

1 Годи́чный звёздный параллакс

С развитием гелиоцентрической системы у астрономов возникло понимание, что из-за обращения Земли вокруг Солнца далёкие объекты, например, близкие звёзды *на фоне других звёзд* (наличие удалённого фона существенно) должны смещаться из-за изменения направления луча зрения на них с Земли. Годи́чный звёздный параллакс - это наибольшее в течение года отклонение звезды от её среднего положения; по сути, это угол α , под которым со звезды, удалённой на расстояние r , виден радиус земной орбиты - (1 а.е.). Следует понимать, что для любой далёкой звезды такой угол будет очень маленьким. Обычно их выражают в угловых секундах ($''$). Напомним, что

$$180^\circ = \pi \text{ радиан}, 1^\circ = 60' = 3600''.$$

Из курса математики известно, что при малых углах $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$ (α обязательно должен быть выражен в радианах!). Таким образом, на картинке справа в прямоугольном треугольнике с вершинами Солнце - Земля - близкая звезда:

$$\sin \alpha = \frac{1 \text{ а.е.}}{r} \Rightarrow r = \frac{1 \text{ а.е.}}{\sin \alpha} \approx \frac{1 \text{ а.е.}}{\alpha}.$$

Поскольку расстояния до звёзд много больше расстояния между Солнцем и Землёй, в этом треугольнике гипотенуза практически равна катету, что обеспечивает малость угла α для любой звезды. Тихо Браге первым попытался измерить параллактическое смещение звёзд невооружённым глазом и тем самым проверить теорию Коперника, однако он не знал, что точности измерений углов около $1'$, определяемой свойствами глаза, в принципе недостаточно для таких измерений. Только спустя почти три столетия астрономические приборы были усовершенствованы настолько, чтобы можно было увидеть параллаксы звёзд.

В астрономии за единицу расстояний до звёзд принята величина 1 парсек (пк)¹ - это расстояние, с которого земная орбита видна под углом в одну секунду. Таким образом,

$$1 \text{ ПК} = \frac{1 \text{ а.е.}}{1''} = \frac{1 \text{ а.е.}}{\left(\frac{1^\circ}{3600}\right)} = \frac{1 \text{ а.е.}}{\frac{1}{3600} \left(\frac{\pi}{180} \text{ рад}\right)} = \frac{180 \cdot 3600}{\pi} \text{ а.е.} \approx 206265 \text{ а.е.} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

Параллакс α Центавра², ближайшей к нам звезды (если точнее, тройной звезды, ближайшая в которой - Проксима Центавра), равен $0.77''$. Тогда расстояние до неё равно

$$r = \frac{1 \text{ а.е.}}{0.77''} = 1.3 \text{ ПК} \approx 4.24 \text{ св.г.}$$

Таким образом, описанный на Рис. 1 пример является мысленным, поскольку ближайшая к Солнцу известная звезда находится от него на расстоянии, превышающем 1 ПК. Несмотря на то, что 1 парсек - достаточно большое расстояние, некоторые астрономические объекты имеют размеры, которые исчисляются тысячами или миллионами парсек.

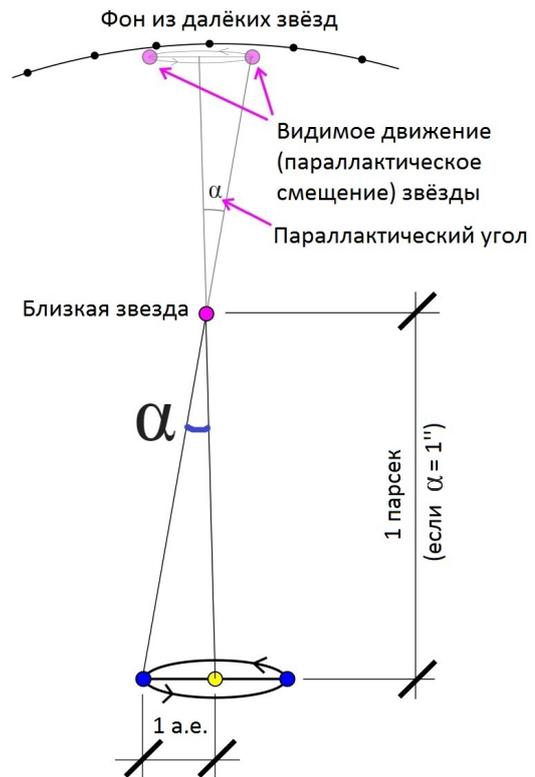


Рис.1. Звёздный параллакс.

¹Название образовано из сокращений слов «**п**араллакс» и «**с**екунда».

² α - это обозначение звезды, а не угла.

2 Почему $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$?

Напомним, что это работает только в том случае, если угол α выражен в радианах. Вспомните, что

длина дуги = угол в радианах · радиус.

Красным цветом выделена дуга, длина которой равна α . Попробуем мысленно распрямить красную дугу и сравнить её длину с синусом и тангенсом:

$$\sin \alpha < \alpha < \operatorname{tg} \alpha.$$

Если уменьшать угол α , то значения синуса и тангенса будут всё ближе друг к другу, а значит, и к значению длины "зажатой" между ними дуги.

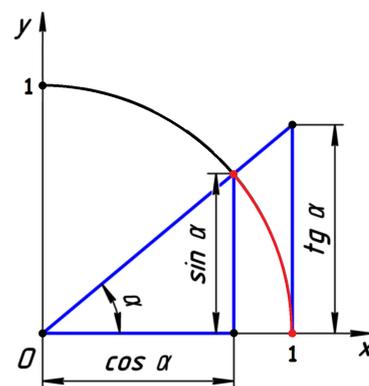


Рис.2. Первая четверть тригонометрической окружности

3 Аберрация света

Ещё одним подтверждением обращения Земли вокруг Солнца является так называемая *абerrация* света от звёзд. Для её описания можно использовать простую аналогию: предположим, человек с зонтом находится под дождём, капли которого падают вертикально вниз. Если человек побежит с некоторой скоростью, то капли начнут падать под наклоном навстречу ему. Чтобы не промокнуть, человек должен наклонить зонт в направлении движения, и чем быстрее он движется, тем сильнее ему нужно наклонить зонт.

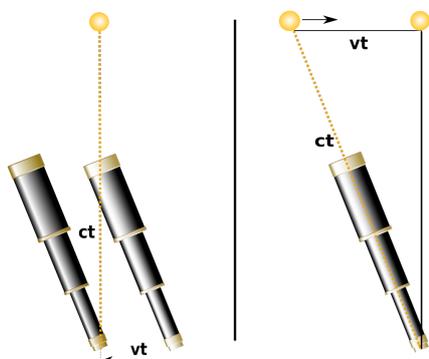


Рис.3. Аберрация света

Аналогичное явление происходит, когда свет попадает в телескоп. Если бы Земля покоилась, то для наблюдения какой-нибудь звезды, расположенной, например, в зените, необходимо было бы направить телескоп строго вверх. Поскольку в действительности Земля движется вокруг Солнца с орбитальной скоростью v , для наблюдения той же звезды необходимо наклонить телескоп на угол

$$\theta \approx \tan \theta = v/c$$

(c - скорость света, а угол θ выражен в радианах) в направлении движения, чтобы свет, вошедший в телескоп «сверху», попал в нижнюю его часть (см. рисунок слева).

Аберрация света была открыта в 1727 г. английским астрономом Дж. Брэдли, который, намереваясь определить параллаксы некоторых неподвижных звёзд, заметил их перемещение в течение года с максимальным углом отклонения около $20.5'' = 9.94 \cdot 10^{-5}$ рад. Это очень маленький угол, его не различить невооружённым глазом, хотя он во много раз больше самого большого известного значения звёздного параллакса $\alpha = 0.77''$ (см. выше).

Зная значение угла θ между реальным и кажущимся положениями звезды, найдём орбитальную скорость Земли (в почти инерциальной системе отсчёта, связанной с Солнцем):

$$v \approx \theta c = (9.94 \cdot 10^{-5} \text{ рад}) \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ км/с}) \approx 30 \text{ км/с}.$$

Это значение хорошо согласуется с реальным значением скорости Земли. Следует отметить, что реальный эффект от аберрации несколько сложнее, чем описано выше.

Ещё одним признаком вращения Земли вокруг Солнца является так называемый *эффект Доплера* (изменение частоты света от звёзд), который будет объяснён позже.