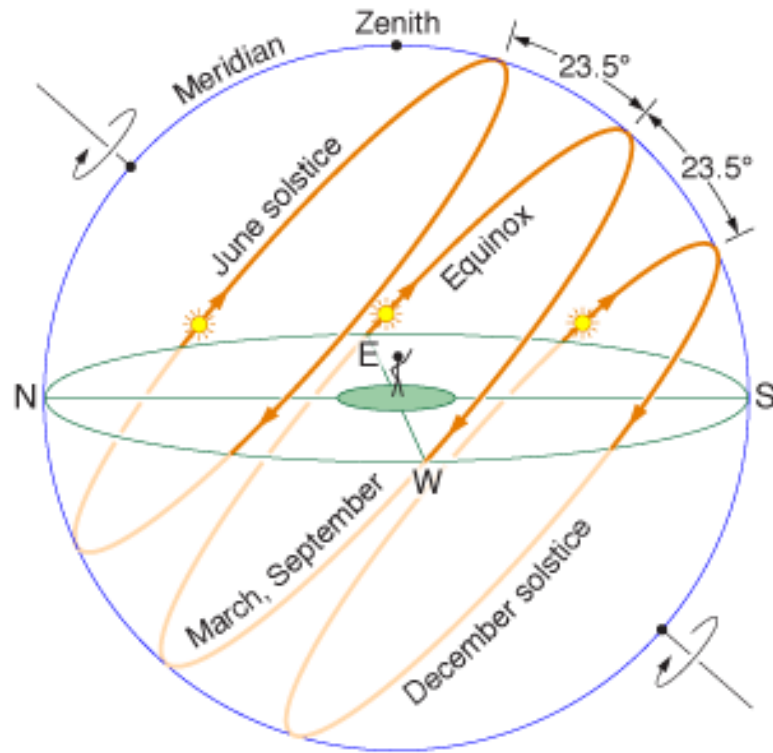


ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ

- Плоскость горизонта – касательная к Земле в данной точке.
- Отвесная линия (направление на зенит) проходит через центр Земли.
- Высота северного полюса мира над горизонтом равна широте места наблюдения: $h_p = \varphi$

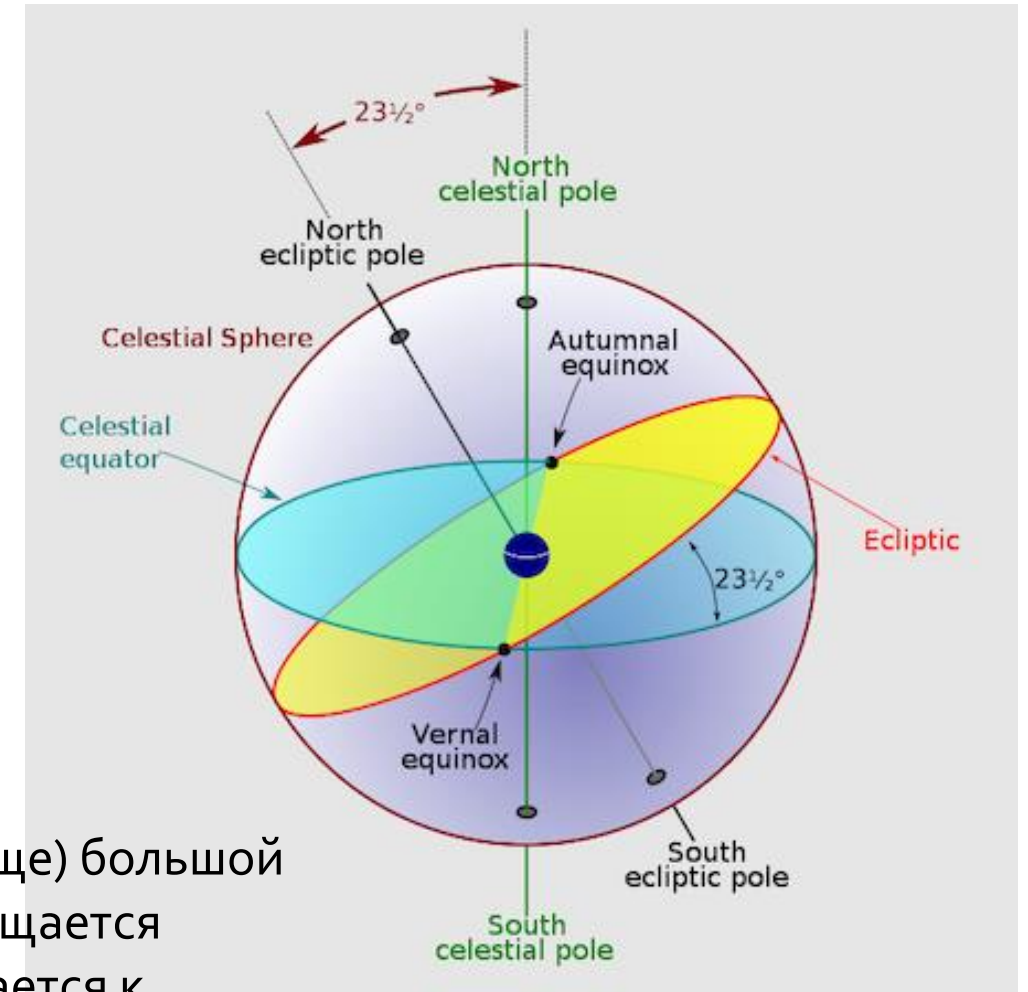
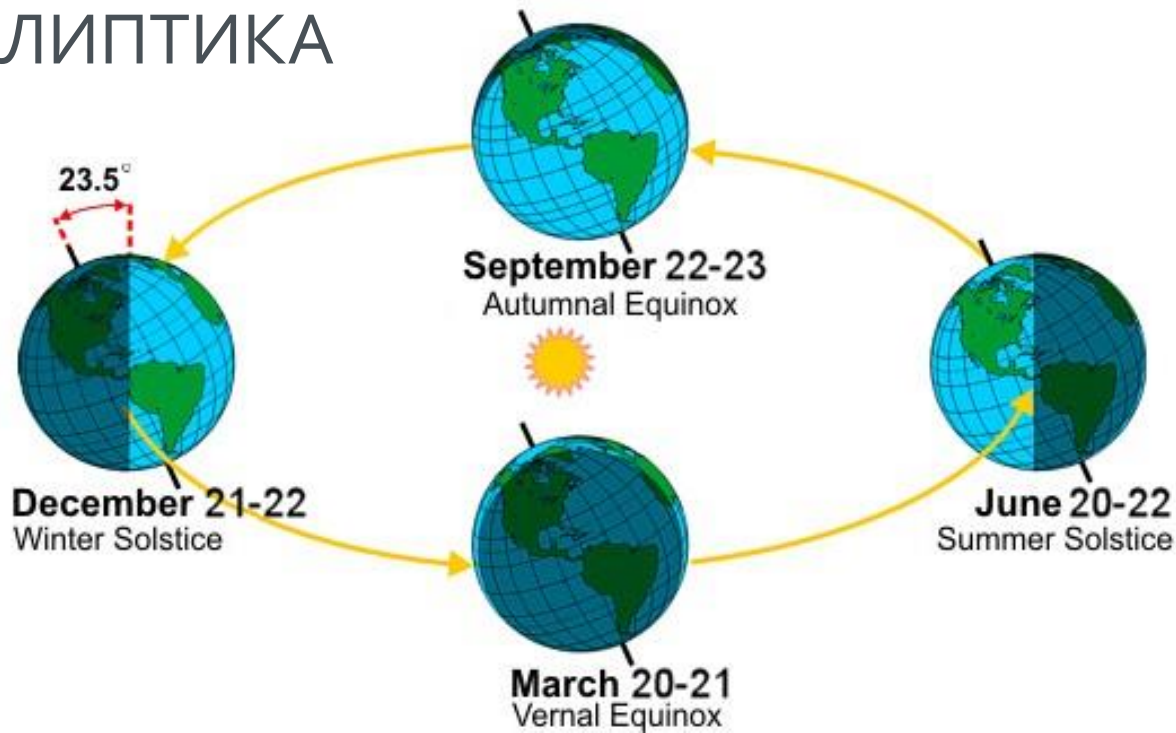


СУТОЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЗВЁЗД



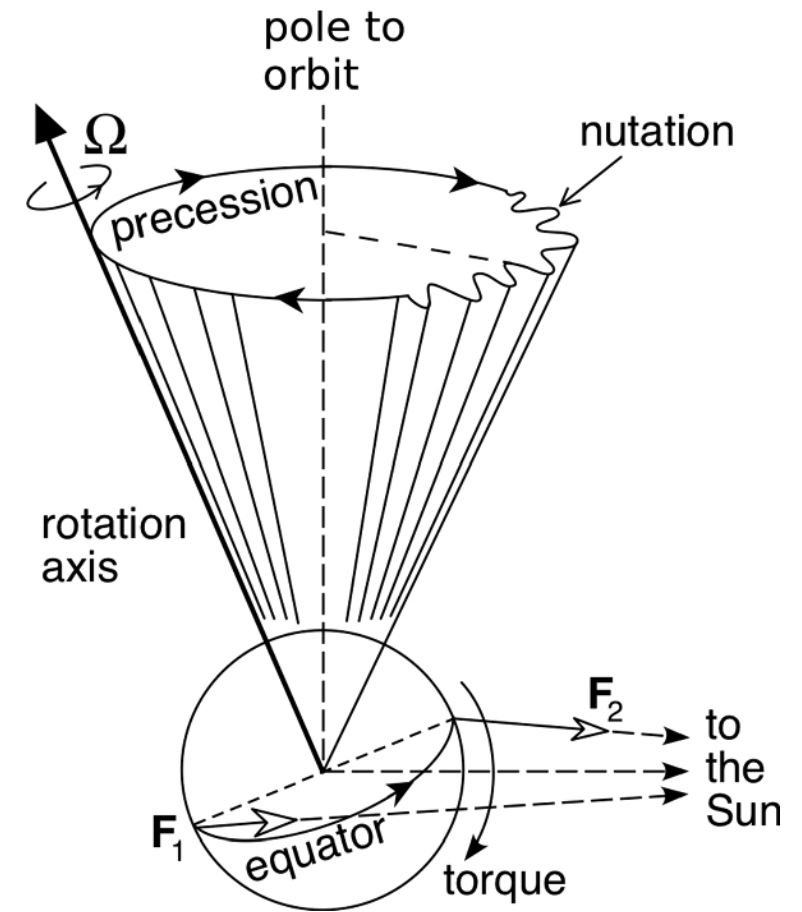
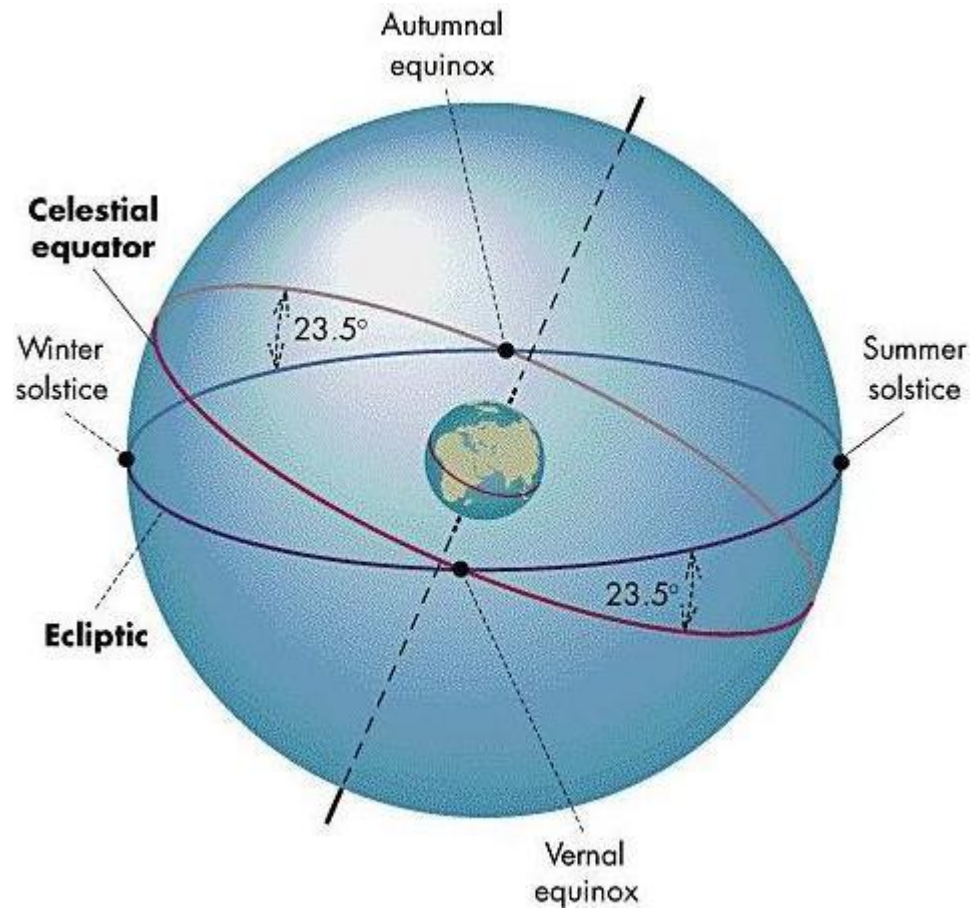
Сидерический период вращения Земли (в инерциальной системе отсчёта «относительно звёзд») равен $23\text{h } 56\text{m } 04\text{s СИ} = 24\text{h звёздного времени}$.

ЭКЛИПТИКА



Эклиптикой называют плоскость орбиты Земли или (чаще) большой круг на небесной сфере, вдоль которого Солнце перемещается среди звёзд в течение года. Каждый день Солнце смещается к востоку на $\approx 0.9^\circ$. От точки пересечения эклиптики и небесного экватора (**точки весеннего равноденствия**) отсчитывают прямые восхождения в экваториальной системе.

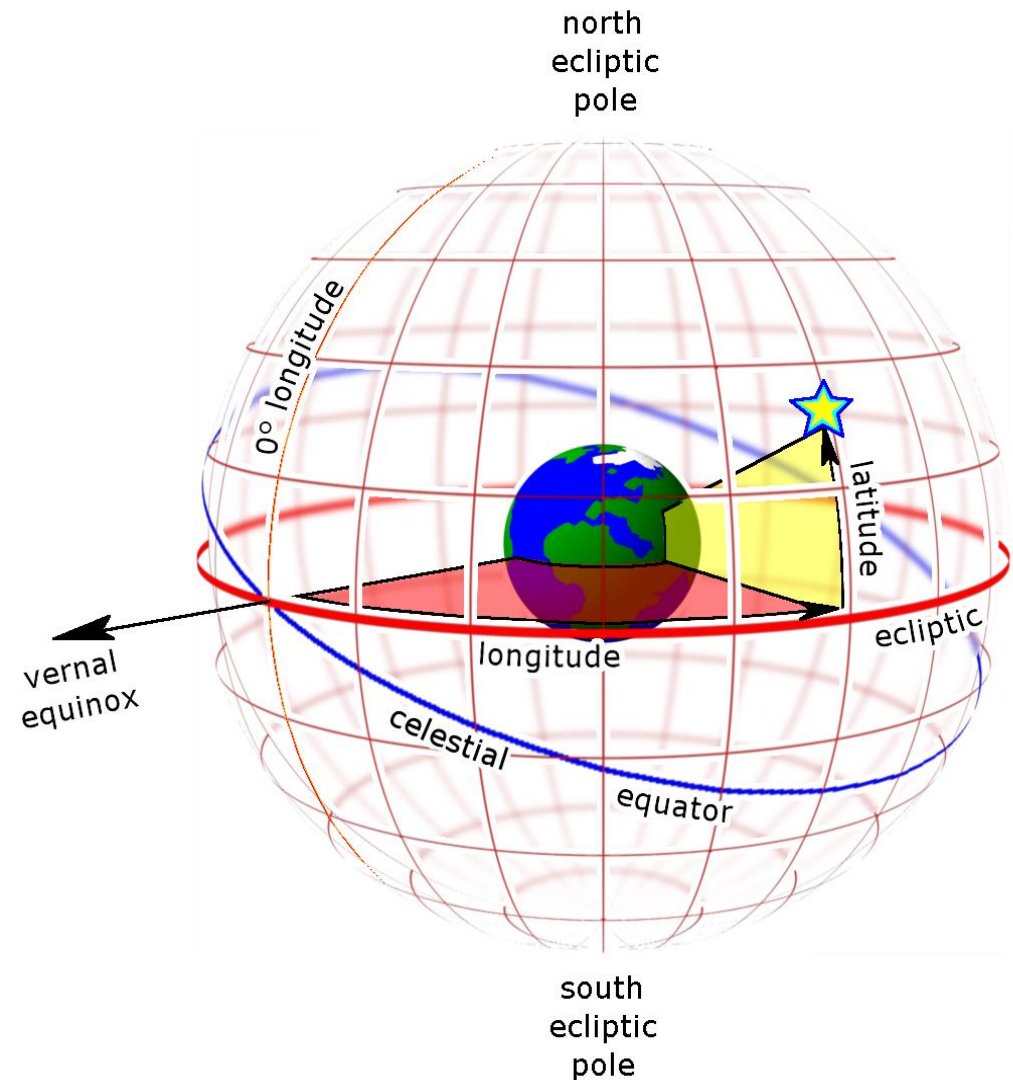
ПРЕЦЕССИЯ



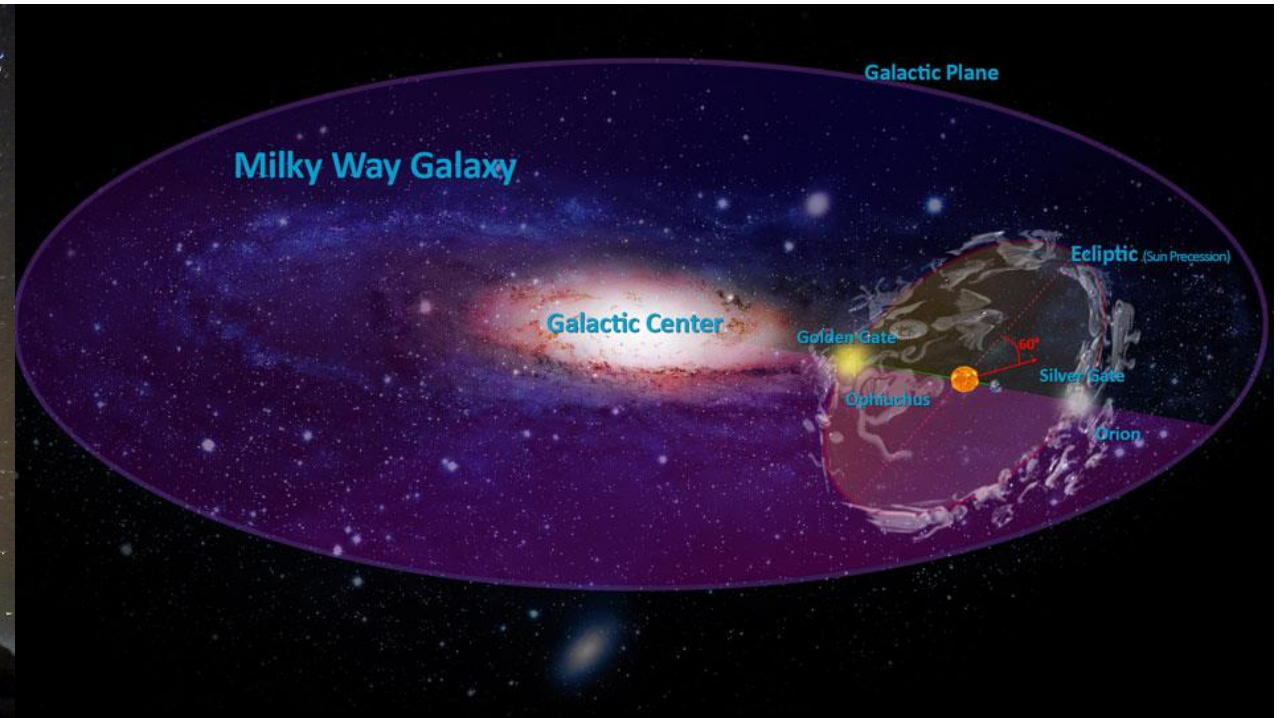
Период прецессии земной оси равен 25772 года. Из-за чего каждый год момент весеннего равноденствия наступает примерно на 20m 24.5s раньше. Это «предварение равноденствий».

ЭКЛИПТИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ

- Базовая плоскость – плоскость эклиптики (наклонена на 23.5° к плоскости небесного экватора).
- Нулевой меридиан проходит через точку весеннего равноденствия.
- Координаты: **эклиптическая широта β** и **эклиптическая долгота λ** . Они измеряются в градусах.
- В эклиптических координатах удобно работать с телами Солнечной системы, так как они, по большей части, концентрируются к плоскости орбиты Земли.



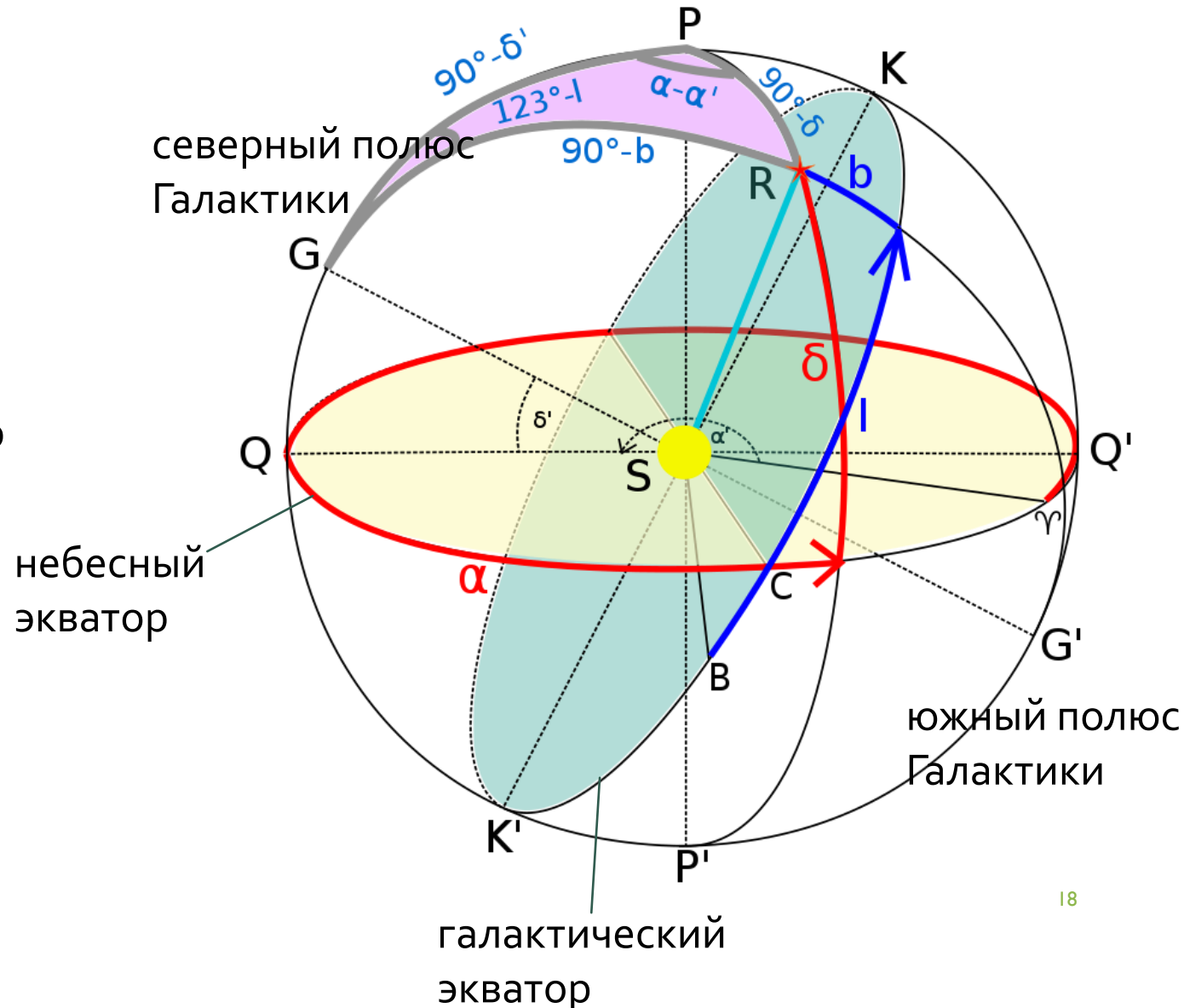
ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ



Млечный Путь (плоскость Галактики) задаёт отдельную систему координат, в которой удобно изучать распределение вещества в Галактике. Сам МП проходит не по большому кругу на небе, так как Солнце «приподнято» над плоскостью Галактики на ~ 50 световых лет.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ

- Базовая плоскость – плоскость галактического экватора. Это большой круг, выбранный так, что **G** имеет координаты $\alpha_{2000.0} \approx 192.9^\circ$ и $\delta_{2000.0} \approx 27.1^\circ$
- Нулевой меридиан проходит через центр Галактики (в созвездии Стрельца). Эта точка отстоит от экватора на $l_0 = 32.9^\circ$ (дуга BC)
- Координаты: **галактическая широта b** и **галактическая долгота l** . Они измеряются в градусах.



НЕМНОГО СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Сферический треугольник образован отрезками трёх больших кругов.

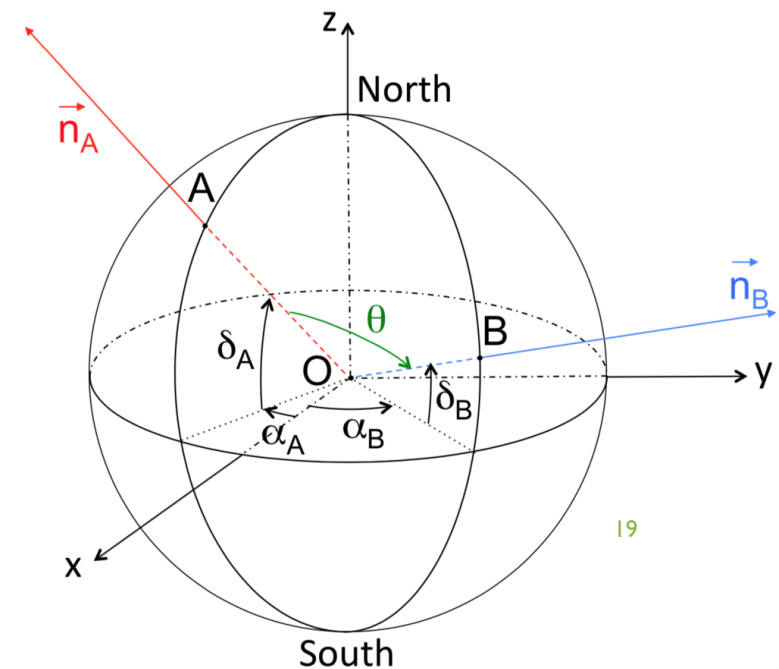
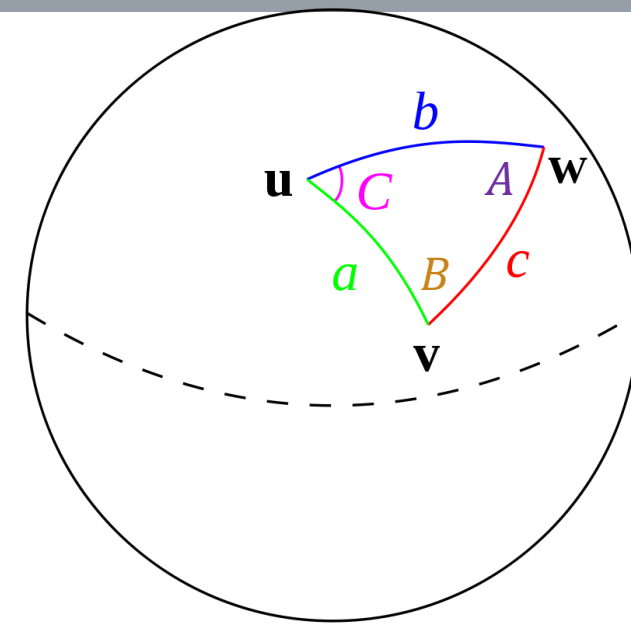
$$\left. \begin{aligned} \cos c &= \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C \\ \cos C &= -\cos A \cos B + \sin A \sin B \cos c \\ \dots \end{aligned} \right\} \text{теоремы косинусов для сферического треугольника.}$$

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C} - \text{теорема синусов.}$$

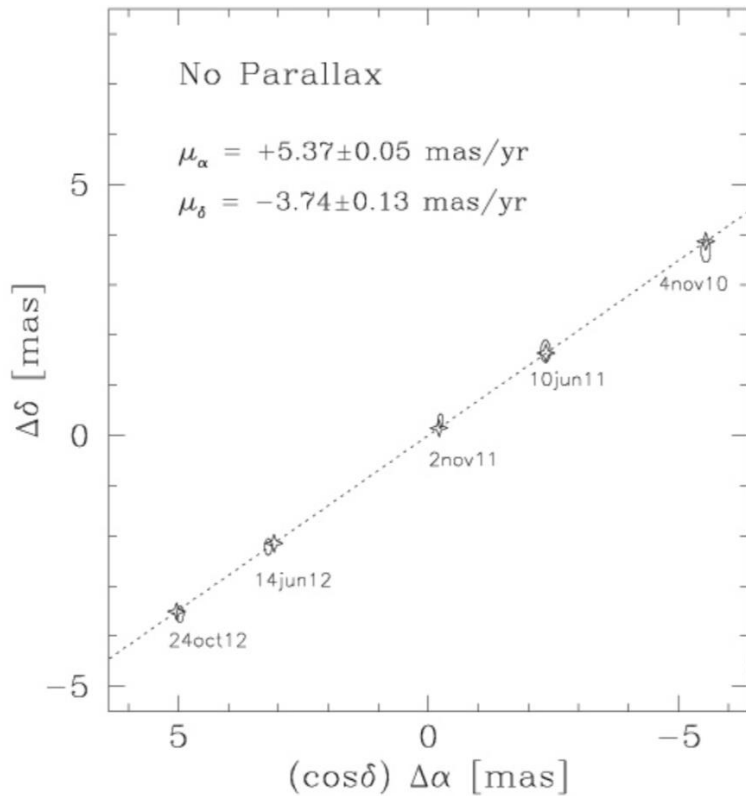
$$\mathbf{n}_{A,B} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{A,B} \cos \alpha_{A,B} \\ \cos \delta_{A,B} \sin \alpha_{A,B} \\ \sin \delta_{A,B} \end{pmatrix} - \text{единичный вектор в направлении на объект.}$$

$$\cos \theta = \mathbf{n}_A \cdot \mathbf{n}_B = \sin \delta_A \sin \delta_B + \cos \delta_A \cos \delta_B \cos(\alpha_A - \alpha_B)$$

- угловое расстояние между точками с известными координатами.



ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ: СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ



arXiv:1402.2380

Собственным движением называется скорость изменения небесных координат объекта. Например:

$$\mu_\alpha = \dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} \quad \text{и} \quad \mu_\delta = \dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt}$$

В приближении малых углов ($|\Delta\alpha| \ll 1$, $|\Delta\delta| \ll 1 \Rightarrow \theta \ll 1$):

$$1 - \frac{\theta^2}{2} \approx 1 - \frac{(\Delta\delta)^2}{2} - \cos\delta \cos(\delta + \Delta\delta) \cdot \frac{(\Delta\alpha)^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta^2 \approx (\Delta\alpha)^2 \cos^2 \delta + (\Delta\delta)^2$$

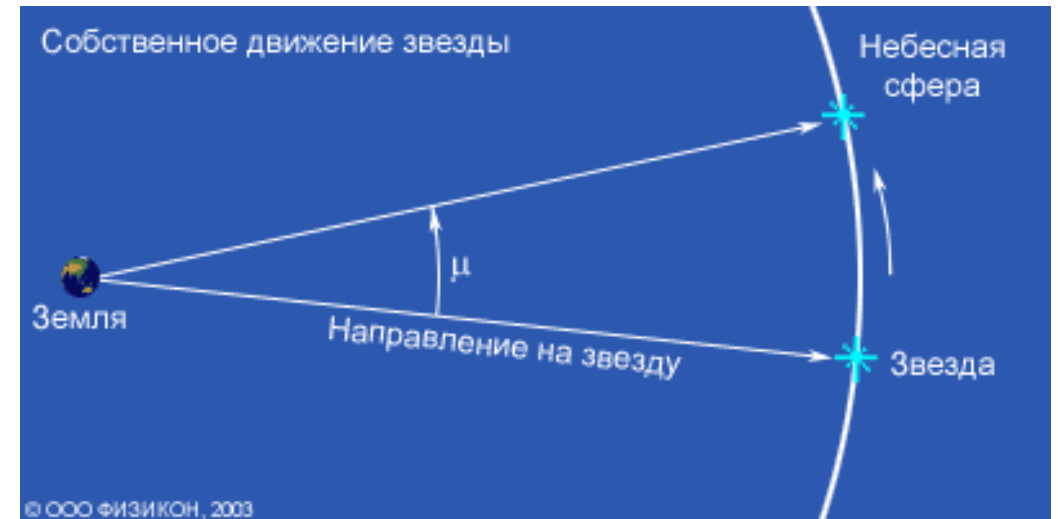
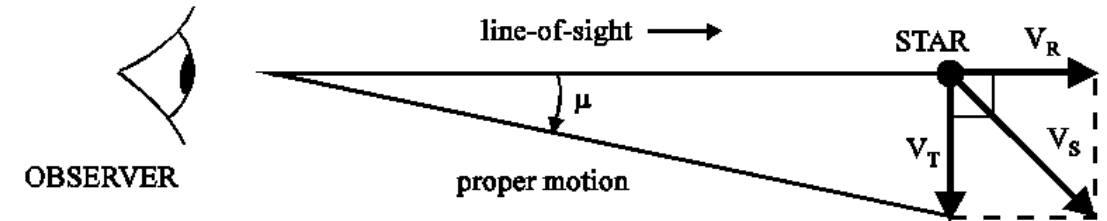
И, значит, **полное собственное движение**:

$$\mu_{\text{tot}} = \dot{\theta} = \sqrt{\mu_\alpha^2 \cos^2 \delta + \mu_\delta^2}$$

ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ: СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

- V_R : radial velocity – **лучевая скорость** объекта (вдоль луча зрения).
- V_T : transverse velocity – **поперечная скорость** объекта (по небесной сфере или в картинной плоскости).

$$V_T \approx (4.74 \text{ km s}^{-1}) \cdot \left(\frac{\mu_{\text{tot}}}{1 \text{ arcsec} \cdot \text{yr}^{-1}} \right) \cdot \left(\frac{d}{\text{pc}} \right)$$



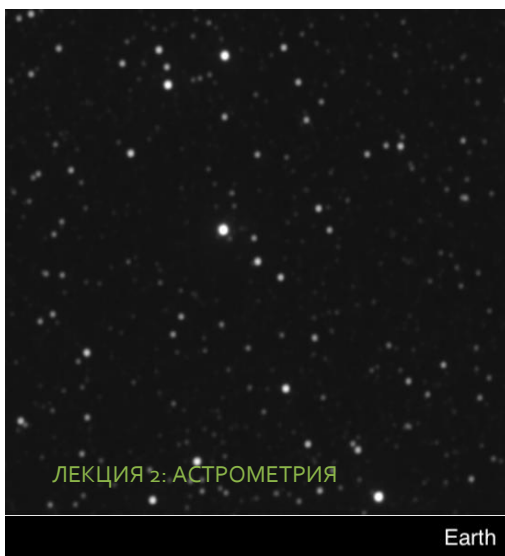
ПАРАЛЛАКС

Астрономическая единица – средний радиус земной орбиты.

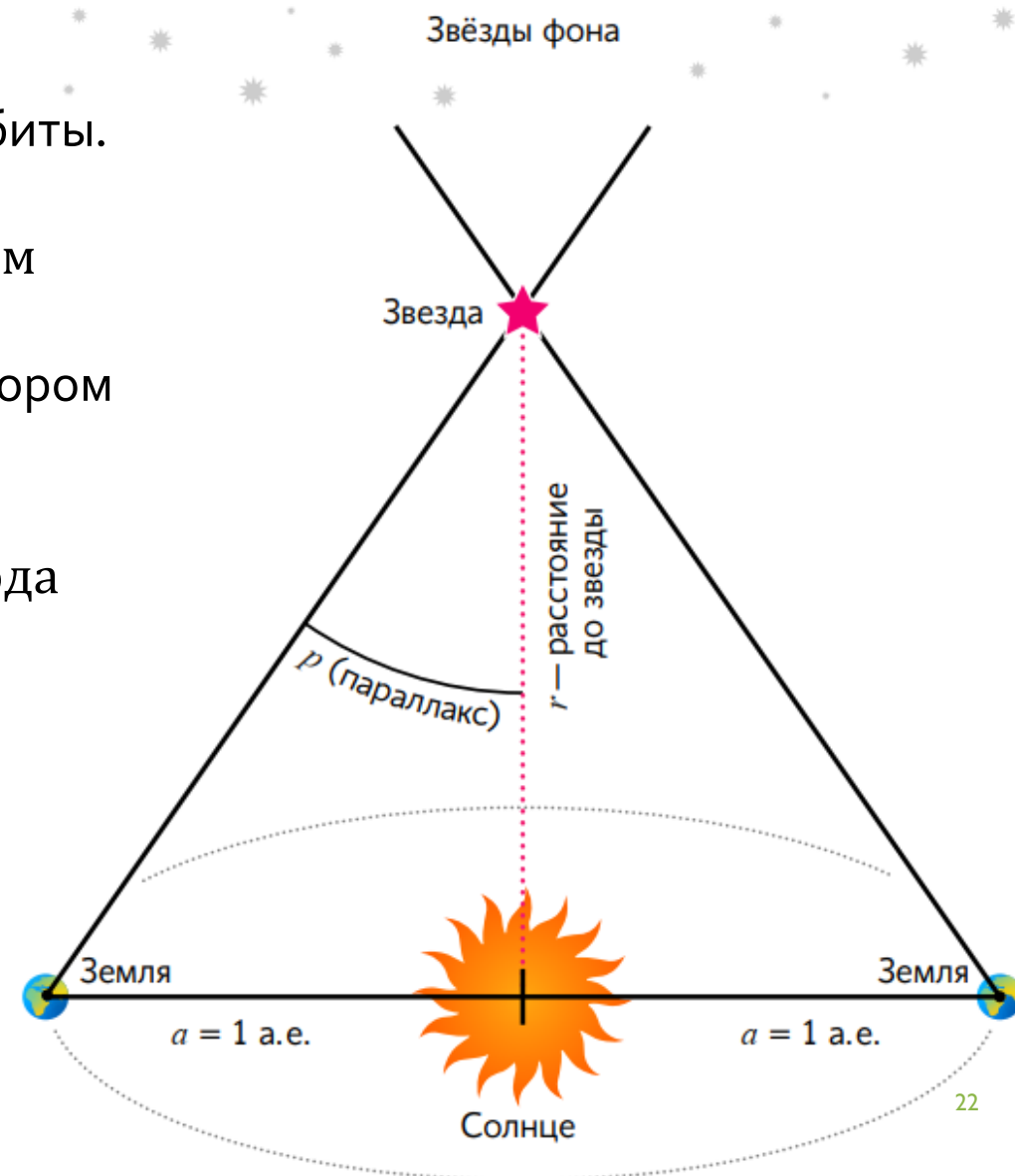
$$1 \text{ а. е.} = 149\,590\,870\,700 \text{ м (точно)} \approx 1.49 \cdot 10^{13} \text{ см}$$

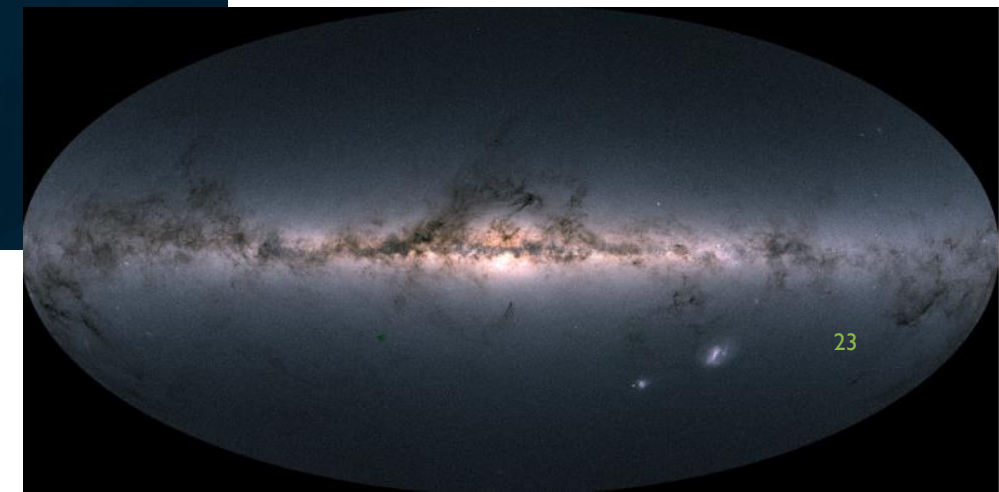
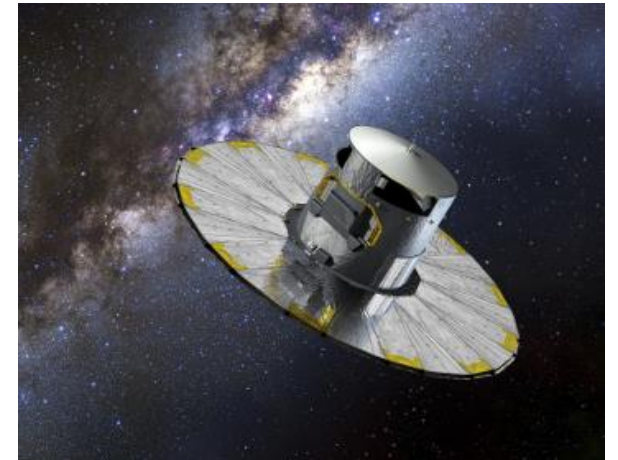
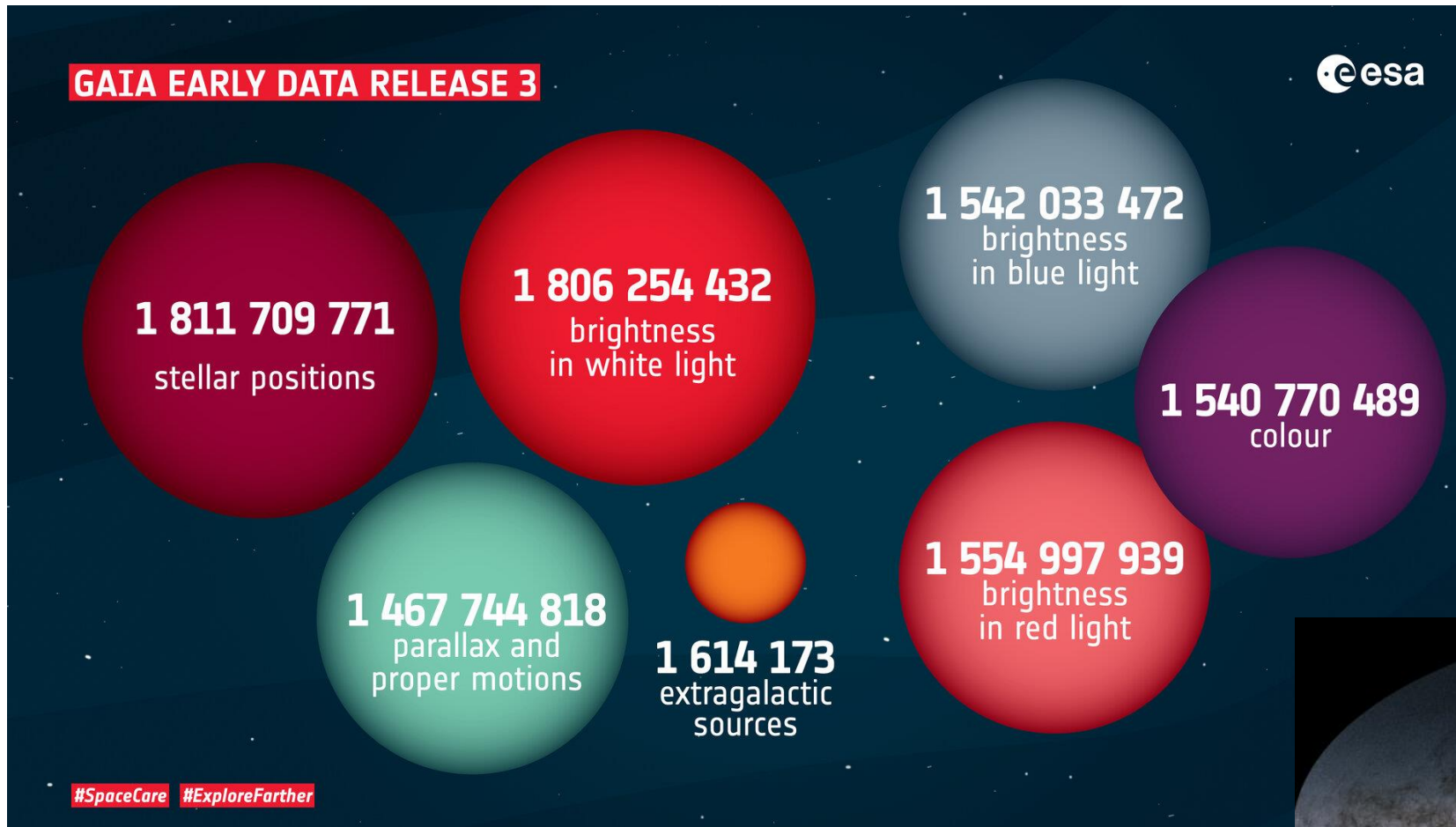
Парсек (пк, рс, **параллакс-секунда**) – расстояние, при котором 1 а. е. видна под углом в 1".

$$1 \text{ ПК} \approx 3.08 \times 10^{18} \text{ см} \approx 206\,264,8 \text{ а. е.} \approx 3.26 \text{ св. года}$$



Проксима Центавра
($d = 1.3 \text{ ПК}$, $p = 1/d = 769 \text{ mas}$).
Вид с Земли и с орбиты Плутона.





ПОЛНОЕ СОБСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

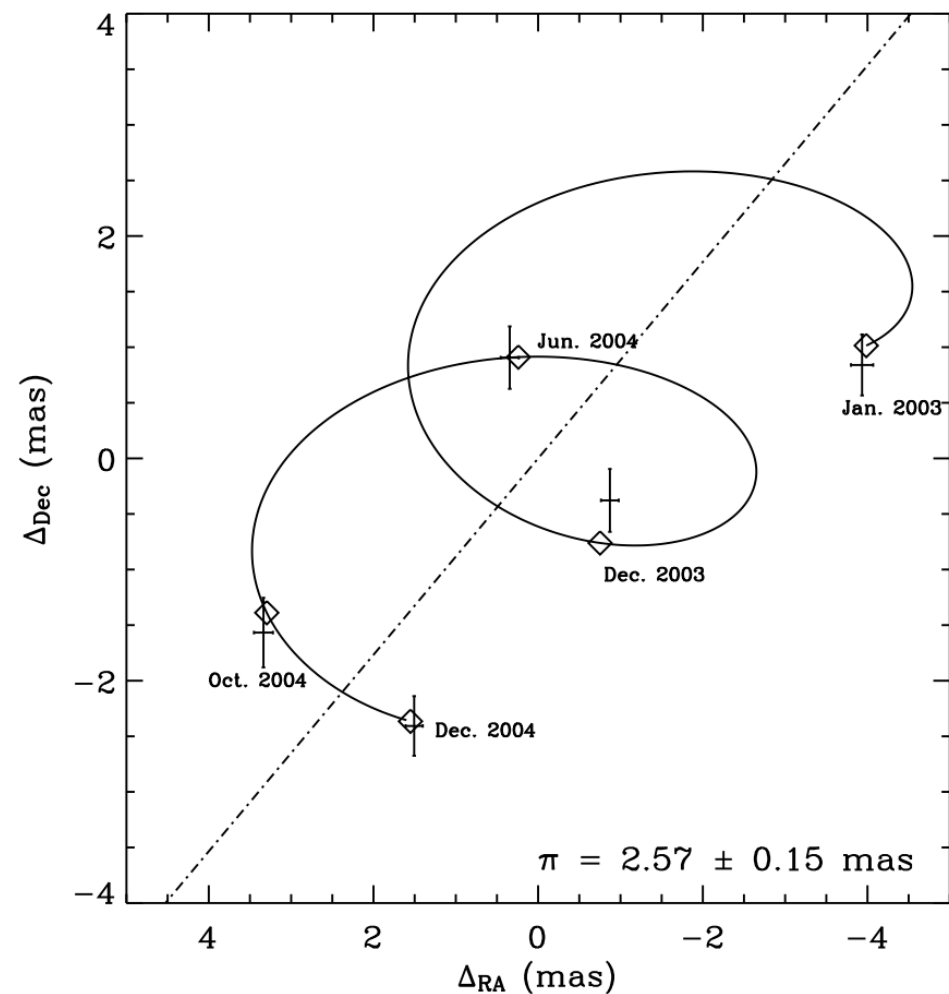


TABLE 5
GMR A ASTROMETRIC PARAMETERS*

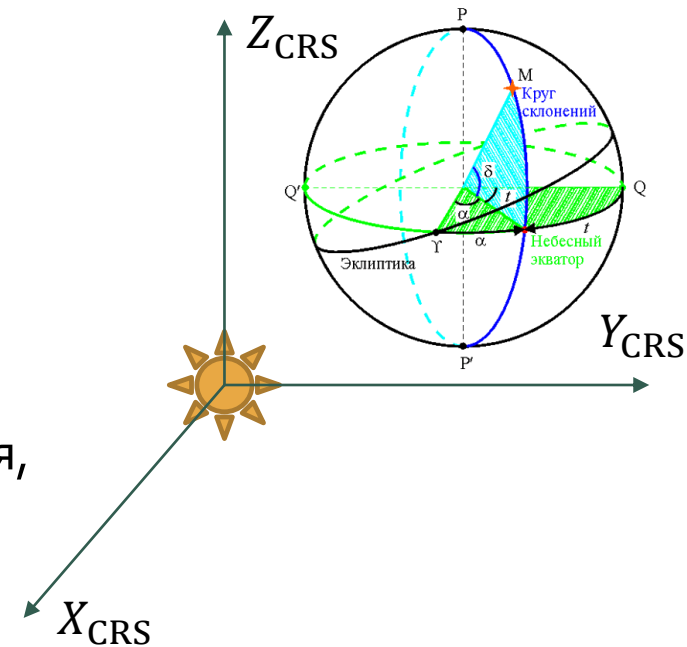
Parameter	Value
Fit Quantities	
Epoch	2004.25 (MJD 53095.3)
Right Ascension α_0	$5^{\text{h}}35^{\text{m}}11^{\text{s}}.80295404$
Declination δ_0	$-5^{\circ}21'49''.247452$
$\mu_{\alpha} \cos \delta$ (mas yr $^{-1}$)	1.89 ± 0.12
μ_{δ} (mas yr $^{-1}$)	-1.67 ± 0.19
Parallax π (mas)	2.57 ± 0.15
Derived Quantities	
Distance (pc)	389^{+24}_{-21}
Transverse Velocity (km s $^{-1}$)	4.65 ± 0.39
Position Angle † ($^{\circ}$)	131.5 ± 3.7

* All coordinates are listed in the J2000 equinox and measured in reference to the assumed position of J0541–0541: $5^{\text{h}}41^{\text{m}}38^{\text{s}}.084106$, Dec. $-5^{\circ}41'49''.42841$.

† The position angle of the proper motion, measured from North through East.

CELESTIAL REFERENCE SYSTEM/FRAME

- Небесная система отсчёта (celestial reference system) – зафиксированная инерциальная декартова система с началом в барицентре (центре масс) Солнечной системы. Её ось Z направлена в сторону северного полюса мира, а ось X в сторону точки весеннего равноденствия.
- Небесная система координат (celestial reference frame) – практическая реализация этой системы отсчёта.
- CRF «держится» на каталогах фундаментальных источников: точечных объектов, которые не показывают значительного собственного движения, и координаты которых могут быть измерены с очень высокой точностью.
- Долгое время это были обычные звёзды. До 1999 года были выпущены шесть каталогов фундаментальных звёзд. Последний реально использовавшийся – FK5 (Fricke et al. 1988).



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ КАТАЛОГ ЗВЁЗД (FK5/FK6)

- Состоит из более чем 1500 звёзд, координаты которых **задают** свою систему координат (свою плоскость небесного экватора и направление на точку равноденствия).
- С учётом неравномерности вращения Земли традиционно эту систему фиксируют на эпоху J2000.0 (12:00 TT 01.01.2000).

1	2	3	4	5	6	7
FK6 No.	HIP No.	Name	α (SI) 2000 h m s	δ (SI) 2000 ° ' "	μ_{α^*} (SI) 2000 [mas/yr]	μ_{δ} (SI) 2000 [mas/yr]

904	122	ϑ Oct	0 1 35.702946	− 77 3 56.60834	− 56.82	− 176.98
1630	154	30 Psc	0 1 57.619825	− 6 0 50.65534	+ 48.08	− 40.82
905	301	2 Cet	0 3 44.388192	− 17 20 9.56681	+ 25.84	− 8.55
1001	377	45 G. Tuc	0 4 41.308247	− 71 26 12.80871	+ 30.03	− 13.56
1003	560	9 G. Cet	0 6 50.086034	− 23 6 27.13707	+ 96.93	− 46.33

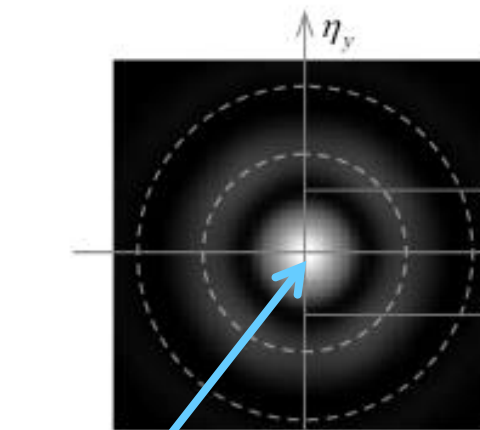
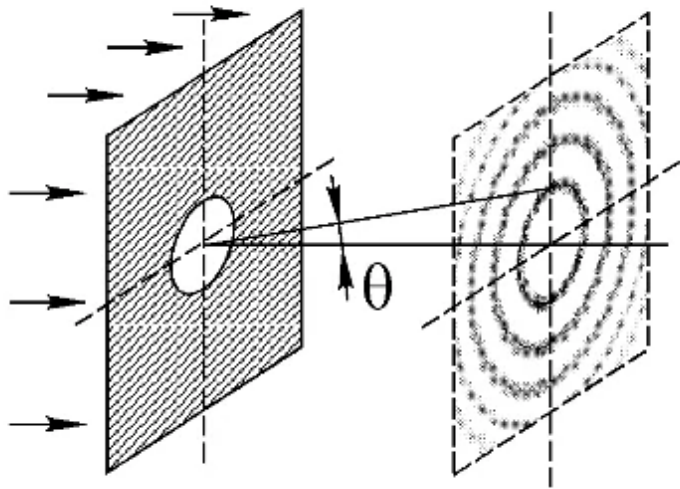
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
FK6 No.	T_{α} (SI)	ε_{α^*} (SI) [mas]	$\varepsilon_{\mu, \alpha^*}$ (SI) [mas/yr]	T_{δ} (SI)	ε_{δ} (SI) [mas]	$\varepsilon_{\mu, \delta}$ (SI) [mas/yr]	p_{res} [mas]	$\varepsilon_{p, res}$ [mas]	K_p	v_{rad} [km/s]	m_V	K_m	K_{bin}	$K_{\Delta\mu}$	K_{ae}

904	91.18	0.40	0.37	91.21	0.39	0.33	14.77	0.47	H	+ 23.7	4.78		11	1	3
1630	91.13	0.80	0.29	91.51	0.39	0.24	7.86	0.94	H	− 11.8	4.37	2	33		
905	91.45	0.82	0.27	91.42	0.40	0.25	14.31	0.92	H	− 5.0	4.55		29	2	
1001	91.20	0.45	0.42	91.28	0.41	0.36	5.70	0.53	H	− 3.0	5.59		19		1
1003	91.27	0.70	0.46	91.40	0.41	0.35	25.59	0.75	H	+ 3.1	6.19		29	2	

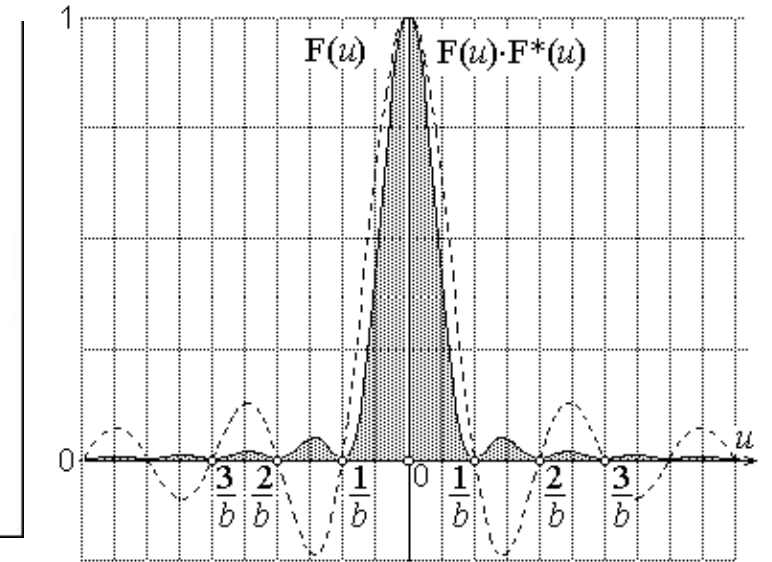
Wielen et al. 1999

ДИФРАКЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

- Любой телескоп имеет конечные размеры!
- Изображение, которое строит телескоп, есть результат дифракции излучения на входной апертуре.



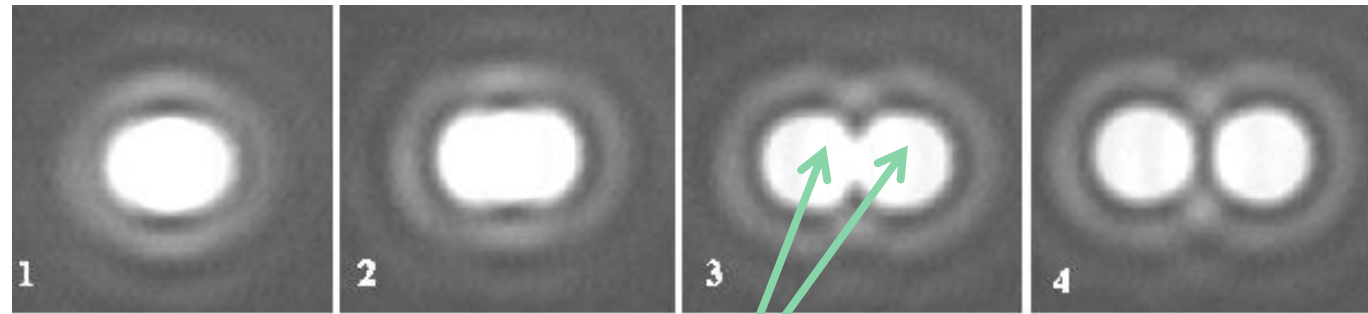
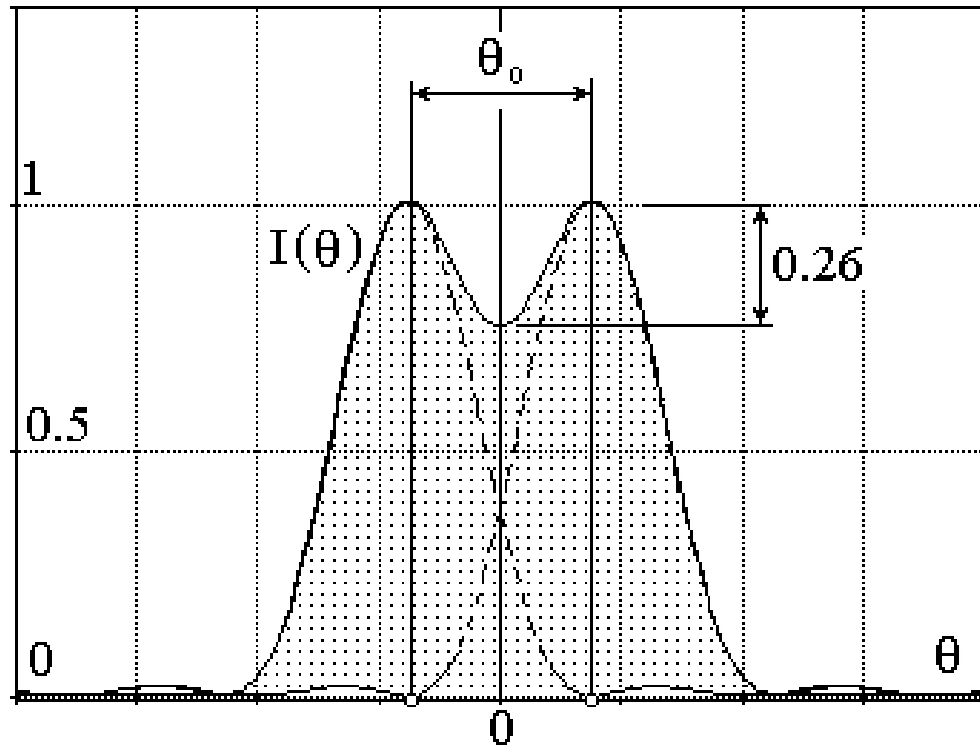
В центральном максимуме
содержится 83.8% всей энергии.



$$F(u) \propto \left[\frac{\sin(\pi b u)}{\pi b u} \right]^2$$

КРИТЕРИЙ РЭЛЕЯ

- Два точечных источника разрешаются, если максимум диска Эйри одного источника лежит дальше первого минимума диска второго источника.



Диск Эйри

КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

$$d_e = \underbrace{2.44 \frac{\lambda}{D}}_{\theta_e} \times F$$

фокусное расстояние



Длина волны λ	Диаметр апертуры D	Фокусное расстояние F	Угловое разрешение θ_e	Линейный размер пятна Эйри на фокальной плоскости
550 нм	6 м	24 м	0.05"	5.6 мкм
550 нм	0.65 м	35 м	0.42"	72 мкм
21 см	64 м	27.4 м	27'	22 см

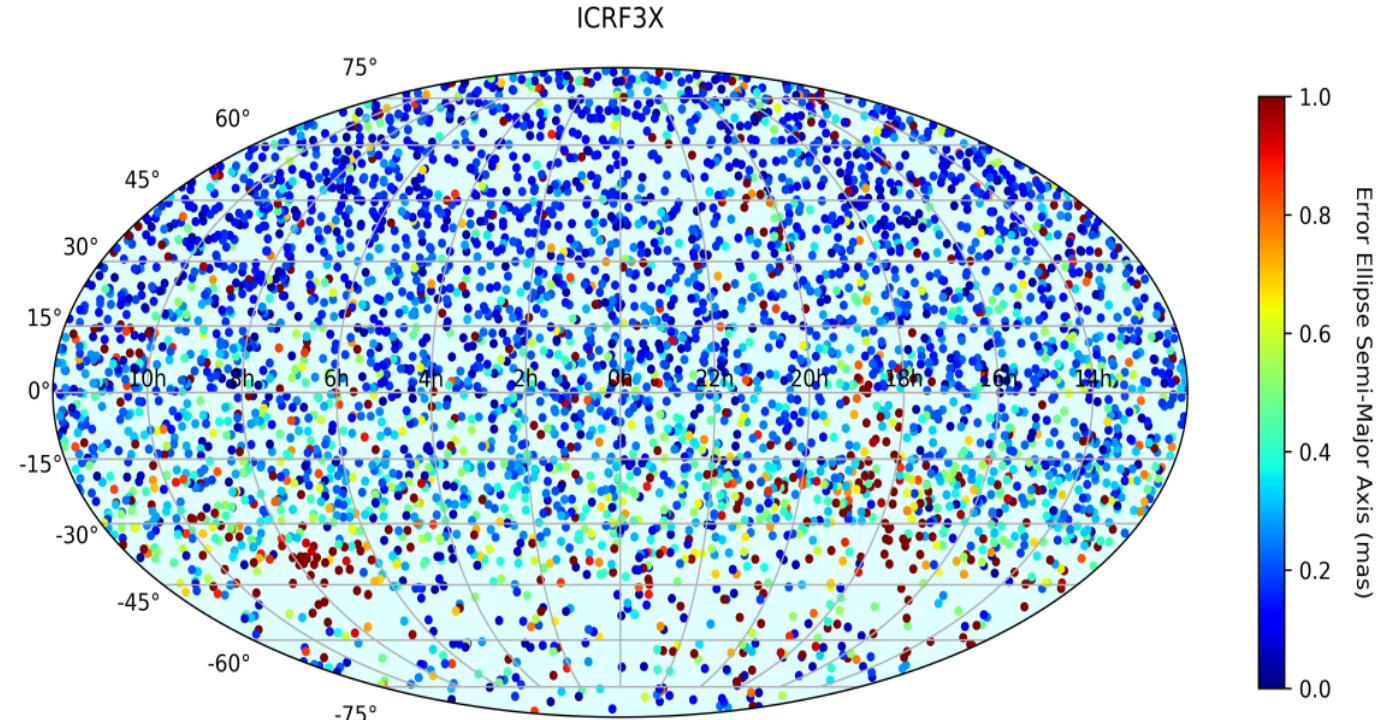
INTERNATIONAL CELESTIAL REFERENCE FRAME

- С 2019 года основной системой координат в астрономии (и космонавтике) считается ICRF3.
- Её формируют 4536 радиоисточников, положения которых измерялись при помощи РСДБ-наблюдений. Средняя ошибка координат – 50 микросекунд дуги!
- Эпоха равноденствия каталога: J2015.0

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{ICRF}} = r_{\text{SSB}} \cdot \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}_{\text{ICRF}}$$

ЛЕКЦИЯ 2: АСТРОМЕТРИЯ

Расстояние от барицентра Солнечной системы до объекта.

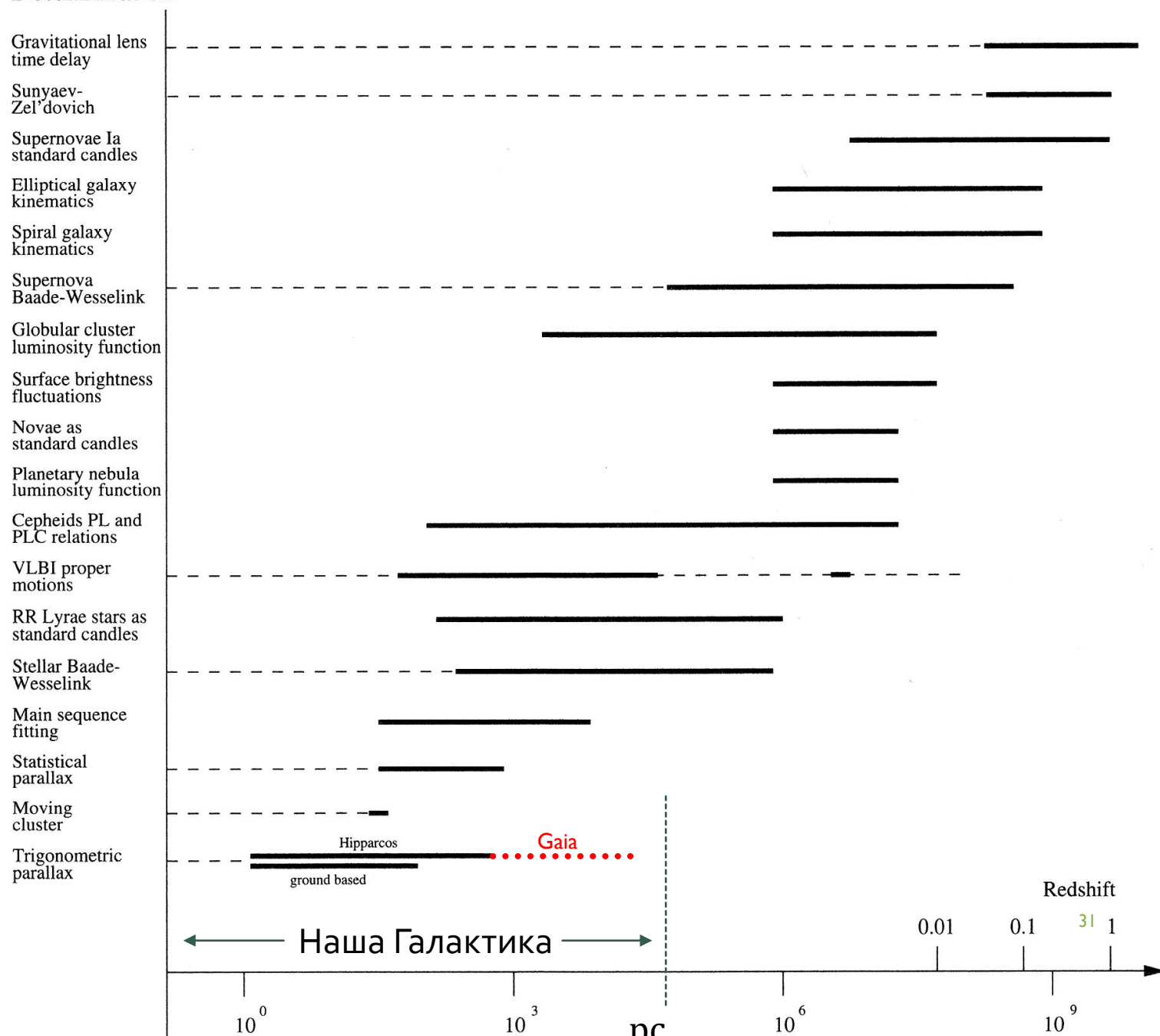


ЛЕСТНИЦА РАССТОЯНИЙ

- Метод параллакса – основной прямой метод измерения расстояний в космосе.
- Внутри Солнечной системы можно ещё пользоваться радиолокацией (она точнее).
- Положение Земли на своей орбите относительно центра масс СС мы знаем с точностью не хуже нескольких сантиметров.

ЛЕКЦИЯ 2: АСТРОМЕТРИЯ

Distance Determination

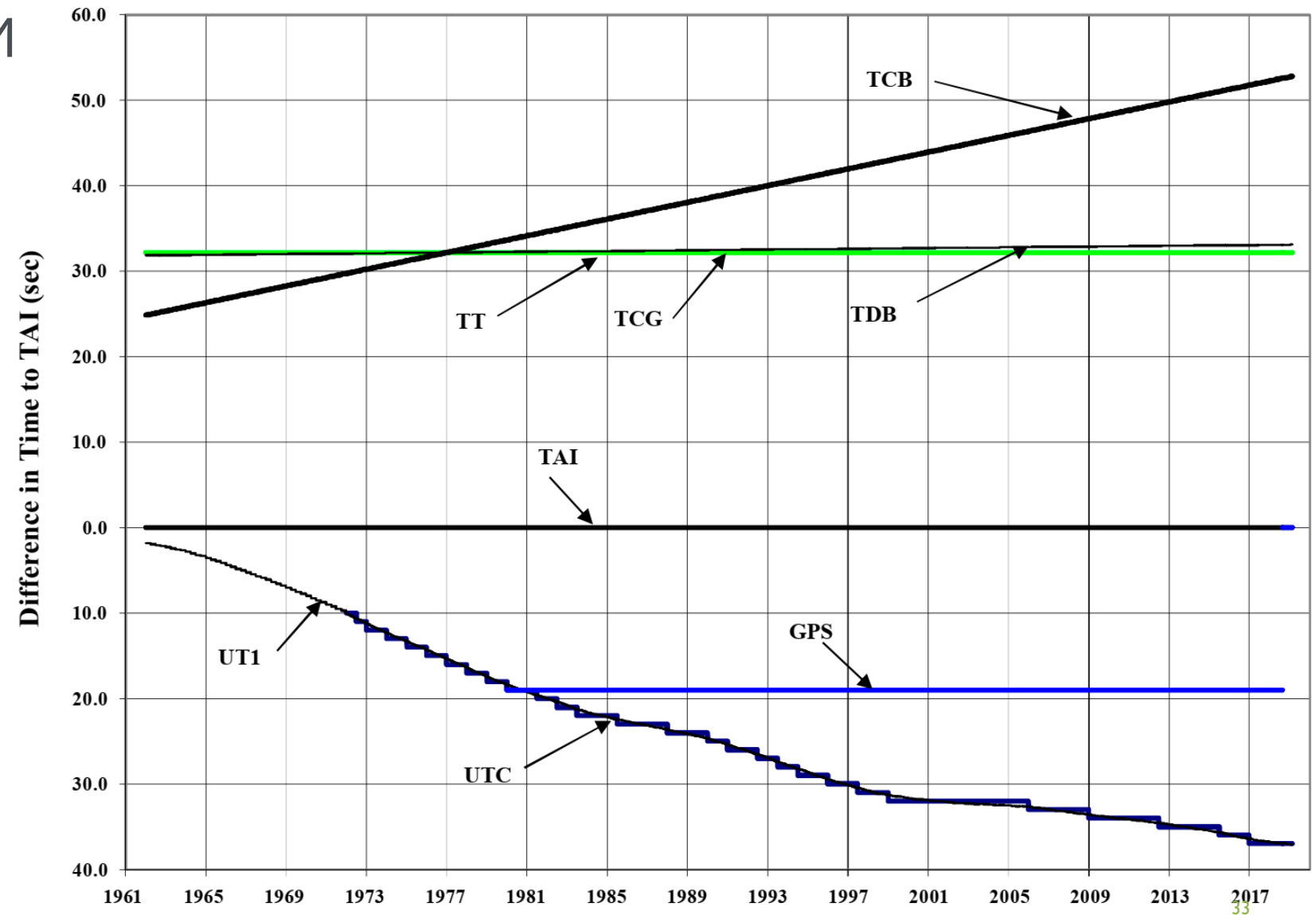


ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

- **TAI:** Базовая шкала времени для астрономических наблюдений – атомная. Эта же шкала задаёт секунду СИ.
- **UTC:** В качестве рабочей шкалы используется Всемирное Координированное Время. $UTC = TAI - LS$, где LS – время координации (leap seconds). На сегодня $LS = 37s$.
- **TT = TDT:** Земное (динамическое) время – время идеальных часов на поверхности геоида. $TT = TAI + 32.184s$.
- **TDB:** Барицентрическое динамическое время. Связано с TT сложным релятивистским преобразованием.
- **TCB:** Барицентрическое координатное время. $TCB \approx TDB + 0.489 \text{ s yr}^{-1} (\text{year} - 1977.0)$.

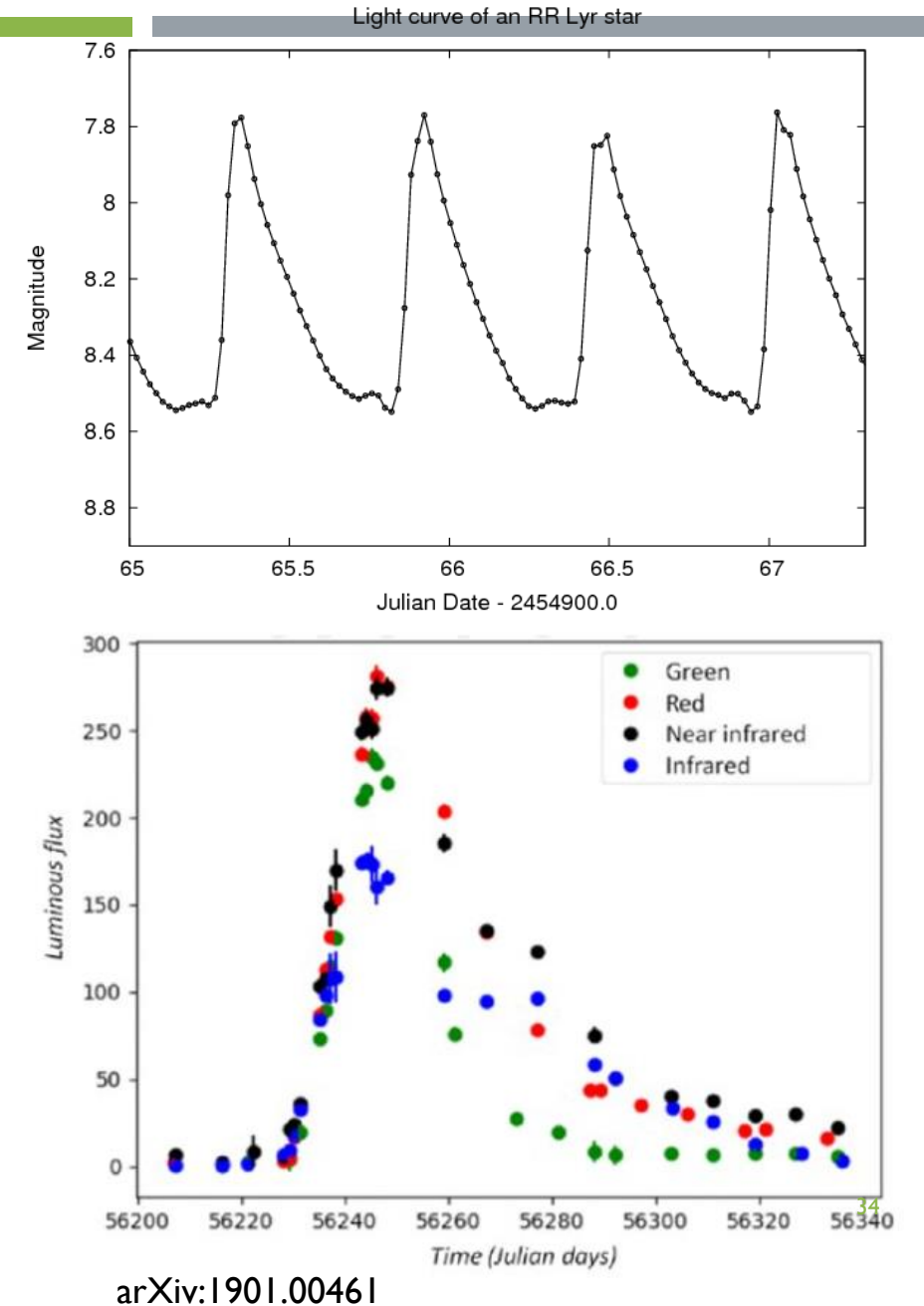
ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

- Соотношение между разными шкалами времени, в предположении, что TAI строго равномерно.



ЮЛИАНСКАЯ ДАТА

- JD – принятая в наблюдательной астрономии система непрерывного счёта дней.
- JD = 0.0 соответствует 12h UT, 1 января 4713 года до н.э.
- MJD – Модифицированная Юлианская дата.
 $MJD = JD - 2400000.5$.
MJD = 0.0 соответствует 0h UT 17 ноября 1858 года.
- <https://www.aavso.org/jd-calculator>



ЛИТЕРАТУРА

- Кононович, Мороз. «Общий курс астрономии», §§ 1.4-1.12, 1.18
- Жаров. «Сферическая астрономия», Гл. 1, 2, 4.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

В радионаблюдениях в режиме интерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ-наблюдениях) было обнаружено, что от радиоисточника 3C 279 отлетают несколько сгустков светящегося вещества. Источник 3C 279 это квазар. А сгустки составляют струйный выброс (джет) вещества из его центральной части. Самый дальний сгусток имеет полное собственное движение $\mu = 0.25 \text{ mas yr}^{-1}$ – см. рисунок. Расстояние до 3C 279 составляет $d = 1.5 \cdot 10^9$ парсек (1.5 Гпк).

Получите *нижний предел* для величины *полной* пространственной скорости дальнего сгустка *относительно наблюдателя*. Ответ выразите в единицах скорости света.

