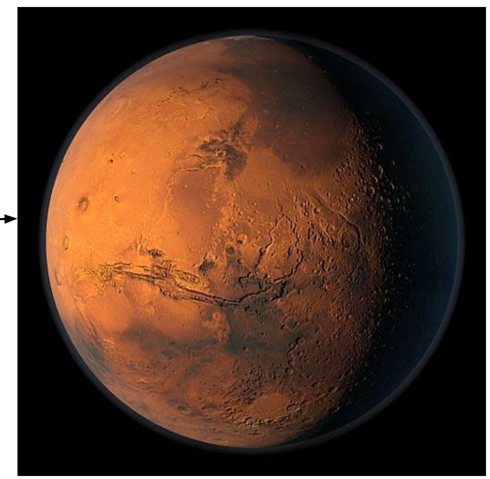
Измерение малых расстояний в Астрономии

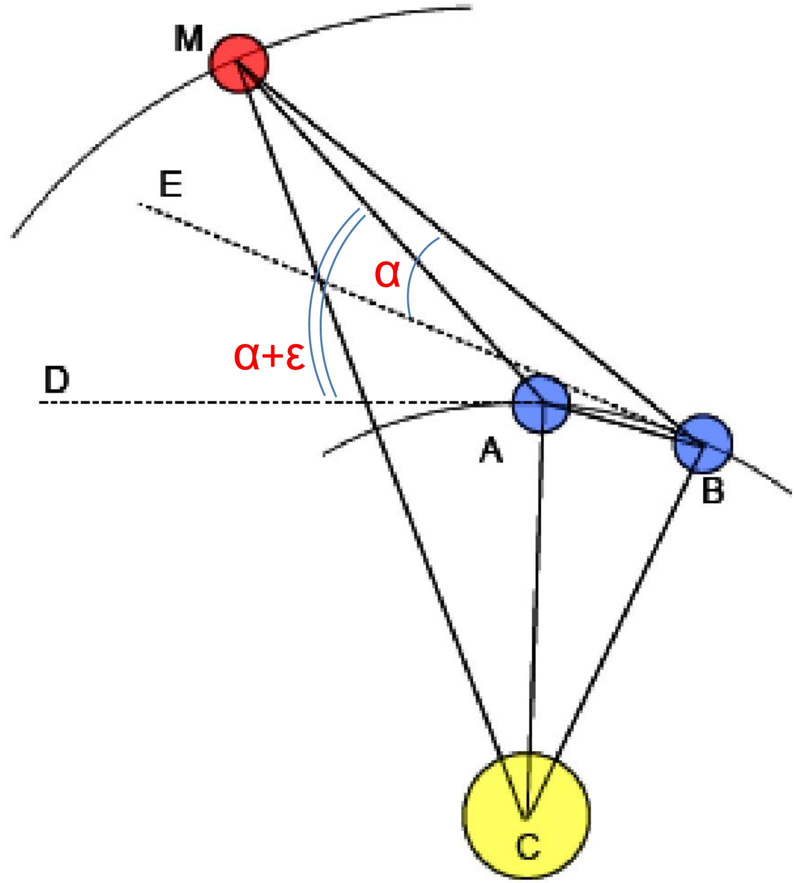
Филипп Алексеевич Барон, PhD

2 марта 2020

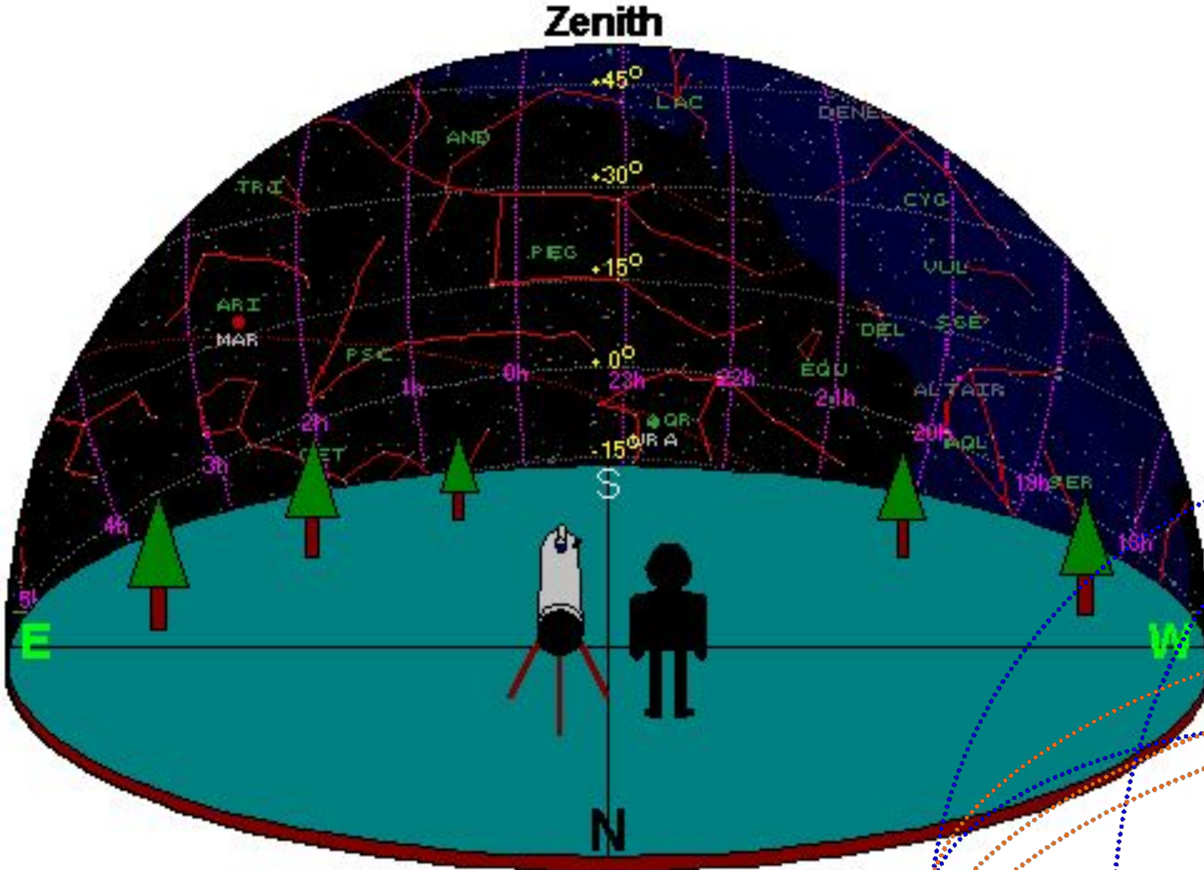
Расчёт расстояния до планет

?

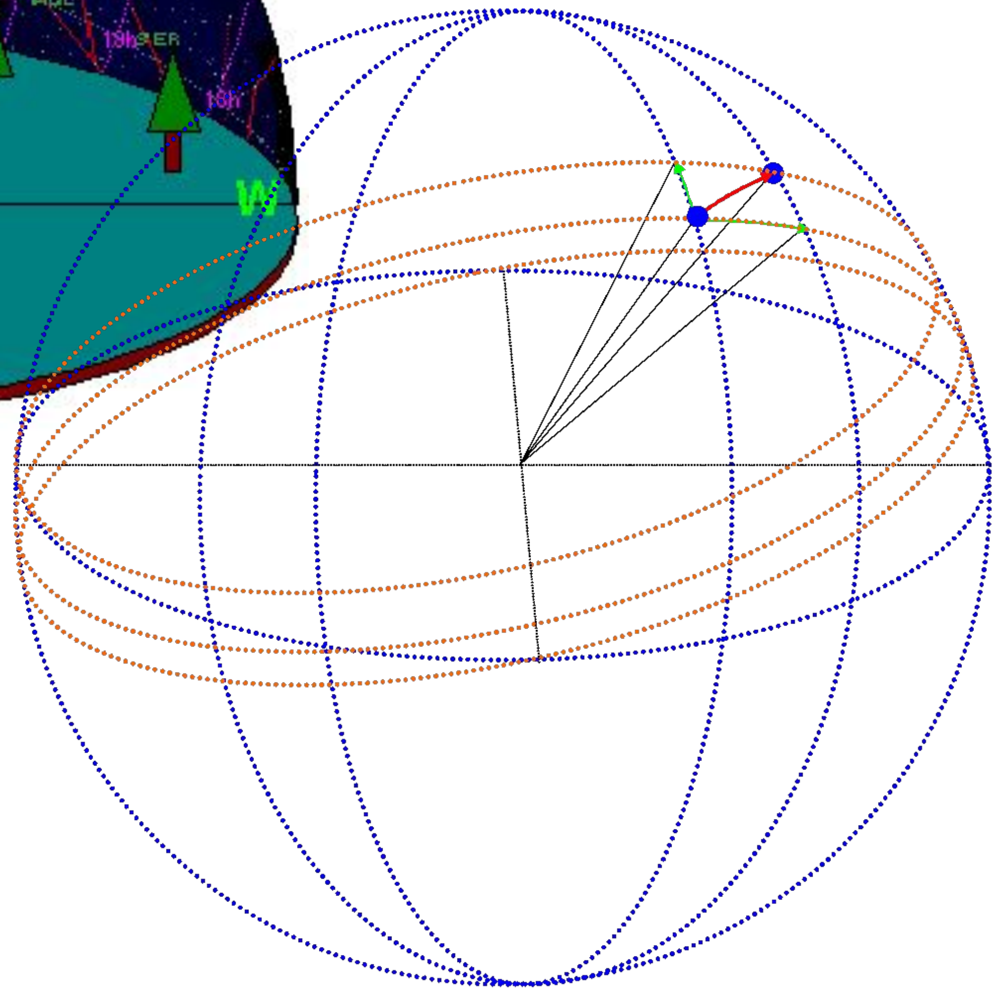


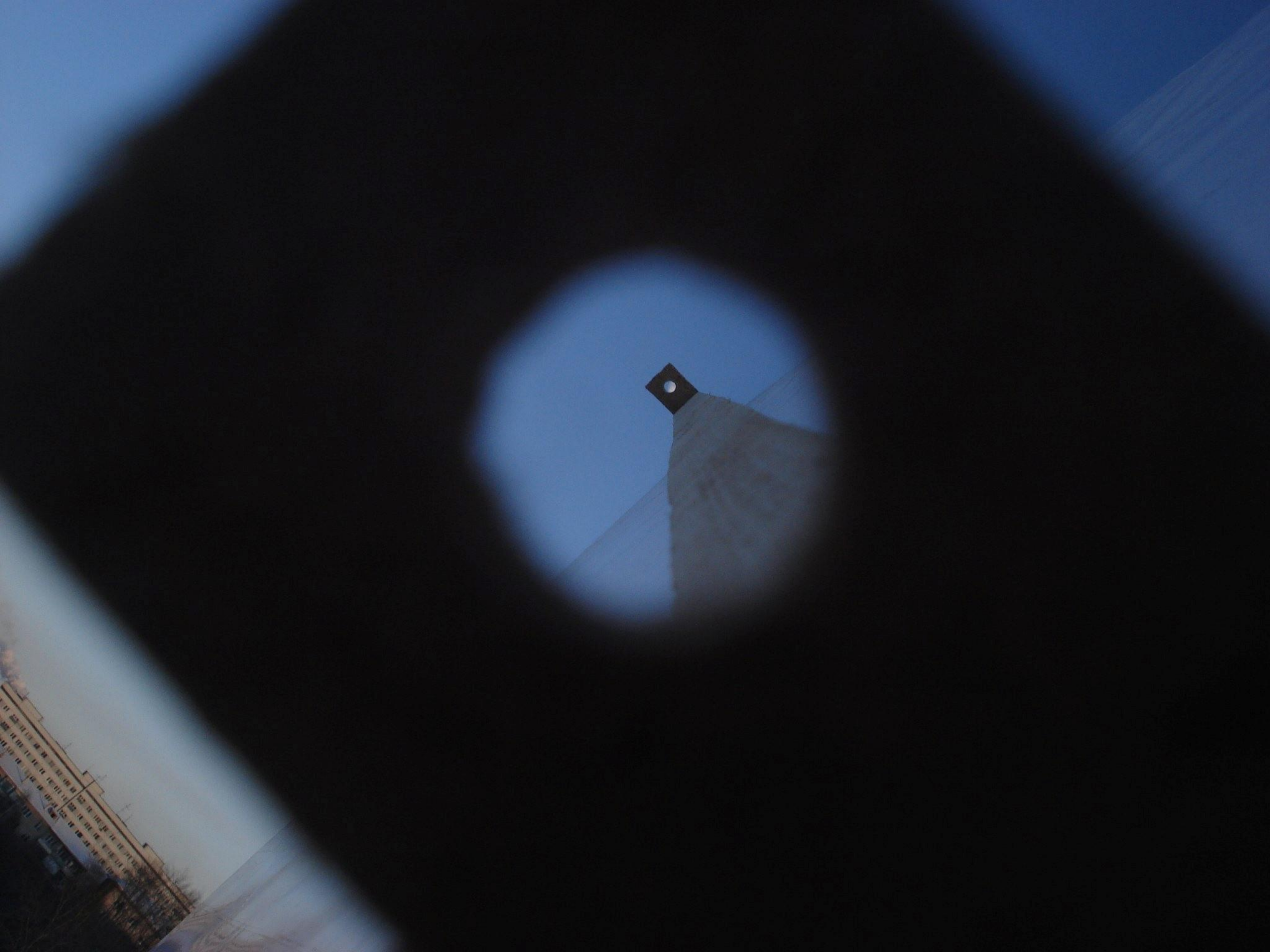


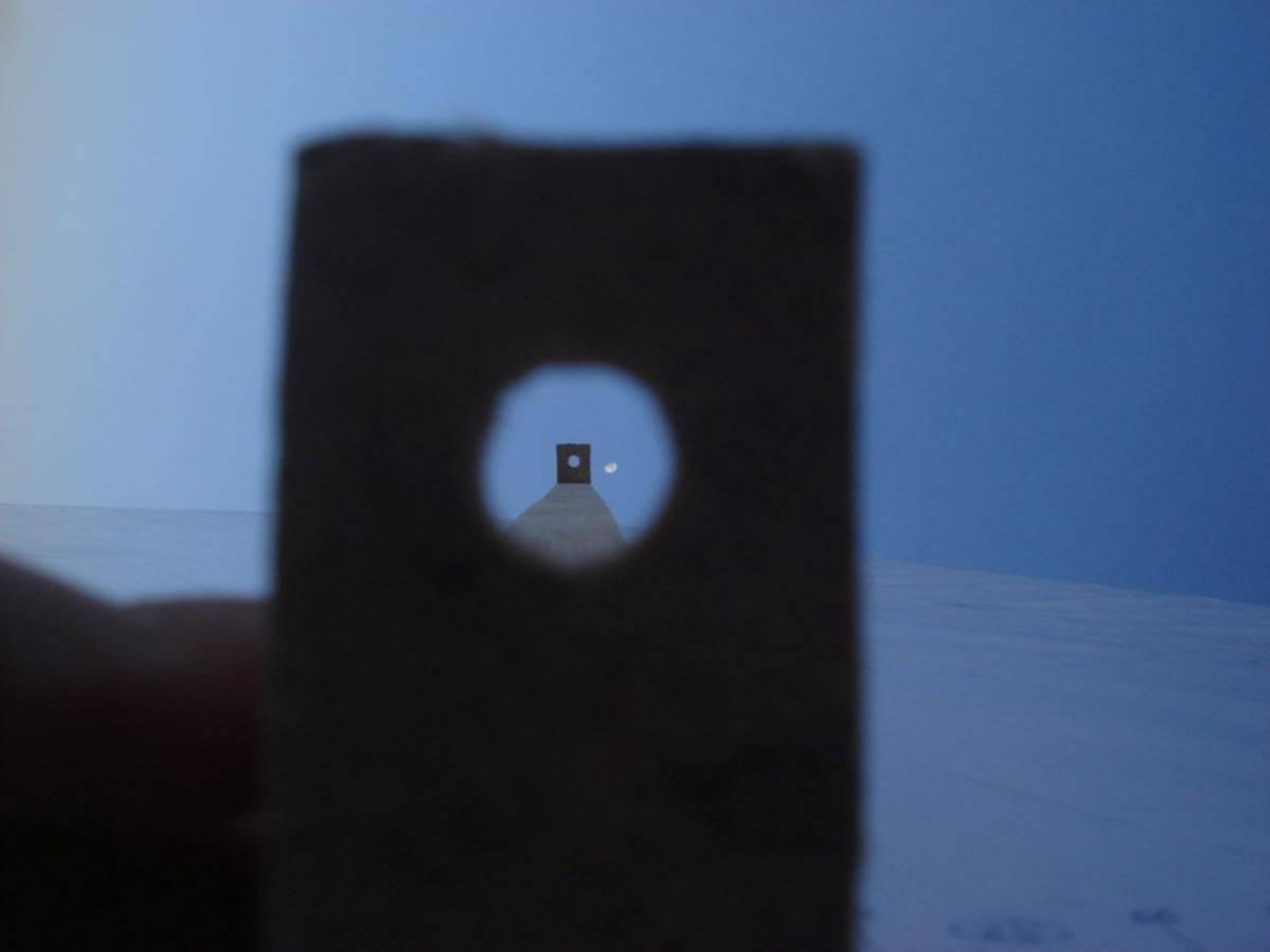
- ACB≈1
- CAB=CBA=89.5
- EBM=CBM-90
- DAM=EBM+E, E – угловое смещение
- MAB≈180-DAM+(90-89.5)
- AMB≈180-MAB-MBA
- AB=2*Rca*sin(ACB), Rca=1.5*10^8
- AM=AB*Sin(ABM)/Sin(AMB) – расстояние до Марса.



Lines of Right Ascension

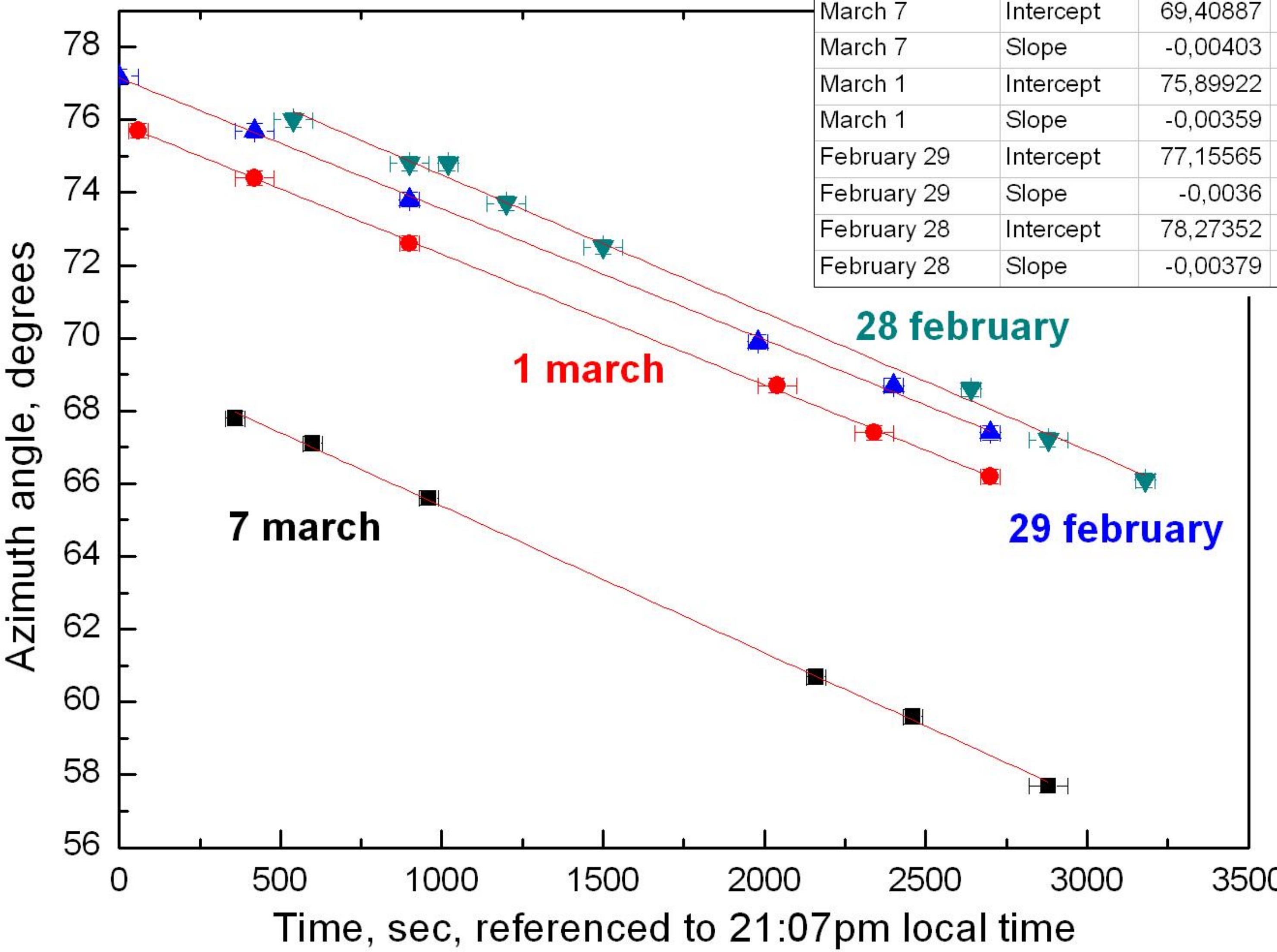


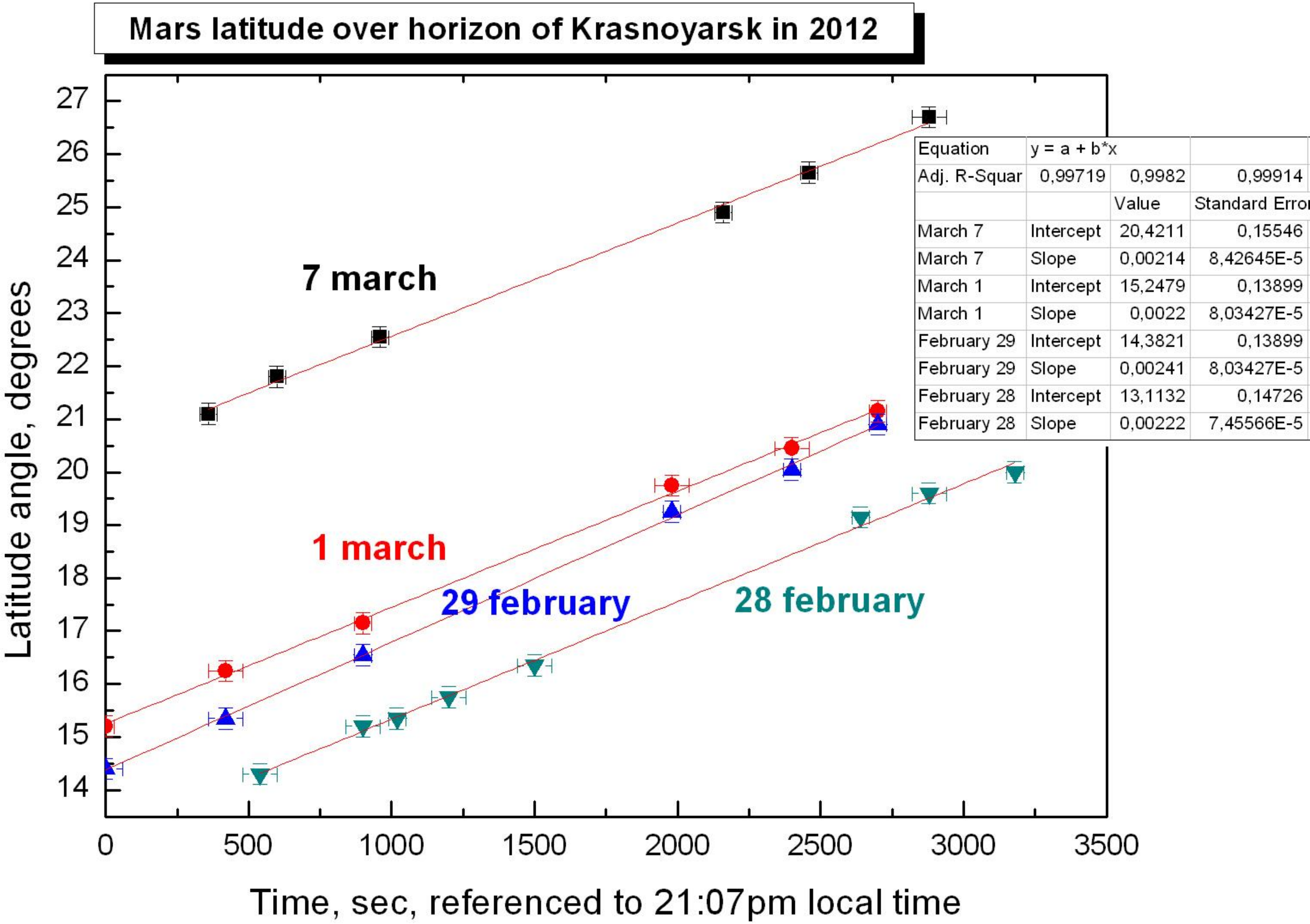




Mars azimuth in Krasnoyarsk in 2012

Equation	y = a + b*x		
Adj. R-Square	0,99915	0,99951	0,99891
		Value	Standard Error
March 7	Intercept	69,40887	0,15546
March 7	Slope	-0,00403	8,42645E-5
March 1	Intercept	75,89922	0,14123
March 1	Slope	-0,00359	8,17273E-5
February 29	Intercept	77,15565	0,13899
February 29	Slope	-0,0036	8,03427E-5
February 28	Intercept	78,27352	0,14726
February 28	Slope	-0,00379	7,45566E-5



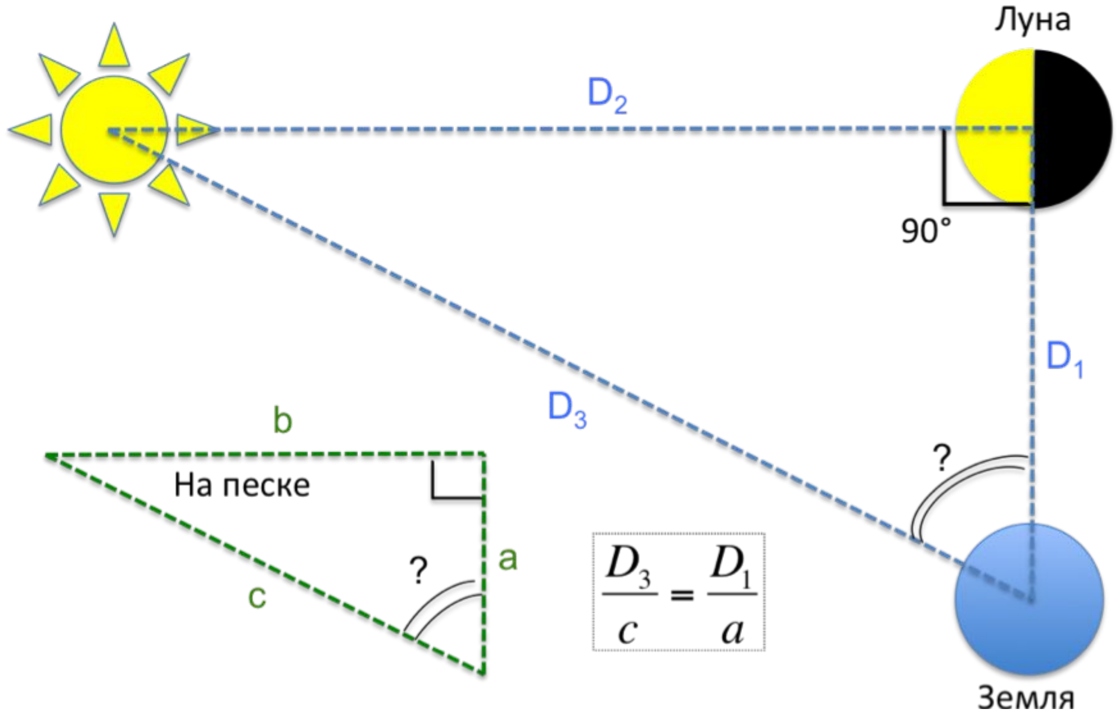


Equation	y = a + b*x		
Adj. R-Squar	0,99719	0,9982	0,99914
		Value	Standard Erro
March 7	Intercept	20,4211	0,15546
March 7	Slope	0,00214	8,42645E-5
March 1	Intercept	15,2479	0,13899
March 1	Slope	0,0022	8,03427E-5
February 29	Intercept	14,3821	0,13899
February 29	Slope	0,00241	8,03427E-5
February 28	Intercept	13,1132	0,14726
February 28	Slope	0,00222	7,45566E-5

- Далее мы написали алгоритм вычислений для программы Maple
- Входными данными для неё являются вертикальный и горизонтальный углы, расстояние Земля-Солнце, на выходе мы получаем расстояние до Марса.
- Этот метод годится не только для расчётов Марса, таким образом можно измерить расстояние до Венеры, Юпитера и Сатурна
- Вычисленное нами расстояние было равно $1.23*10^8$, когда на тот момент расстояние до Марса было $1.07*10^8$.
- Это произошло из-за собственного движения Марса по своей орбите – в нашей модели движение Марса не учитывалось. Расчёт расстояния с учётом смещения планеты требует более сложных математических вычислений, но это возможно

А что с измерениями расстояний до Солнца?

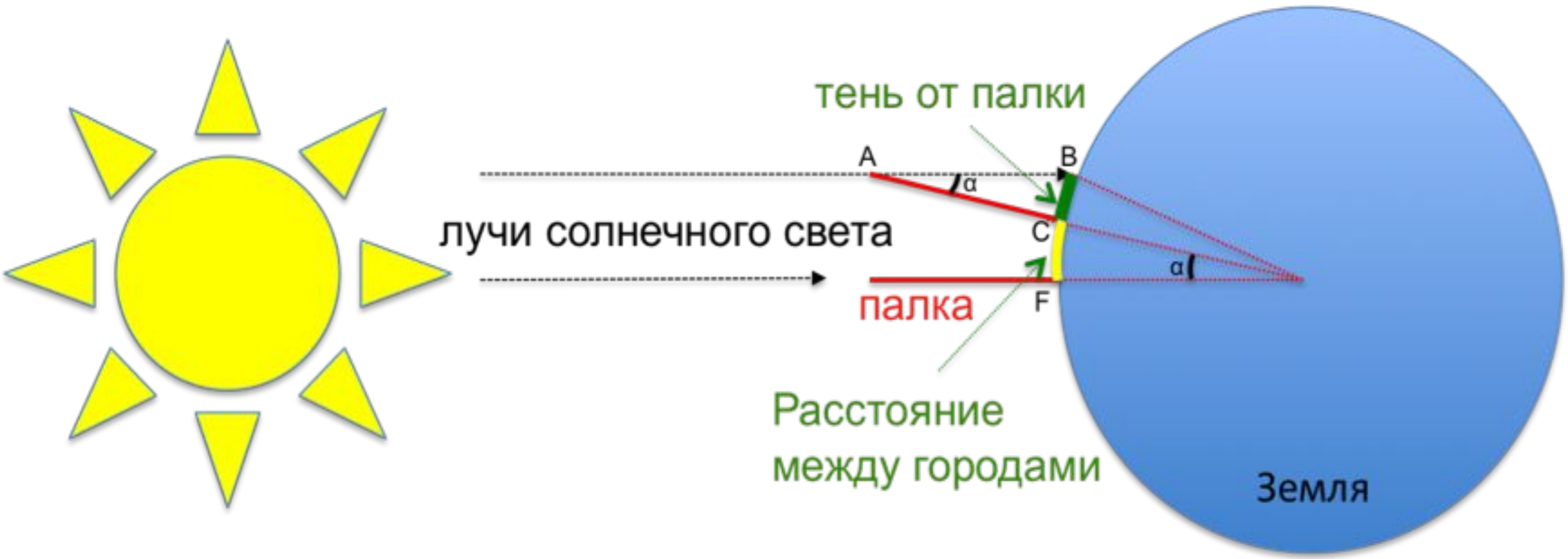
Все началось с попытки ученого Аристарха (3 в. д. н. э.) найти расстояние до Солнца



$$\frac{D_3}{c} = \frac{D_1}{a}$$

- Можно выразить расстояние до Солнца в единицах расстояния до Луны
- При этом нужно выразить расстояние до Луны в единицах радиуса Земли

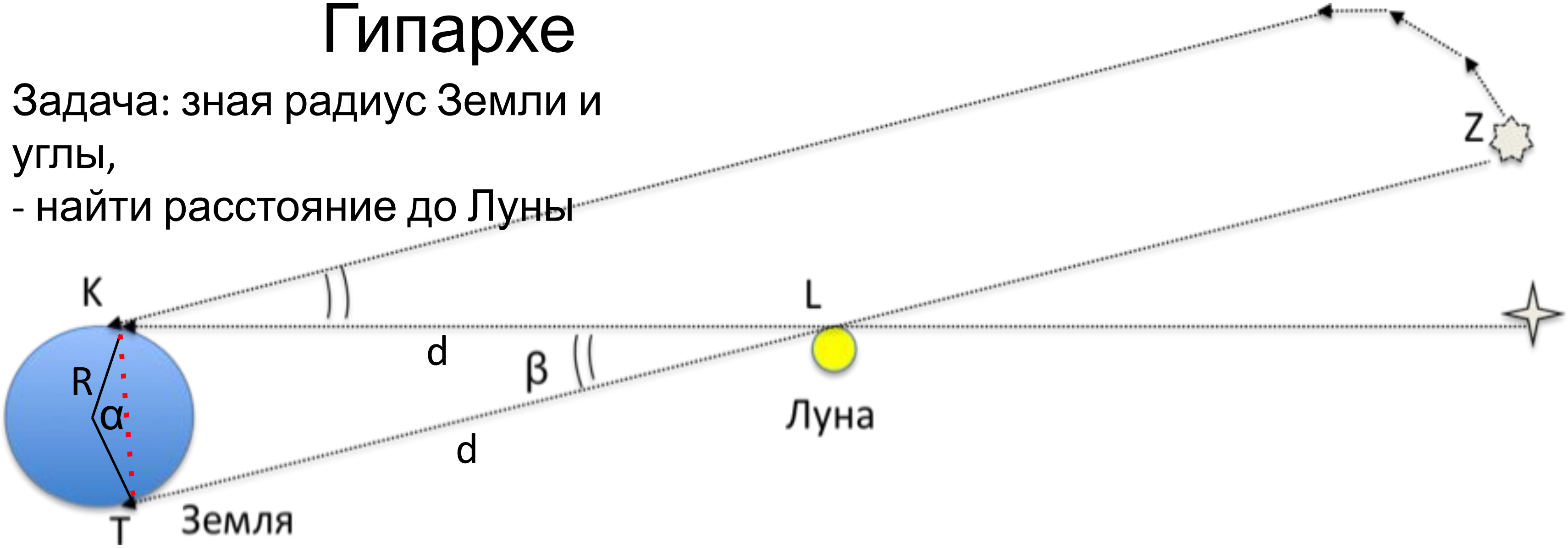
Примерно в то же время (240 г д.н.э.) первый географ Эратосфен вычисляет радиус Земли



С Луной все оказалось сложнее

Легенда о Коляне, Толяне и Гипархе

Задача: зная радиус Земли и углы,
- найти расстояние до Луны



Тригонометрия началась с функции Гипарха «Хорд»:

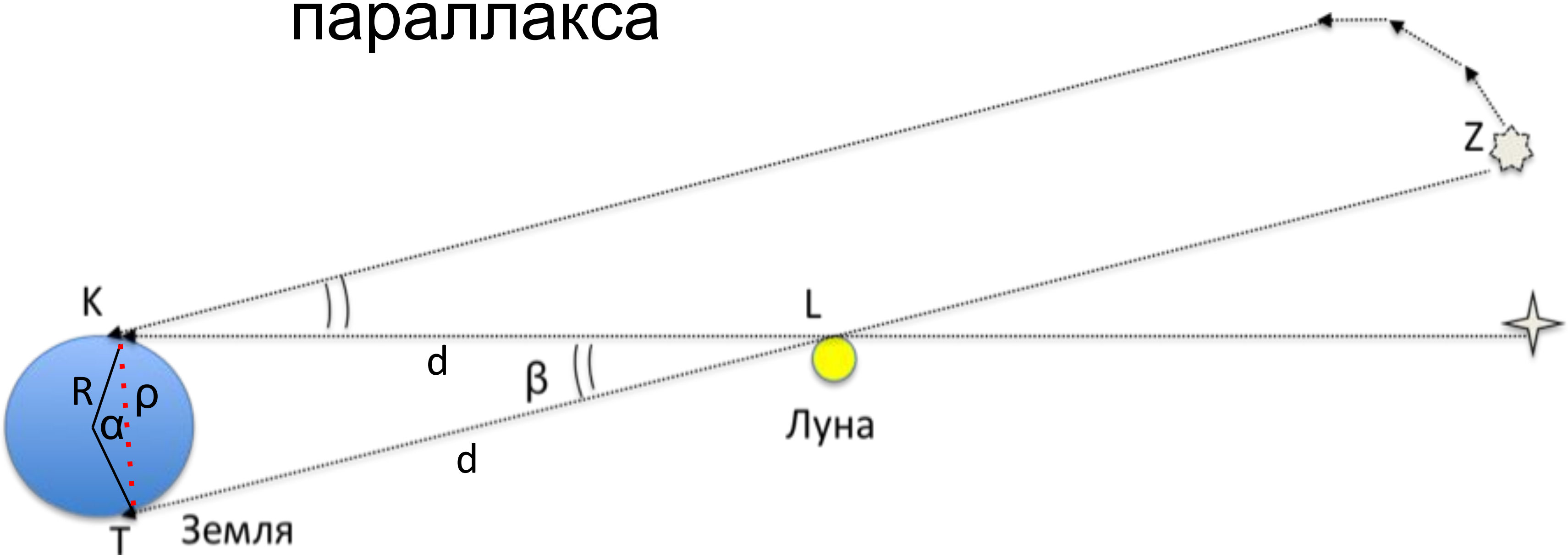
$$R \cdot Chord(\alpha) = d \cdot Chord(\beta) \quad \Rightarrow \quad d = R \cdot \frac{Chord(\alpha)}{Chord(\beta)}$$

Взяв из таблицы хорд ее значения для альфы и бетты, а также значение для радиуса Земли
от Эратосфена и подставив их в эту формулу, Гипарх нашел, что расстояние для Луны
приблизительно равно 59 Земных радиусов, то есть примерно 240 тысяч километров

Но это было уже во 2 в. д. н. э., то есть через целых 100 лет!

Так родился метод

… а угол β назвали углом параллакса



В наше время мы используем для решения этой задачи гораздо более удобную современную функцию – синус:

$$\begin{cases} \rho = 2R\sin(\alpha/2) \\ \rho = 2d\sin(\beta/2) \end{cases} \Rightarrow d = R\frac{\sin(\alpha/2)}{\sin(\beta/2)} \Rightarrow d \approx \frac{2R}{\beta}\sin(\alpha/2)$$

Но на изобретение синуса потребовалось еще 1500 лет!☺

Индусы: Мадхава (14-15в.в) и Ястадева (1500 – 1575)

«Юктибхаса» 1530г на малайамском языке. Основные результаты:

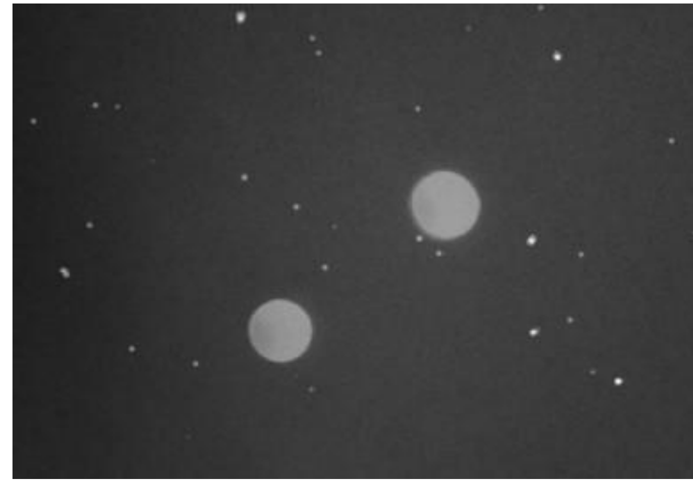
$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \ldots$$

$$r \sin \frac{x}{r} = x - x \cdot \frac{x^2}{(2^2+2)r^2} + x \cdot \frac{x^2}{(2^2+2)r^2} \cdot \frac{x^2}{(4^2+4)r^2} - \cdot$$

$$r \arctan(\frac{y}{x}) = \frac{1}{1} \cdot \frac{ry}{x} - \frac{1}{3} \cdot \frac{ry^3}{x^3} + \frac{1}{5} \cdot \frac{ry^5}{x^t} - \ldots, \text{where } y/x \leq 1.$$

$$\frac{\pi}{4} = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \ldots$$

Чтобы вычислить расстояние до Луны надо:



1. Произвести измерения Коляна, Толяна или Гипарха Никейского, т.е. ночного параллакса Луны

2. Из полученного угла параллакса β вычесть
ночное смещение Луны из-за ее движения по
орбите вокруг Земли, исходя из пропорции:

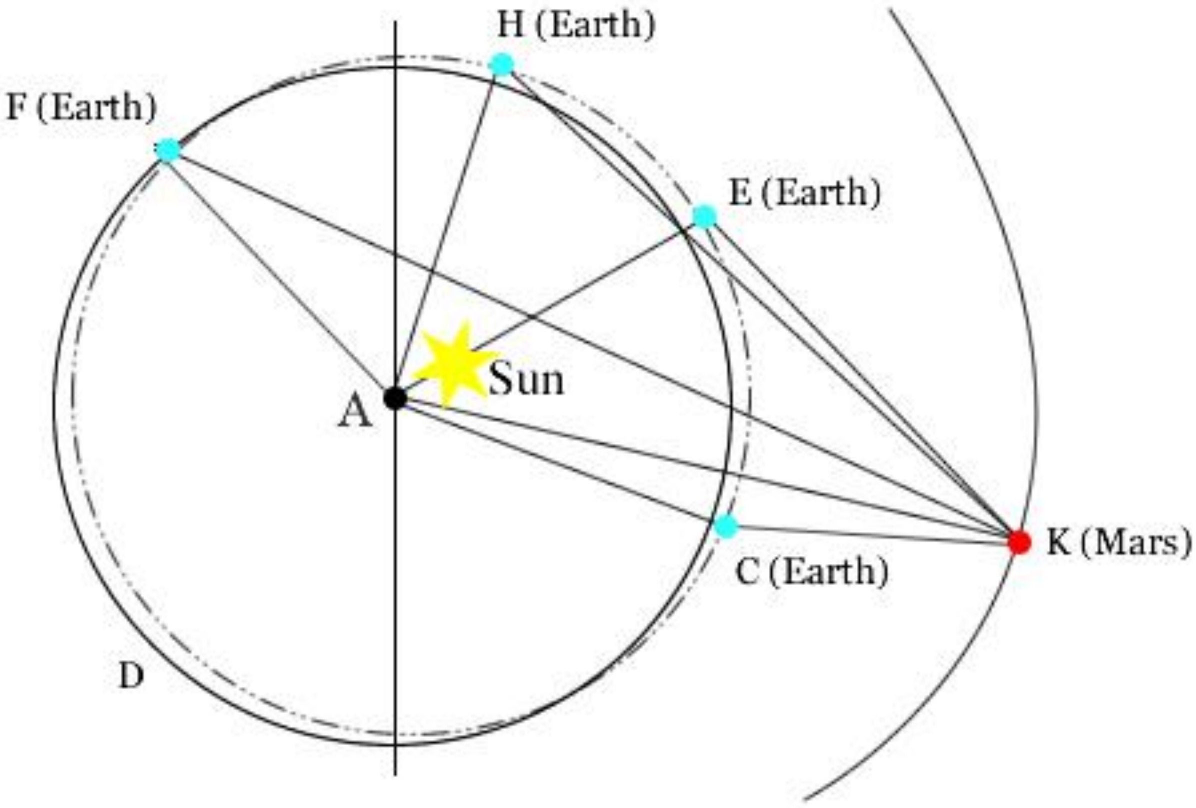
360 градусов Луна проходит за 29.5 дней = 29.5*24 = 708часов
X градусов Луна проходит за время между часовыми поясами Пацанов,
либо между временем вечернего и утреннего измерений Гипарха

Но у Гипарха не было точных часов!!!
=> 240 тысяч километров вместо 380тыс

⇒ Нужен был более точный метод определения расстояний до небесных тел,
имея «неточные часы» и БЕЗ ТЕЛЕСКОПА

Иоганн Кеплер
(1571 – 1630)

Суть метода Кеплера измерений расстояний:



Kepler's diagram in Chapter 24

1. Измерения надо проводит на базе орбиты вокруг Солнца

2. Они дольше, но гораздо точнее

3. Точность ~6 угловых минут
без телескопа и часов!!!

А затем через 80 лет Гук сделал точные часы и,
имея в распоряжении телескопы …

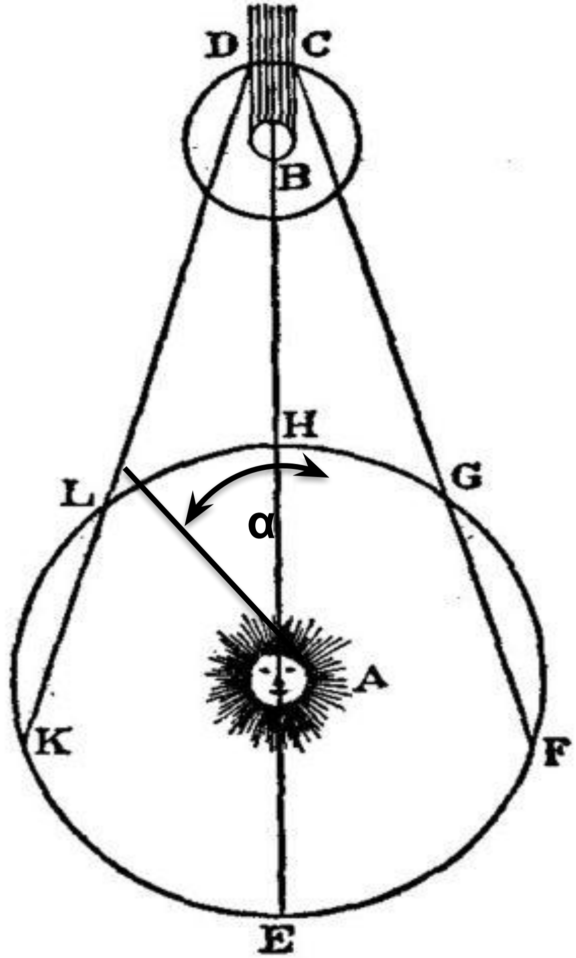


Fig. 70.

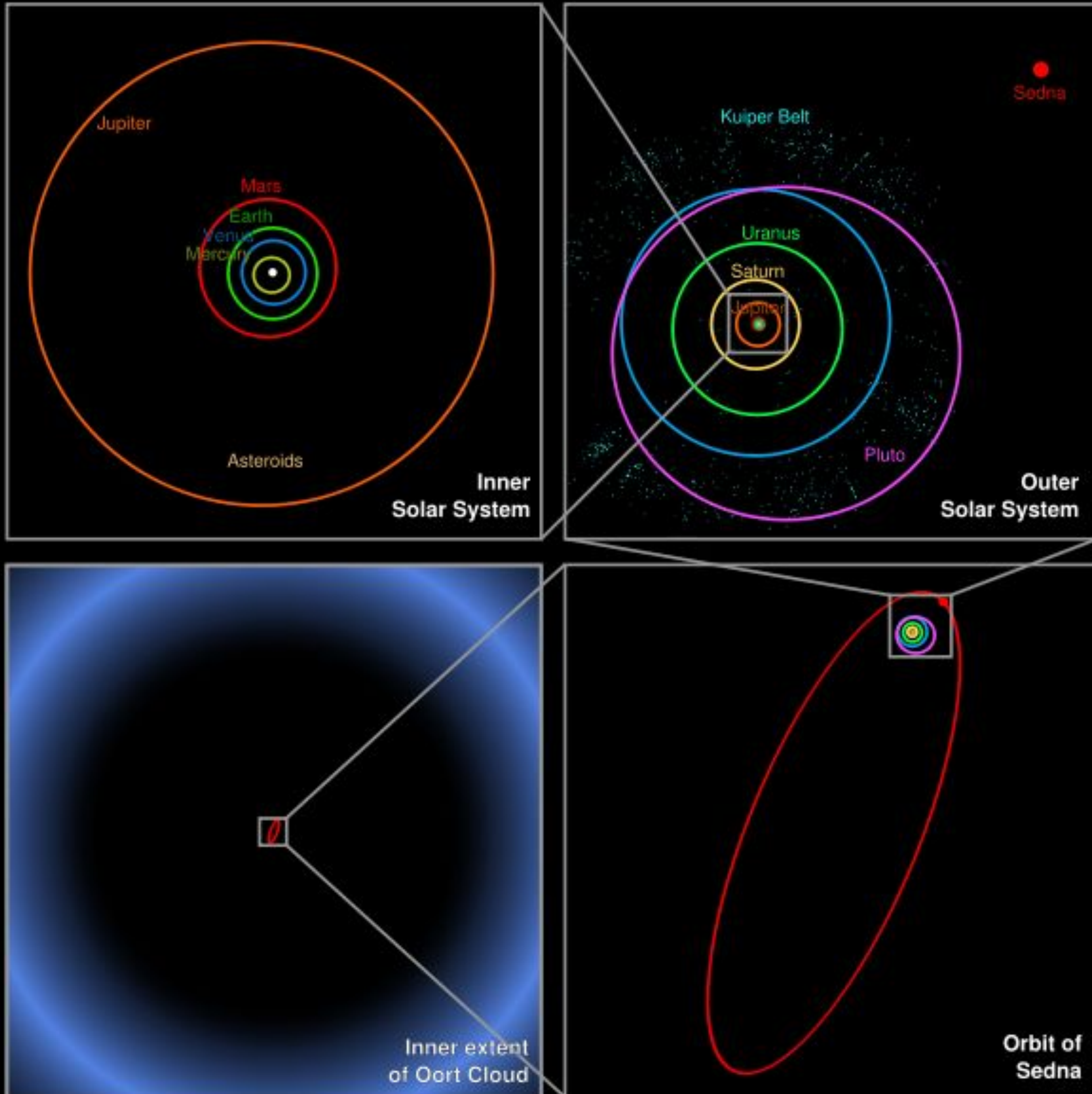
Оле Рёмер
(1644 – 1710)

В 1671-1677 годах с помощью измерений затмений лун Сатурна показал, что **скорость света – конечна** …

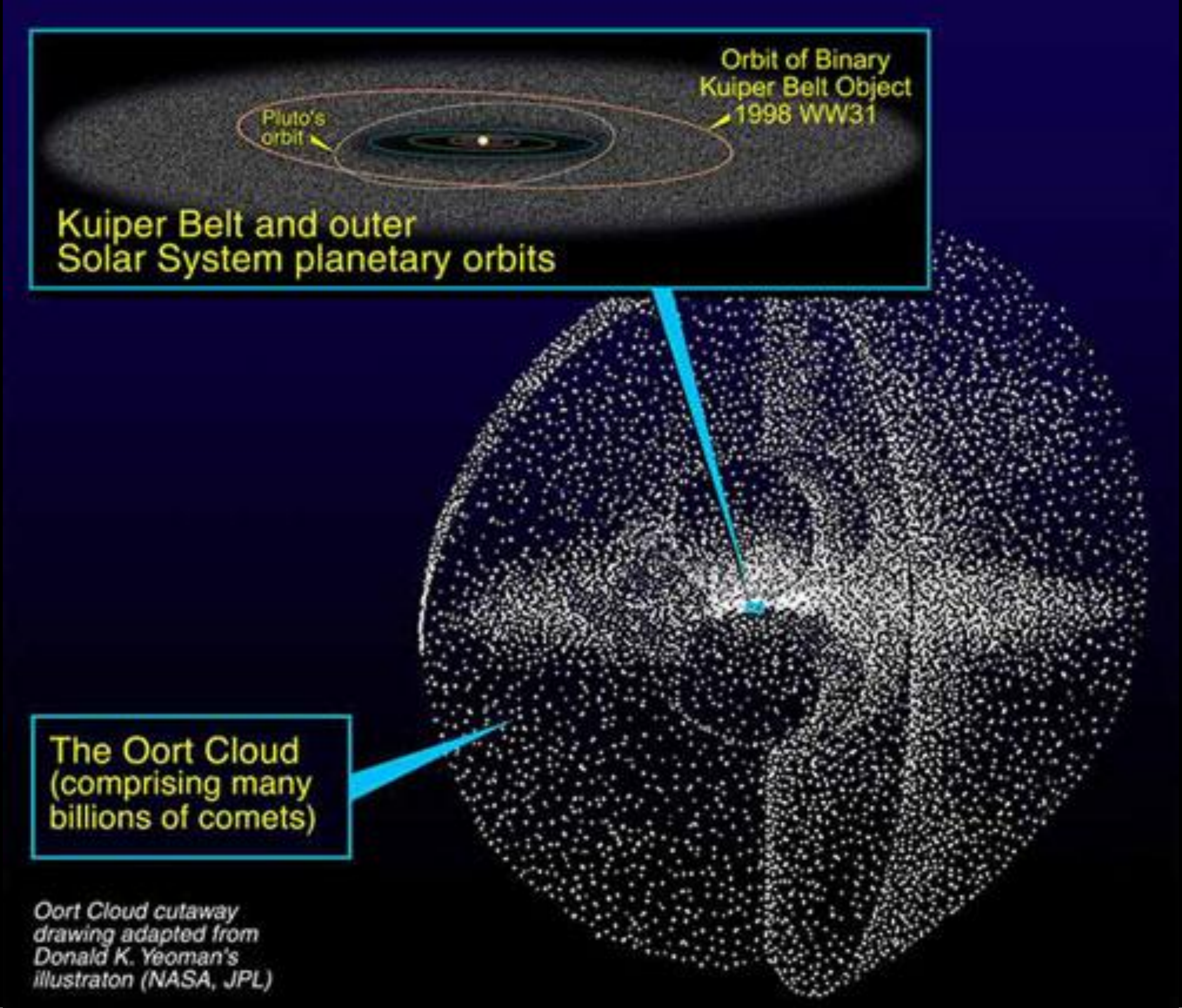
потому что видимое затмение лун Сатурна происходит с задержкой по времени в зависимости от положения Земли на орбите вокруг Солнца

$\Delta t=22*(\alpha/_{180^\circ})[minutes]$

… метод Кеплера сильно увеличился в точности благодаря часам и телескопу



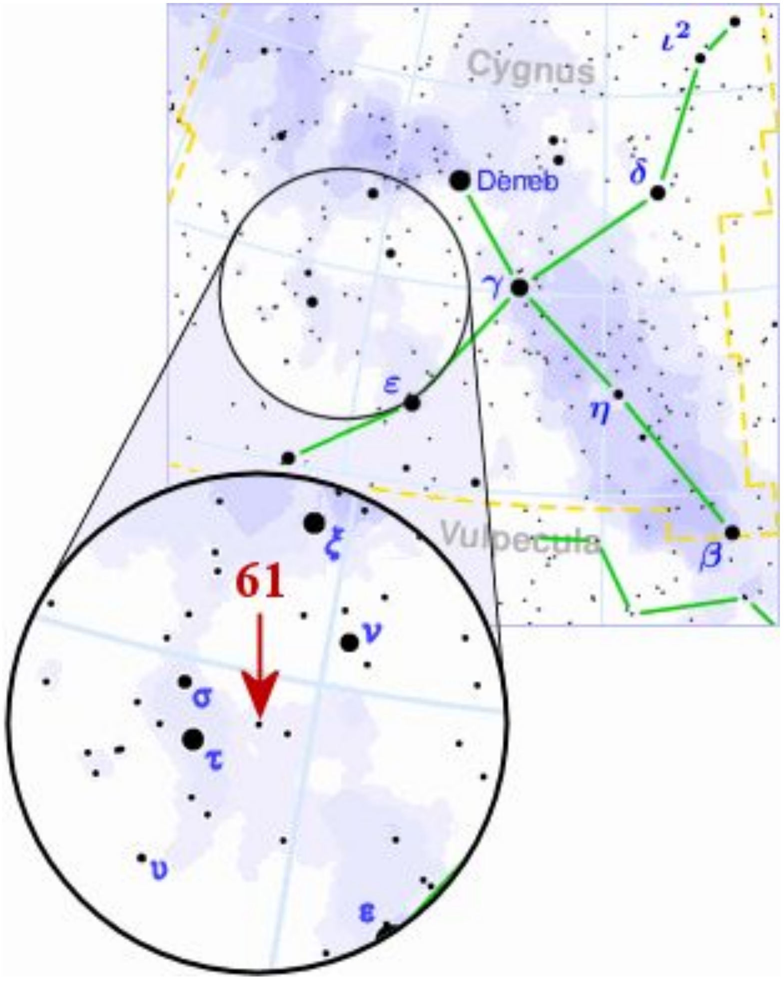
Jupiter
Mars
Earth
Venus
Mercury
Asteroids
Inner
Solar System
Sedna
Kuiper Belt
Uranus
Saturn
Jupiter
Pluto
Outer
Solar System
Inner extent
of Oort Cloud
Orbit of
Sedna

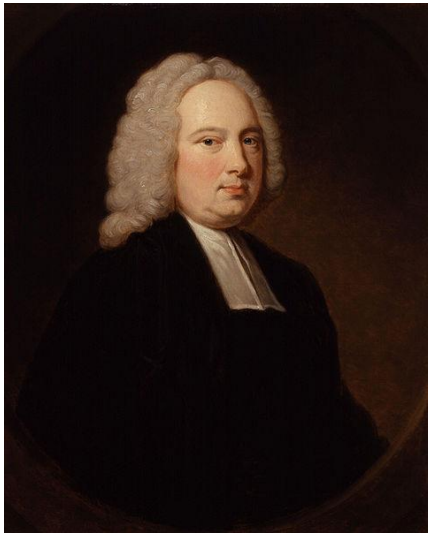

Orbit of Binary
Kuiper Belt Object
1998 WW31
Pluto's
orbit
Kuiper Belt and outer
Solar System planetary orbits
The Oort Cloud
(comprising many
billions of comets)
Oort Cloud cutaway
drawing adapted from
Donald K. Yeoman's
illustraton (NASA, JPL)

Что дальше ?

Измерение расстояний до звезд

Джеймс Бредлей (1693 – 1762)



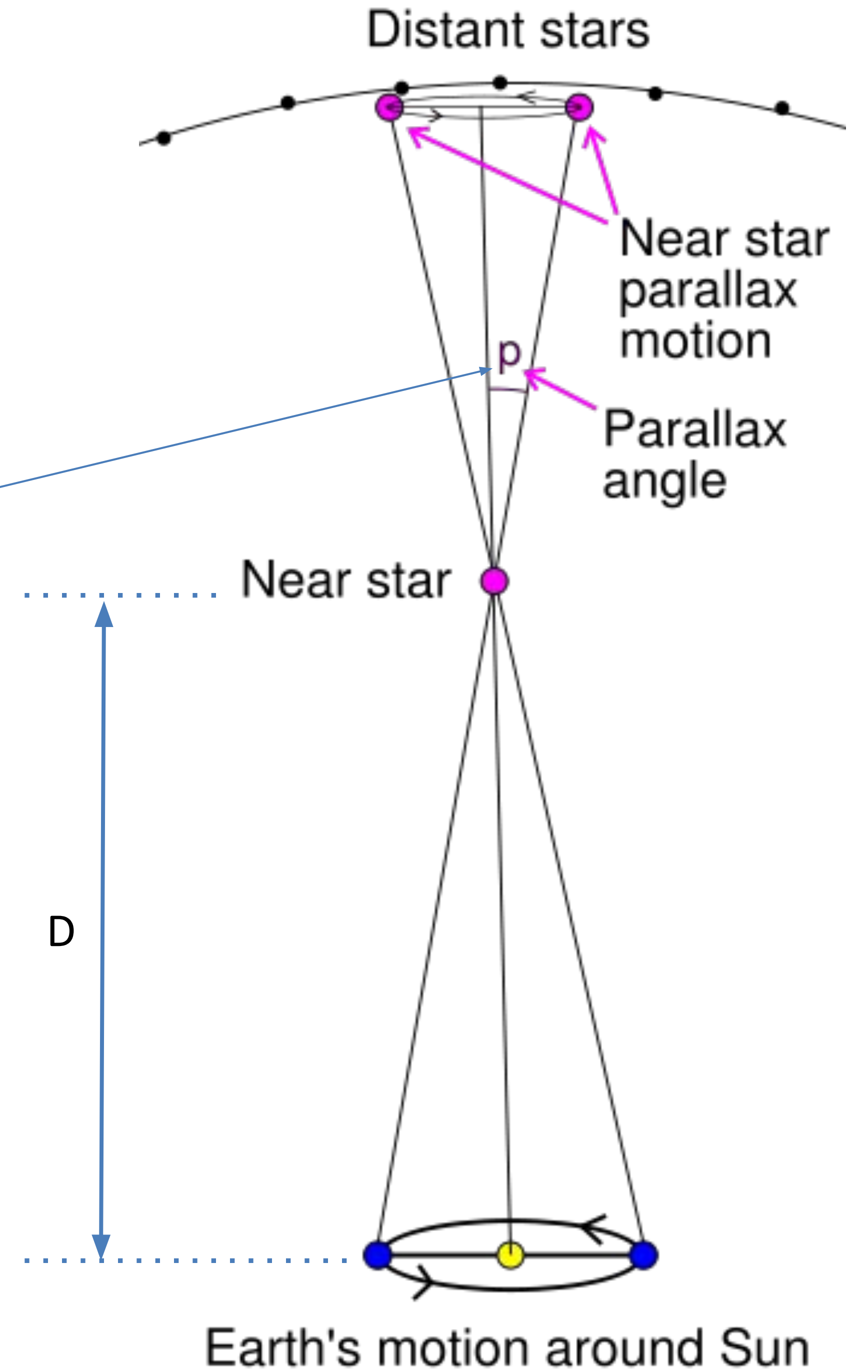


Звезда 61 Лебедя

Суть звездного параллакса и Парсек

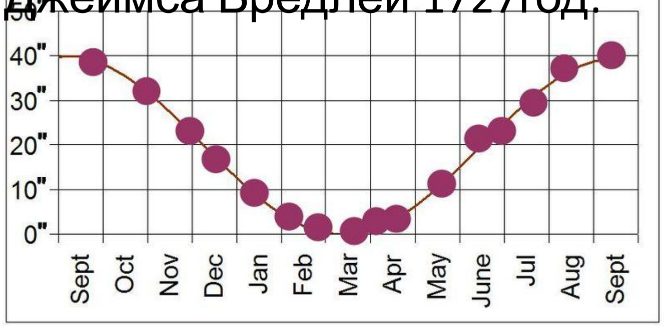
1 Парсек это расстояние D, соответствующее
годичному углу параллакса p=1 секунда

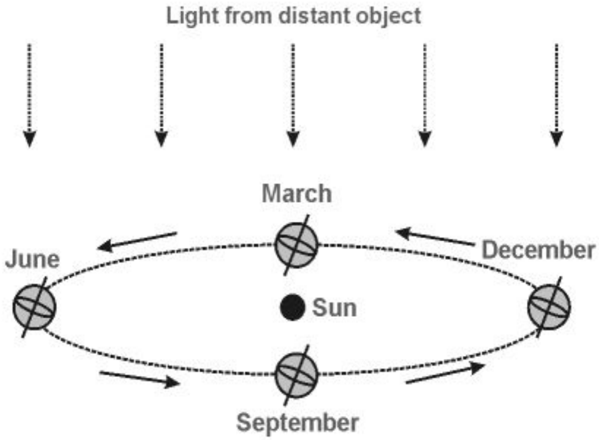
~3 световых года ~30триллионов км



Что осложняет измерения звездного параллакса

Данные измерений параллакса
Джеймса Бредлей 1727год:





1. Аберрация света