

Белорусский государственный университет

Физический факультет

Кафедра атомной физики и физической информатики

Астрономия

Курс лекций

*Автор: доктор физико-математических наук профессор
Клищенко Анатолий Петрович*

*Лектор: доцент, кандидат физико-математических наук
Хвале́й Сергей Владимирович*

Введение

АСТРОНОМИЯ – наука о физическом строении, движении, происхождении и эволюции небесных тел, их систем, Вселенной в целом.

Объекты Астрономии – Солнце, звезды, планеты и их спутники, метеорные тела, туманности, звездные скопления, звездные системы и вся Вселенная.

Новые объекты – пульсары, квазары, барстеры, космические лучи, «реликтовое» излучение, «черные» и «белые» дыры, поиски внеземных цивилизаций.

- 3000 лет до н.э. - Возникновение астрономии. Первый этап строительства Стоунхенджа
- 2500 лет до н.э. - Выделение созвездий (шумеро-аннадская цивилизация)
- 4000 лет назад - Возникновение китайской и египетской астрономии

Греческая астрономия

- 585 год до н.э. - Предсказание солнечного затмения Филесом Милетским
- 432 год до н.э. - Открытие Метонова цикла
- 120 год до н.э. - Гиппарх (прецессия, видимое движение тел)
- 140 год н.э. - Геоцентризм Птолемея (публикация «Альмагеста»)

Арабская астрономия

- 850 год - аль-Баттани изучает и проверяет открытия греков
- 1038 год - аль-Хасен изучает атмосферную рефракцию
- 15 век - Улукбек строит обсерваторию, создает оригинальный звездный каталог

- 1542 год - Коперник публикует трактат «Об обращении небесных тел»
- 1576 год - Строительство обсерватории Тихо Браге в Дании
- 1608 год - Изобретение телескопа Галилеем
- 1609 год - Публикация первых двух законов Кеплера

- 1676 год - Карл II основал Гринвичскую обсерваторию
- 1687 год - Публикация «Математических начал натуральной философии» Ньютона
- 1781 год - Уильям Гершель открывает планету Уран
- 1809 год - Публикация Гауссом «Теории движения небесных тел»
- 1817 год - Фраунгофер открывает темные линии в спектре Солнца
- 1842 год - Первый дагерротип Солнца
- 1846 год - Открытие Нептуна Адамсом и Лаверье
- 1905 год - Специальная теория относительности Эйнштейна
- 1915 год - Общая теория относительности Эйнштейна
- 1930 год - Томбо открывает Плутон
- 1945 год - Развитие радиоастрономии
- 1957 год - Запуск первого искусственного спутника Земли
- 1959 год - Первые фотографии обратной стороны Луна (КА «Луна-3»)
- 1960 год - Открытие квазаров
- 1961 год - Первый космический полет Юрия Гагарина на космическом корабле «Восток»

1961 год	- Полет «Меринера-2» к Венере
1963 год	- Первый полет женщины-космонавта Валентины Терешковой
1966 год	- Первая мягкая посадка на Луну «Луна-9»
1967 год	- Открытие первого пульсара
1969 год	- Нейл Армстронг – первый человек, ступивший на поверхности Луна (программа «Апполон»)
1971 год	- «Меринер-9» - первый искусственный спутник Марса
1976 год	- Спускаемый модуль «Викинг-1» садится на поверхности Марса
1977 год	- Ввод в строй 6-метрового телескопа Зеленгугской обсерватории (СССР, Краснодарский край)
1972 - 1981 годы	- Запуск КА «Пионер-10, -11», «Викинг-1, -2», «Вояджер-1, -2» для исследования внутренних и внешних внутренних и внешних областей Солнечной системы
1986 год	- КА «Вега» и «Джотто» встречаются с кометой Галлея. Запуск космической станции «Мир»
1989 год	- «Вояджер-2» достигает Нептуна
1990 год	- Вывод на орбиту космического телескопа Хаббл

Разделы астрономии

- **Астрометрия** – разрабатывает теоретические методы, технику измерений на небесной сфере, способы обработки наблюдений.
В ведении Астрометрии – служба времени, календарь, определение координат пунктов на Земле
 - а) *Сферическая Астрометрия* – разрабатывает математические методы определения положения и движения небесных тел, а также системы счета времени.
 - б) *Практическая Астрометрия* – разрабатывает способы наблюдений, методы их обработки, теорию астрономических приборов.
- **Небесная механика** – изучает пространственное движение тел и их систем под действием сил тяготения и другой природы. Определяет элементы орбит по данным наблюдений и вычисляет видимые положения небесных тел.
- **Астрофизика** – изучает физическое состояние и процессы на поверхности и внутри небесных тел.
 - а) *Практическая Астрофизика* – разрабатывает способы наблюдений небесных тел, их обработку.
 - б) *Теоретическая Астрофизика* – объясняет наблюдаемые явления, процессы на основе физических законов.

- **Звездная Астрономия** – изучает движение, распределение в пространстве звезд, туманностей, звездных систем, их структуру, эволюцию (раздел – внегалактическая астрономия).
- **Космогония** – занимается проблемами происхождения и эволюции небесных тел и их систем, происхождением Солнечной системы.
- **Космология** – изучает Вселенную как единое целое, выявляет структуру, ее эволюцию и происхождение ее структурных единиц.
 - а) *экспериментальная основа* – астрофизика и звездная астрономия.
 - б) *теоретическая* – ОТО, физика элементарных частиц, квантовая механика, электродинамика.

Строение и размеры объектов Вселенной

Земля	$d_{\text{ср}} = 12756 \text{ км}$
Земля – Луна	$l = 384400 \text{ км}$
Земля – Солнце	$L = 149600000 \text{ км}$
Солнечная система	$d = 10 \text{ млрд. км}$
Солнце – Проксима ($\alpha \text{ Cen C}$)	$L = 1,32 \text{ пк} =$ $40,7352 \cdot 10^{12} \text{ км}$
Галактика (Млечный Путь)	$d = 30000 \text{ пк}$
Галактика – Б.Магелланового Облако	$L = 50000 \text{ пк}$
Скопление звездных систем	$d = 3 \div 20 \text{ Мпк}$
Сверх Галактика (10^{15} звезд)	$d = 50 \text{ Мпк}$
Метагалактика	$d = 60 \cdot 10^3 \text{ Мпк}$

Количество небесных объектов

Галактика	10^{12} звезд
Звездные системы (галактики)ё	$10^9 \div 10^{12}$ звезд
Число галактик	$\sim 10^{12}$

Предельная яркость наблюдаемых небесных объектов (в звездных величинах)

Невооруженным глазом	+6m
Глазом с помощью телескопа	17÷19m
Телескоп с фотографической регистрацией	22÷24m
Телескоп с фотоэлектрической регистрацией	27÷29m

Астрономия и деятельность человека

- Геодезия и картография.
- Геологическая разведка полезных ископаемых.
- Астрономическая служба времени.
- Выбор орбит ИСЗ средствами Н.М.
- Охрана природы, космонавтов от излучения.
- Космическая технология.

Литература

Основная:

- Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. Учебник. – М.: Наука, 1977. – 544 с.
- Воронцов-Вельяминов Б.А. и др. Методика преподавания астрономии в средней школе: Пособие для учителя. – М.: Просвещение, 1985. – 240 с.
- Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
- Клищенко А.П., Шупляк В.И. Астрономия: Учебное пособие. – М.: Новое знание, 2004. – 224 с.
- Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие. – М.: Едиториал УРСС, 2001. – 544 с.
- Левитан Е.П. Дидактика астрономии. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 296 с.
- Мартынов Д. Я., Липунов В.М. Сборник задач по астрофизике. – М.: Наука, 1988. – 125 с.
- Мартынов Д.Я. Курс общей астрофизики: Учебник. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
- Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. – М.: Наука, 1985. – 326 с.

Дополнительная

- Агемян Т.А. Звезды, галактики, Метагалактика. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
- Волынский Б.А. Астрономия: (Учебное пособие для естеств.–геогр. фак. пед. ин-тов). /Под ред. проф. Р.В.Куницкого. – М.: Просвещение, 1971. – 208 с.
- Горбацкий В.Г. Введение в физику галактик и скоплений галактик. – М.: Наука, 1986. – 253 с.
- Гуревич Л.Э., Чернин А.Д. Происхождение галактик и звезд. – М.: Наука, 1987. – 190 с.
- Дагаев М.М. Лабораторный практикум по курсу общей астрономии: (Для пед. ин-тов). – М.: Высшая школа, 1972. – 284 с.
- Дагаев М.М. Сборник задач по астрономии: (Для физ.–мат. фак. пед. ин-тов). – М.: Просвещение, 1980. – 128 с.
- Дагаев М.М., Демин В.Г., Климишин И.А., Чаругин В.М. Астрономия: (Учебное пособие для физ.–мат. фак. пед. ин-тов). – М.: Просвещение, 1983. – 384 с.
- Данлоп С. Азбука звездного неба: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 238 с.
- Климишин И.А. Астрономия наших дней. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
- Климишин И.А. Элементарная астрономия. – М.: Наука, 1991. – 462 с.
- Курышев В.И. Практикум по астрономии: (Учебное пособие для физ. и мат. спец. пед. ин-тов). – М.: Просвещение, 1986. – 141 с.
- Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд: теория и наблюдения. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
- Монтенбрук О., Пфлегер Т. Астрономия на персональном компьютере (+CD). – Изд-во Питер. – 2002. – 320 с.
- Москаленко Е.И. Методы внеатмосферной астрономии: Учебное пособие. – М.: Наука, 1984. – 280 с.
- Мур П. Астрономия с Патриком Муром: Пер. с англ. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. – 368 с.
- Оксфордская иллюстрированная энциклопедия. В 9 тт. Т. 8. Вселенная: Пер. с англ. – М.: "Издательский дом ИНФРА-М", изд-во "Весь Мир", 2000. – 204 с.
- Сурдин В.Г. Астрономические олимпиады. – М.: МГУ, 1995. – 320 с.
- Уокер Г. Астрономические наблюдения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 352 с.
- Щеглов П.В. Проблемы оптической астрономии. – М.: Наука, 1986. – 271 с.

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СИМВОЛЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

☉	Солнце, а также Воскресенье	☿	комета
☾	Луна, а также Понедельник	☄	метеор
♂	Марс, а также Вторник	Var	переменная звезда
☿	Меркурий, а также Среда	♊ или ♋	восходящий узел орбиты
♃	Юпитер, а также Четверг	♋ или ♌	нисходящий узел орбиты
♀	Венера, а также Пятница	♌	соединение
♄	Сатурн, а также Суббота	♍	противостояние
♁ или ⊕	Земля	☐	квадратура
♅ или ♁	Уран	●	новолуние
♆ или ♁	Нептун	☾	первая четверть
♇ или ♁	Плутон	◯	полнолуние
★	звезда	☾	последняя четверть

N	север	A	азимут
NE	северо - восток	α или (AR)	прямое восхождение
S	юг	δ	склонение
SE	юго — восток	λ	эклиптическая, а также географическая долгота
E	восток		
NW	северо — запад	β	эклиптическая широта
W	запад	ϕ	географическая широта
SW	юго - запад	z	зенитное расстояние
a	год	μ	собственное движение
d	сутки	l или l'	галактическая долгота
h, m, s	час, минута, секунда времени	b	галактическая широта
°, ', "	градус, минута, секунда дуги	π	годовой параллакс
t	часовой угол светила	V_r	лучевая скорость
s	звездное время	h	высота светила над горизонтом
$T_{\odot}$	солнечное время		
T_{*}	звездный год	ρ	полярное расстояние
ε	угол между эклиптической и небесным экватором (между экватором Земли и плоскостью ее орбиты)		

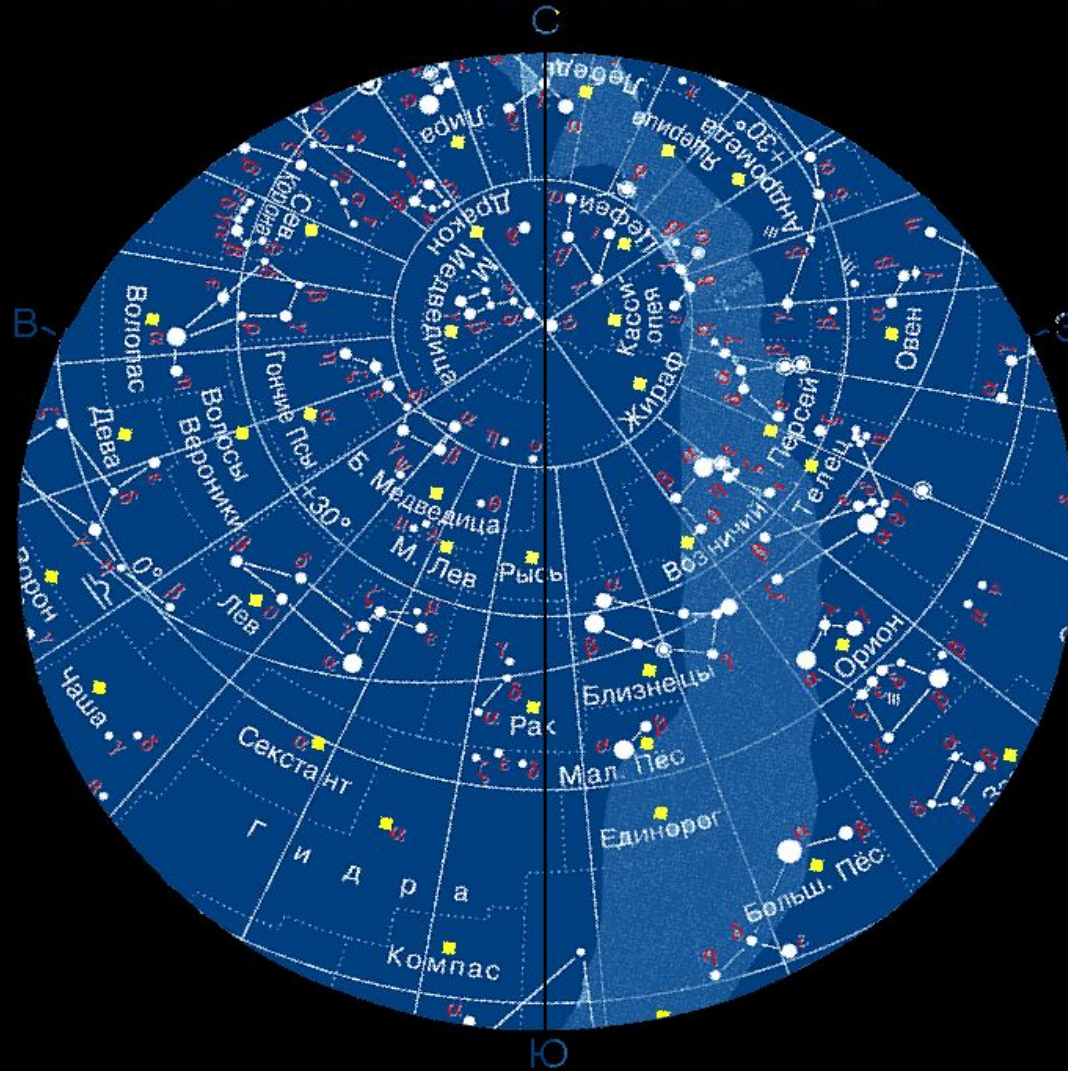
ЗНАКИ ЗОДИАКА

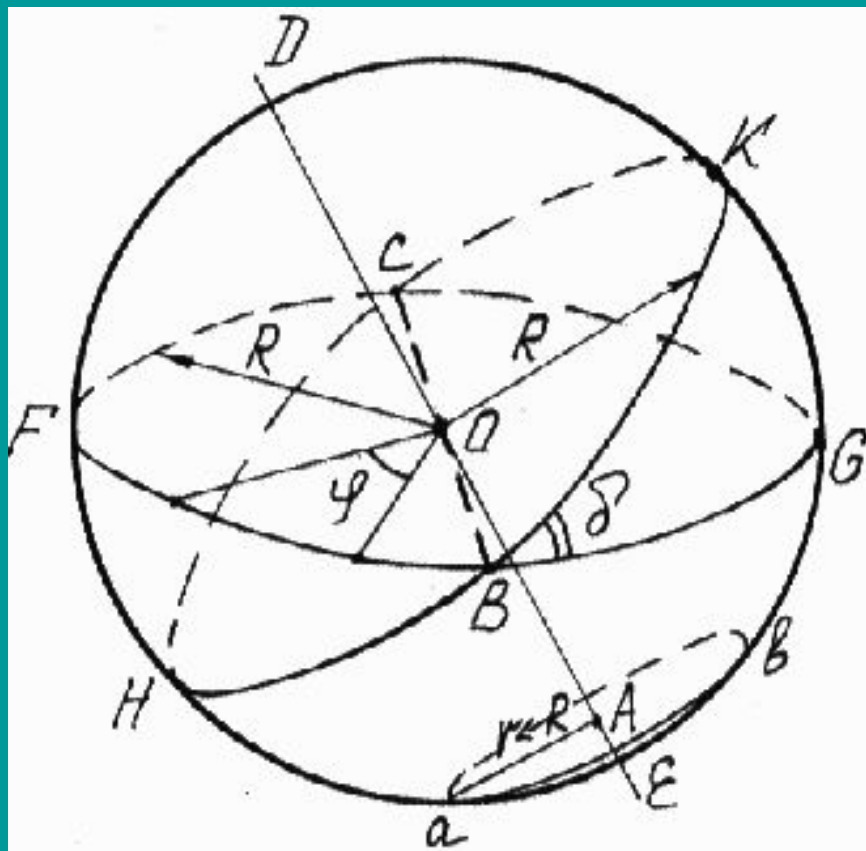
- ♈ Arles (Овен), а также точка весеннего равноденствия в созвездии Рыб
- ♎ Libra (Весы), а также точка осеннего равноденствия в созвездии Девы
- ♉ Taurus (Телец) ♏ Scorpius (Скорпион)
- ♊ Gemini (Близнецы) ♐ Sagittarius (Стрелец)
- ♋ Cancer (Рак), а также точка летнего солнцестояния в созвездии Тельца (с 1990 г.)
- ♑ Capricornus (Козерог), а также точка зимнего солнцестояния в созвездии Стрельца
- ♌ Leo (Лев) ♒ Aquarius (Водолей)
- ♍ Virgo (Дева) ♓ Pisces (Рыбы)

Глава I СФЕРИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

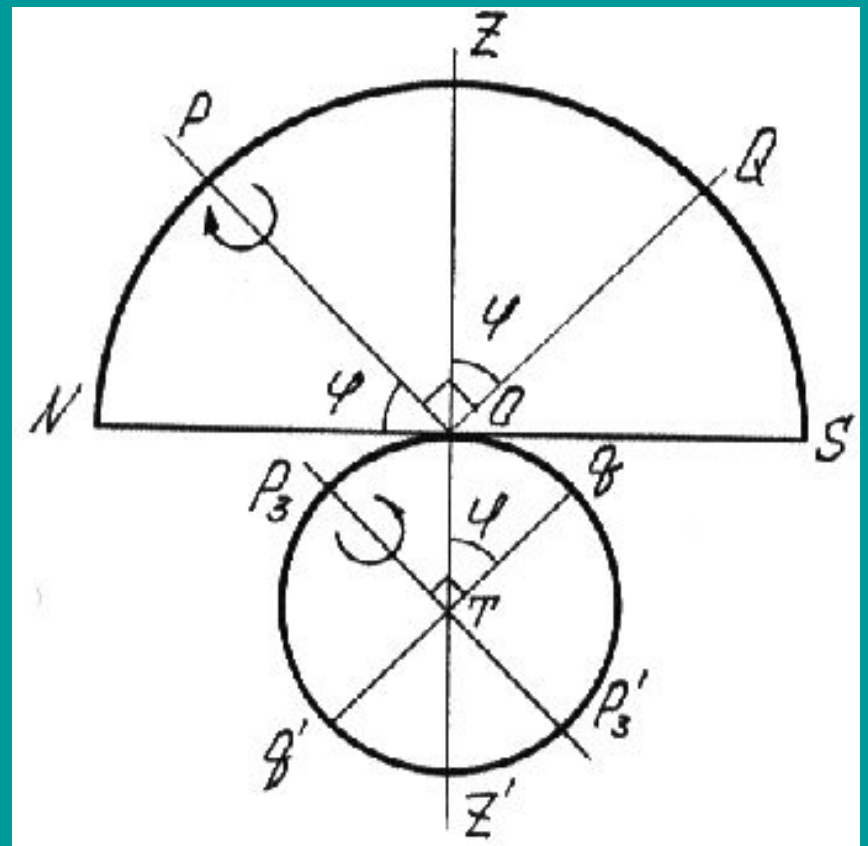
Карта звездного неба

г.Тайшет (56"N, 98"E), 24 января в 0 час.0 мин.

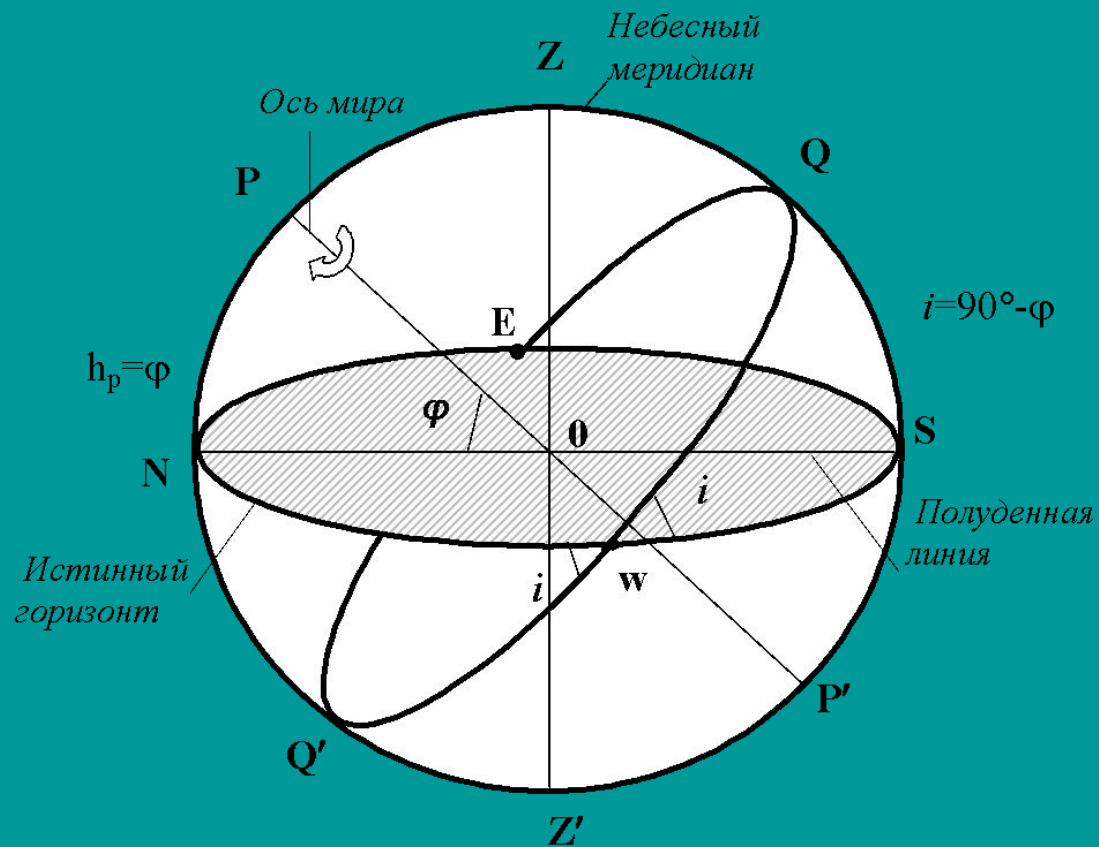




Характеристики сферы: FG, HK – большие круги сферы (радиуса R), ab – малый круг сферы (радиуса r), ϕ – центральный угол в плоскости большого круга, δ – угол между плоскостями больших кругов



Вид небесной сферы для наблюдателя, находящегося на поверхности Земли на широте ϕ (точка O)



Основные элементы
небесной сферы

Сферический
избыток

$$\sigma = A + B + C - 180^\circ$$

Площадь
сферического
треугольника

$$S = \sigma \frac{\pi R^2}{180^\circ}$$

Основные формулы

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

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

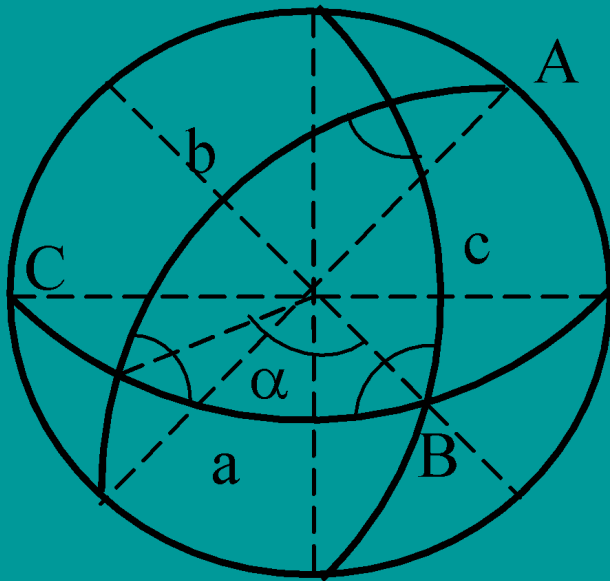
$$\sin c \cdot \cos A = \sin b \cdot \cos a - \sin a \cdot \cos b \cdot \cos C$$

При $C=90^\circ$ $\cos c = \cos a \cdot \cos b$

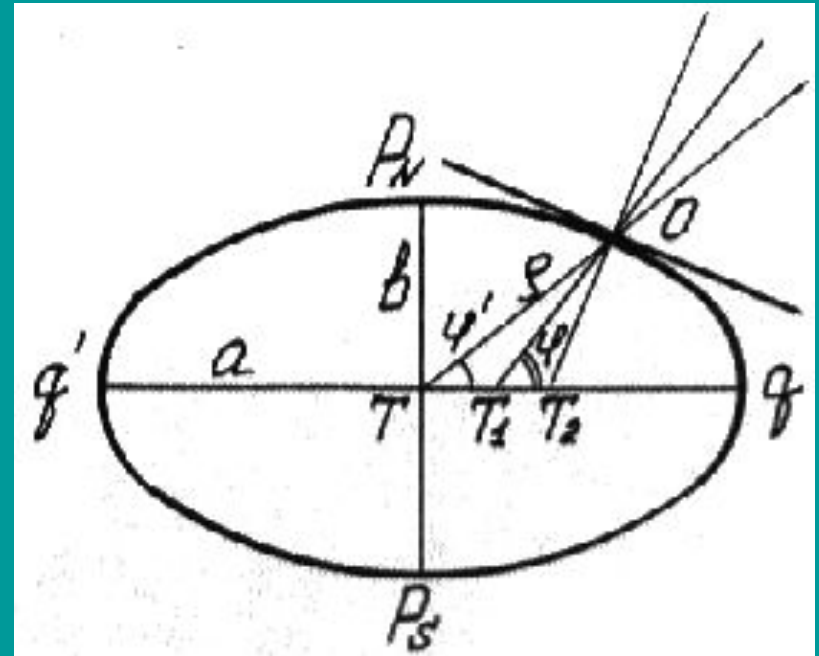
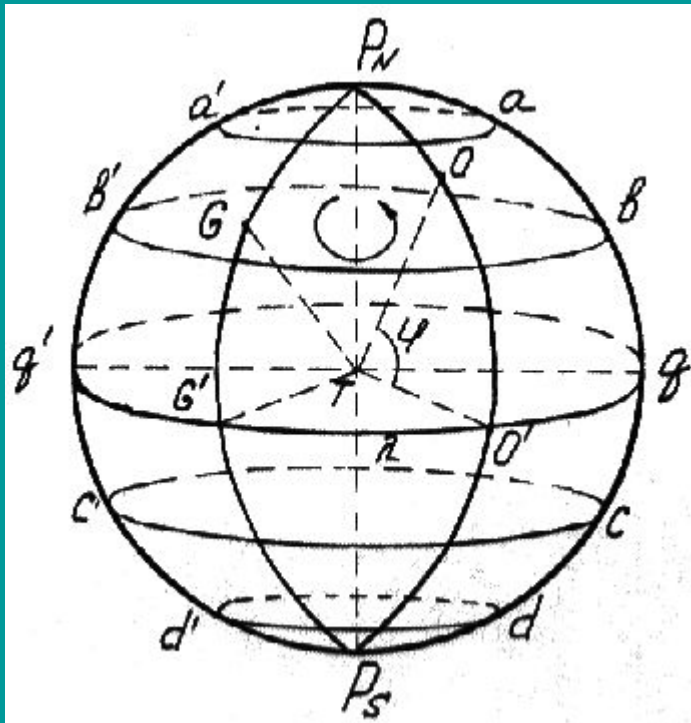
$$\sin a = \sin b \frac{\sin A}{\sin B} \quad \sin a = \sin c \cdot \sin A$$

$$\sin b = \sin c \cdot \sin B$$

$$\sin c \cdot \cos A = \sin b \cdot \cos a \quad \sin b = \operatorname{tga} \cdot \operatorname{ctg} A$$

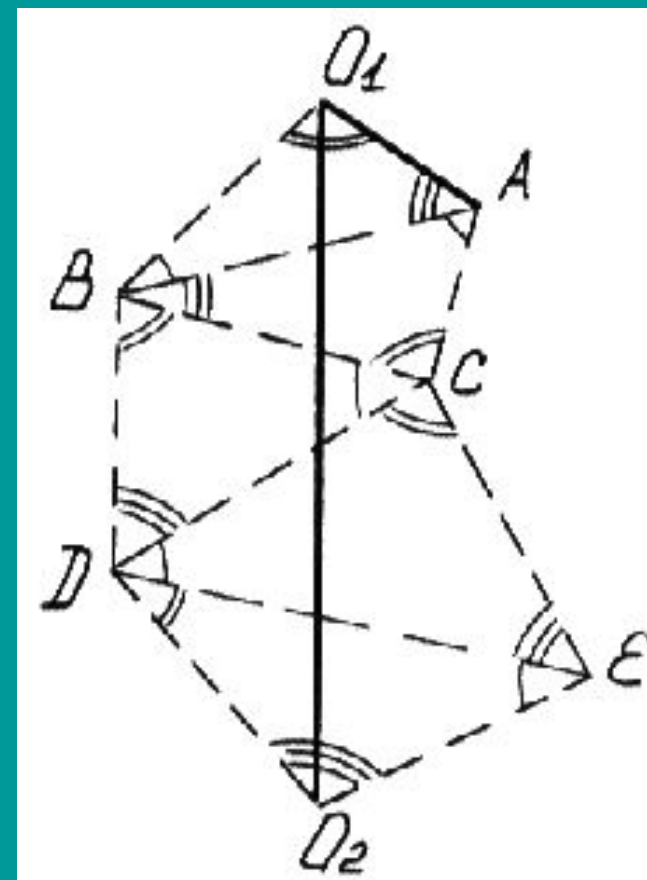
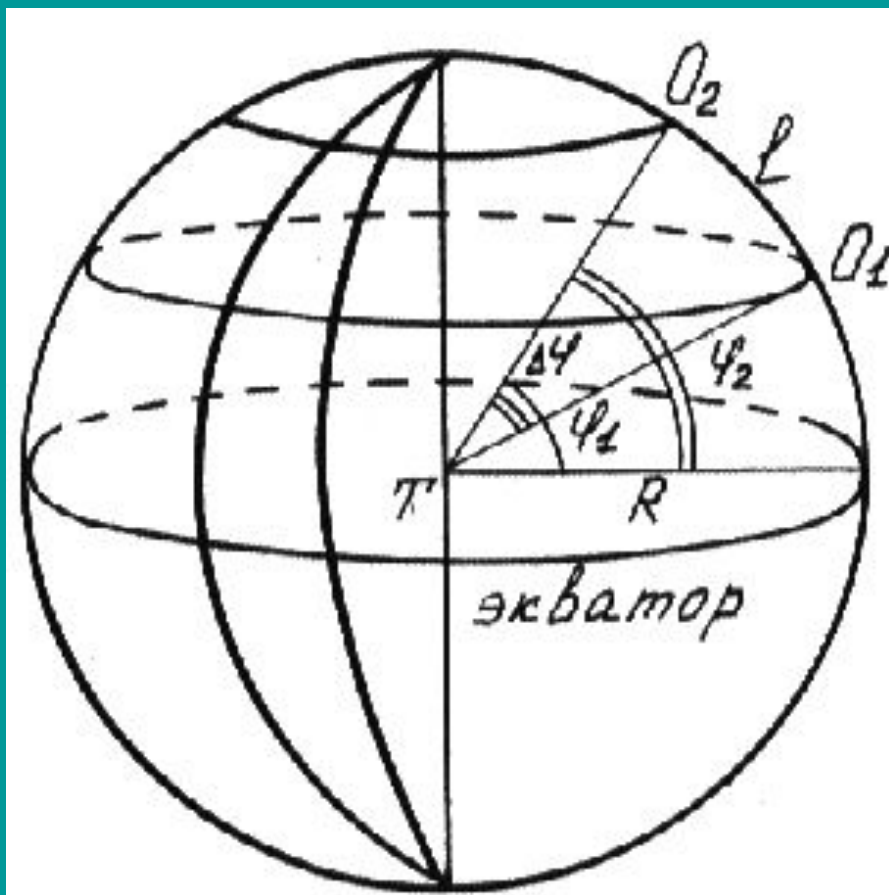


Географическая система координат



Географические координаты

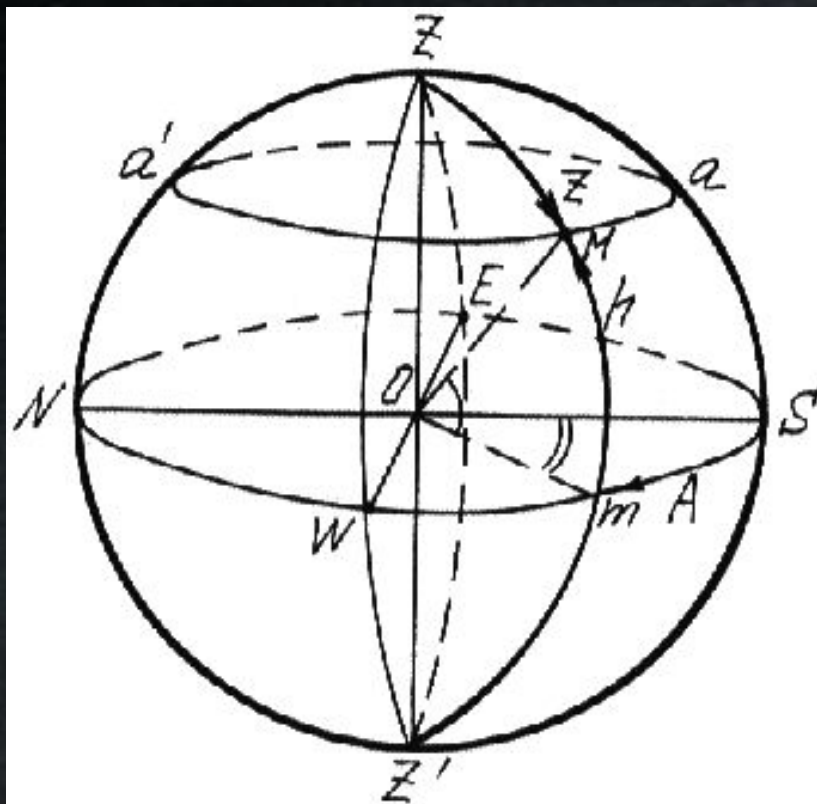
Различные виды географической широты: OTq – геоцентрическая широта (ϕ'); OT_1q – астрономическая широта (ϕ'); OT_2q – геодезическая широта; a и b – полуоси земного эллипсоида



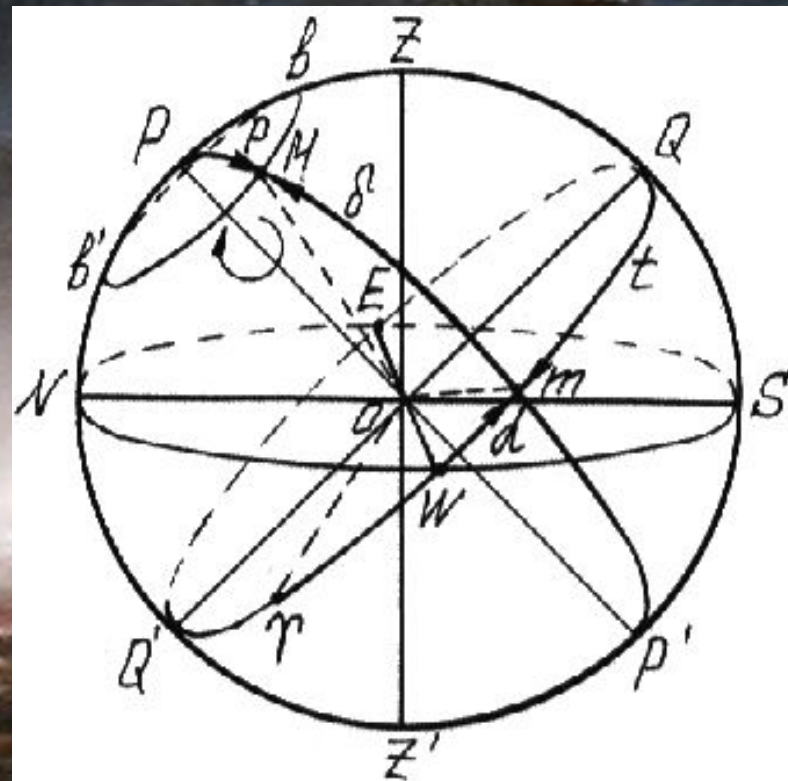
Определение длины дуги (O_2O_1) земной поверхности на одном меридиане

Триангуляционный метод определения расстояний на поверхности: O_1A – базис; O_1O_2 – искомое расстояние ; A, B, C, D, E – вспомогательные точки измерения

Горизонтальная и экваториальная сферические системы небесных координат



Горизонтальная система небесных координат

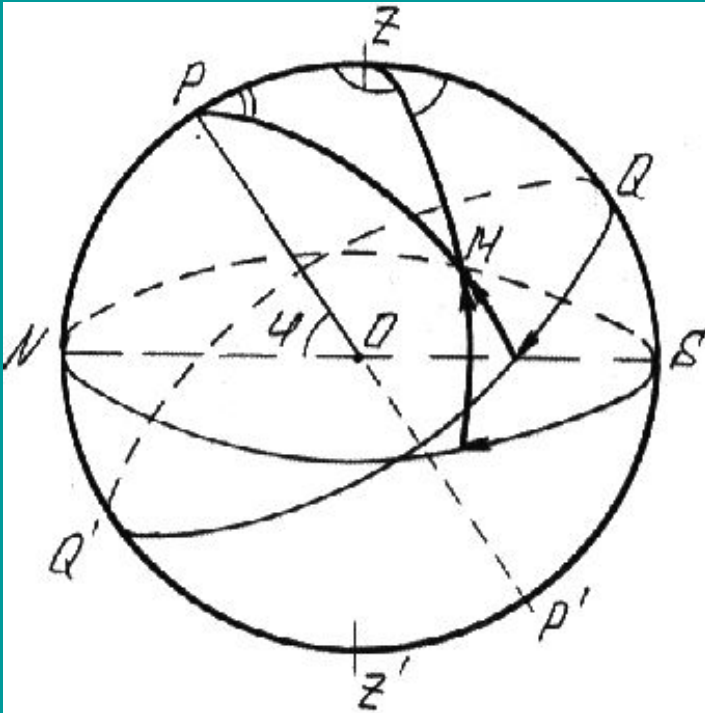


Экваториальная система небесных координат

Таблица. Связь между градусным и часовым измерением α и t

Часы	24 ^ч	1 ^ч	4 ^м	1 ^м	4 ^с	1 ^с	1 ^с / 15
Градусы	360°	15°	1°	15'	1'	15''	1''

Преобразование небесных координат



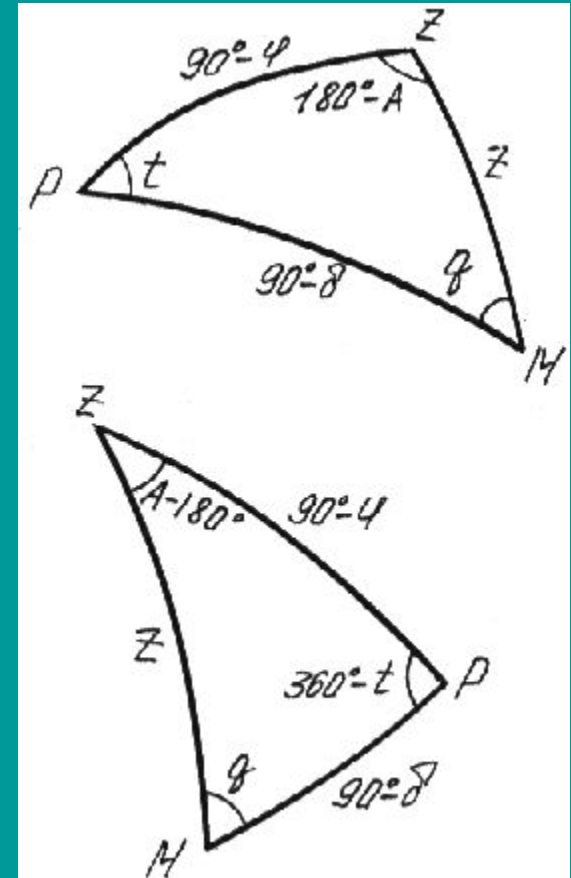
Определение параллактического треугольника

Формулы преобразования

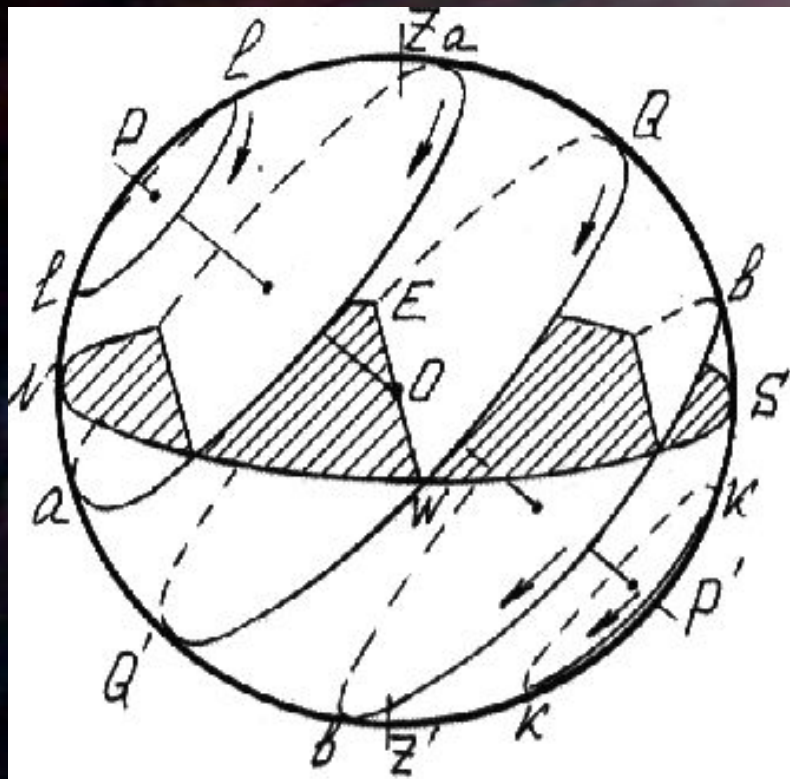
$$\sin Z \sin A = \sin t \cos \delta$$

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos t$$

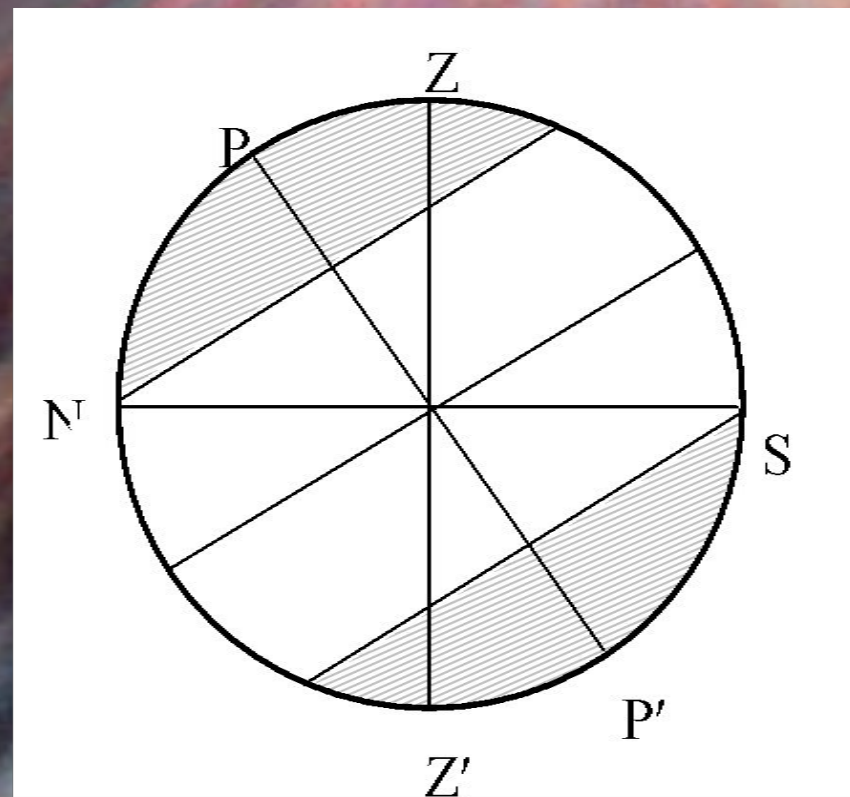
$$\sin Z \cos A = \cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos t$$



Параллактический треугольник в западной и восточной небесной полусфере



Суточные параллели
для наблюдателя на
произвольной широте ϕ



Область небесной сферы с
незаходящими (заштрихованная
часть северного полушария) и
невосходящими
(заштрихованная часть южного
полушария) светилами

Кульминация светил

Верхняя кульминация

$$t=0^\circ; Z \geq 0;$$

$$Z = \pm(\phi - \delta); \cos Z \cos A = \sin(\phi - \delta)$$

$$1. \phi > \delta \quad Z_B = \phi - \delta \quad h_B = 90^\circ - (\phi - \delta)$$

$$\cos A = +1 \quad A = 0$$

Кульминация к югу от зенита

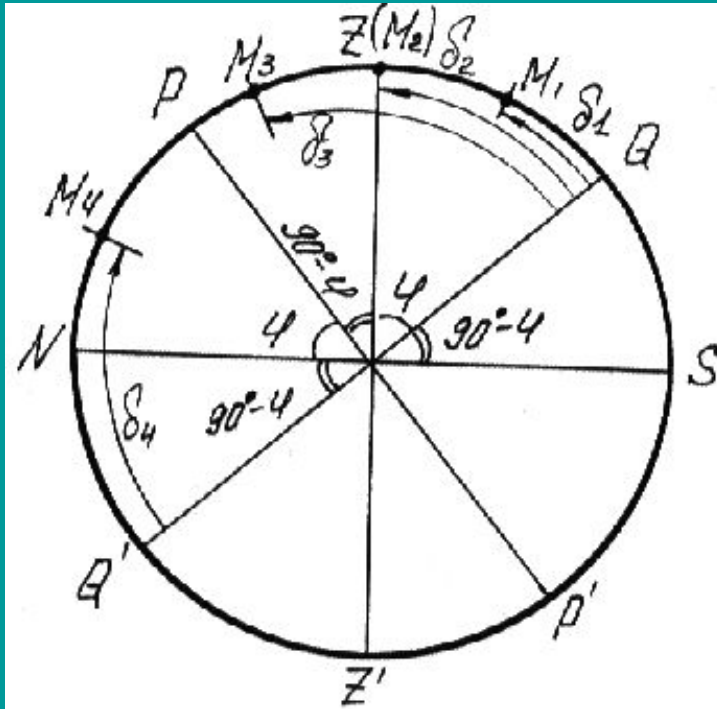
$$2. \phi < \delta \quad Z_b = \delta - \phi \quad h_B = 90^\circ - (\delta - \phi)$$

$$\cos A = -1 \quad A = 180^\circ$$

Кульминация к северу от зенита

$$3. \phi = \delta \quad Z_b = 0^\circ \quad h_B = 90^\circ$$

Кульминация в зените



Условия видимости светил

Не восходит, если

$$h_b \leq 0^\circ; Z_b \geq 90^\circ; \delta \leq -(90^\circ - \phi)$$

Не заходит, если

$$h_H \geq 0^\circ; Z_H \leq 90^\circ; \delta \geq 90^\circ - \phi$$

«Заходящие – восходящие», если

$$-(90^\circ - \phi) \leq \delta \leq (90^\circ - \phi)$$

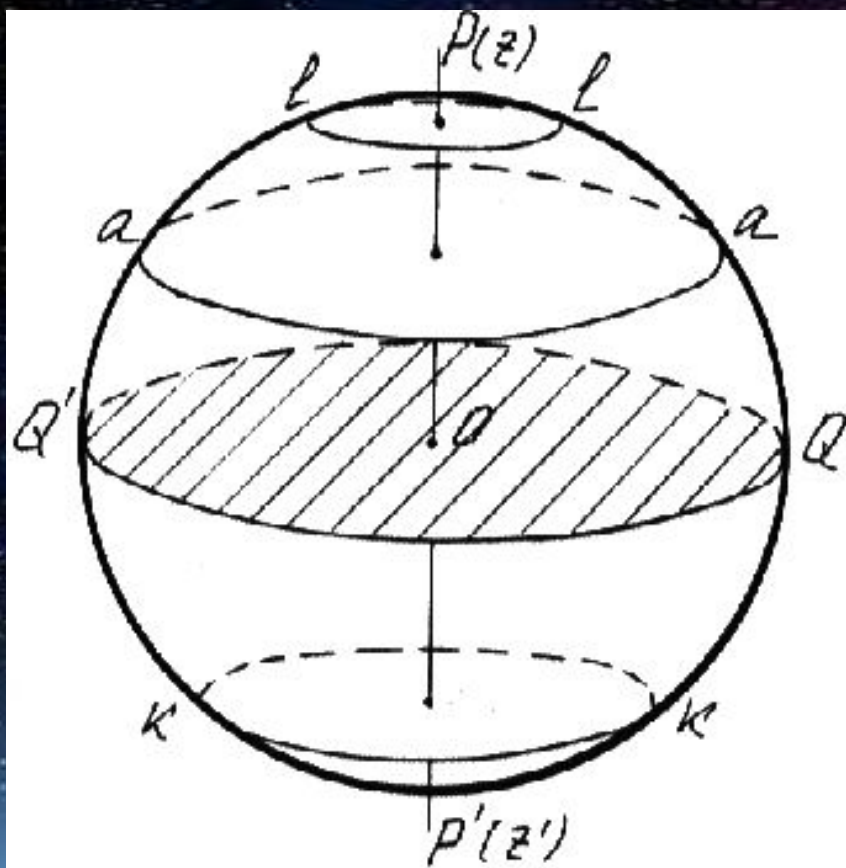
Нижняя кульминация

$$\cos t = -1;$$

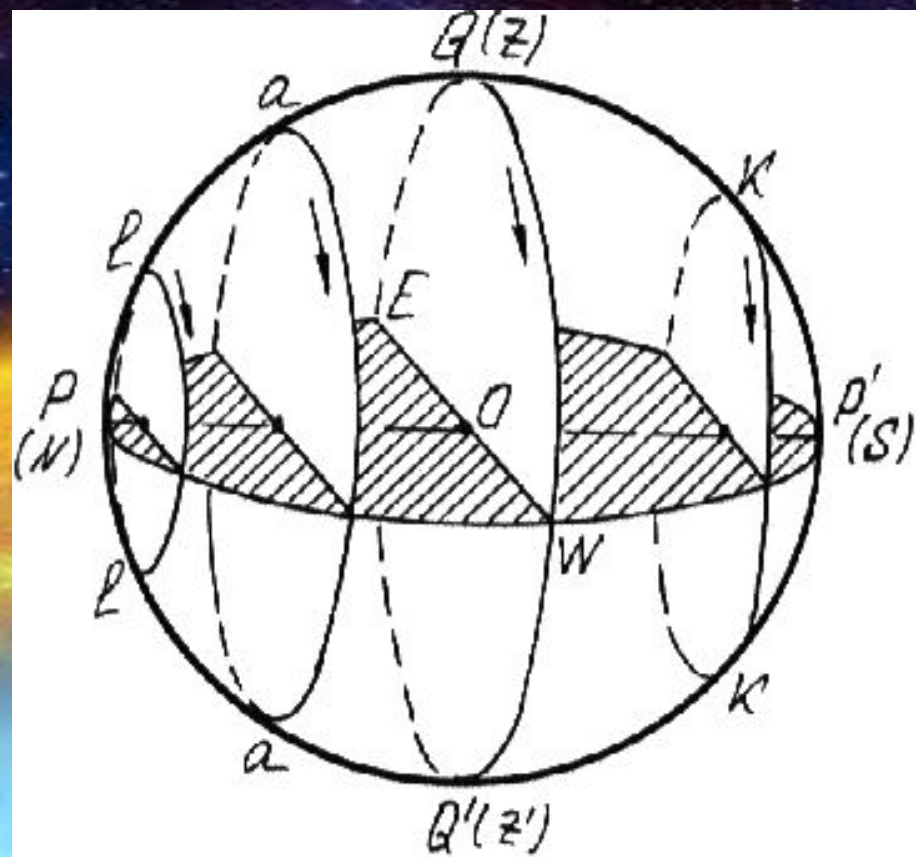
$$\cos Z = -\cos(\phi + \delta) = [180^\circ - (\phi + \delta)]$$

$$Z_H = 180^\circ - \phi - \delta$$

$$h_H = \delta - (90^\circ - \phi)$$

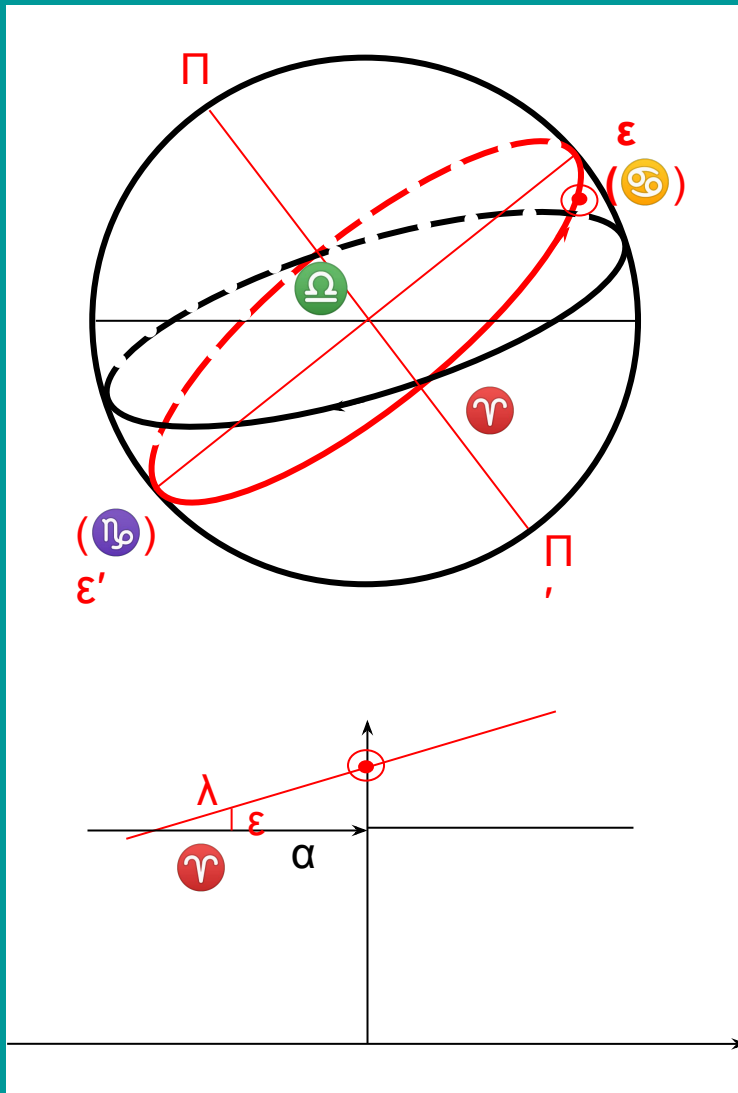


**Суточные параллели
звезд для наблюдателя на
полюсах Земли**



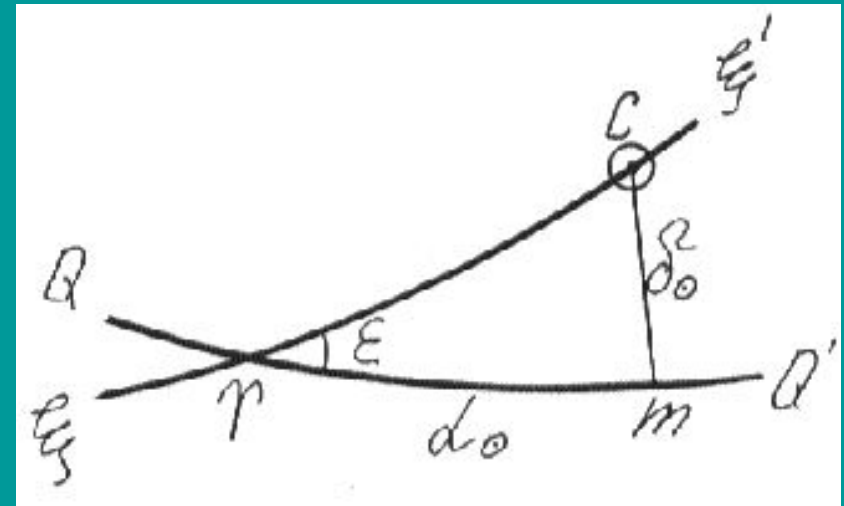
**Суточные параллели звезд
на экваторе Земли**

Видимое движение Солнца, его причины и следствия



горизонт

Основные линии и точки
небесной сферы, связанные с
эклиптикой

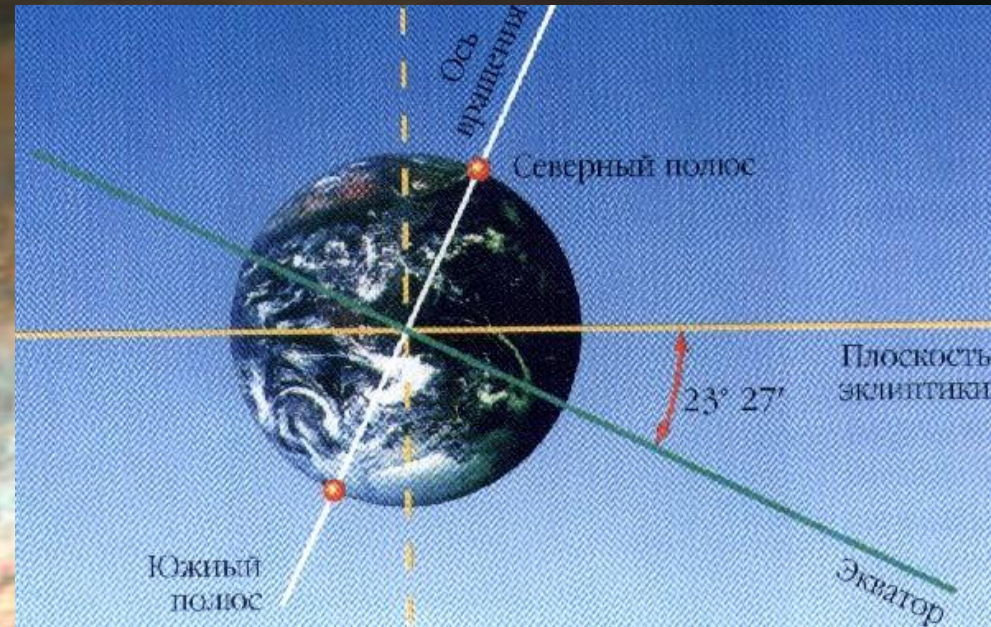
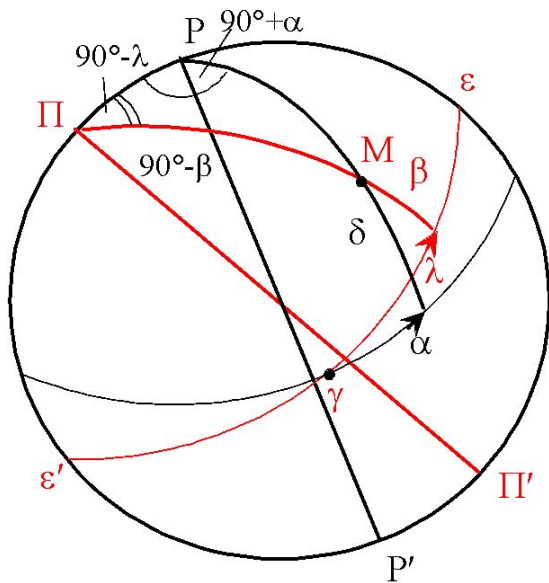


Схема, поясняющая метод
определения абсолютных
координат Солнца $\delta_{\odot}$ и $\alpha_{\odot}$:
QQ' - линия небесного
экватора, $\xi\xi'$ - линия
эклиптики

$$\delta_{\odot} = \phi - Z_{\odot}$$

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \delta_{\odot} \operatorname{ctg} \varepsilon$$

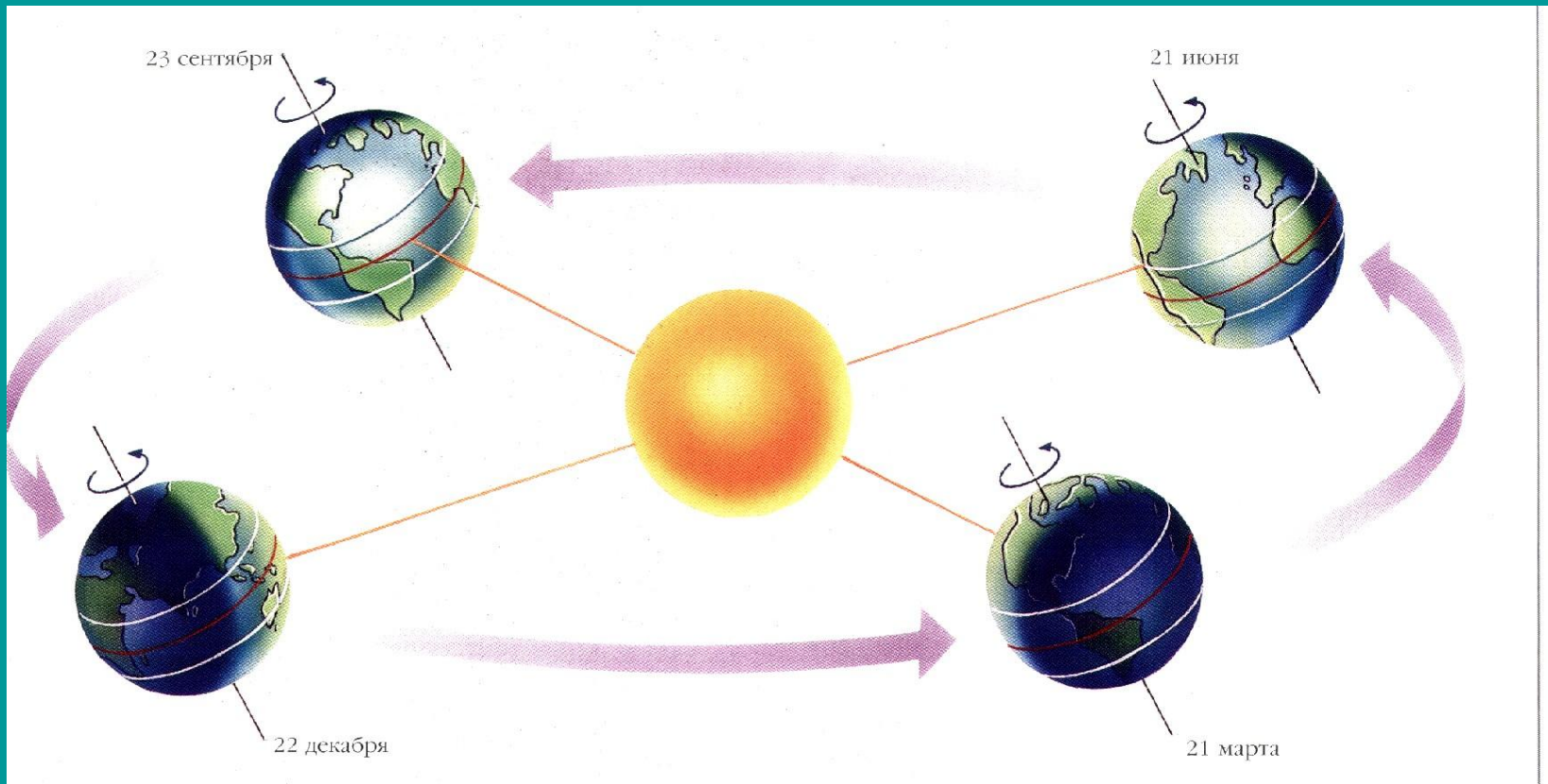
Для Солнца $\beta = 0$
 $\cos \lambda = \cos \alpha \cdot \cos \delta$
 $\sin \lambda = \sin \alpha \cdot \cos \delta \cdot \sec \varepsilon$



Преобразование эклиптических
 координат в экваториальные.
 Астрономический треугольник

Наклон плоскости экватора Земли к
 плоскости своей орбиты (плоскости
 эклиптики, обеспечивающей смену
 времен года)

Смена времен года на планете Земля



$$T_* = 365,2564 = 365^{\text{Д}}6^{\text{Ч}}09^{\text{М}}10^{\text{С}}$$

$$T_{\gamma} = 365^{\text{Д}}5^{\text{Ч}}48^{\text{М}}46^{\text{С}}$$

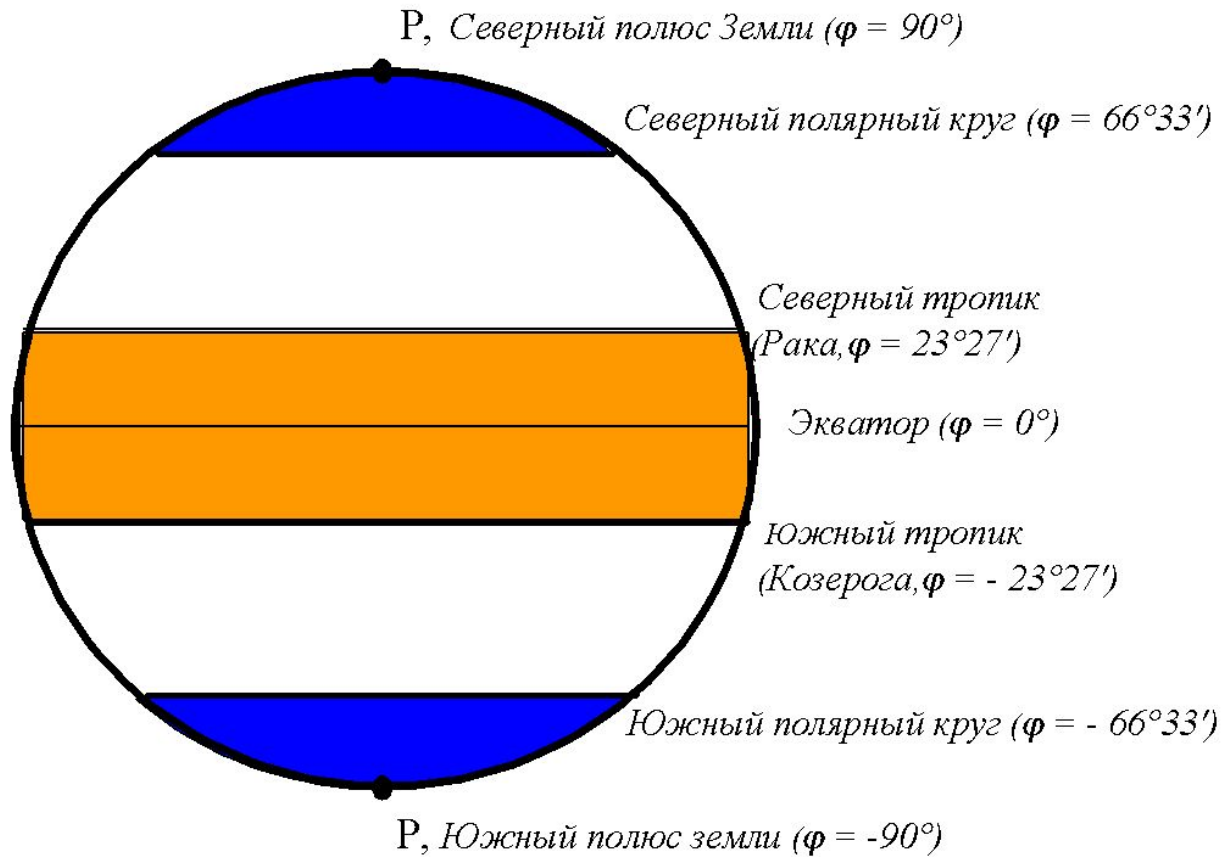
$$n_{\text{ср}} = 360^{\circ}/T_* = 59'/\text{день}$$

Летом $n = 59'/\text{день}$

Зимой $n = 61'/\text{день}$

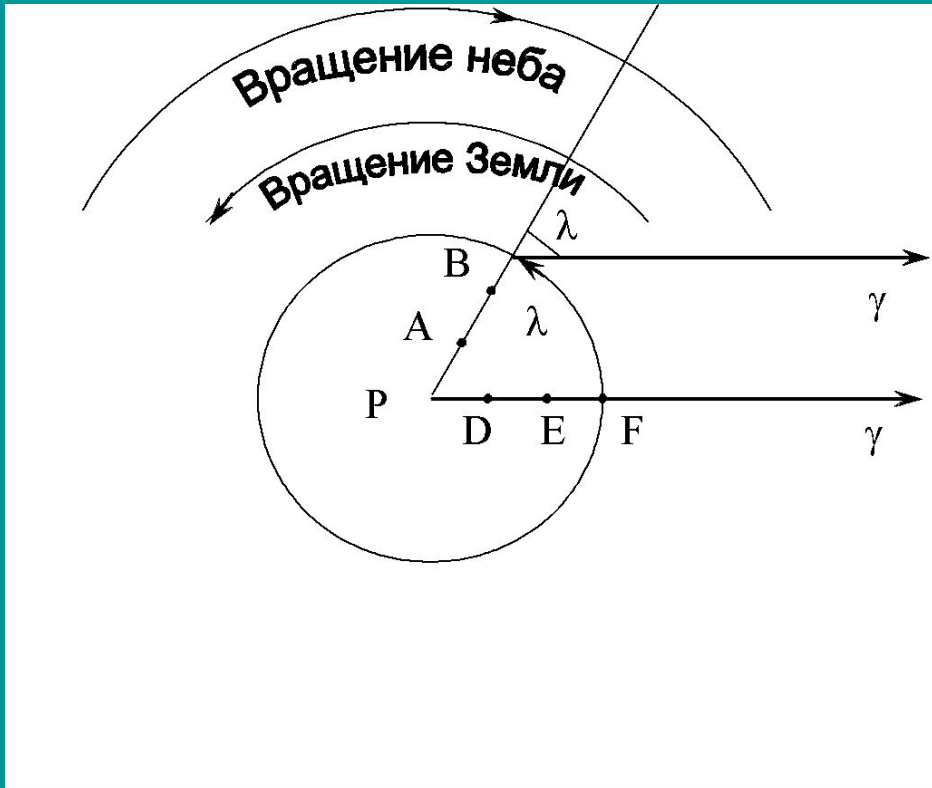
Начало года: $\lambda = 280^{\circ}$

Климатические (тепловые) пояса Земли



Измерение времени

Звездное время



Связь всемирного S_0 и
местного S звездного
времени

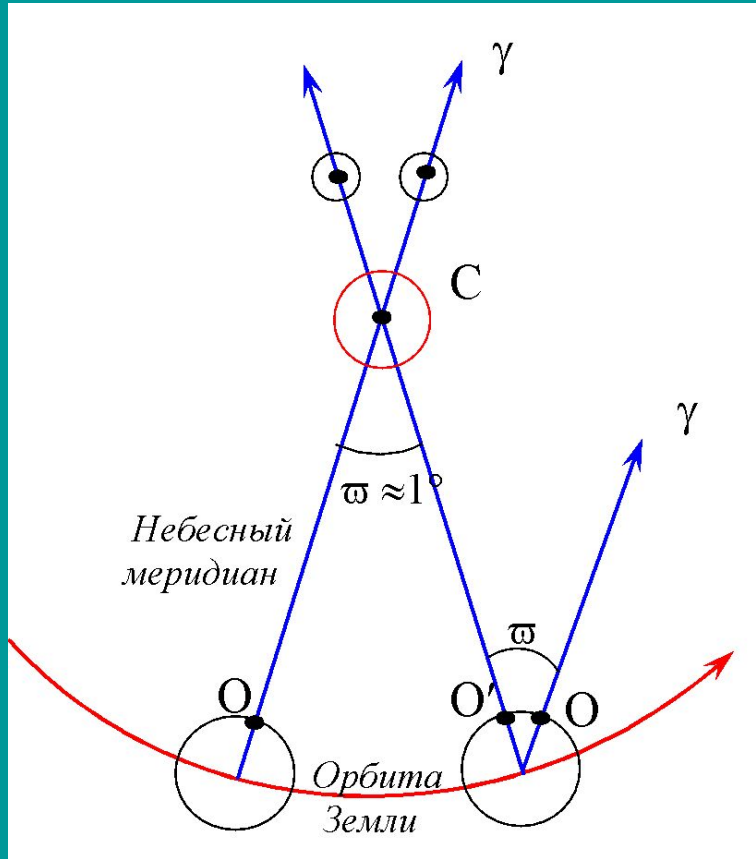
$$S = S_0 + \lambda;$$

S_0 – звездное время Гринвича

$S = t\gamma$ - звездное время, t – часовой угол точки γ .

$S = \alpha + t$, где t – часовой угол звезды с прямым восхождением α .

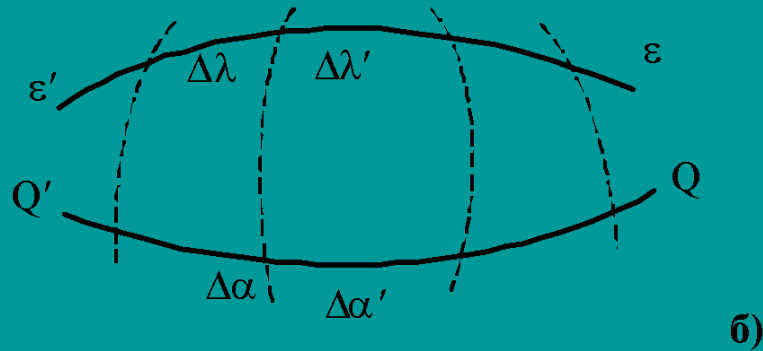
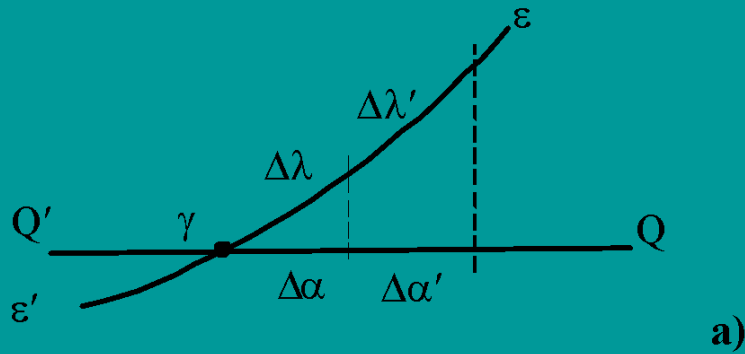
Истинное и среднее солнечное время



$T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h$ – истинное солнечное время
Если $t_{\odot} = 0^h$, то $T_{\odot} = 12^h$ – истинный полдень
 $\Delta T = T_{\odot} - T_{*} = 3^m 56^s, 56$ – разница между
солнечными и звездными сутками

Схема, поясняющая отличие
звездных суток от истинных
солнечных суток

Среднее солнечное время. Уравнение времени



$$T_{\lambda} = \langle T_{\odot} \rangle = 24^{\text{ч}}; 1^{\text{ч}} = 60^{\text{м}}; 1^{\text{м}} = 60^{\text{с}}$$

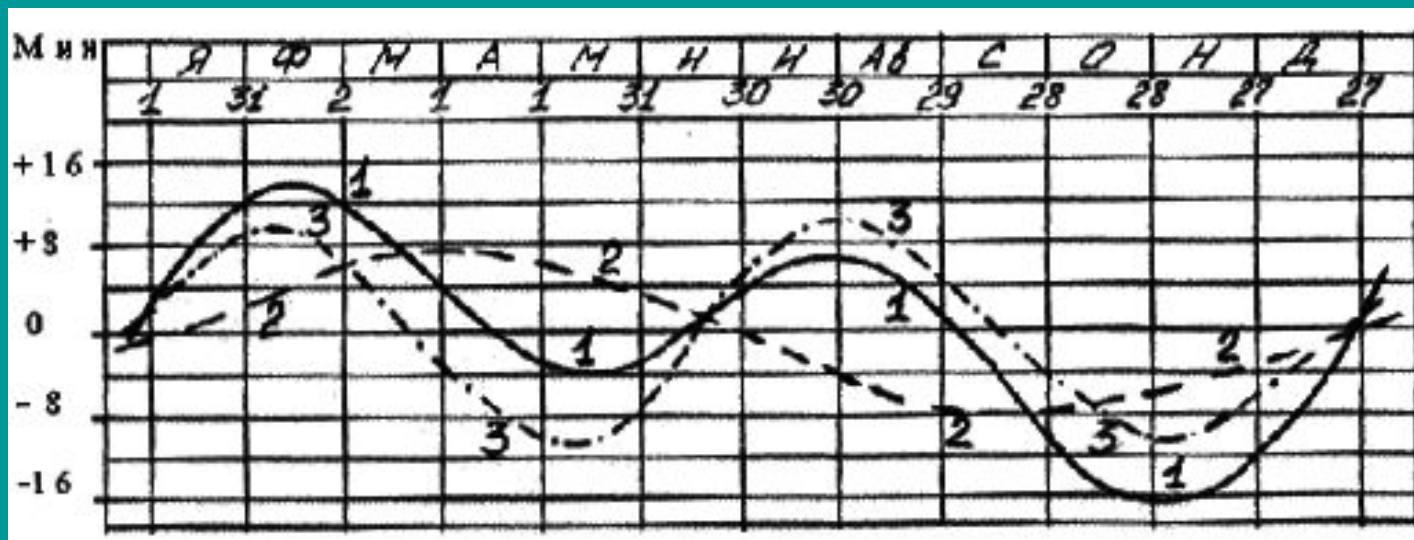
$\eta = T_{\lambda} - T_{\odot}$ - уравнение времени

T_{λ} - среднее солнечное время

$$t_{\lambda} = S - \alpha_{\lambda} \quad T_{\lambda} = T_{\odot} + \lambda$$

$T_{\odot}$ – всемирное время, λ - долгота местности

Характер изменения $\Delta\alpha$ и $\Delta\lambda$ в точках равноденствия (1) и солнцестояния (2)



- 1 - график уравнения времени;
 2 - график уравнения от эксцентриситета;
 3 - график уравнения от наклона эклиптики

$\eta = 7^m,7 \sin(\lambda_m + 78^\circ) - 9^m,5 \cdot \lambda_m$ – приближенная величина уравнения времени, где λ_m – средняя долгота Солнца на каждые сутки.

Перевод интервалов звездного времени ΔS и среднего солнечного времени ΔT_m друг в друга

$$\Delta S = K \cdot \Delta T_m \quad \Delta T_m = K' \Delta S$$

где $K = 1,002738$ где $K' = 0,997270$

Системы счета времени

$T_{\lambda} = T_0 + \lambda$ - среднее солнечное время на долготе λ .

$T_{\lambda_2} - T_{\lambda_1} = \lambda_2 - \lambda_1$

$T_n = T_0 + n$ – поясное время, n – номер пояса

$T_{n'} = T_0 + 1^h + n$ – летнее время в поясе n

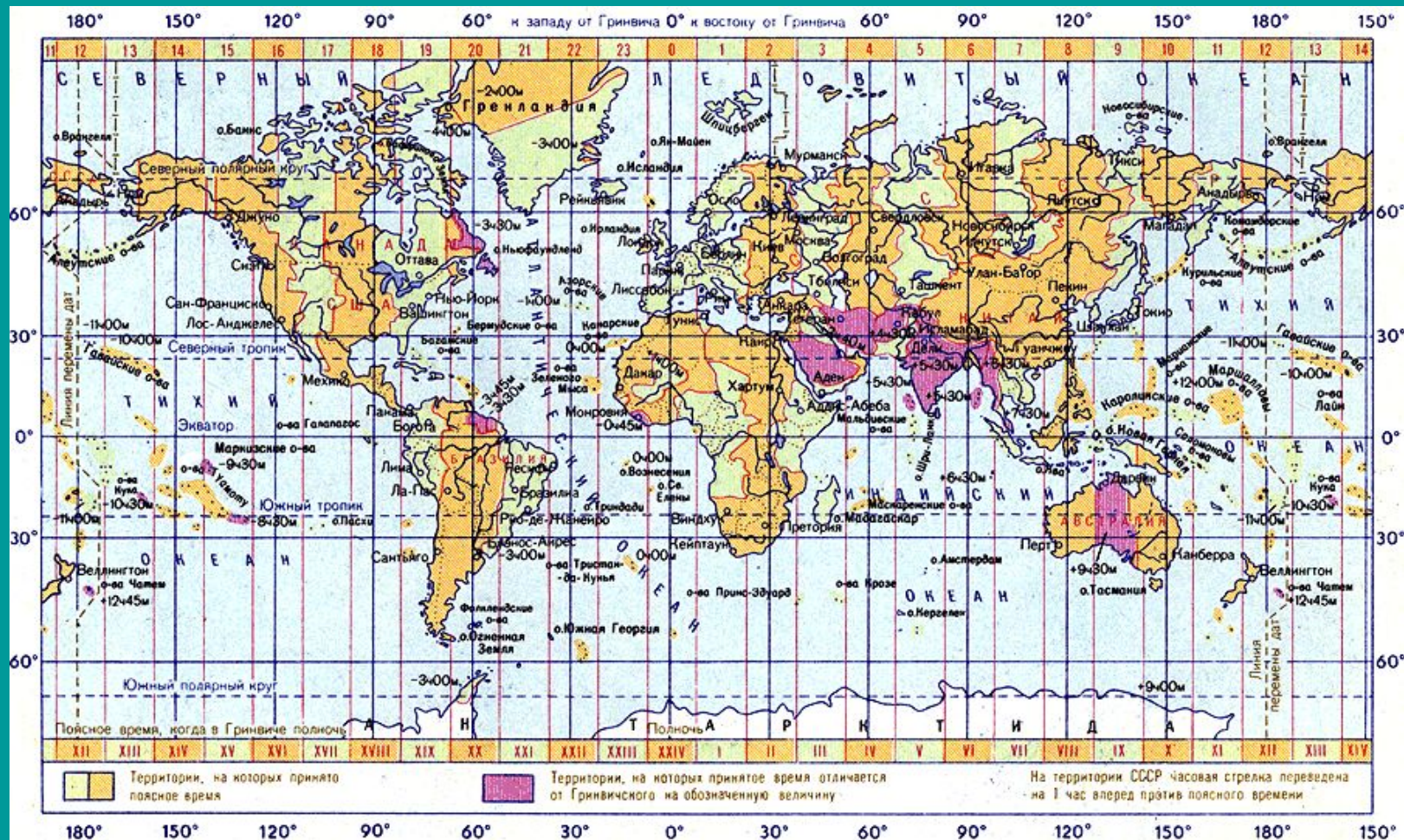


Схема часовых поясов на поверхности Земли

Эфемеридное время

Положения объектов солнечной системы, вычисленные на основании теории тяготения, относятся по времени, которое является независимой переменной дифференциальных уравнений движения небесных тел. Это время считается равномерным и называется эфемеридным ($T_{\text{эф}}$).

Если бы Земля вращалась вокруг своей оси также равномерно, то наблюдаемые и вычисленные координаты Солнца, Луны и планет для $0^{\text{ч}}$ всемирного и $0^{\text{ч}}$ эфемеридного времени совпали.

Однако, как показывают наблюдения, угловая скорость Земли непостоянна из-за вековых и скачкообразных периодических и сезонных изменений. В результате вековых изменений продолжительность одного оборота Земли увеличилась за последние 2000 лет на $0^{\circ},0023$ за столетие (за последние 250 лет это увеличение уменьшилось – около $0^{\circ},0014$ за 100 лет). Причина этого замедления в действии солнечных и лунных приливов. В результате сезонных изменений скорость вращения Земли может отличаться от средней на $\pm 0^{\circ},001$.

Неравномерность вращения Земли приводит к разности наблюдаемых и вычисленных координат планет, Луны и Солнца, причем она больше, чем больше среднее суточное движение светила $n = 360^{\circ}/T_{*}$ и зависит от разности между эфемеридным $T_{\text{эф}}$ и всемирным временем T_0 . Поскольку n имеют Луна, Меркурий, Венера и Солнце, то для этих объектов следует ожидать различие в координатах вычисленных и наблюдаемых.

Величина $\Delta T = T_{\text{эф}} - T^{\circ}$ вычисляется из сравнения наблюдаемых и эфемеридных координат Луны (для ее эта величина наибольшая) по формуле

$\Delta T = +24^{\circ},349 + 72^{\circ},318T + 29^{\circ},950T^2 + 1,821V$, где T – время в юлианских столетиях, отсчитанное от момента 1900,0 12^ч эфемеридного времени в Гринвиче, V – флуктуация долготы Луны.

Разность ΔT в 1900 году была близка к нулю.

В настоящий момент эфемеридное время на 55 сек опережает всемирное. За последнее столетие изменился подход к определению эталона времени. В связи с использованием с 1952 года эфемеридного времени было введено новое определение секунды. До 1956 года секунда определялась как 1/86400 доля солнечных суток. В октябре 1956 года Международное Бюро мер и весов установило 1 секунду как 1/31556425,9747 долю тропического года, продолжительность которого в системе эфемеридного времени в 1900 г. равнялась 365, 2421988 средних солнечных суток.

Создание атомных и молекулярных эталонов привело к созданию в 1972 г. атомного времени, которое определяется атомными процессами и в настоящее время считается наиболее точным.

Календарь — это система для фиксирования начала, продолжительности и порядка следования времени года. Все календари можно разделить на три типа: солнечный, лунный и солнечно-лунный. В основе первого лежит продолжительность тропического года (365,2422 дня), лунного — синодический месяц, или лунация (около 29,5 дней) третьего типа — комбинация лунного месяца и солнечного года.

При составлении календарного года (календаря) надо учитывать следующие факторы:

1. Продолжительность календарного года в среднем за несколько лет должна быть как можно ближе к продолжительности тропического года, а, следовательно, трудовой деятельности человека.

2. Календарь должен содержать целое число средних солнечных суток, т.к. неудобно начинать один год ночью, другой утром и т.д.

У большинства народов сначала был принят лунный календарь, в котором основным интервалом был месяц, а не год, и были предложены различные системы, чтобы согласовать его с циклом смены времен года. Например, для вавилонян начало нового месяца было появление на западном небе нарождающейся Луны, причем началом суток был момент восхода Солнца. Средняя длина этих месяцев была равна синодическому месяцу и нормальный год имел 12 месяцев или около 354 суток. Для того, чтобы поддерживать соответствие календаря временам года по мере необходимости вставляли дополнительный месяц (проводили интерполяцию).

Календарь (К)

К — система счета длительных промежутков времени

1. **Солнечный** - основа — тропический год
2. **Лунный** — основа — синодический месяц
3. **Солнечно-лунный** — сочетание этих периодов

К учитывает:

1. Продолжительность **К** года в среднем должна совпадать с продолжительностью тропического $T_{\odot} = 365,2422 = 365^{\text{д}}5^{\text{ч}}48^{\text{м}}46^{\text{с}}$
2. Календарь должен содержать целое число суток
Юлианский **К** - $(3 \times 365 + 1 \cdot 366) / 4 = 365,25$
 $\Delta T = T_{\odot} - T_{\text{ю}} = 0,0078 \text{ сут. (1 сутки за 128 лет)}$
Григорианский **К** - $(3 \times 365 + 1 \cdot 366) / 4$ с учетом того, что 1700, 1800, 1900, 2100 ... годы не високосные
 $\Delta T = T_{\odot} - T_{\text{г}} = 0,0003 \text{ сут. (1 сутки за 3000 лет)}$

Основу юлианского календаря, который был распространен в Российской империи, а затем и в Советском Союзе, а, значит, и в Беларуси, вплоть до 20-х годов 20-го века составил лунный календарь, разработанный александрийским астрономом Созигеном и введенным в Римской империи Юлием Цезарем в 46 г. до н.э., что очевидно из его разделения на 12 месяцев. Однако месяцы в нем не соответствуют лунациям, поскольку в них были добавлены дни, чтобы довести продолжительность года до 365 дней. Точное соответствие со средним солнечным годом достигается путем вставки каждые четыре года високосного года, содержащего еще один 366 день – 29 февраля.

Таким образом, средняя продолжительность в юлианском календаре за 4 года составляет 365,25 средних солнечных суток. Расхождение календарного (юлианского) и тропического годов в 0,0078 суток приводит к тому, что за 400 лет день весеннего равноденствия по календарной дате будет наступать на 3 дня раньше.

Вплоть до 16-го века большинство стран Европы пользовались юлианским календарем, когда было обнаружено, что истинное весеннее равноденствие происходит на 10 суток раньше календарного, относимого к 21 марта. Установление данного календарного дня связано с с правилом определения даты религиозного весеннего праздника Пасхи, утвержденным Никейским Собором в 325 году н.э., когда день весеннего равноденствия пришелся на 21 марта по юлианскому календарю. В соответствии с решением Никейского Собора дата Пасхи определялась как первое воскресенье после полнолуния после дня весеннего равноденствия.

Григорианский календарь, впервые введенный в 1582 г. папой Григорием XIII и в настоящее время используемый почти всеми, вытеснил юлианский благодаря простым модификациям.

Булла Римского папы от 4 октября 1582 года говорила:

1. После 4 октября предписано считать наступление не 5, а 15 октября 1582 года, что вернуло календарную дату весеннего равноденствия к 21 марта и ликвидировало разницу в 10 дней, набравшую со времени Никейского Собора 325 года н.э.

2. Не считать в дальнейшем високосными те года столетия, у которых число сотен не делится без остатка на 4 (1700, 1800, 1900, 2100 и т.д.)

Вторым пунктом продолжительность календарного года в среднем за 400 лет устанавливалась равной 365,2425 суток, что отличало календарный год от тропического всего на 0,0003 суток (одни сутки набегали за 3000 лет).

Григорианский календарь – это в целом церковный календарь, связанный с установлением даты Пасхи. Как таковой он, прежде всего, был принят в католических странах, а затем постепенно распространялся и на другие страны.

Новый (григорианский) стиль календаря в Беларуси (тогда в составе СССР) был введен лишь в 1918 году, когда необходимо было ликвидировать отставание дат по старому (юлианскому) календарю на 13 суток. Соответствующим Декретом было предписано считать вместо 1 февраля дату 14 февраля 1918 года календарным днем (новый стиль).

Юлианские даты (J.D.)

Системы летоисчисления больших промежутков времени, а также начала календарного года также претерпели достаточно большие изменения. Та из них, которой в настоящее время пользуются большинство стран, идет от начала христианской эры (с рождества Христова) и была предложена римским монархом Дионисием Малым в 525 году. Однако начало года в разных странах было установлено по-разному, а приход к 1 января осуществился для большинства стран в 18 веке. В России лишь в начале 18 века указом Петра I 1 января был определен как первый день нового календарного года.

В практике астрономических исследований часто необходимо знать количество дней между двумя календарными датами. При этом необходимо учитывать число високосных годов, что может приводить к ошибке при больших интервалах событий.

Такие расчеты лучше решать при помощи юлианских дней J.D (юлианского периода), которые считаются от гринвичского полудня непрерывно с 1 июля 4713 г. до н.э. и обозначают количество суток (с учетом дробной части суток), прошедших с этого момента. В астрономических ежегодниках даются целые числа юлианских дней. В таблице 1.2 даны юлианские даты и количество дней обычного и високосного года по месяцам.

Юлианские даты (J.D.)

Таблица. Юлианские даты

Юлианские даты (J.D – 2400000) на нулевое число каждого года

Годы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2000	51544	51910	52275	52640	53005	53371	53736	54101	54466	54832
2010	55197	55562	55927	56293	56658	57023	57388	57754	58119	58484
2020	58849	59215	59580	59945	60310	60676	61041	61406	61771	62137
2030	62502	62867	63232	63598	63963	64328	64693	65059	65424	65789
2040	66154	66520	66885	67250	67615	67981	68346	68711	69076	69442

Количество дней между 0 число года и каждого месяца

	янв.	фев.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.
обычн.	0	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	365
висок.	0	31	60	91	121	152	182	213	244	274	305	366

Пользуясь Таблицей, рассчитаем юлианскую дату J.D. для

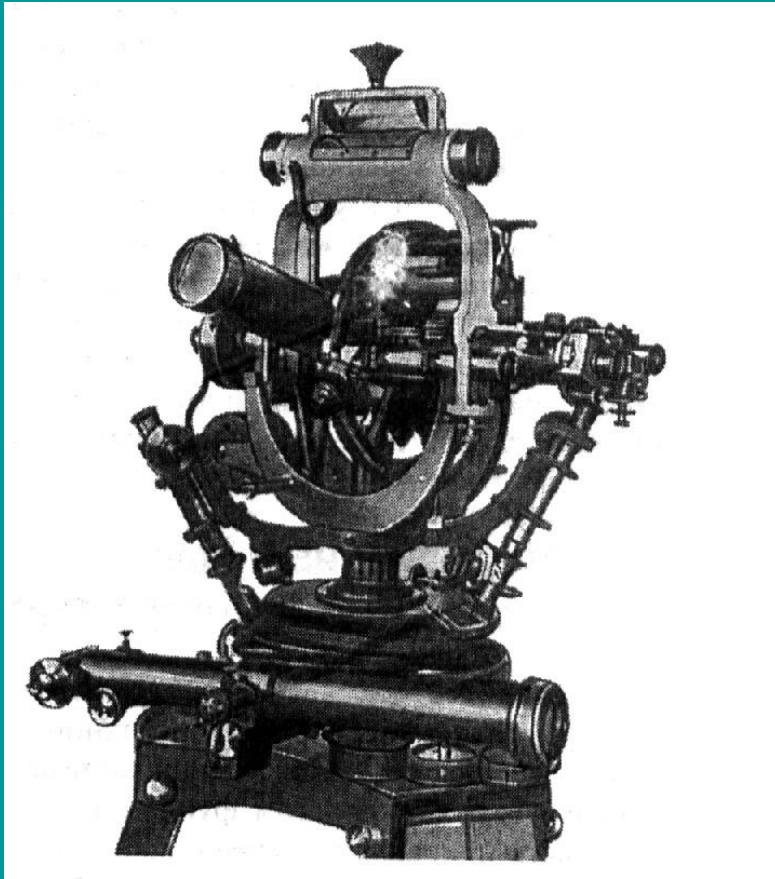
8 сентября 2010 года (после 15 часов)

$$J.D = 2400000 + 55197 + 243 + 8 = 2\,455\,448$$

Начало счета юлианских дней условно и было предложено в 15 веке Скалигером как начало периода в 7980 лет, получаемого перемножением трех интервалов времени – 28 лет (повторение распределения дней недели по дням года), 19 лет – метонов цикл, 15 лет – период связанных с налоговой системой у римлян.

Основы практической астрономии

Измерение горизонтальных координат светил и определение положения небесного меридиана



Универсальный инструмент (УИ)

Определение положения
(значение n_s на горизонтальном круге УИ)
небесного меридиана

$$1. \sin Z \cdot \sin A = \cos \delta \cdot \sin t$$

Если $A' = -A''$ Z – одинаково

$$n_s = \frac{n' + n''}{2}$$

2. Зная δ и ϕ (широта)

$$\cos A = \frac{\sin \phi \cdot \cos Z - \sin \delta}{\cos \phi \cdot \sin Z}$$

$$n_s = n - A$$

Определение склонения звезд и географической широты местности

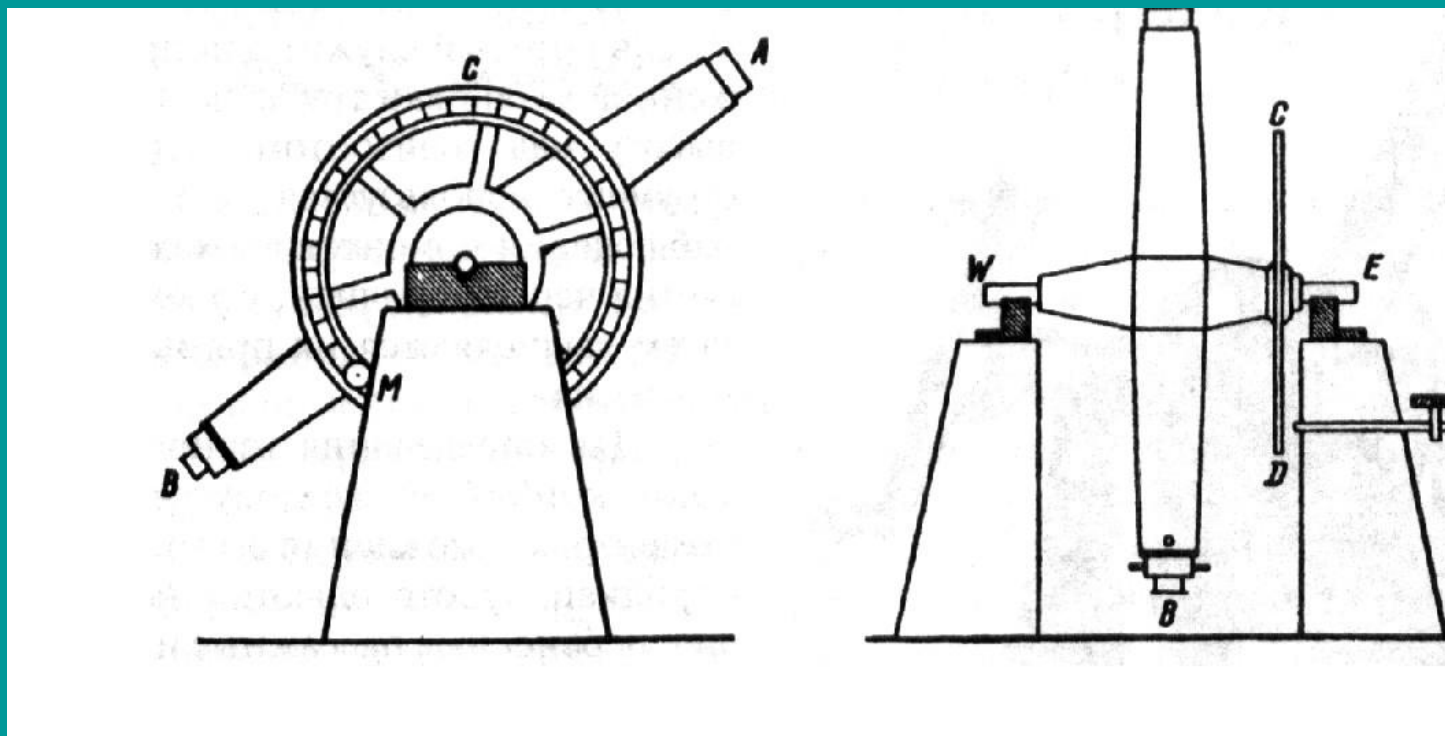


Схема меридианного круга

1. Если $\phi > \delta$ $Z_B = \phi - \delta$ $Z_H = 180^\circ - (\phi - \delta)$

$$\delta = 90^\circ - \frac{Z_H - Z}{2} \quad \phi = 90^\circ - \frac{Z_B + Z}{2}$$

2. Если $\delta > \phi$ $Z_B = \delta - \phi$ $Z_H = 180^\circ - (\phi - \delta)$

$$\delta = 90^\circ - \frac{Z_H + Z_B}{2} \quad \phi = 90^\circ - \frac{Z_H - Z}{2}$$

Служба времени

$$\omega = \frac{U_2 - U_1}{T_2' - T_1'} \quad \text{— ход часов} \quad U_2 - U_1 \text{ — поправка часов}$$

$U = T - T'$ - поправка часов

T — точное время; T' - показания часов

Поправка U в любое время $U = U_1 + \omega(T_2' - T_1')$

Поправка звездного времени (звездных часов) $U_s = S - S' = \alpha - S''$

α - склонение звезд, находящейся в верхней кульминации

Для звездных часов U_{s_0} (Гринвич) $= S_0 - S' = S_0 - (S - U_s) = U_s - \lambda$

Для солнечных часов $U_M = T_M - T'$ $U_0 = T_M - 2^h - T'$

Определение α и λ

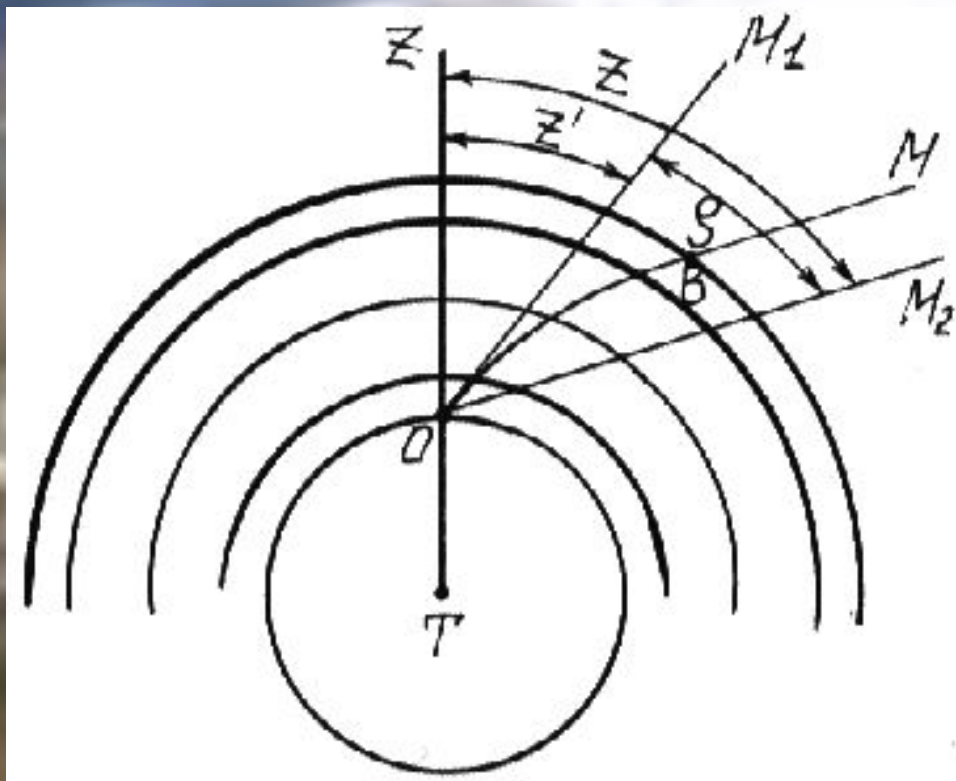
α определяют через звездное время Солнца $S_\odot$ $S_\odot' \rightarrow Z_\odot \rightarrow U_s = \alpha_\odot - S_\odot'$

$$U = U_s + \omega(S' - S_\odot'); S = \alpha = S' + U = S' + U_s + \omega(S' - S_\odot')$$

$$\alpha = \alpha_\odot + (S - S_\odot') + \omega(S' - S_\odot') \quad \lambda = S - S_0 = U_s - U_{s_0}$$

Факторы, искажающие видимое положение светил на небе

Рефракция



Влияние рефракции света в атмосфере

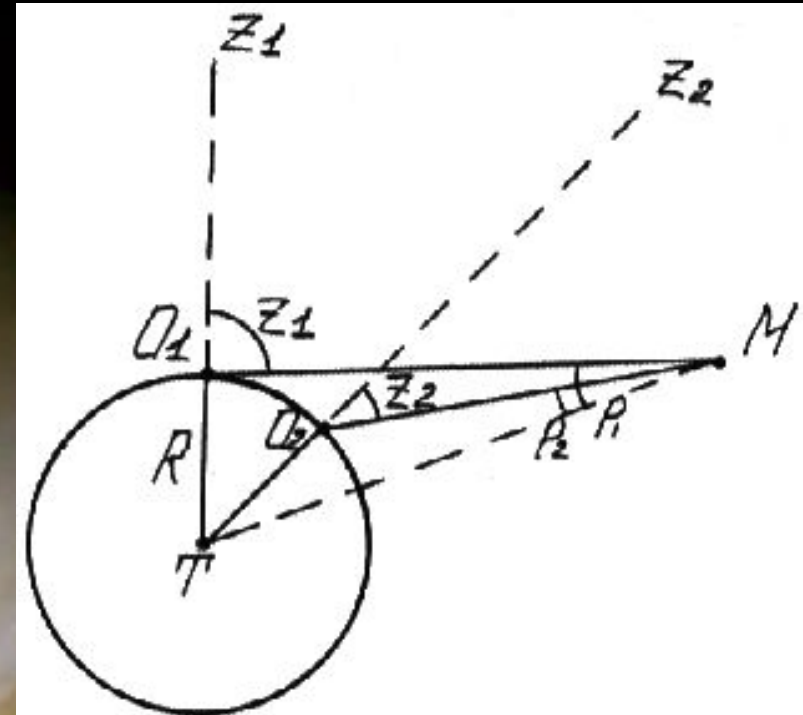
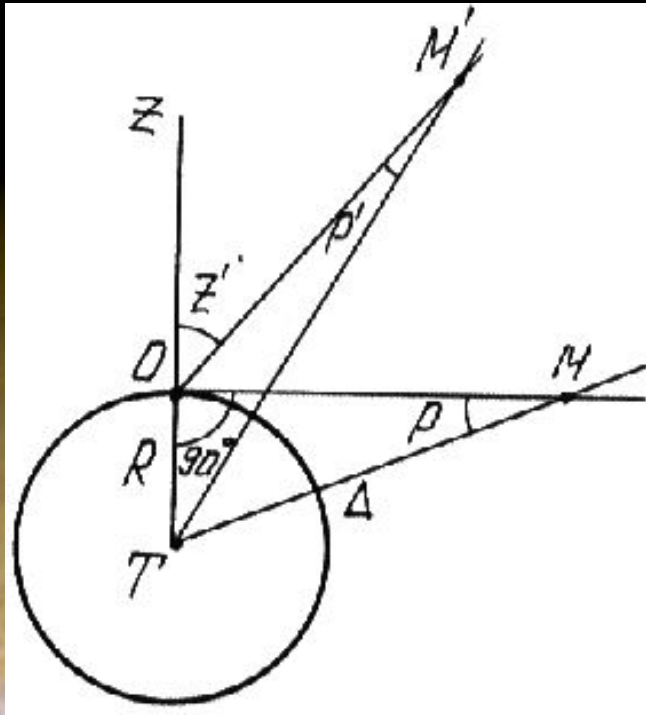
$$Z - Z' = \rho$$

$$\rho = 60'', 25 \operatorname{tg} Z' \quad (Z \leq 70^\circ)$$

У горизонта

$$\rho = 35' \quad (t_{\text{возд}} = 0^\circ, \varphi = 760 \text{ мм рт. ст.})$$

Суточный параллакс



К вопросу о суточном параллаксе P' светила M' и горизонтальном параллаксе P светила M . R – радиус Земли, Δ – расстояние от центра Земли до светила

$$\frac{R}{\sin P'} = \frac{\Delta'}{\sin Z'} \quad \frac{R}{\sin P} = \frac{\Delta}{\sin Z} = \Delta$$

$$\Delta = \frac{R_o}{\sin P_o} \quad \sin P_o = P_o'' \sin l'' = \frac{P_o''}{206265}$$

$$\Delta = \frac{206265}{P_o''} R_o$$

К вопросу о годичном параллаксе звезды M (C – Солнце, T – Земля)

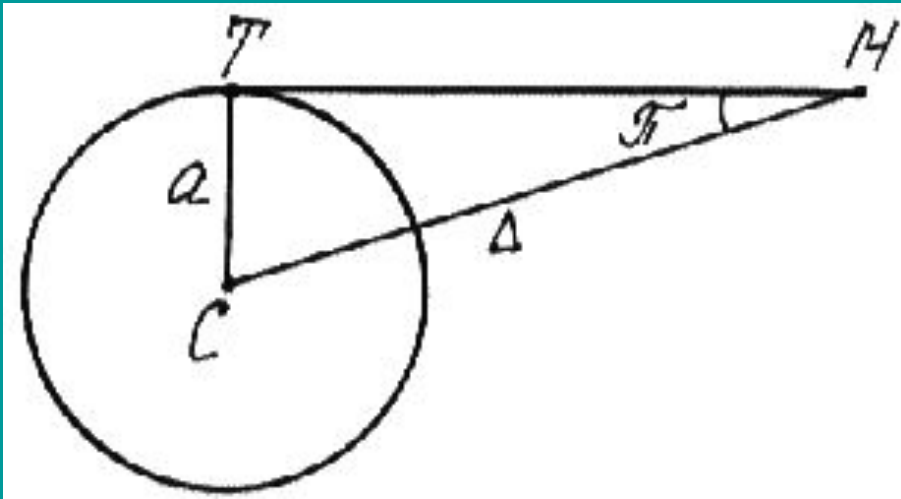
$\sin P' = \sin P \cdot \sin Z'$ ($p = 57'$ – Луна, $P = 8'',79$ – Солнце, $P \approx 1'$ – у ближайших планет)

$$\sin P \approx P \Rightarrow P' \sin Z'$$

Если $R = R_o = 6378$ км (экваториальный радиус Земли)

$P = P_o$ – горизонтальный экваториальный параллакс

Годичный параллакс



К вопросу о годичном параллаксе звезды M
(C – Солнце, T – Земля).

$$\Delta = \frac{\alpha}{\sin \pi} = \frac{206265}{\pi''} \alpha$$

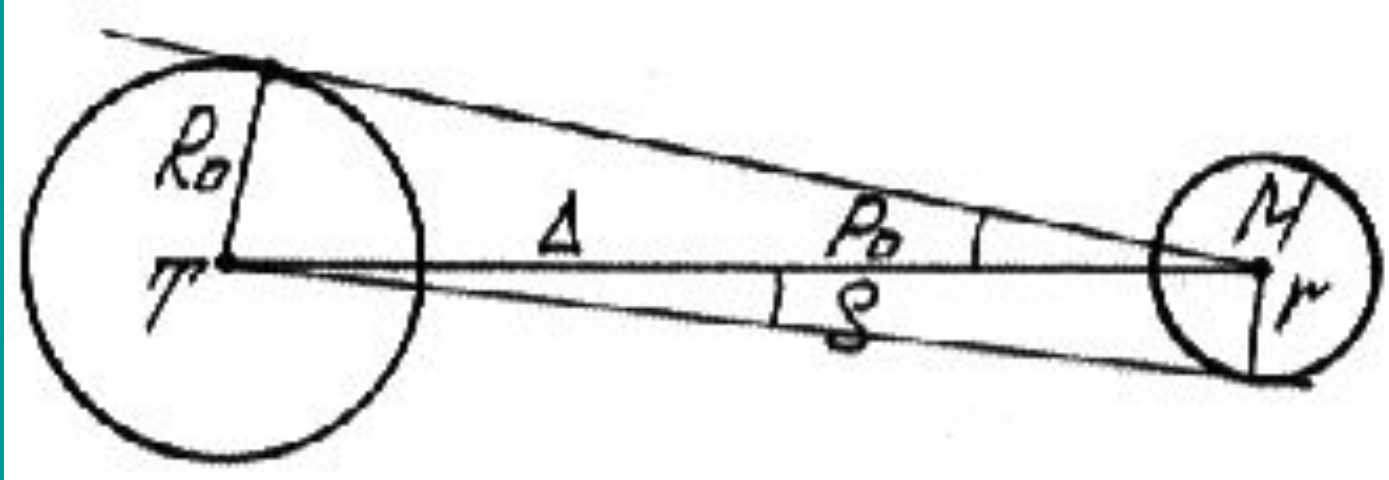
π - годичный параллакс

α - средний радиус орбиты
Земли, равный 1 а.е. =
149600000 км

Таблица основных единиц расстояний, используемых в астрономии, и связь между ними.

	км	а.е.	св.год	парсек
1 км	1	$6,6846 \times 10^{-9}$	$1,057 \times 10^{-13}$	$3,2408 \times 10^{-14}$
1 а.е.	$1,49598 \times 10^8$	1	$1,5813 \times 10^{-5}$	$4,8481 \times 10^{-6}$
1 св.год	$9,4605 \times 10^{12}$	63240	1	0,3066
1 пс	$3,0857 \times 10^{13}$	206265	3,2616	1

Определение линейных размеров тел Солнечной системы



К вопросу об определении размеров и формы тел Солнечной системы: ρ и P_0 – угловой радиус и горизонтальный экваториальный параллакс светила M с радиусом r .

$$\Delta = \frac{r}{\operatorname{tg} \rho}; \operatorname{tg} \rho = \rho \text{ и } \frac{r}{\rho} = \Delta$$

$$r = \Delta \cdot \rho \quad r = R_0 \frac{\rho}{P_0}$$

Восход и заход светил

Часовой угол и азимут восхода t_v , A_v и захода t_3 , A_3 светил связаны формулами

$$\cos t = \frac{\cos Z - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} \qquad \sin A = \frac{\cos \delta}{\sin Z} \cdot \sin t$$

Если $Z = 90^\circ + \rho - p + r$ (ρ - рефракция, p – параллакс, r – угловой радиус светила)

Для звезд

$$\cos t = \frac{-\sin 35' - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} \qquad (r = 0, p = 0)$$

Для Луны

$$\cos t = \frac{-\sin 7' - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta}$$

Для Солнца

$$\cos t = \frac{-\sin 51' - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} \qquad (p \approx 0)$$

$$\cos t = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta \qquad (r = 0, p = 0, \rho = 0)$$

Продолжительность дня

$T_{\lambda} = t_{\odot} + 12^h + \eta$ ΔT – продолжительность дня

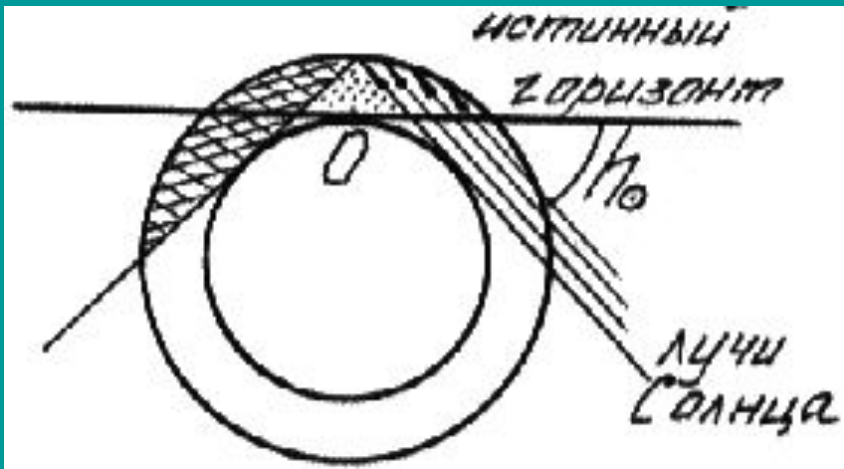
$$180^{\circ} \leq t \leq 360^{\circ}$$

$$\sin A_{\text{восхода}} = \frac{\cos \delta \sin t_{\text{в}}}{\sin(90^{\circ} + \rho + r - p)}$$

$$0^{\circ} \leq t \leq 180^{\circ}$$

$$\sin A_{\text{захода}} = \frac{\cos \delta \sin t_{\text{з}}}{\sin(90^{\circ} + \rho + r - p)}$$

Сумерки



Гражданские сумерки $h_{\odot} = -6^{\circ}$

Астрономические сумерки $h_{\odot} = -18^{\circ}$

Продолжительность сумерек Δt

$$\cos(t + \Delta t) = \frac{-\sin h_0 - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta_0}$$

Появление сумерек на Земле в области точки O. $h_{\odot}$ - высота Солнца под горизонтом.

Суточная и годичная аберрация

$$\sin \sigma = \frac{v}{c} \sin \theta$$

$$\sigma = 206265'' \frac{v}{c} \sin \theta$$

Для суточной аберрации $V = v_o \cos \varphi$, v_o – скорость наблюдателя на экваторе, φ - широта местности.

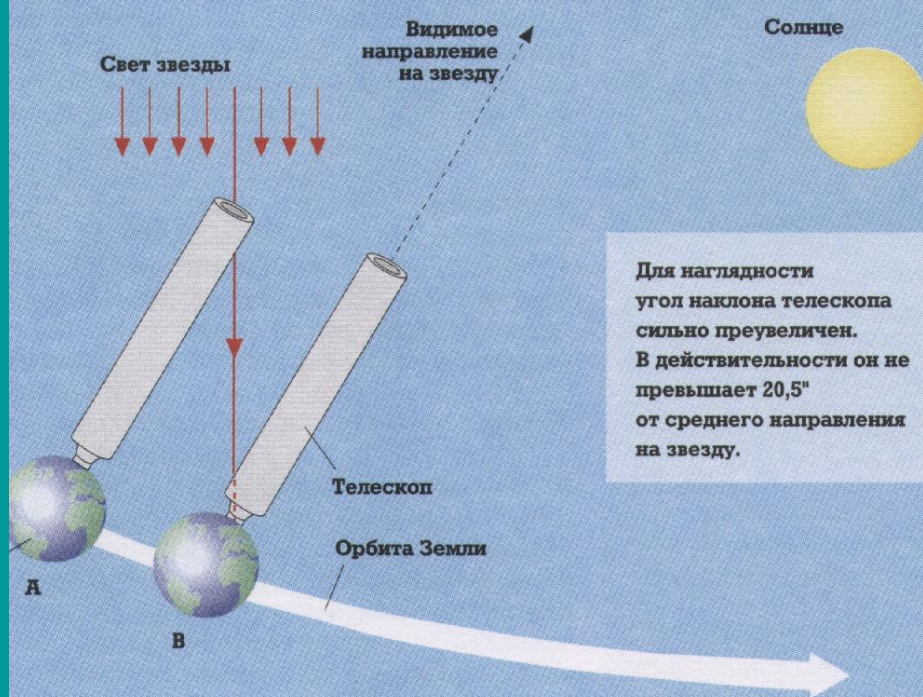
$$\sigma_c (\text{суточная аберрация}) = \frac{v_o \cos \varphi}{c} \sin \theta = 0,315 \cos \varphi \sin \theta$$

$$\text{Где } K_c = \frac{0,464 \text{ км/с}}{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}} = 0,315 \cdot 10^{-6} \text{ с} - \text{коэффициент суточной аберрации}$$

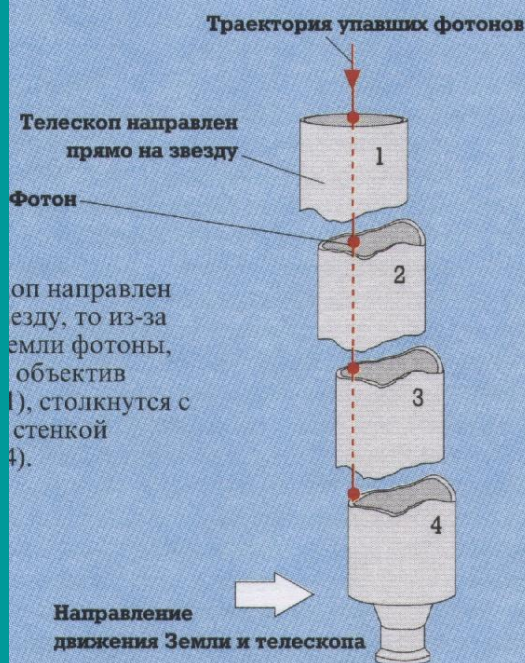
Для годичной аберрации $v_{\text{ср}} = 29,765 \text{ км/с}$ и

$$\sigma_r (\text{годовая аберрация}) = \frac{206265'' \cdot 29,765}{3 \cdot 10^5} \sin \theta = 20,496 \sin \theta$$

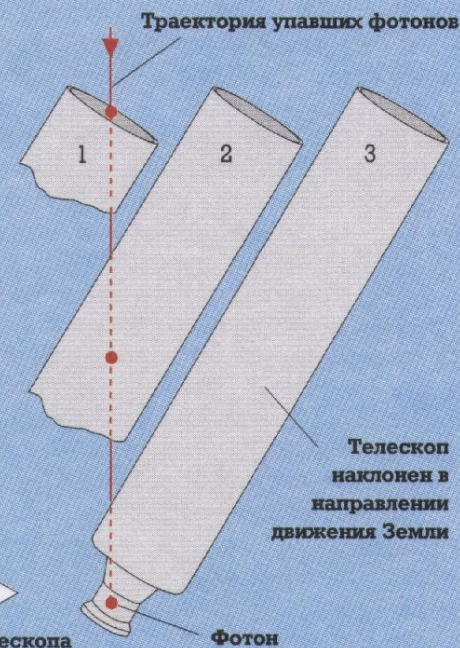
где $K_r = 20,496$ – коэффициент годичной аберрации



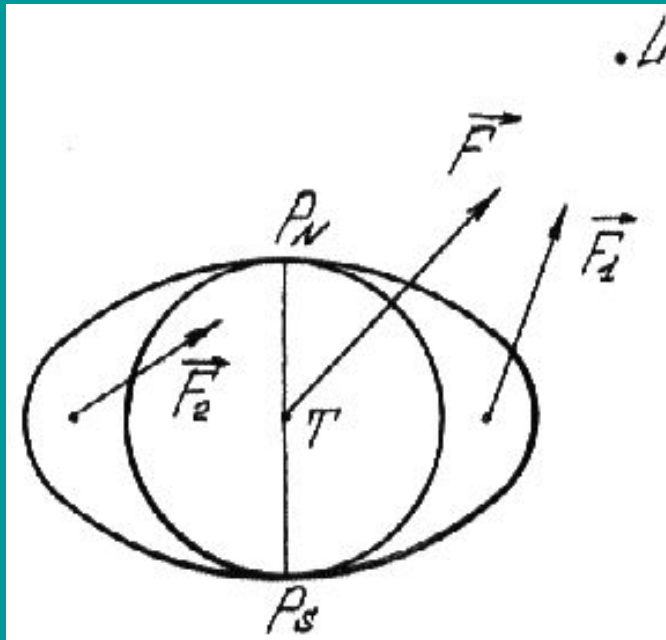
Вследствие конечности скорости света и орбитальной скорости Земли телескоп следует слегка наклонить в направлении движения планеты. Фотону, попавшему в объектив телескопа в положении А, чтобы достичь поля зрения наблюдателя, требуется столько же времени, сколько для перемещения Земли из А в В.



Если же телескоп слегка наклонен (в направлении движения Земли вокруг Солнца), то попавшие в объектив телескопа фотоны (1) останутся на прямой траектории относительно телескопа (2) и попадут в окуляр (3).



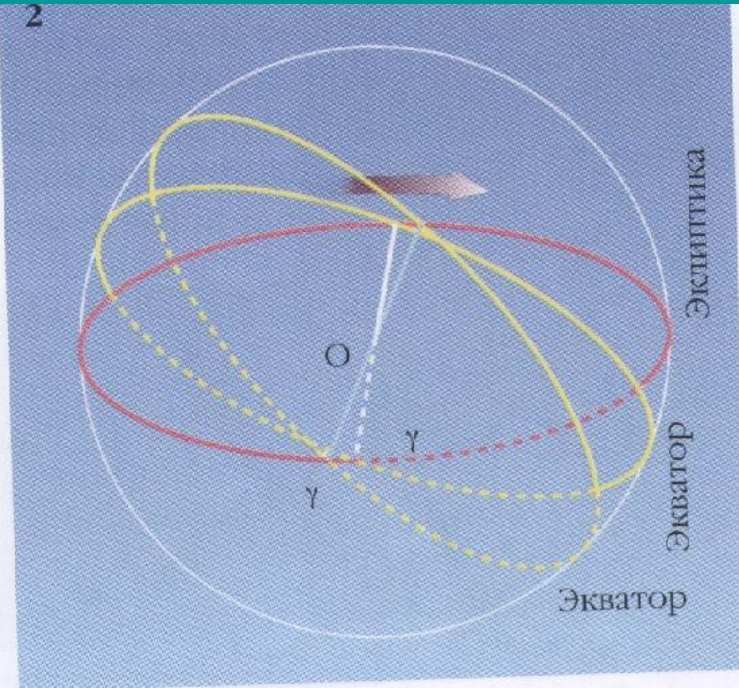
Явления, приводящие к смещению сферических систем координат



Причины прецессии земной оси

Схема, поясняющая появление прецессионного движения земной оси:
- $\vec{F}, \vec{F}_1, \vec{F}_2$ силы, действующие на разные участки объема Земли со стороны светила L .

Лунно-солнечная прецессия



Влияние прецессии

Скорость перемещения за год точки весеннего равноденствия

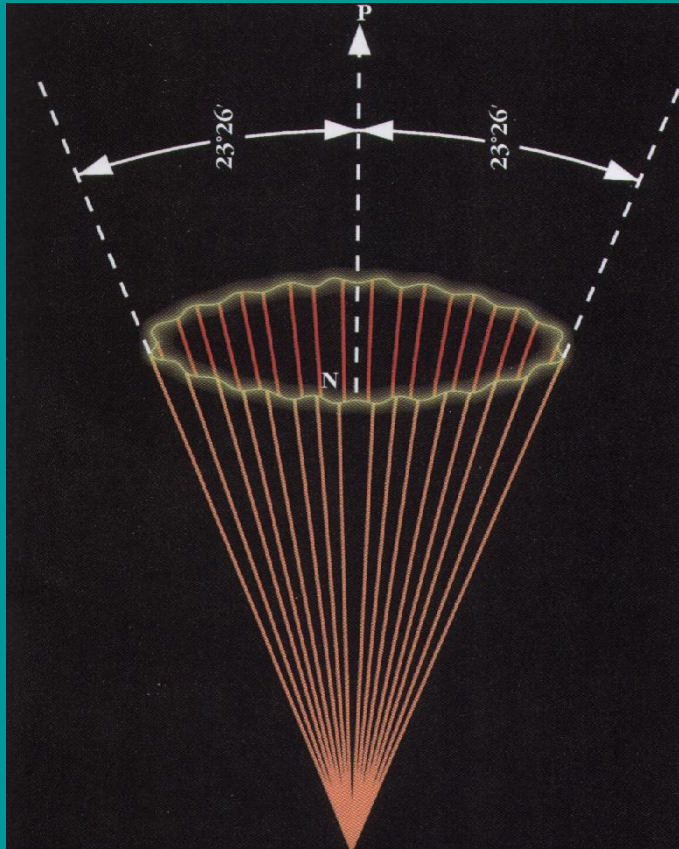
1. В эклиптике $\lambda = \frac{360^\circ}{26000} = 50'',26$

2. В экваторе $m = 50'',26 \times \cos \varepsilon = 50'',26 \times \cos 23^\circ 27' = 46'',11$

Изменение α за год $\frac{d\alpha}{dt} = m + n \sin \alpha \operatorname{tg} \delta$

Изменение δ за год $\frac{d\delta}{dt} = n \cos \alpha$ $m = 46'',11 = 3с,0742$ $n = 20'',038$

Нутация



Влияние нутации на α и δ

$$\alpha - \alpha_o = \Delta\Psi(\cos \varepsilon + \sin \varepsilon \cdot \sin \alpha_o \operatorname{tg} \delta_o) - \Delta\varepsilon \cos \alpha_o \operatorname{tg} \delta_o$$

$$\delta - \delta_o = \Delta\phi \sin \varepsilon \cos \alpha_o + \Delta\varepsilon \sin \alpha$$

Эллипс нутации: $\Delta\Psi = \pm 18''$ изменение долготы

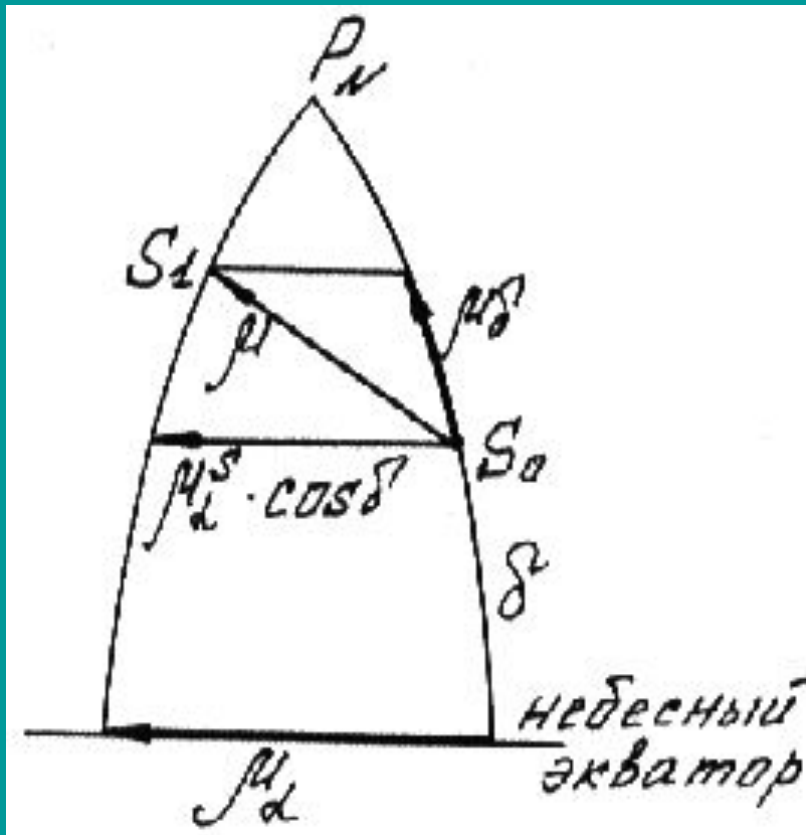
$\Delta\phi = \pm 10''$ изменение широты

18,6 лет – главное нутационное колебание

$21^\circ 55' \leq \Delta\varepsilon \leq 21^\circ 55'$ – за 41000 лет

На коническое прецессионное движение, которое способствует перемещению полюса эклиптики (Р), накладывается колебательное движение – нутация (N). В результате края конуса становятся «волнистыми»

Собственное движение звезд



Собственное движение звезды S_0 :

μ_δ - собственное движение по склонению;

μ_α - собственное движение по прямому восхождению.

P_N – северный полюс мира.

$$\mu = \sqrt{\mu_\delta^2 + (15\mu_\alpha \cos \delta)^2}$$

$$\mu_\delta = \mu \cos \varphi$$

$$15\mu_\alpha \cos \delta = \mu \cdot \sin \chi$$

Тангенциальная скорость $v_\tau = 4,74 \frac{\mu''}{\pi''} \frac{\text{км}}{\text{с}}$

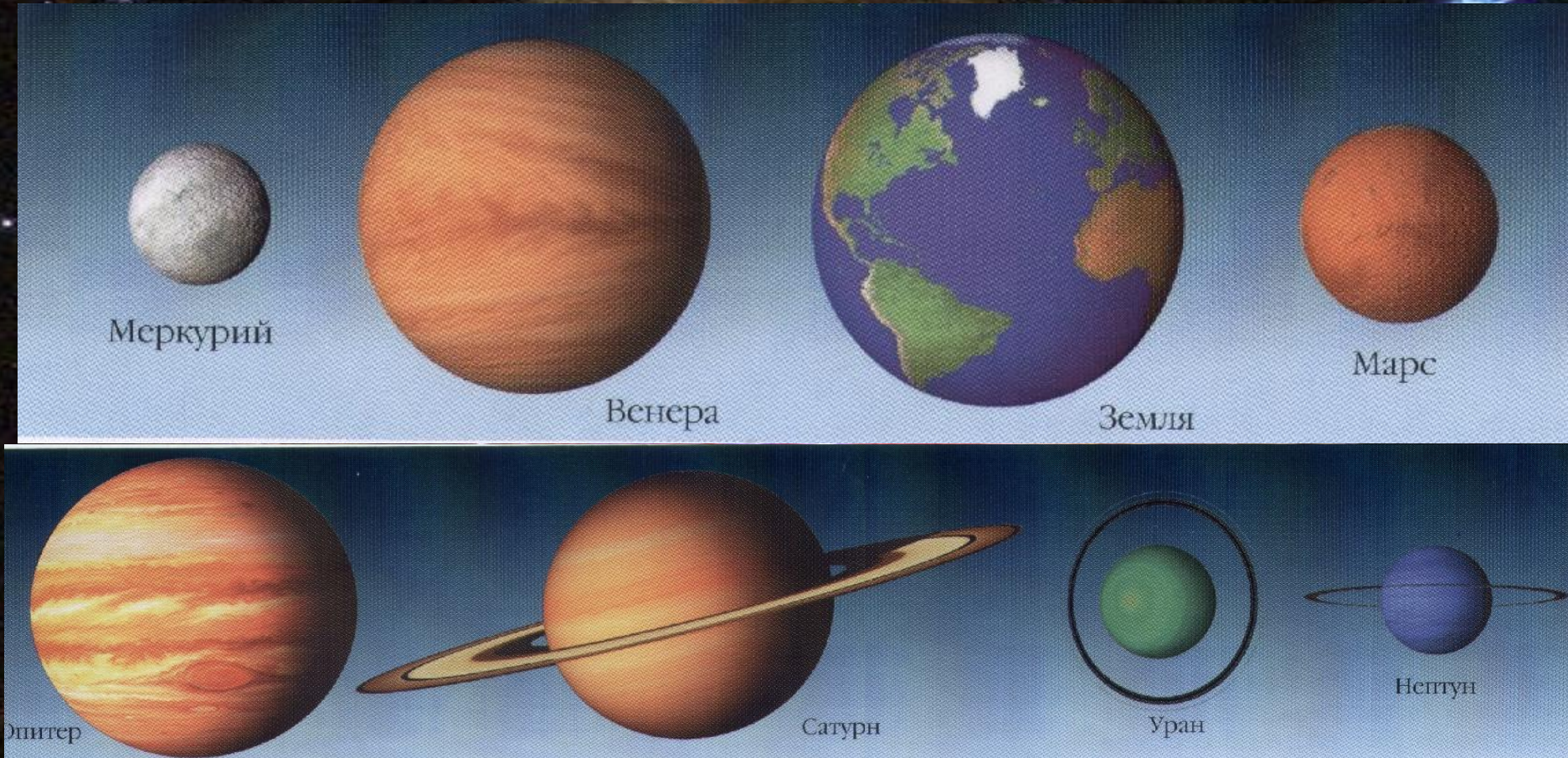
Полная скорость звезды в пространстве

V_r – лучевая скорость

$$v = \sqrt{v_\tau^2 + v_r^2}$$

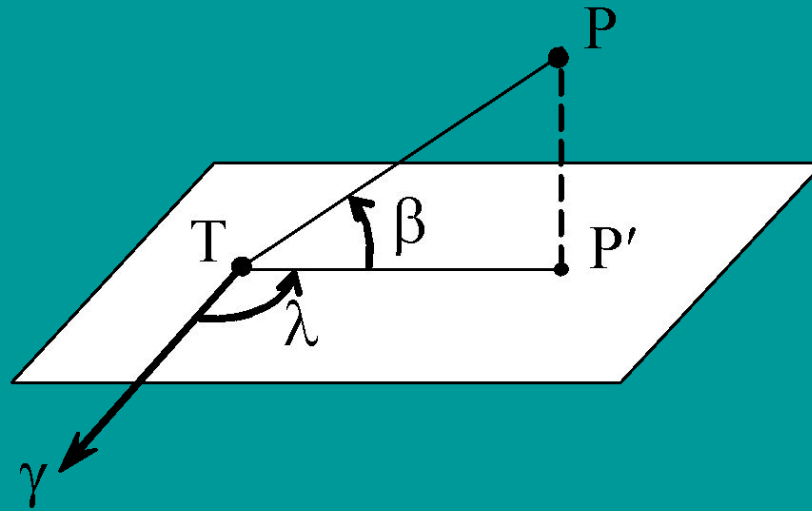
ГЛАВА II. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Структура Солнечной системы



Структура Солнечной системы

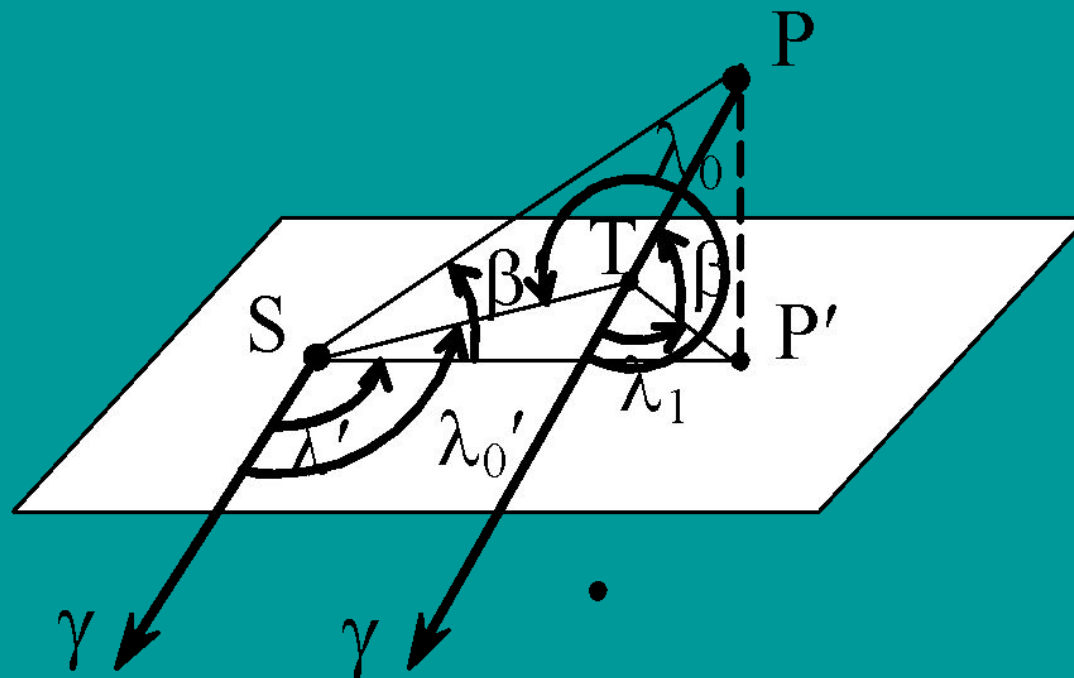
Пространственные системы координат



Геоцентрические (центр Т — Земля) сферические
эклиптические координаты λ и β

$$0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ \quad -90^\circ \leq \beta \leq +90^\circ$$

Пространственные системы координат

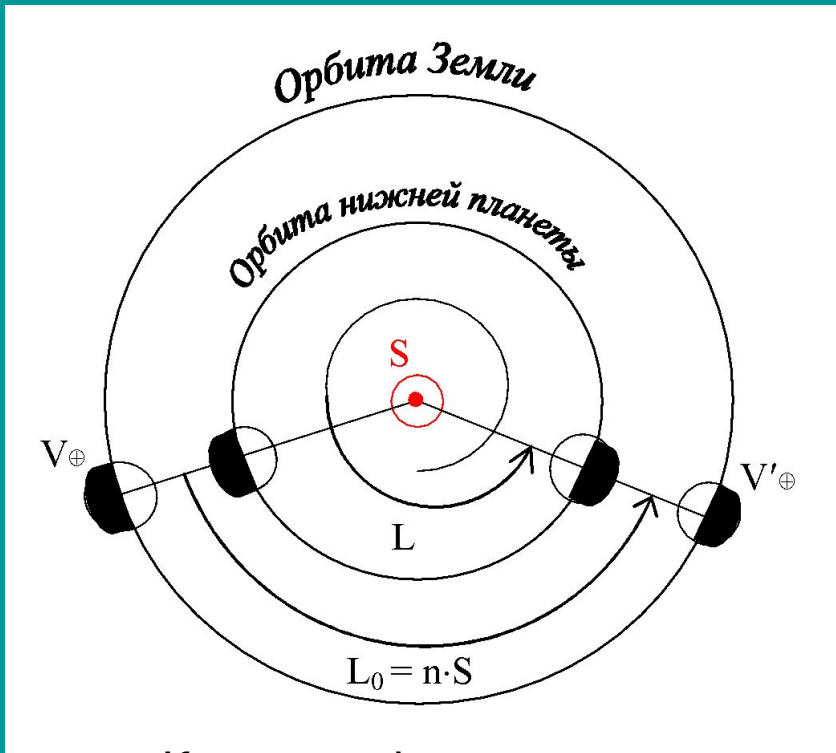


Гелиоцентрические (центр S Солнце) сферические эклиптические системы координат тела P λ' и β' и их связь с геоцентрическими координатами λ и β

$$0^\circ \leq \lambda' \leq 360^\circ \quad -90^\circ \leq \beta' \leq +90^\circ$$

Условия видимости небесных тел. Конфигурации.

Синодический период



К выводу формулы
продолжительности
синодического периода

S – синодический период

$T_{\oplus}$ – сидерический период Земли

T – сидерический период планеты

$$n = \frac{360^{\circ}}{T} \quad n_{\oplus} = \frac{360}{T_{\oplus}}$$

$$L_{\oplus} = n_{\oplus} S = \frac{360}{T_{\oplus}} S \text{ и } L = n S = \frac{360}{T} S$$

$$\frac{360^{\circ}}{T} \cdot S = 360^{\circ} + \frac{360^{\circ}}{T_{\oplus}} \cdot S$$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}}$$

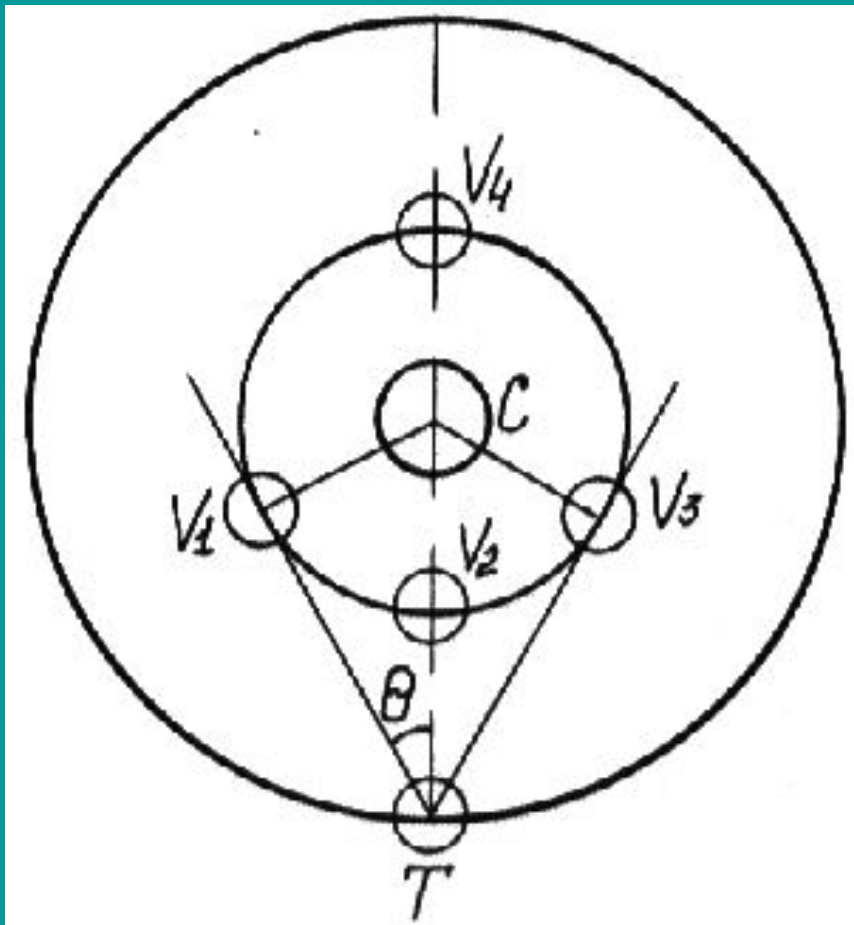
Для нижних планет

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T}$$

Для верхних планет

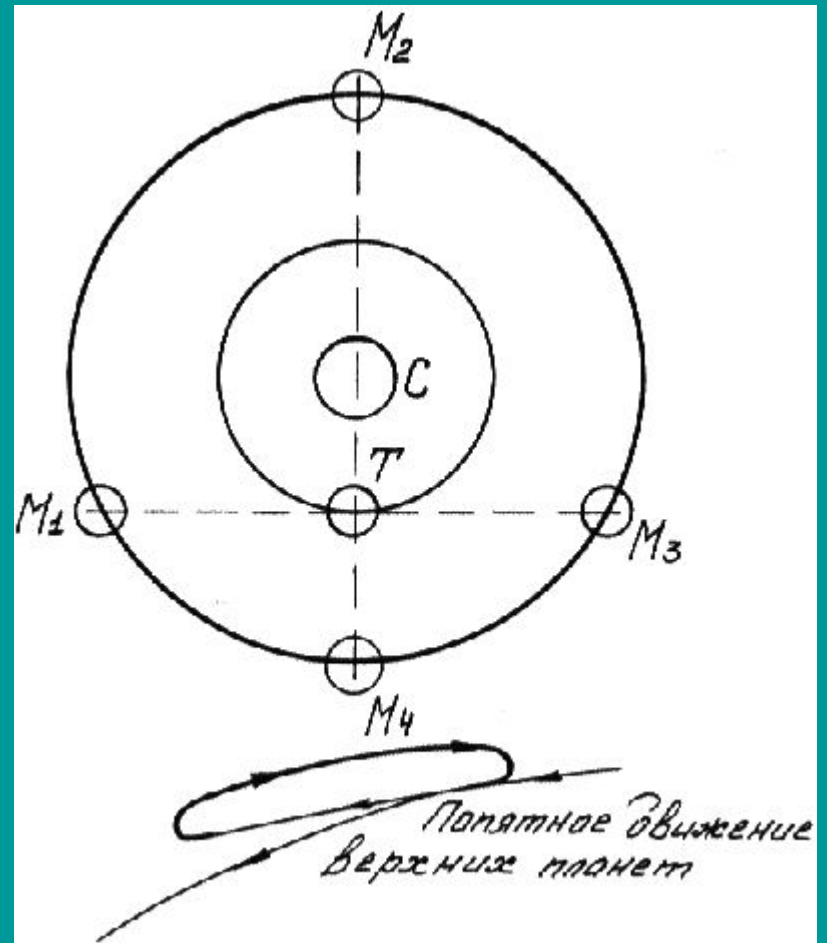
$$\text{В общем случае } \frac{1}{S} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$$

где T_1 – сидерический период планеты, находящейся ближе к Солнцу, чем планеты с сидерическим периодом T_2 ($T_2 > T_1$)



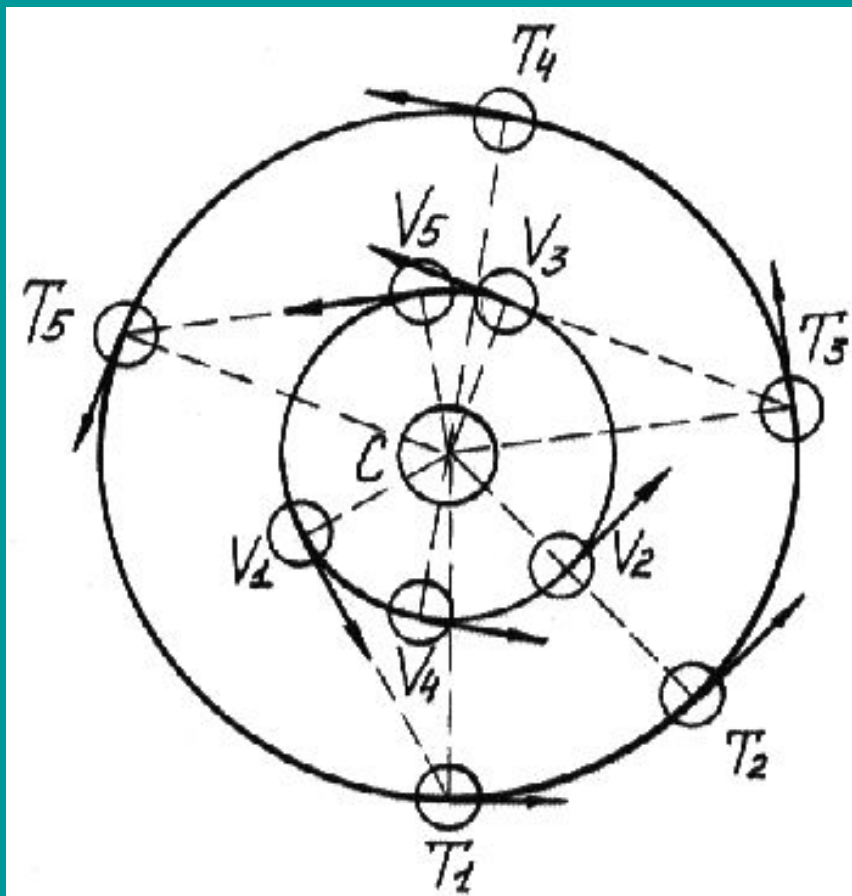
Конфигурации нижних планет:

V_1 – восточная элонгация;
 V_2 – нижнее соединение;
 V_3 – западная элонгация;
 V_4 – верхнее соединение

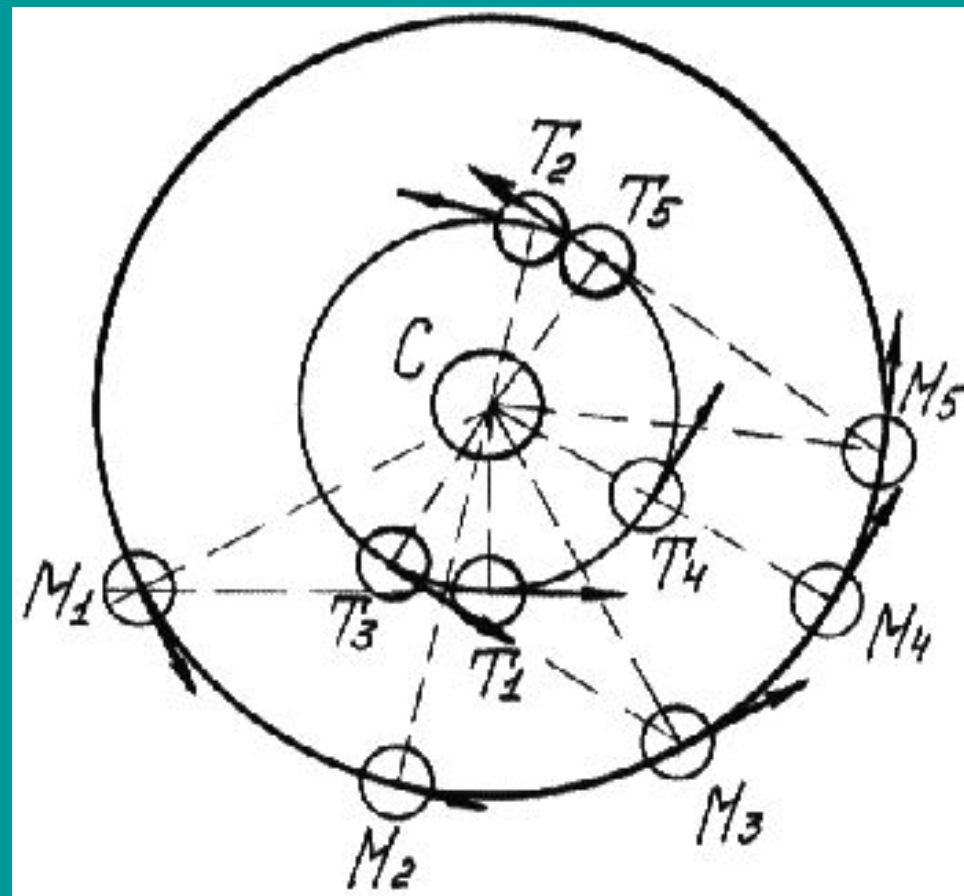


Конфигурации верхних планет:

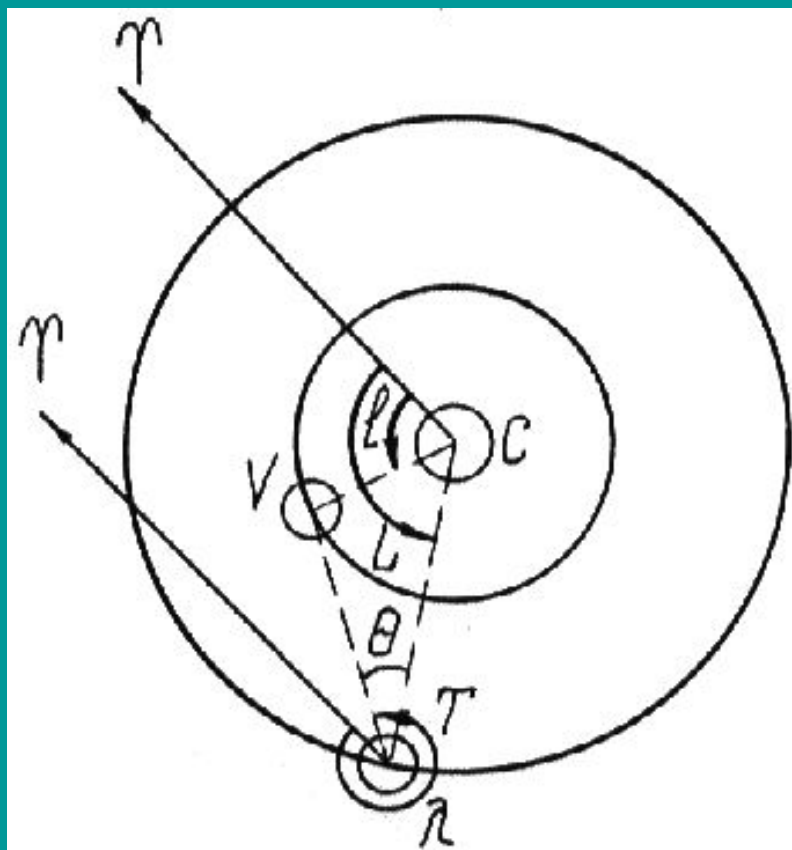
M_1 – восточная квадратура;
 M_2 – соединение;
 M_3 – западная квадратура;
 M_4 – противостояние.



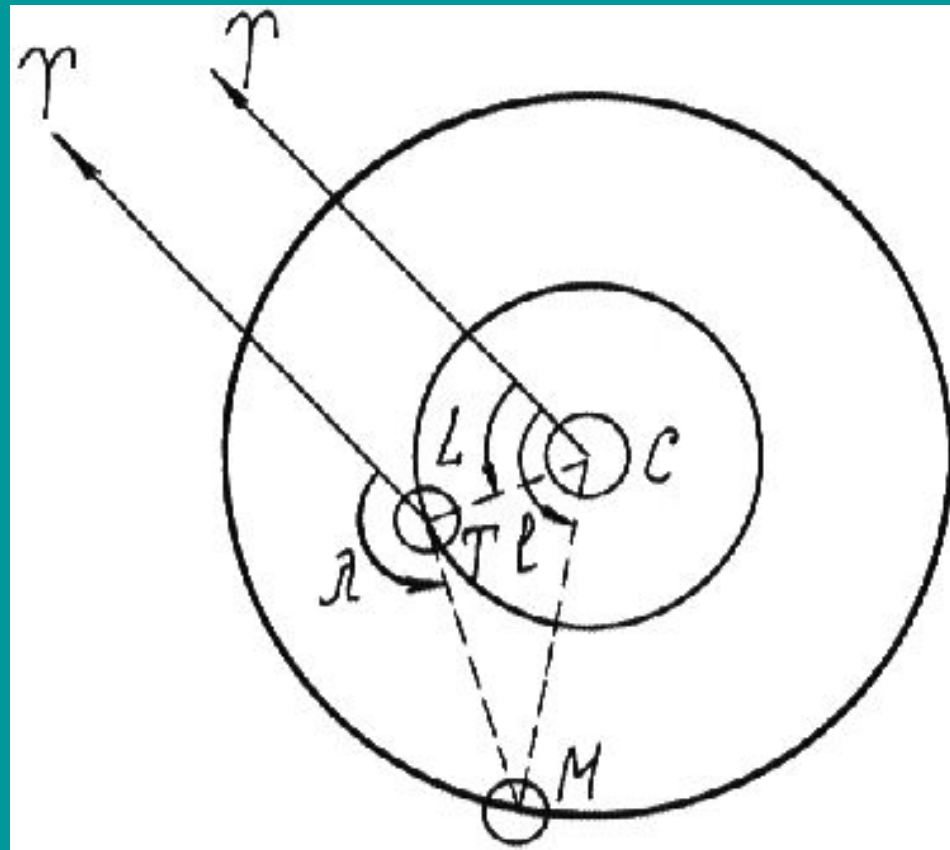
Схема, объясняющая
смену конфигураций
нижних планет



Схема, объясняющая
смену конфигураций
верхних планет



**Определение
гелиоцентрических долгот
Земли (L) и нижних планет (I):
 λ - геоцентрическая
(эклиптическая) долгота**



**Определение
гелиоцентрических долгот
Земли (L) и верхних планет (I):
 λ - геоцентрическая
(эклиптическая) долгота**

Соотношение между геоцентрическими λ и гелиоцентрическими λ' долготами дня нижних планет:

а) нижнее соединение (V_2)

$$\lambda_o = \lambda; \lambda_o' = \lambda'$$

λ_o – геоцентрическая долгота Солнца

λ_o' – гелиоцентрическая долгота Земли

б) верхнее соединение (V_4)

$$\lambda_o = \lambda; 180^\circ = \lambda' - \lambda_o'$$

в) восточная элонгация (V_1)

$$\lambda - \lambda_o = \theta; \lambda' - \lambda_o' = 270^\circ + \theta$$

г) западная элонгация (V_3)

$$\lambda - \lambda_o = -\theta; \lambda' - \lambda_o' = 90^\circ - \theta$$

Соотношение между геоцентрическими λ и гелиоцентрическими λ' долготами дня верхних планет:

а) противостояние (M_4)

$$\lambda - \lambda_o = -180^\circ; \lambda' - \lambda_o' = 0^\circ$$

б) соединение (M_2)

$$\lambda - \lambda_o = 0^\circ; \lambda' - \lambda_o' = 180^\circ$$

в) восточная квадратура (M_1)

$$\lambda - \lambda_o = 0^\circ; \lambda' - \lambda_o' = -\theta'$$

г) западная квадратура (M_3)

$$\lambda - \lambda_o = -90^\circ; \lambda' - \lambda_o' = \theta'$$

Великие противостояния

$$r_{\min} = q - a_o = a(1-e) - a_o, \quad r_{\max} = Q - a_o = a(1+e) - a_o$$

$$e = 0,093; a = 1,524a_o - \text{для Марса} \quad \frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 1,83$$

Если $r \leq 0,4 \text{ а.е.} = 60 \cdot 10^6 \text{ км}$ – великие противостояния

Условие повторения великих противостояний

$$mT = nS,$$

где T – сидерический период Марса, равный $687^{\text{д}} = 1,881T_{\oplus}$, а $S = 780^{\text{д}} = 2,136T_{\oplus}$
 $1,881 \cdot m = 2,136n$

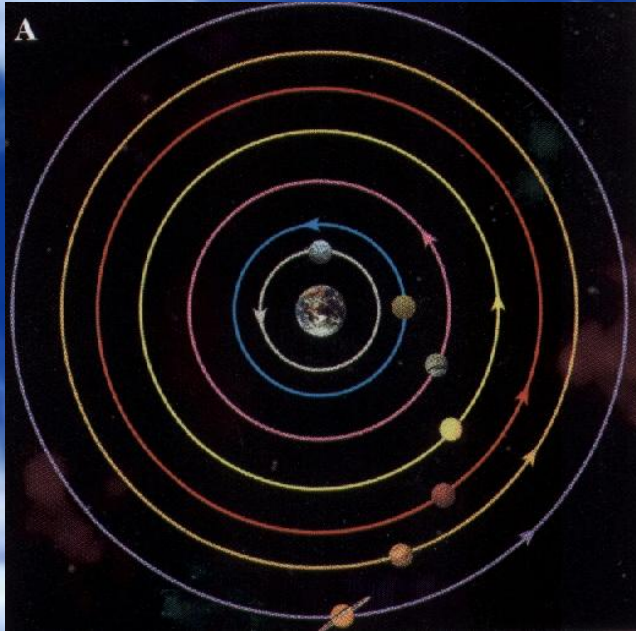
Отсюда 15,05 и 14,95 года; 16,93 и 17,09 года.

Последнее противостояние было в 2005 году.

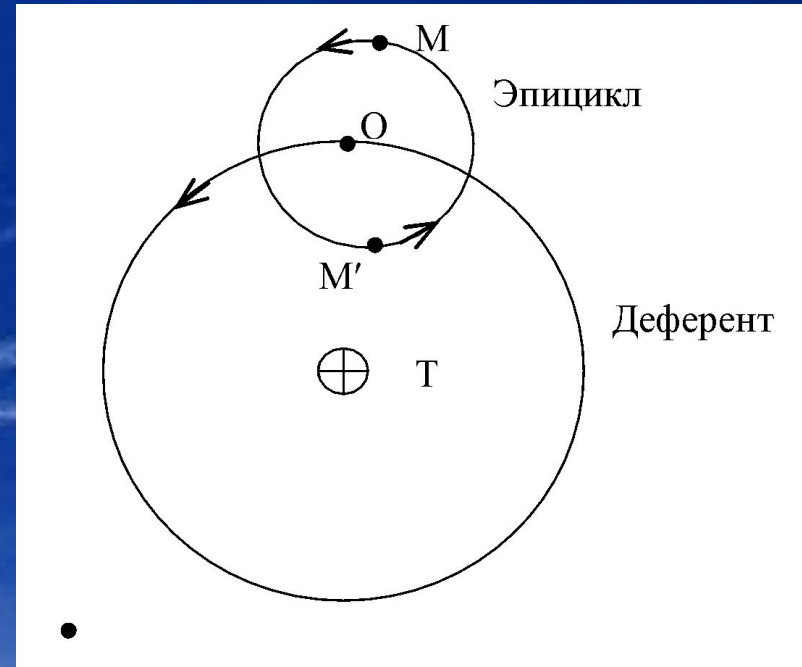
Таблица. Среднее суточное движение планет

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
n	245',5	96',1	59',1	31',4	5'	2'

Геоцентрическая система Птолемея



1. Земля в центре Вселенной
2. Земля неподвижна
3. Все тела движутся вокруг Земли
4. Движение осуществляется по окружности с $v = \text{const}$



К описанию
геоцентрической
картины Птолемея.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Земля



Солнце



Луна



Меркурий



Венера



Марс

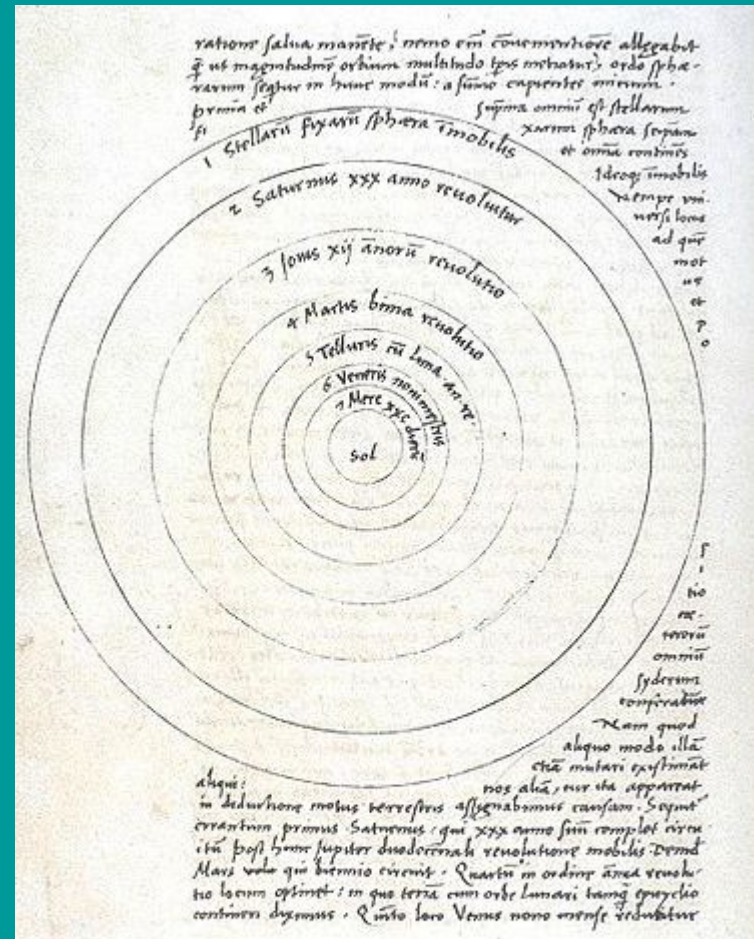
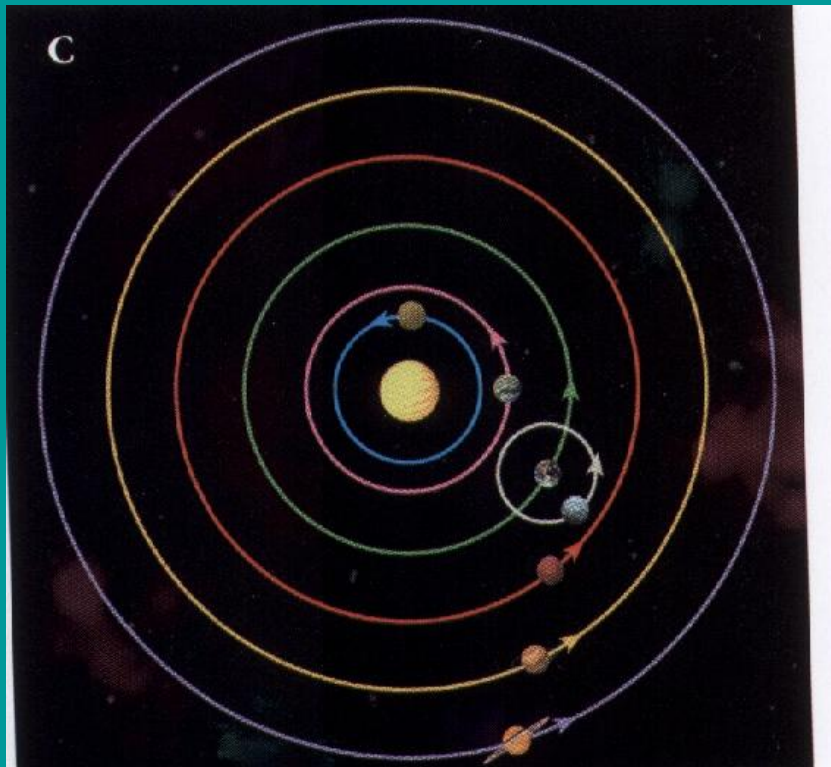


Юпитер



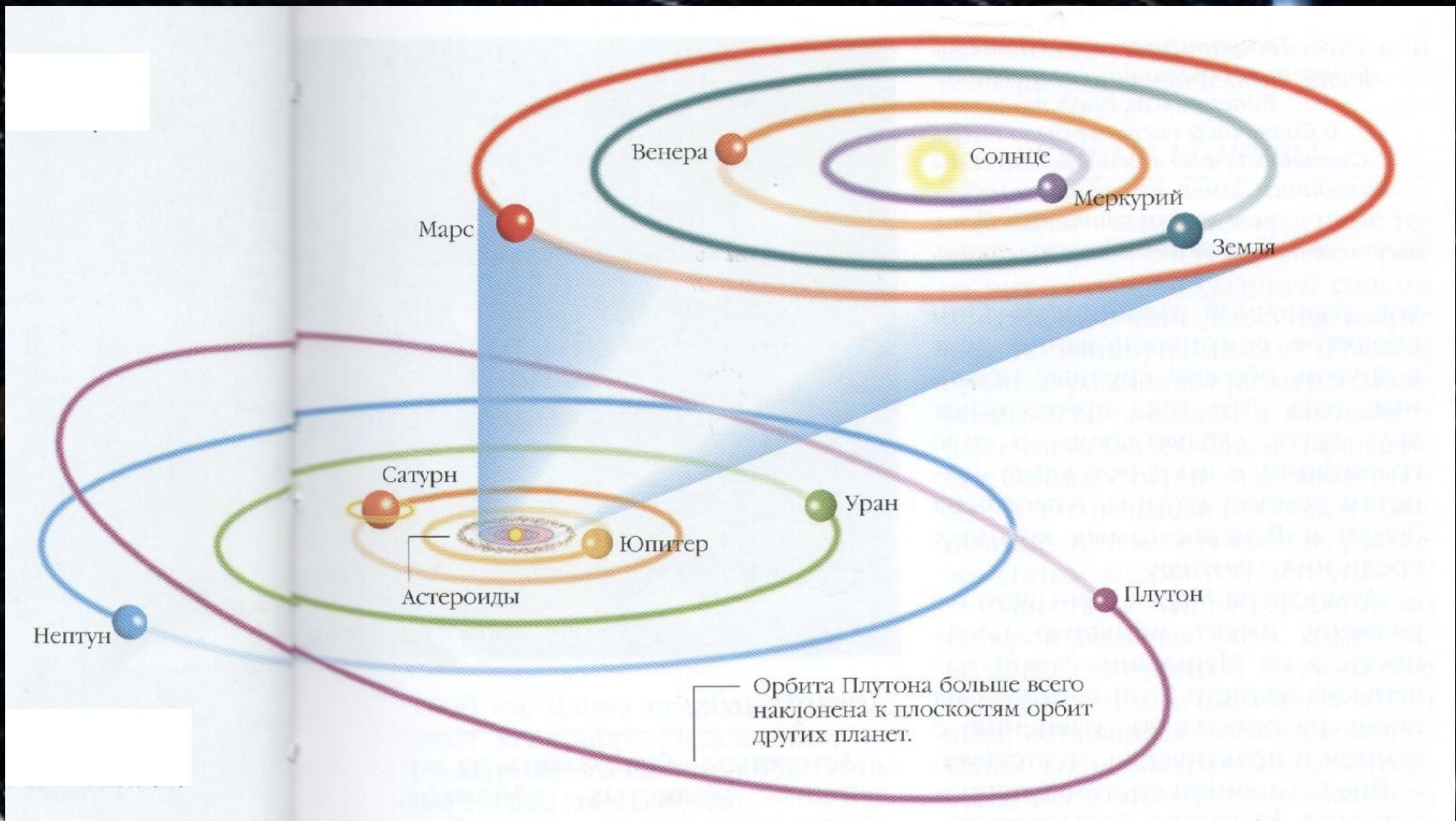
Сатурн

Система мира Коперника



1. В центре мира Солнце, а не Земля.
2. Шарообразная Земля вращается вокруг своей оси, и это вращение объясняет кажущееся суточное движение всех светил.
3. Земля, как и все планеты, обращается вокруг Солнца, что и объясняет видимое движение Солнца на фоне звезд.
4. Все движения – это комбинация равномерных круговых движений.
5. Кажущиеся прямые и попятные движения планет принадлежат не им, а Земле, т.е. каким образом их видит движущийся вместе с Землей наблюдатель.

Гелиоцентрическая картина мира



Орбиты планет, по которым планеты вращаются вокруг Солнца, немного наклонены друг к другу. Исключение составляет Плутон. Его орбита имеет наклон в 17° к плоскости эклиптики

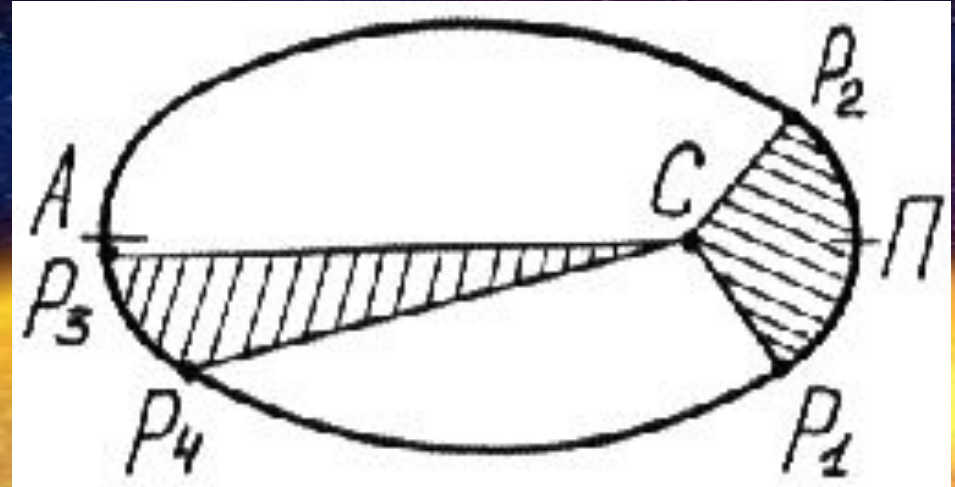
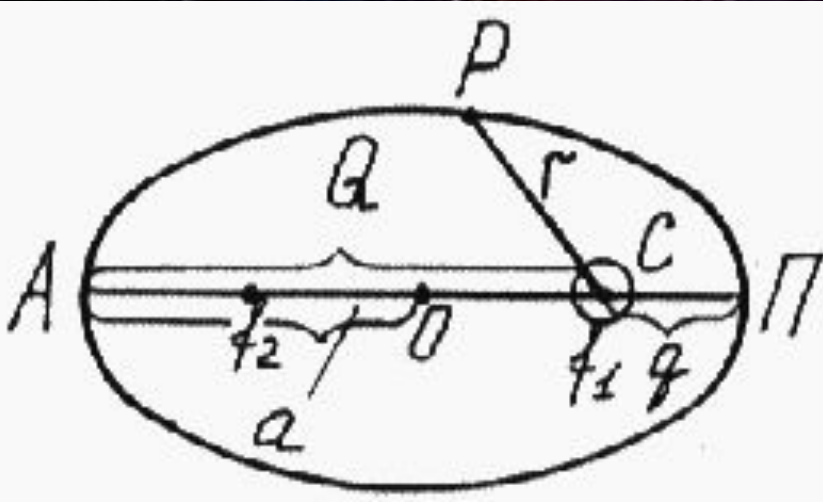
1-й закон. Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце.

2-й закон. Радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равновеликие площади.

3-й закон. Квадратуры сферических периодов обращений вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad T = \sqrt{a^3} \quad (T_{\oplus} = 1, a_{\oplus} = 1)$$

Законы Кеплера



Элементы эллиптической орбиты: a – большая полуось, Q – расстояние в афелии; q – расстояние в перигелии; r – радиус-вектор орбиты.

$$e = \frac{Of_1}{OP}$$

-эксцентриситет (Венера $e = 0,007$; Земля $e = 0,017$; Меркурий $e = 0,206$

$$q = a(1 - e)$$

$$Q = f(1 + e)$$

$$a = \frac{q + Q}{2}$$

$$V_c = \sqrt{V_q \cdot V_Q}$$

Иллюстрация второго закона Кеплера.

Движение тел в поле тяготения

Законы Ньютона

Первый закон: «Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения пока и поскольку оно не принуждается приложенными силами изменить это состояние».

$$m\bar{v} = const$$

Второй закон: «Скорость изменения количества движения пропорциональна приложенной силе и происходит по направлению» той прямой, по которой эта сила действует

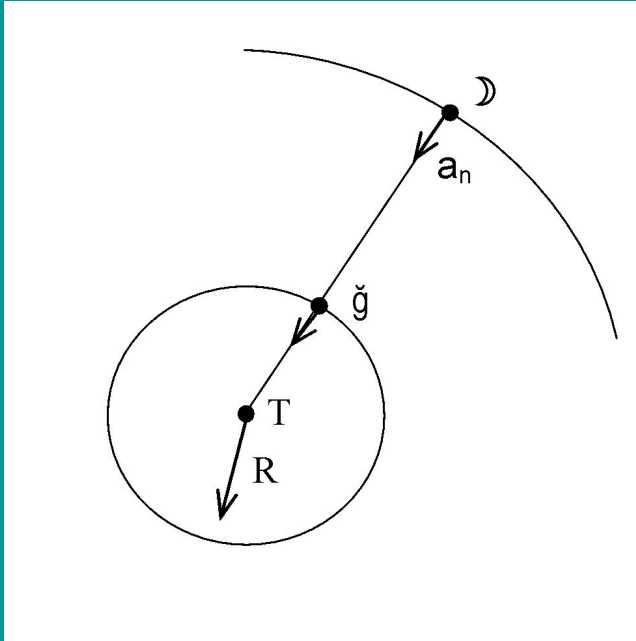
$$\frac{d}{dt}(m\bar{v}) = \bar{F}$$

Третий закон: «Действие всегда вызывает равное и противоположное противодействие, т.е. взаимодействие двух тел между собой равны и направлены в противоположные стороны».

$$\frac{d}{dt}(m_1\bar{v}_1) = \frac{d}{dt}(m_2\bar{v}_2)$$

$$\bar{F}_1 = -\bar{F}_2$$

Закон всемирного тяготения



Связь между нормальным ускорением $\bar{a}_n$

Луны и ускорением силы тяжести $\bar{g}$

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{(2\pi)^2}{T^2} r$$

$$r = 384403 \text{ км}, T = 27,322 \text{ суток}$$

$$a_n = 0,27 \text{ см/с}^2$$

$$\frac{g}{a_n} = \left(\frac{r}{R} \right)^m$$

Сила тяготения между двумя точечными массами пропорциональна массам этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где m_1 и m_2 – массы тел, r - расстояние между ними, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$

Если r в а.е., m в $m_\odot$, T в $T_\odot$ (солнечные сутки), то $G = K^2 = 0,00029591$, а $K = \frac{1}{58}$ гауссовой постоянной.

Гравитационная сила - пример центральной силы

Силы, где $F = \frac{c}{r^2}$ - центральные

$$\vec{F} = \frac{c}{r^2} \vec{r}_o \quad \vec{r}_o = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

$$\square \quad F = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{c}{r^2} \quad U(r) = \frac{c}{r} + const$$

$$U(r) = -\frac{GM_1 M_2}{r} = \frac{c}{r} \quad c = -GM_1 M_2$$

Закон всемирного тяготения справедлив для

1. Тел, имеющих форму шаров с равномерно распределенной плотностью вещества.
2. Тел, имеющих форму шаров со сферически симметричным распределением плотности, зависящей от расстояния от центра шара.

В этих случаях сила взаимодействия между точечной массой M_1 и шаром массы M и радиусом $R_0 < r$ выразится формулой

$$F = \frac{GM_1 M}{r^2}$$

где r – расстояние между точечной массой и центром шара.

Потенциальная энергия пробной массы в поле тяготения сплошного шара

равна
$$U = -\frac{GM_1 M}{r}$$

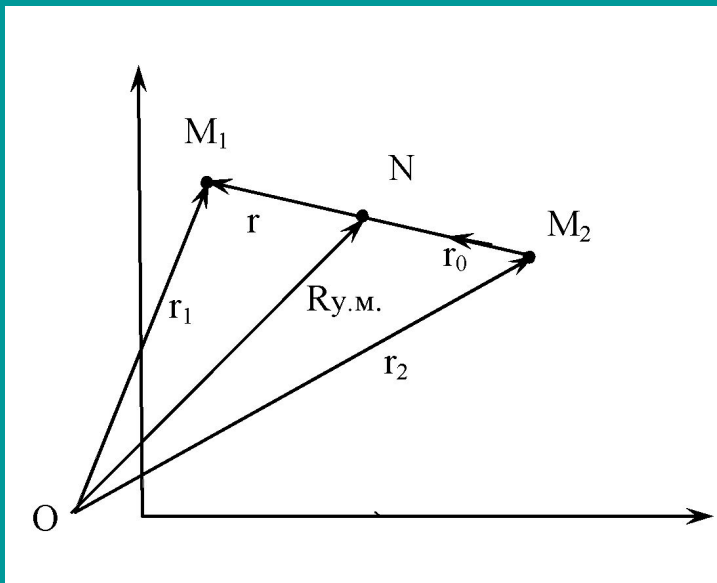
3. Шаровых слоев, у которых вещество имеет постоянную плотность.

В случае взаимодействия точечных масс M_1 с массами в виде шарового слоя

M_m выразится формулами
$$F = -\frac{GM_1 M_m}{r^2} \quad \text{и} \quad U = -\frac{GM_1 M_m}{r}$$

для силы и потенциальной энергии, соответственно

Задача двух тел



Движение двух тел под действием центральных сил

$$F = m \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2}$$

$$M_1 \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = - \frac{GM_1 M_2}{r^2} \bar{r}_0; \quad M_2 \frac{d^2 \bar{r}_2}{dt^2} = \frac{GM_1 M_2}{r^2} \bar{r}_0$$

$$\bar{r} = \bar{r}_1 - \bar{r}_2 \quad \bar{r}_0 = \frac{\bar{r}}{|\bar{r}|}$$

$$M_1 \frac{d^2 \bar{r}_1}{dt^2} + M_2 \frac{d^2 \bar{r}_2}{dt^2} = \text{const}$$

Закон сохранения
количества
движения
замкнутой системы

$$\bar{R}_{ц.м.} = \frac{M_1 \bar{r}_1 + M_2 \bar{r}_2}{M_1 + M_2} \Rightarrow \frac{d\bar{R}}{dt} = \text{const}, \text{ т.е. центр масс движется с постоянной скоростью.}$$

$$\frac{d^2 (\bar{r}_1 - \bar{r}_2)}{dt^2} = \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = - \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{GM_1 M_2}{r^2} \bar{r}_0$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \quad \mu - \text{приведенная масса}$$

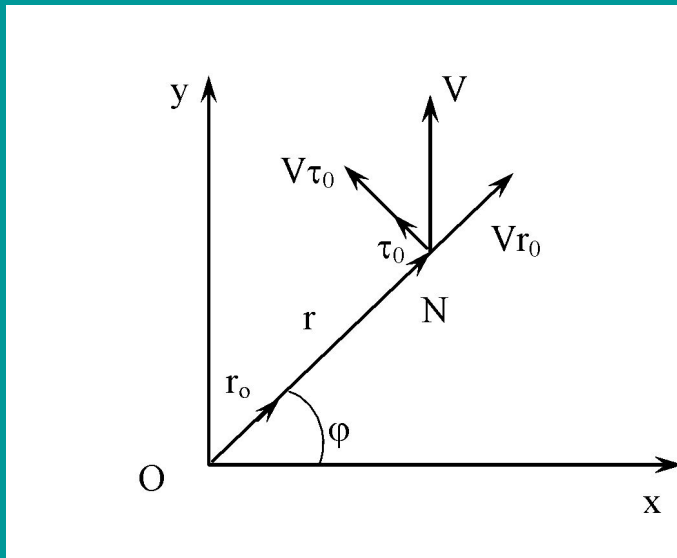
$$\mu \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = - \frac{GM_1 M_2}{r^2} \bar{r}_0$$

Для приведенной массы μ справедливо выражение $\bar{L} = \bar{r} \times \mu \frac{d\bar{r}}{dt} = const$ т.е. момент количества движения материальной точки (μ) $\bar{L}$, движущейся вокруг неподвижного центра сил (центра масс) есть величина постоянная.

$\bar{L} \perp \bar{r}$ и $\frac{d\bar{r}}{dt} = \bar{v}$, т.е. движение в одной плоскости

Преобразуем уравнение движения к виду $\frac{d}{dt} \left(\frac{\mu v^2}{2} - G \frac{M_1 M_2}{r} \right) = 0$

$\frac{\mu v^2}{2} - G \frac{M_1 M_2}{r} = E$ Сумма кинетической энергии тела массой μ и его потенциальной энергии – постоянна.

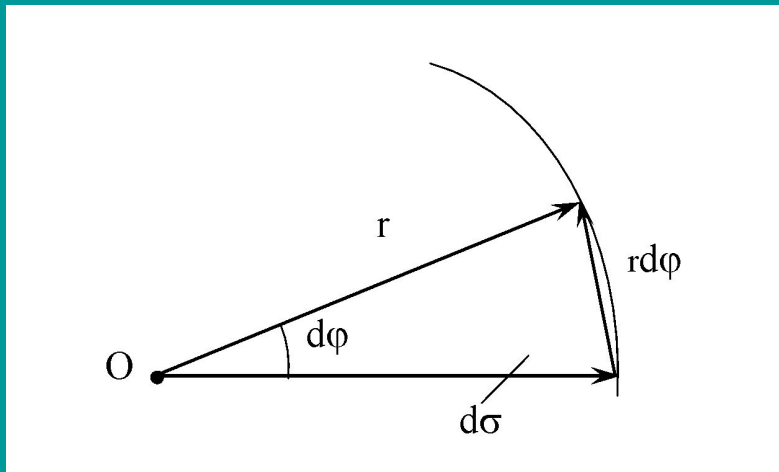


$$\bar{v} = \frac{d\bar{r}}{dt} = \frac{dr}{dt} \cdot \bar{r}_o + r \frac{d\phi}{dt} \bar{\tau}_o = \frac{dr}{dt} \cdot \bar{r}_o + r\omega \bar{\tau}_o$$

$$\bar{L} = \mu r^2 \omega \cdot \bar{r}_o \times \bar{\tau}_o \quad (\bar{r} \times \bar{r}_o)$$

$$L = \mu r^2 \omega = \mu r^2 \frac{d\phi}{dt} = const$$

Представление скорости движения приведенной массы μ (т. N) вокруг неподвижного центра сил в точке O



$$d\sigma = \frac{1}{2} r \cdot r d\phi = \text{const}$$

За равные промежутки времени радиус-вектор точки описывает равные площади (второй закон Кеплера)

К определению секторальной скорости

В полярной системе координат

$$E = \frac{1}{2} \mu \left(\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + r^2 \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right) + U(r) = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{L^2}{2\mu r^2} + U(r)$$

$$U_{\text{эфф}} = U(r) + \frac{L^2}{2\mu r^2} \text{ - определяет одномерное движение в поле «эффективной» потенциальной энергии}$$

$$\frac{L^2}{2\mu r^2} \text{ - центробежная энергия, связанная со вращающейся вокруг N неподвижной системы координат}$$

$$E = U_{\text{эфф}}, \text{ если } \frac{dr}{dt} = 0 \text{ - условие границы области пространства движущегося тела}$$

Если 1) $r \geq r_{\min}$ – движение инфинитное

2) $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$ – движение финитное, лежащее внутри кольца, ограниченного окружностями $r = r_{\min}$ и $r = r_{\max}$

Если 1) $E > U_{\text{эфф}}$ – движение инфинитное

$E < U_{\text{эфф}}$ – движение финитное

Траектория движения определится интегрированием по t выражения для E

$$\varphi = \int \frac{L/r^2 dr}{\sqrt{2\mu|E - U(r)| - \frac{L^2}{r^2}}}$$

Зависимость от времени (время прохождения точки траектории с заданными φ и r) определится интегрированием по r

$$t = \int \frac{L dt}{\mu r^2} = \int \frac{L/r^2 dr}{\sqrt{2\mu|E - U(r)| - \frac{L^2}{r^2}}}$$

Кеплерова задача

$$U(r) = -\frac{c}{r}, \text{ где } c = M_1 M_2 G$$

$$\varphi = \arccos \frac{\frac{L}{r} - \mu G M_1 M_2}{\sqrt{2\mu E + \frac{\mu(G M_1 M_2)^2}{L^2}}}$$

Пусть $p = \frac{L^2}{\mu G M_1 M_2}$ $e = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{\mu(G M_1 M_2)^2}}$ - эксцентриситет

$$\frac{p}{r} = 1 + e \cos \varphi$$

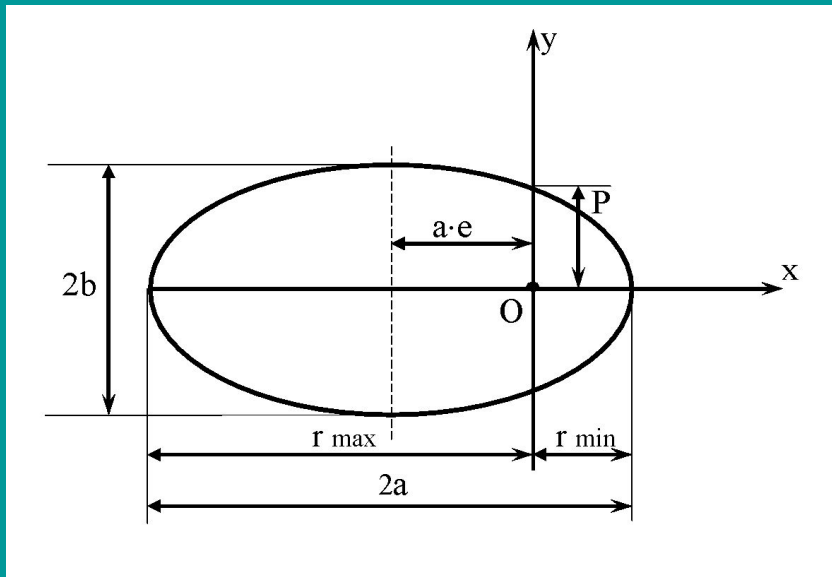
Тогда -
уравнение конического сечения

1) Если $E < 0$, то $e < 1$ -
движение финитное (эллипс или окружность)

$$a = \frac{p}{1 - e^2} = \frac{G M_1 M_2}{2|E|} \quad \text{- большая полуось}$$

$$b = \frac{p}{\sqrt{1 - e^2}} = \frac{L}{\sqrt{2\mu|E|}} \quad \text{- малая полуось}$$

$$r_{\min} = \frac{p}{1 + e} = a(1 - e); \quad r_{\max} = \frac{p}{1 - e} = a(1 + e)$$



Основные элементы эллипса: a – большая полуось; b – малая полуось; p - параметр; e - эксцентриситет

Т.к. $l = \mu r^2 \frac{d\varphi}{dt}$, то $LT = 2\sigma\mu$ ($\sigma = \text{таб}$)

$\frac{T^2 (M_1 + M_2)}{a^3} = 4\pi^2 / G$ - Квадраты периодов обращения по эллиптическим орбитам, пропорциональным кубу их линейных размеров

2) Если $E > 0$, то $e > 1$ – движение инфинитное по гиперболе, огибающей фокус 0

$$r_{min} = \frac{p}{1-e} < \frac{p}{2}$$

3) Если $E = 0$, то $e = 1$ – движение инфинитное по параболе, огибающей фокус 0

Из выражения для энергии, заменив E , получим

$$v^2 = G(M_1 + M_2) \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$$

1. $e = 0$ $r_{max} = r_{min} = a$

$$v = \sqrt{G(M_1 + M_2) \cdot \frac{1}{a}}$$

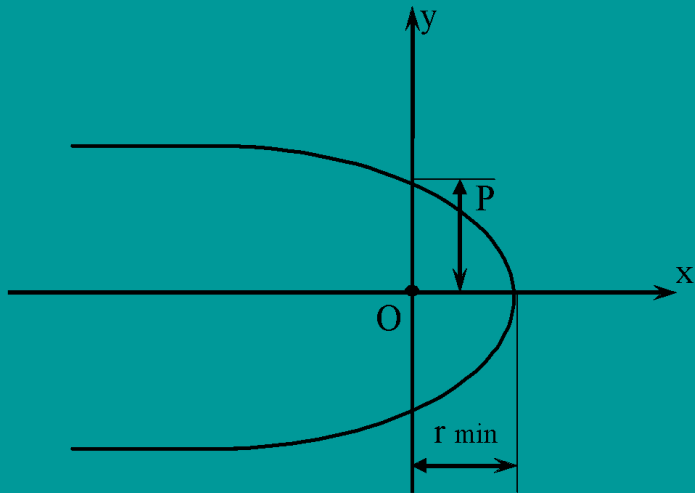
2. $e = 1$

$$v = \sqrt{2} \sqrt{G(M_1 + M_2) \frac{1}{r}}$$

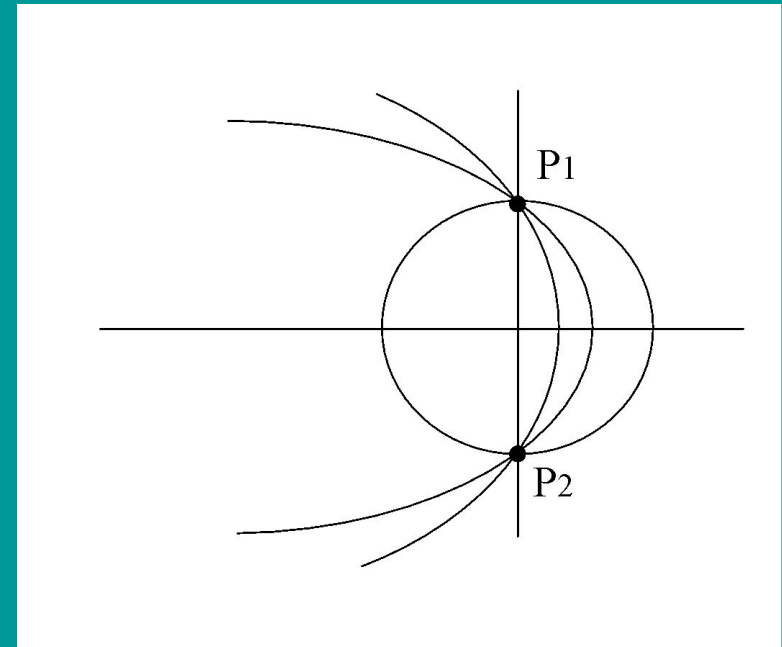
Из выражения для энергии, заменив E , получим $v^2 = G(M_1 + M_2) \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$

1. $e = 0$ $r_{\max} = r_{\min} = a$ $v = \sqrt{G(M_1 + M_2) \cdot \frac{1}{a}}$ (круговая орбита)

$r = r_{\min}$ $v = \sqrt{2} \sqrt{G(M_1 + M_2) \frac{1}{r_{\min}}}$ $r = r_{\max}$ $v = 0$ $a = \infty$



Параметры орбиты инфинитного движения

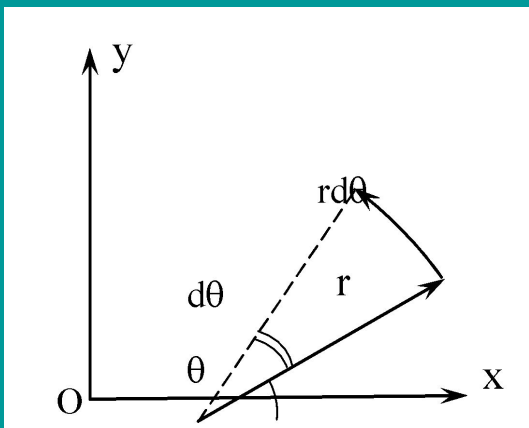


Различные типы орбит приведенной массы μ

Законы Кеплера в рамках задачи двух тел

1. Первый (обобщенный) закон Кеплера.

Под действием сил тяготения одно тело движется в поле тяготения другого по орбите, форма которой представляет собой один из видов количественного сечения – окружность, эллипс, парабола или гипербола. При этом форма и размер орбит тел зависит только от начальной скорости.



К объяснению второго закона Кеплера

2. Второй закон Кеплера.

При невозмущенном движении (в задаче двух тел) радиус-вектор тела за равные промежутки времени описывает равновеликие площади.

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const}$$

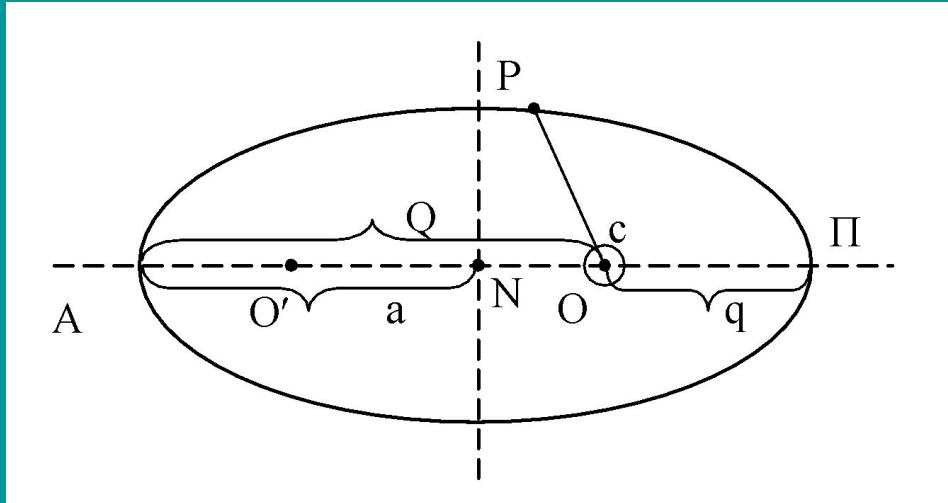
θ - истинная аномалия (Для Солнца, как центра притяжения, θ - угол между направлениями из центра Солнца на планету и на перигелий ее орбиты)

3. Третий (уточненный) закон Кеплера.

Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей эллипсов.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} \cdot \frac{M_1 + m_1}{M_2 + m_2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Характеристики эллиптической орбиты небесного тела относительно Солнца



$AN = a$ – большая полуось;

$$e = \frac{NC}{NP} \quad - \text{ эксцентриситет;}$$

A – афелий; П – перигелий

$$q = CP = a(1-e)$$

$$Q = AC = a(1+e)$$

N – центр эллипса; O (C), O' – фокусы

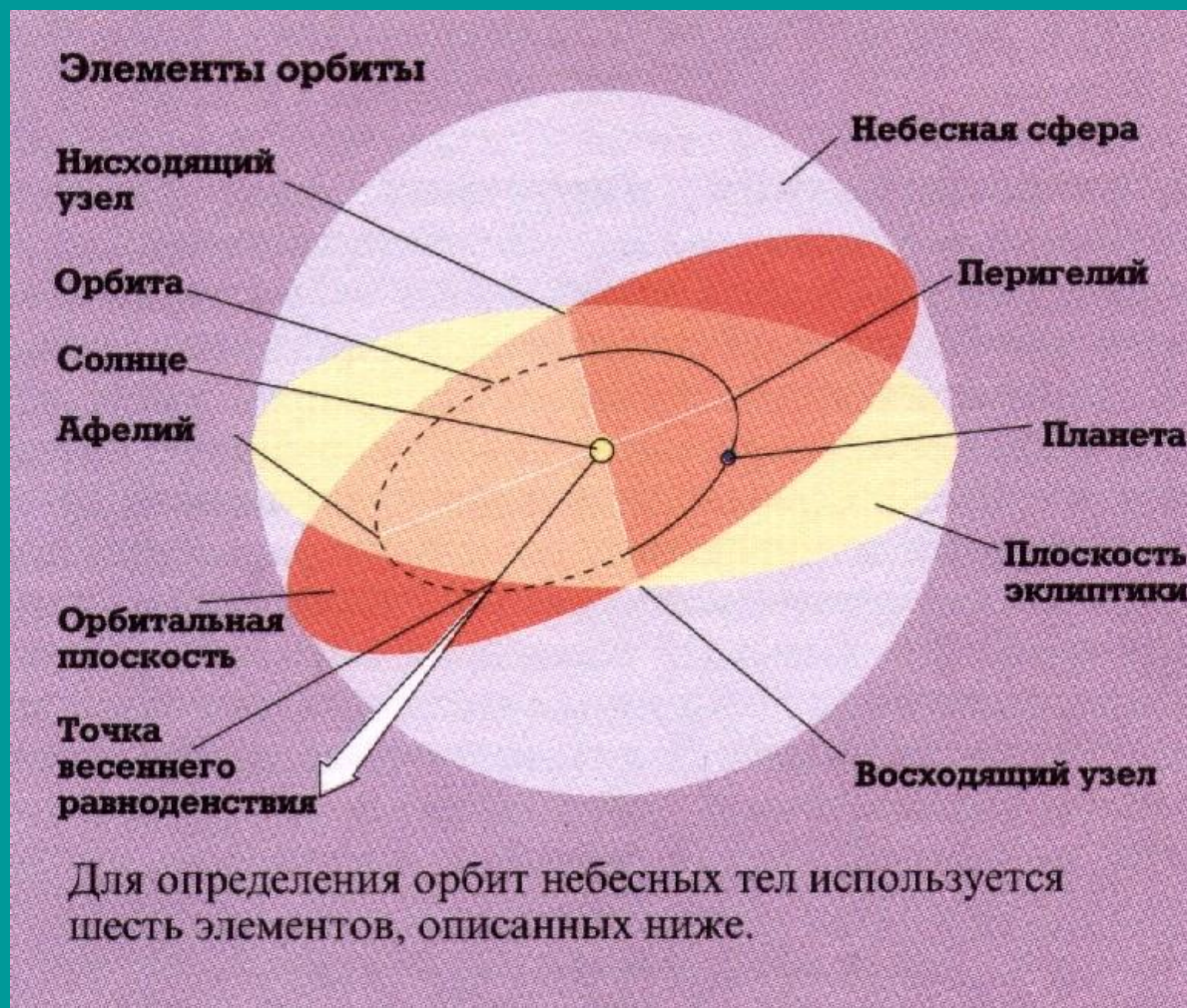
r – радиус-вектор планеты P.

Характеристики
эллиптической орбиты

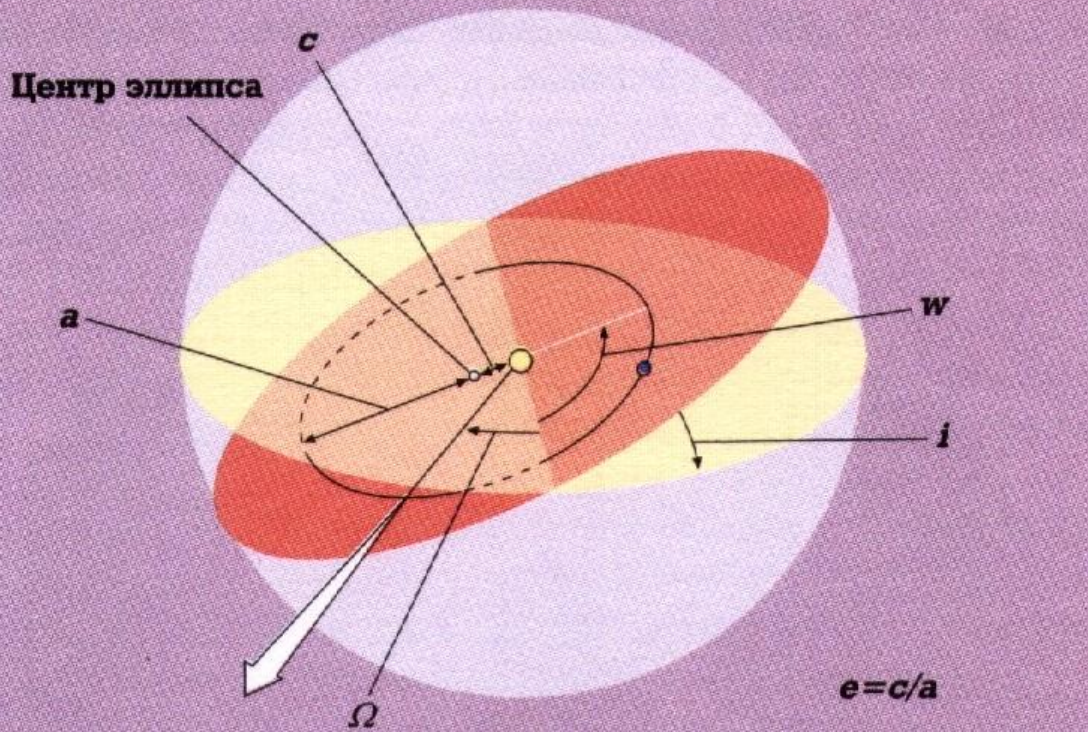
$$v_q = v_{kp} \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$$

$$v_Q = v_{kp} \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}$$

Определение характера движения небесных тел



Основные линии и плоскости,
связанные с орбитой



Элементы орбиты

a – большая полуось эллипса;

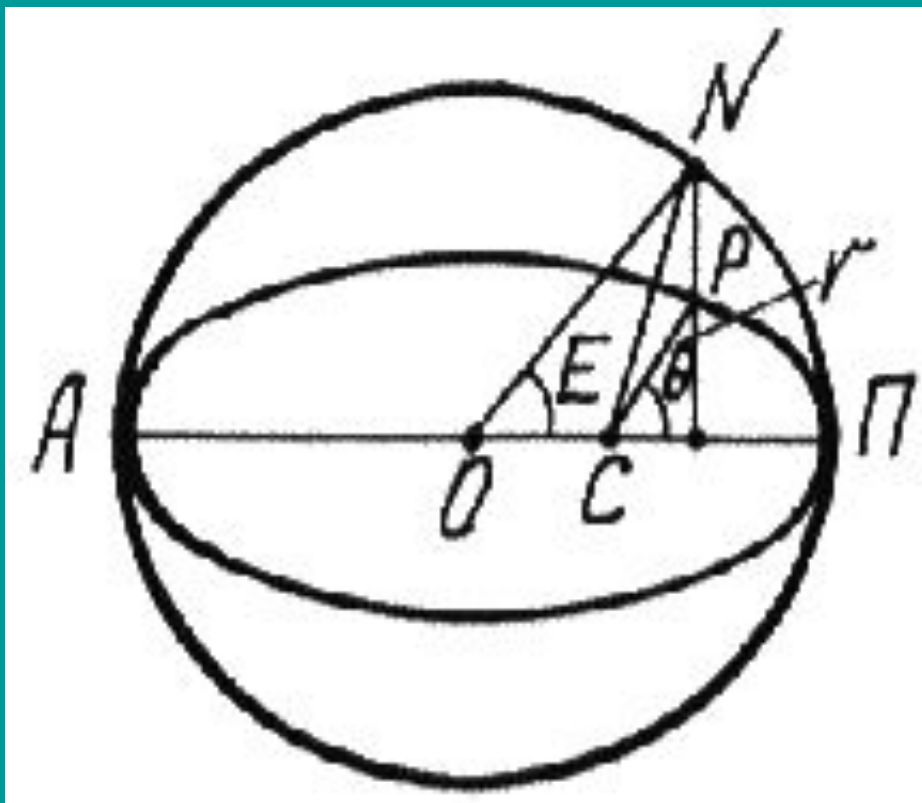
e – эксцентриситет эллипса, определяемый формулой $e = c/a$, где c – расстояние между центром и фокусом, относительно которого обращается планета;

i – наклонение плоскости орбиты к плоскости эклиптики;

Ω – долгота восходящего узла;

w – аргумент перигелия, угол измеряемый в орбитальной плоскости между направлением на перигелий и линией узлов;

T – время прохождения через перигелий



Истинная (θ) и эксцентрическая (E) аномалии орбиты.

Определение θ и r для оценки положения небесного тела на орбите в момент времени t

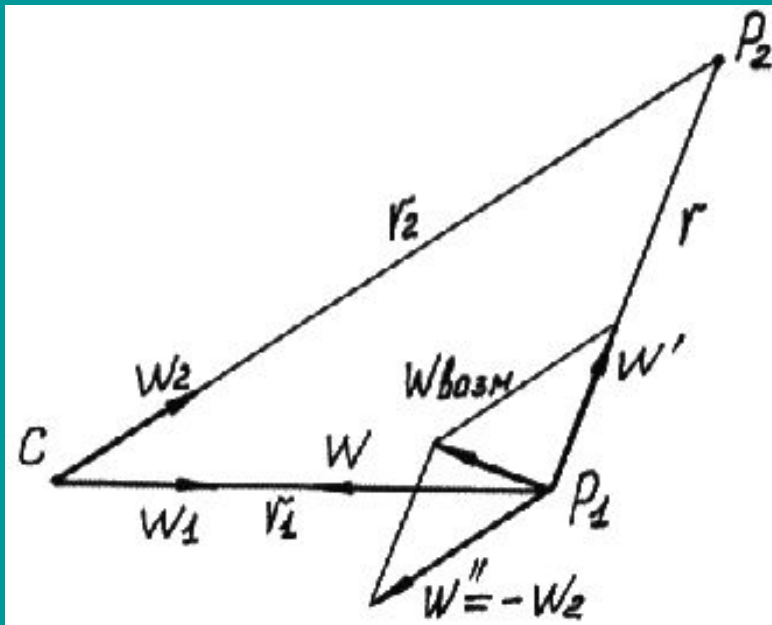
1. $r = a(1 - e \cdot \cos E)$ – уравнение Кеплера
2. $M = E - e \cdot \sin E$ – средняя аномалия

$$3. \quad \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}$$

$$4. \quad M = \frac{2\pi}{T'} (t - T)$$

T' – сидерический период

Природа возмущенного движения



К понятию о возмущающей силе: C – центральное тело; P₁ – притягиваемое тело; P₂ – возмущающее тело.

$$w_1 = G \frac{m_1}{r_1^2} \quad (P_1 C)$$

$$w = G \frac{M + m}{r_1^2} \quad (CP_1)$$

$$w' = G \frac{m_2}{r_2^2} \quad (P_2 P_1)$$

$$w_2 = G \frac{m_2}{r_2^2} \quad (CP_2)$$

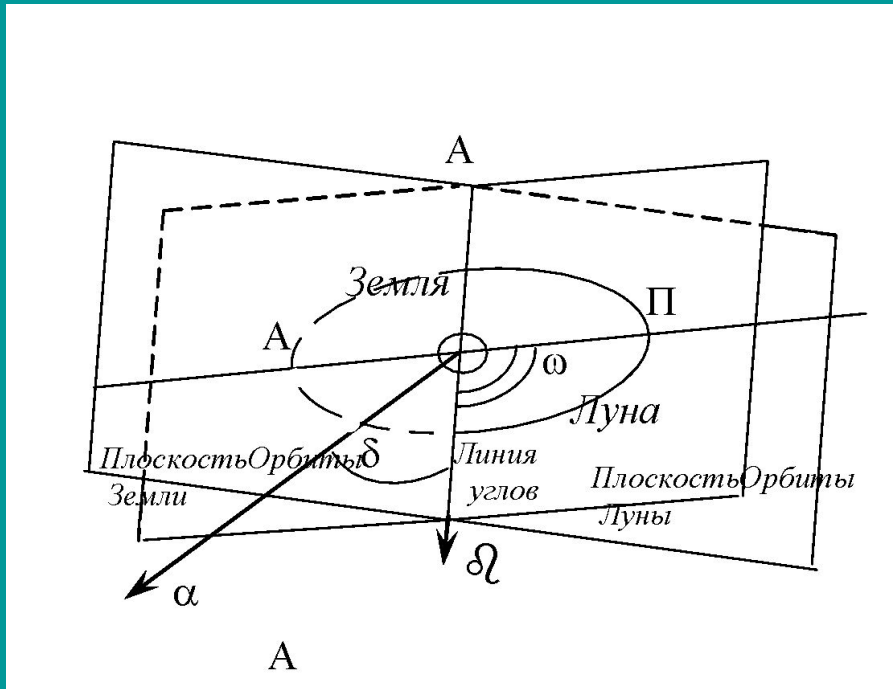
$$\bar{w}_{\text{возм}} = \bar{w}' + \bar{w}'' = \bar{w}' - \bar{w}_2$$

Если $|\bar{w}_1| \gg |\bar{w}_{\text{возм}}|$, то C центральное тело, а P₂ – возмущающее

$$e = 0,016730 - 0,0000419t - 0,0000001t^2$$

где e – эксцентриситет Земли, t – временной период в столетиях

Параметры орбиты Луны



Ориентация орбиты Луны
относительно плоскости
эклиптики

Период вращения линии узлов $6798^{\text{д}} = 18,61$ год

Период вращения линий апсид $3232^{\text{д}} = 8,85$ год

$$S_{\odot} = 27^{\text{д}},21$$

$$T_{* \text{ Л}} = 27,32 \text{ суток} = 27^{\text{д}}7^{\text{ч}}43^{\text{м}}12^{\text{с}}$$

$$29'20'' \leq d_{\text{Л}} \leq 33'20''$$

Наклон экватора Луны к
эклиптике $1^{\circ}32'$

$$S_{* \text{ Л}} = 29^{\text{д}},5$$

$$n_{\text{Л}} = 0,5^{\circ}/\text{час} = 13,2^{\circ}/\text{сутки}$$

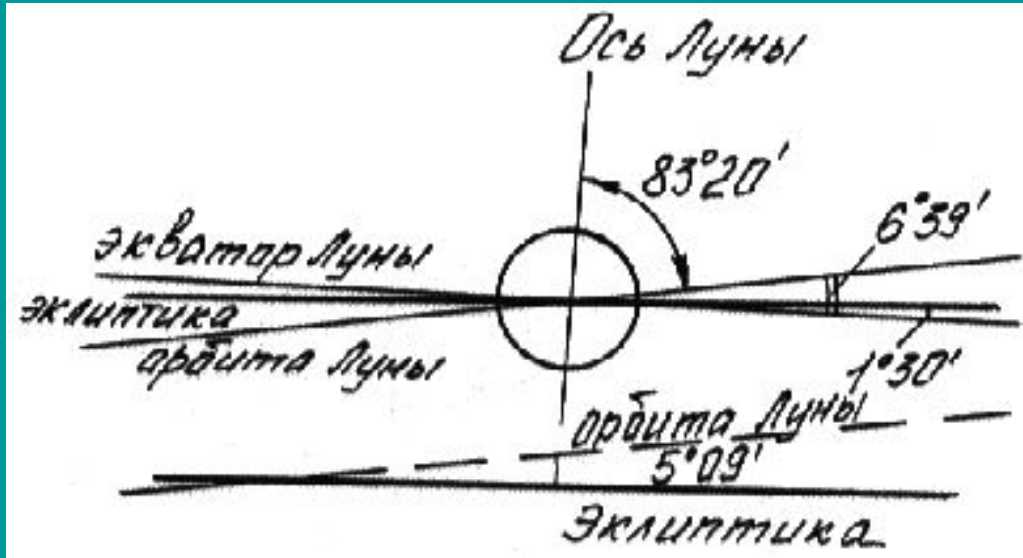
$$a = 384400 \text{ км}$$

$$E = 0,0549$$

$$i = 5^{\circ}09'$$

$$P_{\text{Л}} = 57' (29'20'' \leq P_{\text{Л}} \leq 33'20'')$$

Явления, связанные с движением Луны

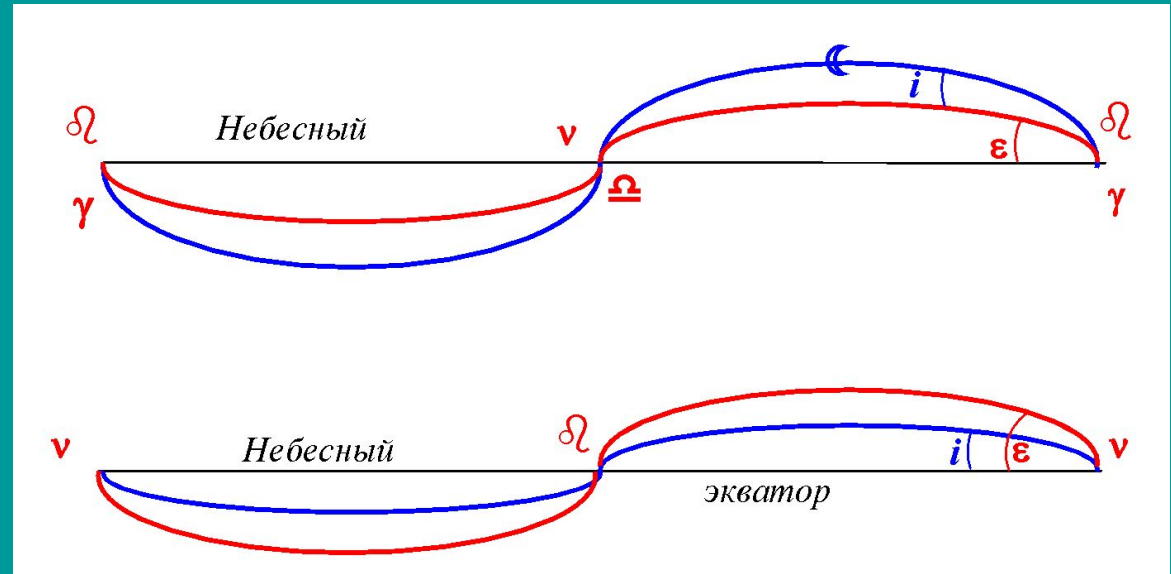


Взаимное расположение в пространстве основных осей и плоскостей Луны и ее орбиты.

Взаимное расположение плоскостей Луны и эклиптики

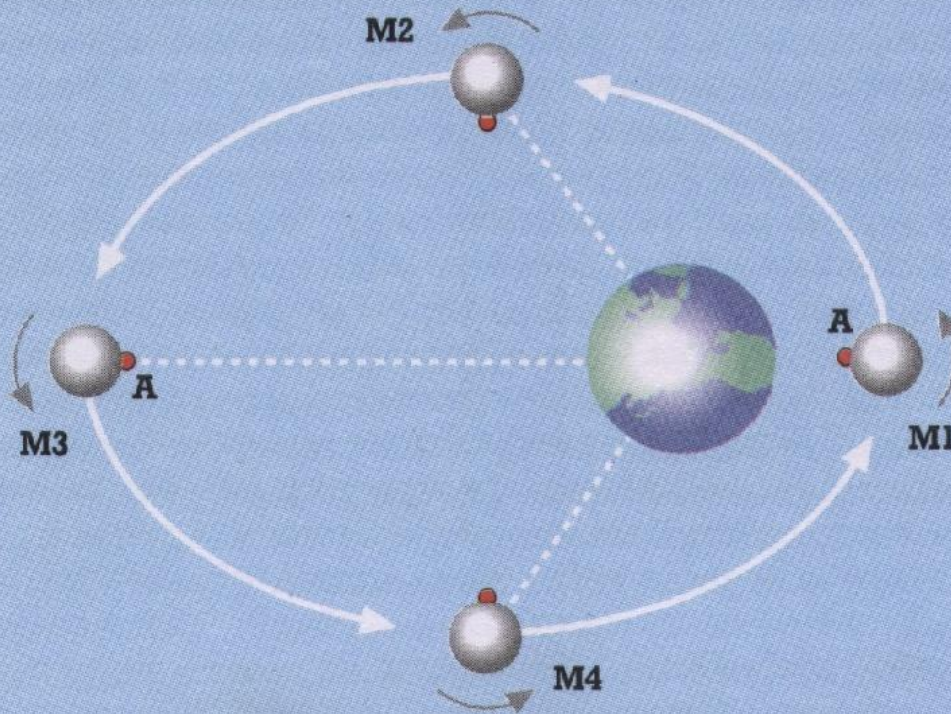
а) $-28^{\circ}35' \leq \delta_{\text{л}} \leq 28^{\circ}35'$ и

б) $-18^{\circ}17' \leq \delta_{\text{л}} \leq 18^{\circ}17'$



Либрация Луны

Либрация Луны по долготе

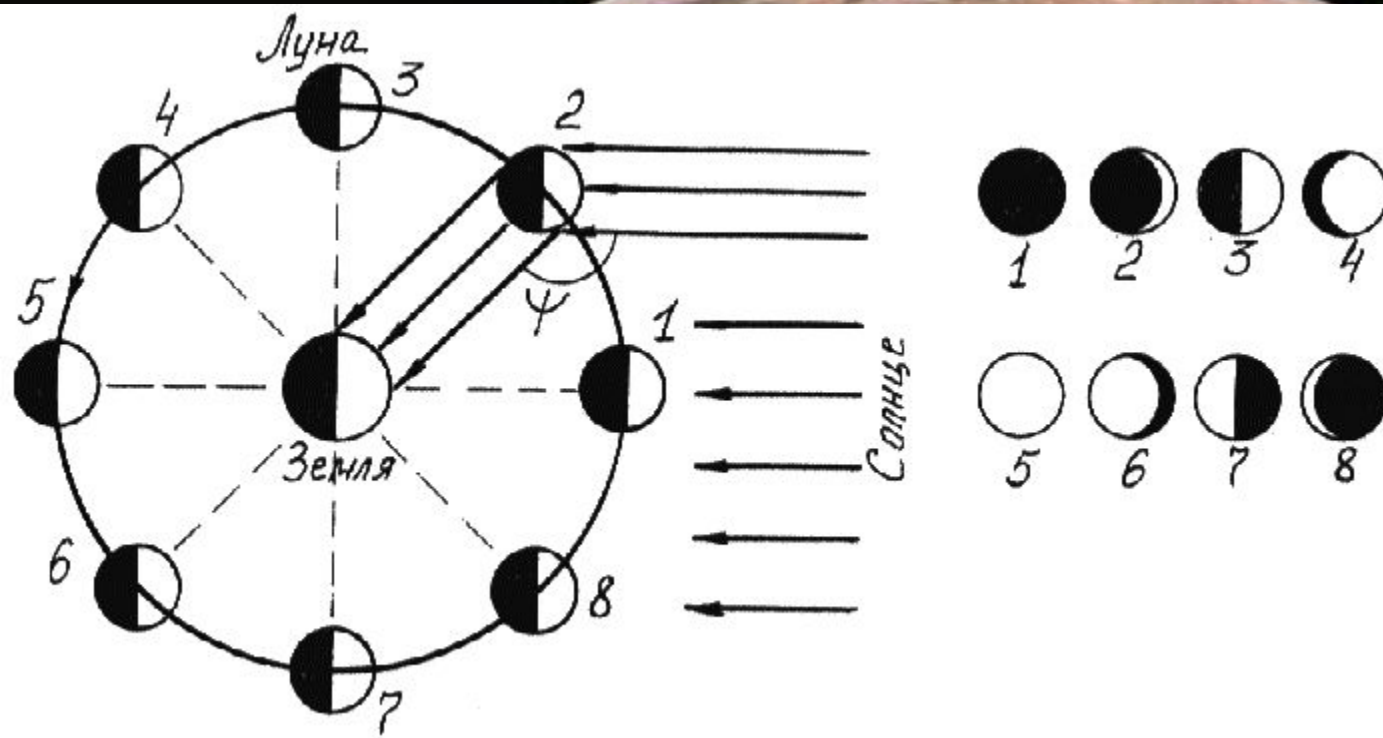


Либрация Луны по долготе

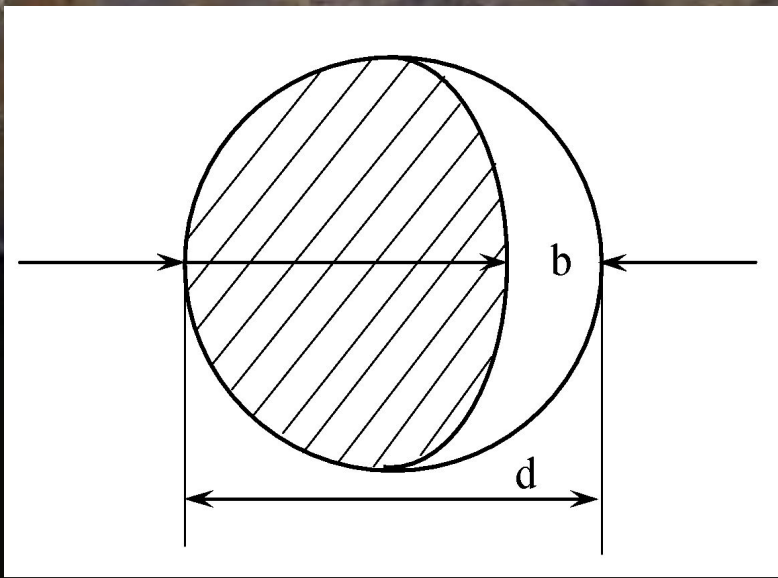


Либрация Луны по широте

Фазы Луны



Схема, описывающая последовательность изменения фаз Луны.



Численное определение фазы Луны

$\Phi = \cos^2 \psi / 2$, где ψ - угол между направлениями с Луны на Солнце и Землю

Солнечные затмения

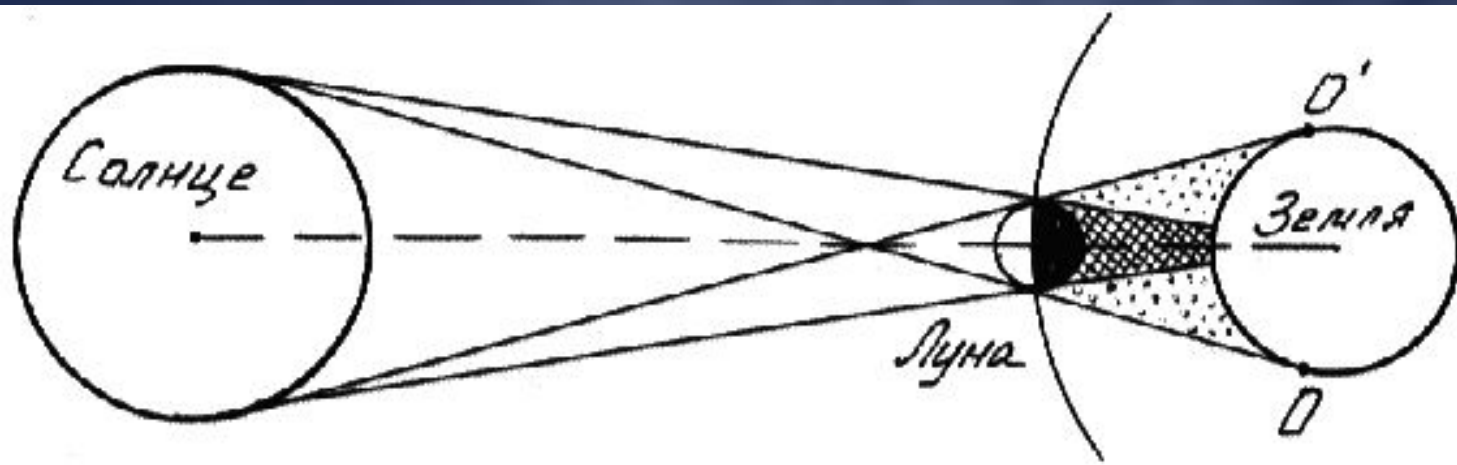


Схема
солнечного
затмения.

$$\Phi = \frac{\rho_0 + \rho_1 - \sigma}{2\rho_0}$$

$$\Phi = \frac{\rho_0 + \rho_1}{2\rho_0} \quad (\sigma=0)$$

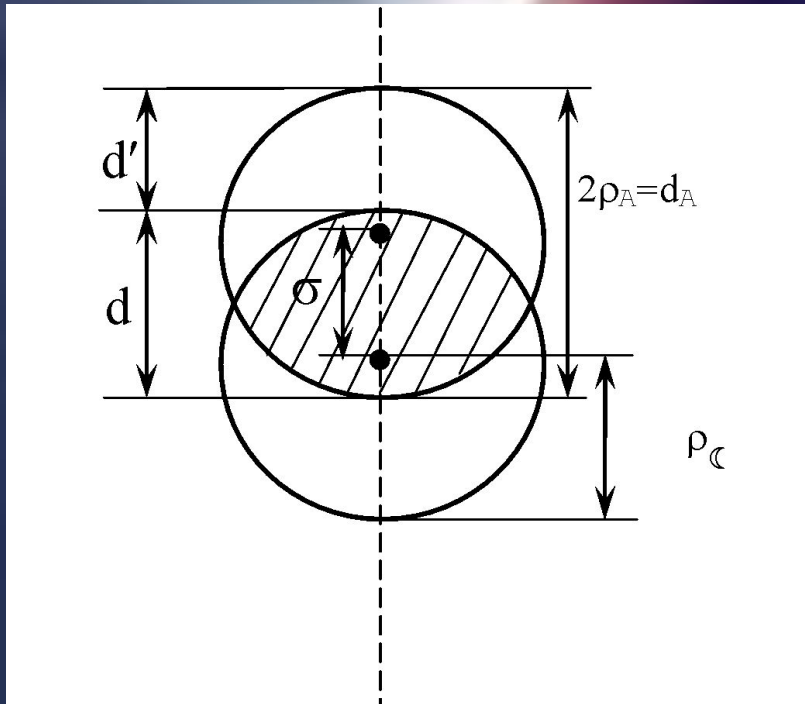
$\Phi_{\odot} \leq 1,03$ $\Phi_{\odot} > 1$, если

$$\rho_{\odot} + \rho_{\zeta} \geq 2\rho_{\odot}$$

Если $\rho_{\odot} > \rho_{\zeta}$ -кольцеобразное
затмение

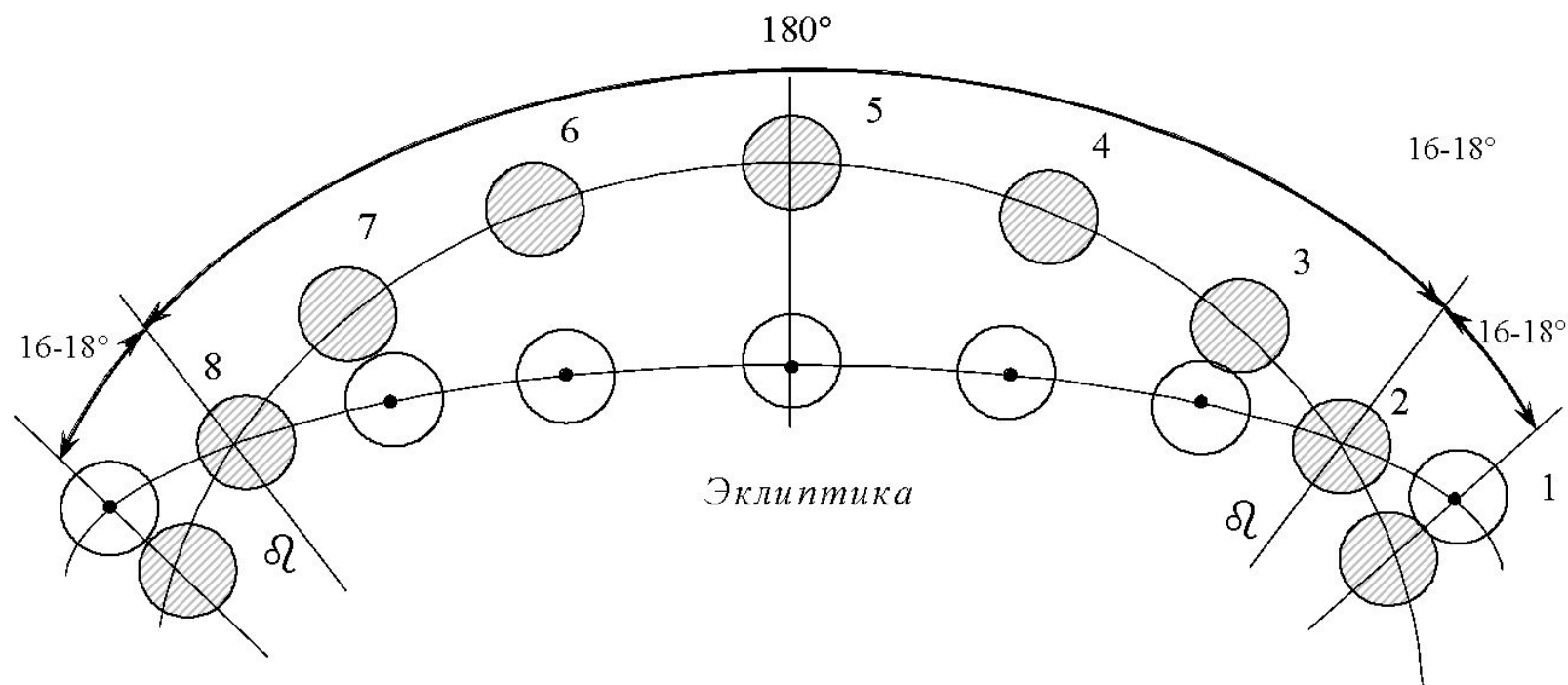
$$\Phi_{\text{кольц.тах}} = \frac{1}{2} \left(\frac{14'40''}{15'46''} + 1 \right) = 0.95$$

$$T_{\text{полного}} \leq 7^{\text{м}}31' \quad 1^{\text{ч}} \leq T_{\text{частного}} \leq 3,5$$

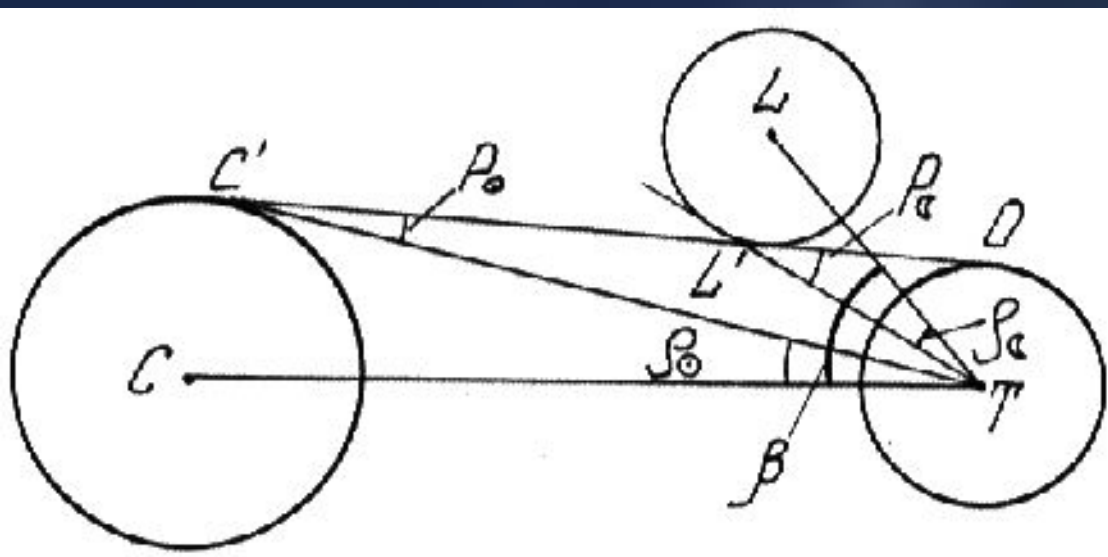


К определению фазы солнечного затмения

Условия наступления солнечного затмения



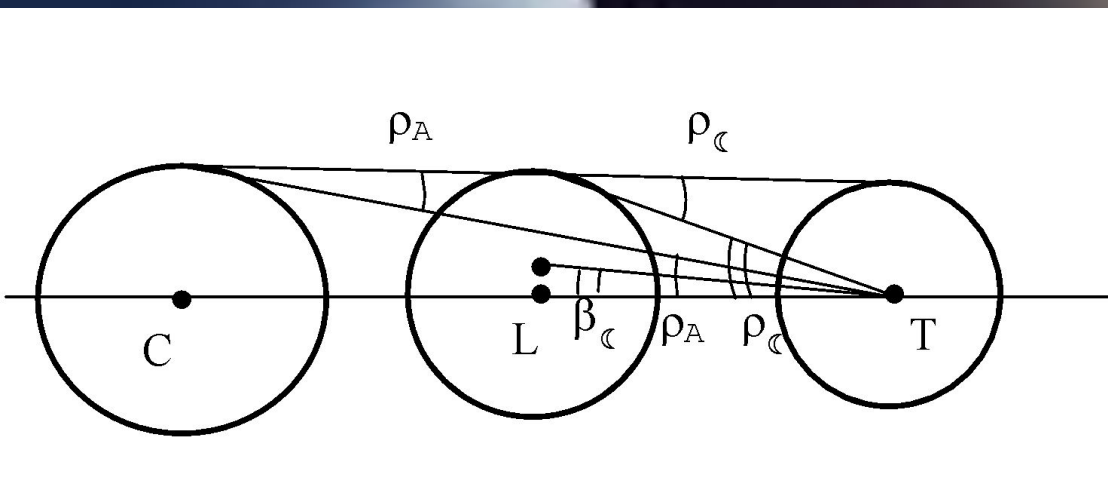
Относительное движение Солнца и Луны, определяющее возможность солнечных затмений



К расчету момента начала
солнечного затмения: $\rho_{\odot}$, $\rho_{\text{☾}}$ -
угловые радиусы Солнца и
Луны; $P_{\odot}$, $P_{\text{☾}}$ - суточные
параллаксы Солнца и Луны.

$$\beta_{\text{☾}} = \rho_{\odot} + \rho_{\text{☾}} + P_{\text{☾}} - P_{\odot}.$$

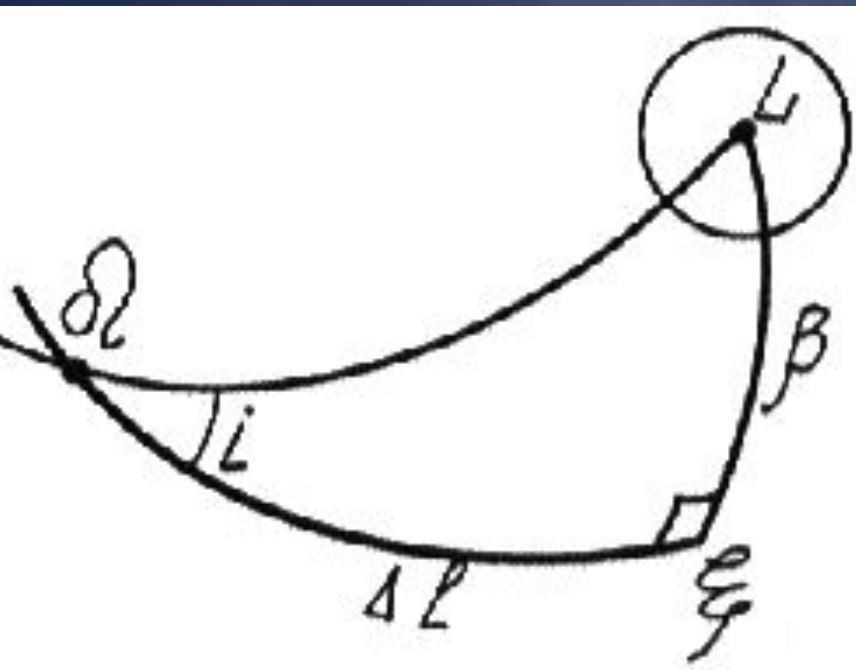
$$84'26'' \leq \beta_{\text{☾}} \leq 94'02''$$



Определение условий
полного солнечного затмения

$$\beta_{\text{☾}} = \rho_{\odot} - \rho_{\text{☾}} + P_{\text{☾}} - P_{\odot}.$$

$$55'06'' \leq \beta_{\text{☾}} \leq 60'36''$$



$$\sin \Delta l = \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg} i$$

$\Delta l \leq 11^\circ \div 12^\circ$ - полные
солнечные затмения

$\Delta l \leq 18^\circ \div 19^\circ$ - частные
солнечные затмения

Δl – эклиптическая долгота

β – эклиптическая широта

$$i = 5^\circ 9'$$

Сферический треугольник $L\xi\text{☾}$ в
момент начала солнечного затмения:
 $L\text{☾}$ - отрезок орбиты Луны, $\xi\text{☾}$ -
отрезок эклиптики.

Лунные затмения

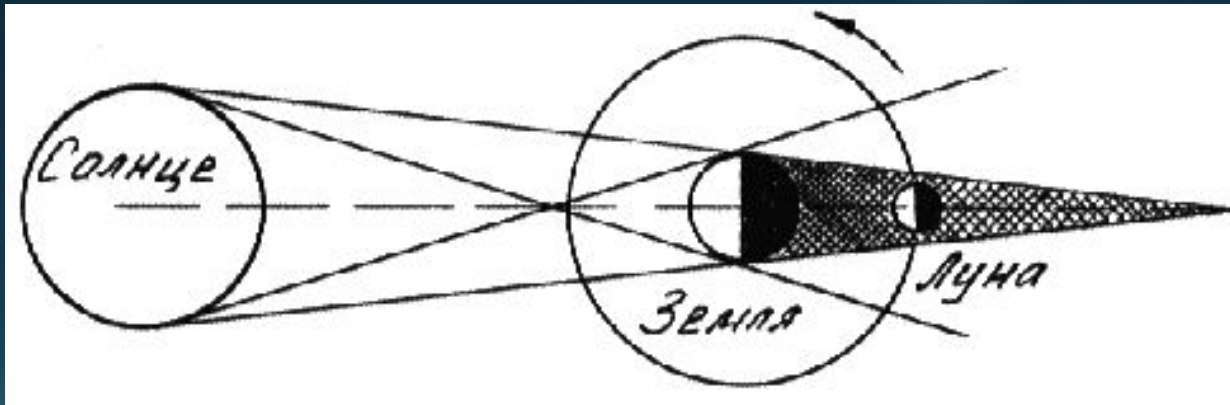
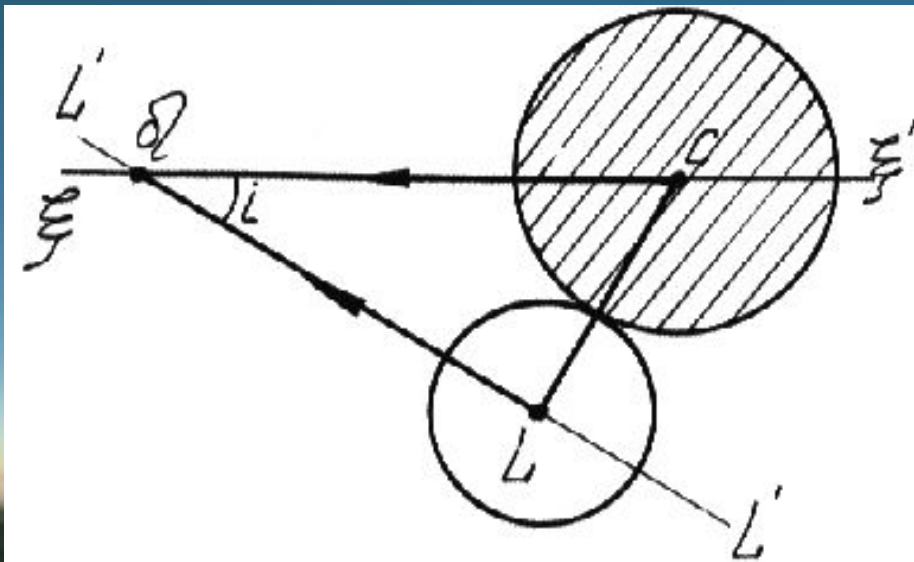


Схема лунного затмения.

$$\Phi = \frac{\rho_T + \rho_l - \sigma}{2\rho_l} \quad \sigma = 0 \quad \Phi_{\max \zeta} = 1,9 \quad (\rho_T \geq 41')$$



К расчету момента начала лунного затмения: С – центр земной тени, L – центр Луны.

$$\begin{aligned} \beta_{\zeta} &\leq 57'30''; \Delta l_{\zeta} \leq 11^{\circ},3 \\ \beta_{\text{пол} \zeta} &\leq 26'30''; \Delta l_{\text{пол} \zeta} \leq 5^{\circ},3 \end{aligned}$$

Частота повторения затмений. Сарос

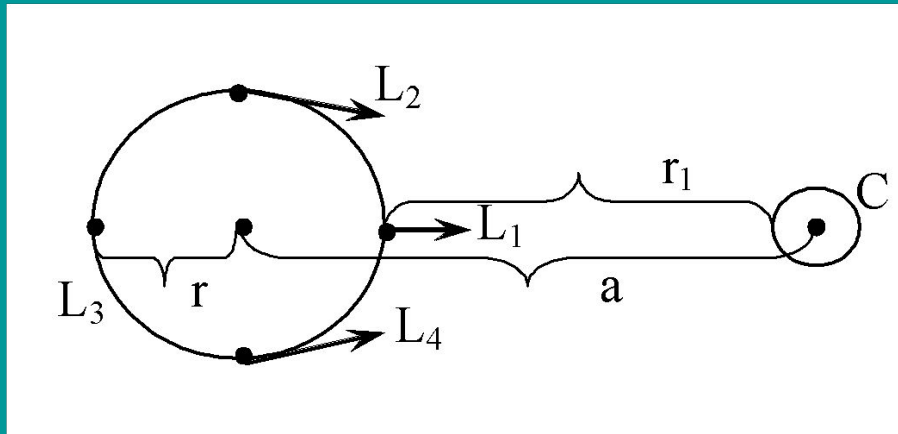
$T_{\odot} = 365^{\text{д}}, 3 - 19^{\text{д}}, 3 = 346^{\text{д}}$ – драконический год

$S = 29^{\text{д}}, 53$ $223 \cdot S = 242 \cdot S_{\odot} = 19T_{\odot} = 18 \text{ л } 11,3 \text{ суток}$ – Сарос

$S_{\odot} = 27^{\text{д}}, 21$

За 18 л 11,3 суток: $70 \div 71$ затмение, из них $42 \div 43$ солнечных (14 полных и $13 \div 14$ кольцеобразных + 15 частных) и 28 лунных

Возмущающие силы. Приливы и отливы



$$w_{C-L} = G \frac{M_C}{r_1^2}$$

$$\frac{w_{C-L}}{w_{3-L}} = \frac{M_C}{M_T} \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 = 2,5$$

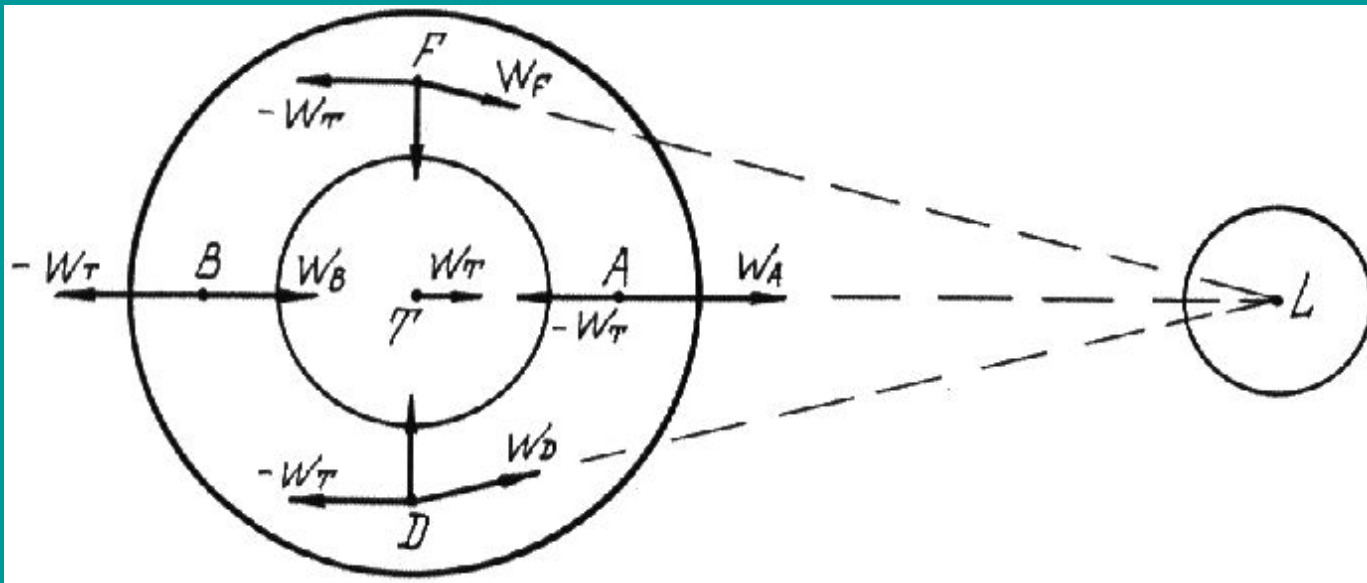
$$w_{3-L} = G \frac{M_T}{r^2}$$

$$w_{C-3} = G \frac{M_C}{a^2}$$

К определению возмущающего действия
Солнца на систему Земля-Луна

$$w_{\text{возм}} = w_{C-L} - w_{C-3} = GM_C \frac{2ar - r^2}{(a-r)^2 d^2} \cong GM_C \frac{r}{a^3}$$

$$\frac{w_{\text{возм}}}{w_{3-L}} = 2 \frac{M_C}{M_T} \left(\frac{r}{a} \right)^3 \approx \frac{1}{90}$$



Схема,
поясняющая
причину,
величину и
периодичность
наступления
приливов и
отливов

$$w_T = G \frac{M_T}{r^2}$$

Для Луны:

$$|\bar{w}_A| > |\bar{w}_T|$$

В точке А $(\bar{w}_A - \bar{w}_T) = GM_T \frac{2rR - R^2}{(r - R)^2 r^2} \cong GM_T \frac{2R}{r^3}$

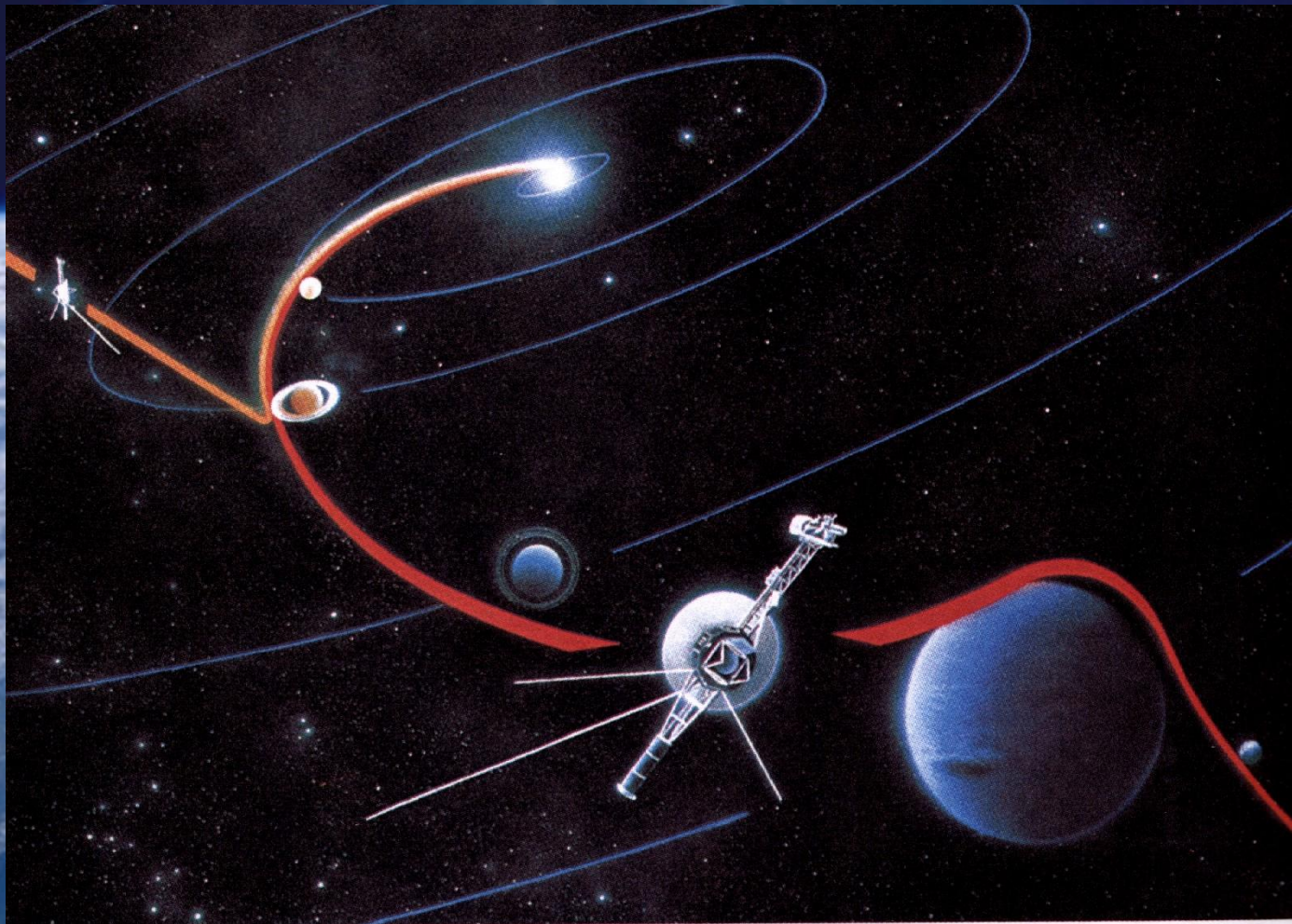
$$|\bar{w}_B| < |\bar{w}_T|$$

(R – радиус Земли)

Для Солнца:

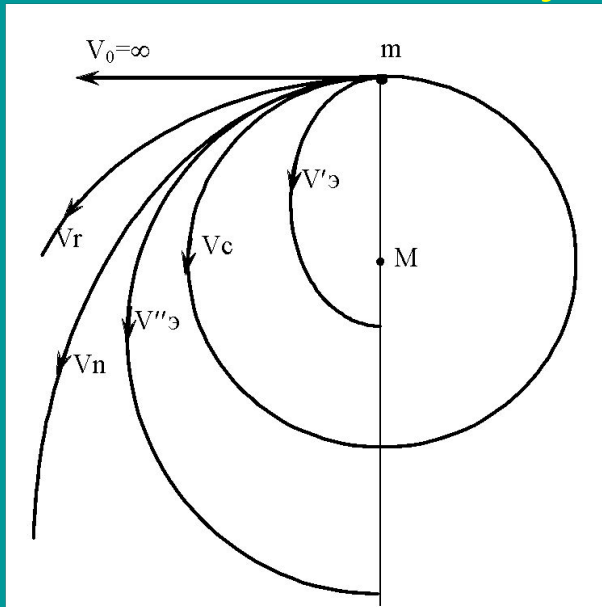
В точке А $(\bar{w}_A - \bar{w}_T) = GM_O \frac{2R}{a^3} \quad \frac{(\bar{w}_A - \bar{w}_T)_C}{(\bar{w}_A - \bar{w}_T)_C} = \frac{M_T}{M_C} \frac{a^3}{r^3} \approx 2,2$

Движение космических аппаратов



«Вояджер-1» (оранжевая траектория) запущен 5 сентября 1977 г., пролетел около Юпитера 5 марта 1979 г., Сатурна – 12 ноября 1980 г., а затем резко повернул и покинул солнечную систему. «Вояджер-2» (красная траектория) старт овал 20 августа 1977 г., раньше «Вояджера-1». Около Юпитера он пролетел 9 июля 1979 г., Сатурна – 25 августа 1981 г., Урана – 24 января 1986 г., Нептуна – 24 августа 1989 г. и также покинул Солнечную систему

Искусственные спутники Земли



1. $v_o = v'_э < v_c$ - эллипс (т.м – апогей)

2. $v_o = v_c$ - окружность

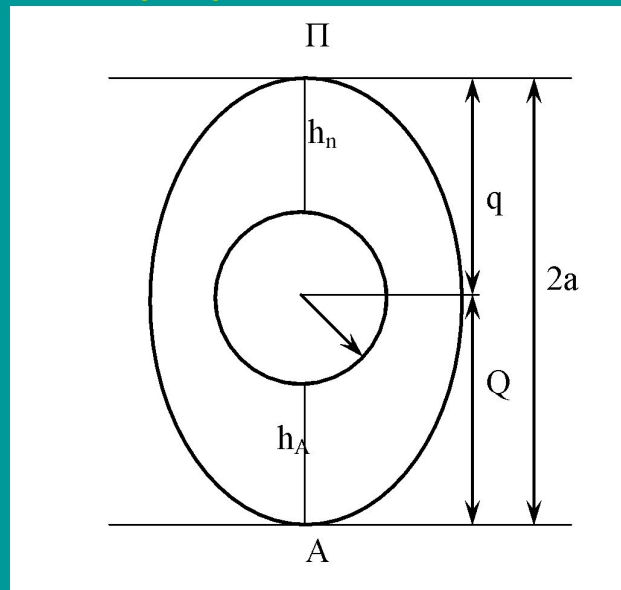
3. $v_o = v''_э > v_c$ - эллипс (т.м – перигей)

$$v_o < \sqrt{2}v_c$$

4. $v_o = \sqrt{2}v_c$ - парабола

5. $v_o > \sqrt{2}v_c$ - гипербола

Типы орбит в зависимости от начальной скорости v_o ($v_o \perp mM$)

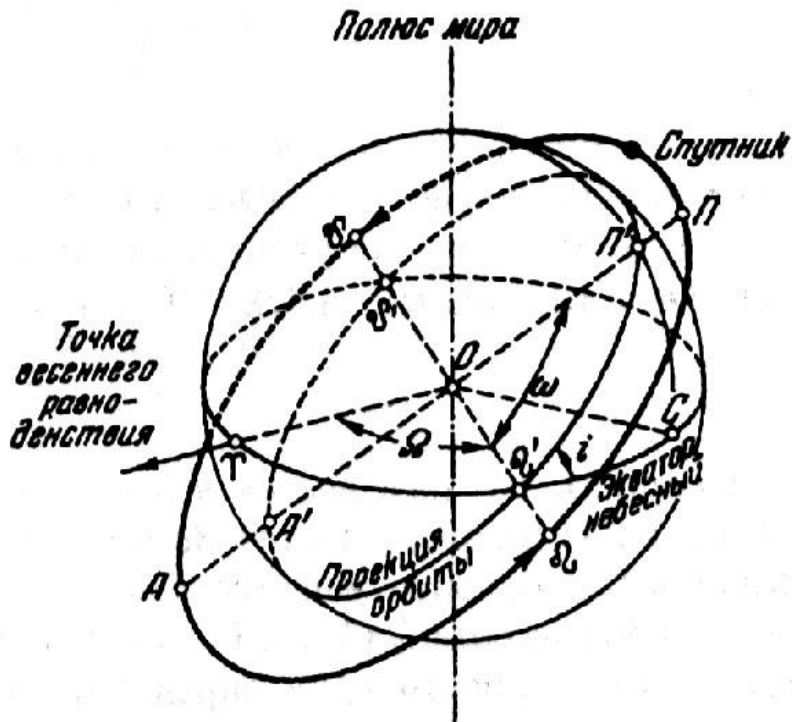


$$e = 1 - \frac{q}{a} \quad \left(\frac{v_q}{v_Q} \right)^2 = \frac{Q(2Q+q)}{q(2q+Q)}$$

$$q = a(1-e) = R_3 + h_n$$

$$Q = a(1+e) = R_3 + h_A$$

Эллиптическая орбита ИСЗ



Орбита ИСЗ в пространстве
вокруг Земли

$$V_c = \sqrt{G \frac{M}{r_o}} \quad r_o = R_3 + h_{\Pi}$$

Для эллиптической орбиты
при $v_o > v_c$

$$\frac{r_o}{a} = 2 - \left(\frac{v_o}{v_c} \right)^2, \quad e = \frac{v_o^2}{v_c^2} - 1, \quad r_A = a(1 + e)$$

$$T = (M \gg m) = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{GM}}$$

Если $r_o \approx R$ $v_c = 7,91$ км/с

$$T = 1,659 \cdot 10^{-4} a^{3/2} \text{ мин}$$

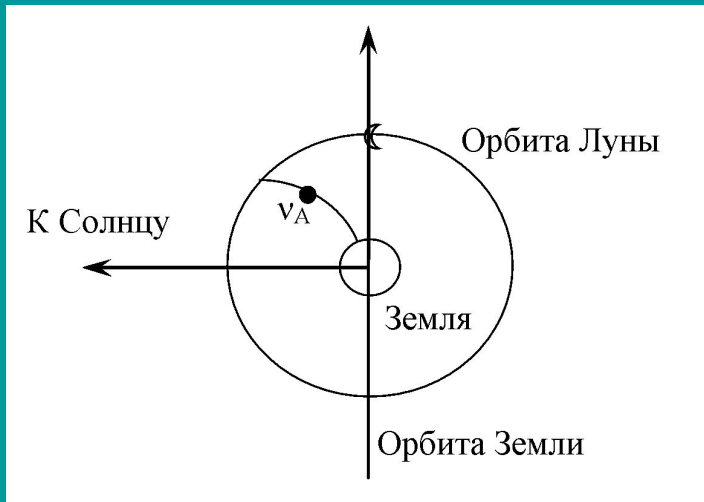
1. Экваториальные ИСЗ $0 \leq i \leq 20^\circ$
2. Полярные ИСЗ $0 \leq i \leq 20^\circ$
3. Геосинхронные и геостационарные ИСЗ

Принципы движения КА

Если $v_o \geq v_n$ – движение КА по параболе или гиперболе

$$\rho = r \left(\frac{m}{m'} \right)^{2/5} \quad \begin{array}{l} \text{– радиус действия тела } m \text{ относительно } m'; \\ r \text{ – расстояние между ними} \end{array}$$

В системе Земля – Луна $\rho = 69000$ км от Луны



1. Условия запуска КА к Луне

В точке ρ

$$G \frac{M_3}{\rho^2} = G \frac{m_1}{(r - \rho)^2}$$

Изменение кинетической энергии КА

$$\Delta E = E_H - E_{min} = \frac{mv_H^2}{2} - \frac{mv_{min}^2}{2}$$

v_H – начальная скорость относительно Земли,
 v_{min} – скорость в точке на расстоянии ρ

Влияние Луны на траекторию КА

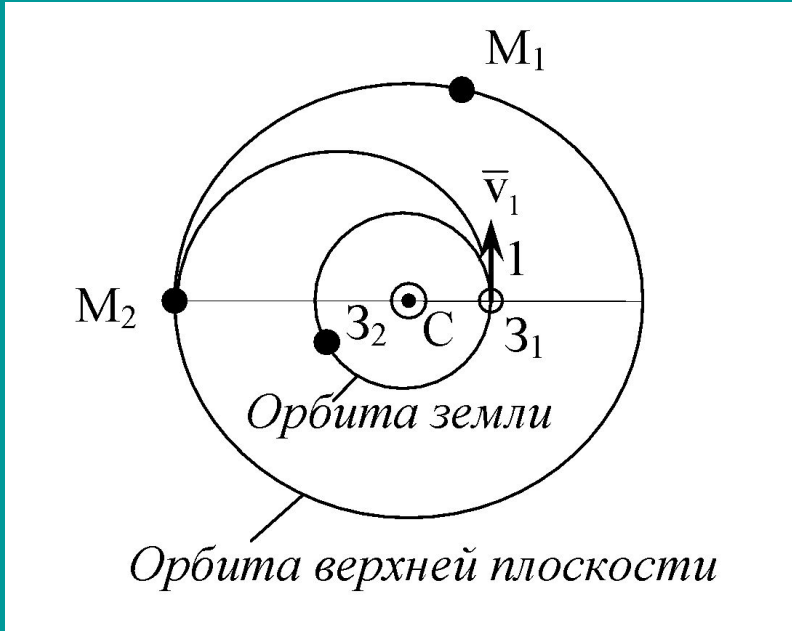
$$U_H = -G \frac{mM_3}{R_3} \quad U_\rho = -G \frac{mM_3}{\rho} \quad U_H = GmM_3 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} \right)$$

$$v_{min}^2 = v_H^2 - 2GM_3 \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{\rho} \right)$$

$$v_K^2 = v_{min}^2 + 2Gm_L \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{\rho} \right)$$

– Конечная скорость сближения с Луной

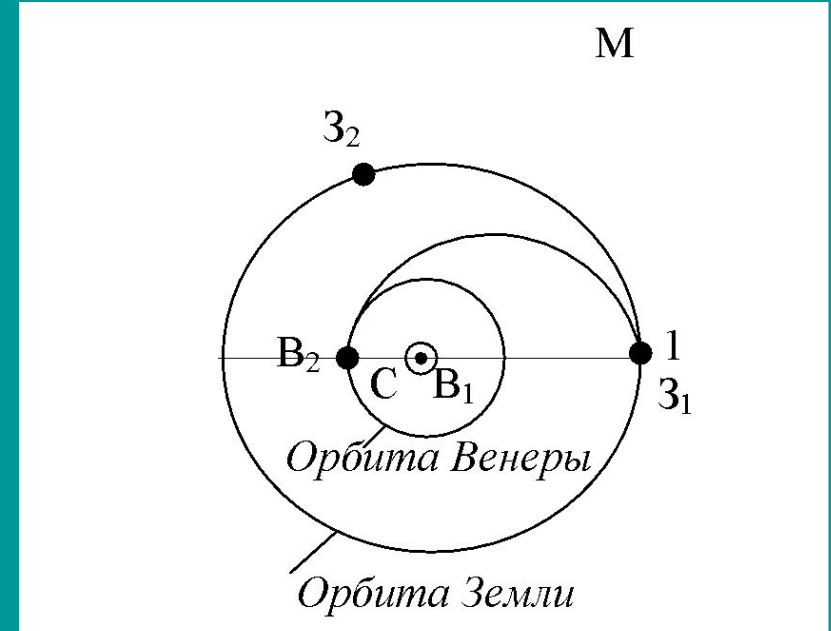
2. Условия запуска КА (АМС)



Гомановская траектория перелета на верхнюю планету М (например, Марс)

$$V^2 = GM_3 \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$$

- интеграл энергии, определяющий скорость КА на любом участке траектории



Гомановская траектория перелета на нижнюю планету В (например, Венеру)

Начальная скорость v_o в случае запуска АМС относительно Земли за пределы Солнечной системы орбиты v_H определится так:

$$V_H = V_q \text{ (относительно Солнца – парабола)}$$

$v_{\text{доп}} = V_H - V_3$ – дополнительная скорость аппарата с которой он покидает сферу притяжения Земли

$$v'_{\text{доп}} = 42,3 \text{ км/с} - 29,8 \text{ км/с} = 12,5 \text{ км/с} ; v''_{\text{доп}} = 42,3 \text{ км/с} + 29,8 \text{ км/с} = 72,1 \text{ км/с},$$

т.к. $V_H = \sqrt{\frac{2GM_o}{a_o}}$ (параболическая скорость относительно Солнца)

$$V_H = \sqrt{\frac{2GM_o}{a_o}} = 42,3 \text{ км/с}$$

$v_3 = 29,8$ – орбитальная скорость

$$v_o^2 = \frac{2GM_3}{R_3 + h} - \frac{Gm}{a}$$

$$v_{\text{дон}}^2 = \frac{2GM_3}{\rho} - \frac{Gm}{a}$$

$$v_o^2 - v_{\text{дон}}^2 = \frac{2GM}{R + h} - \frac{2Gm}{\rho} = v_{\text{нар}}^2$$

$$v_o^2 = \sqrt{v_n^2 + v_{\text{дон}}^2}$$

$$v_o' = 16,6 \text{ км/с}; v_o'' = 72,8 \text{ км/с}$$

v_o – III космическая скорость