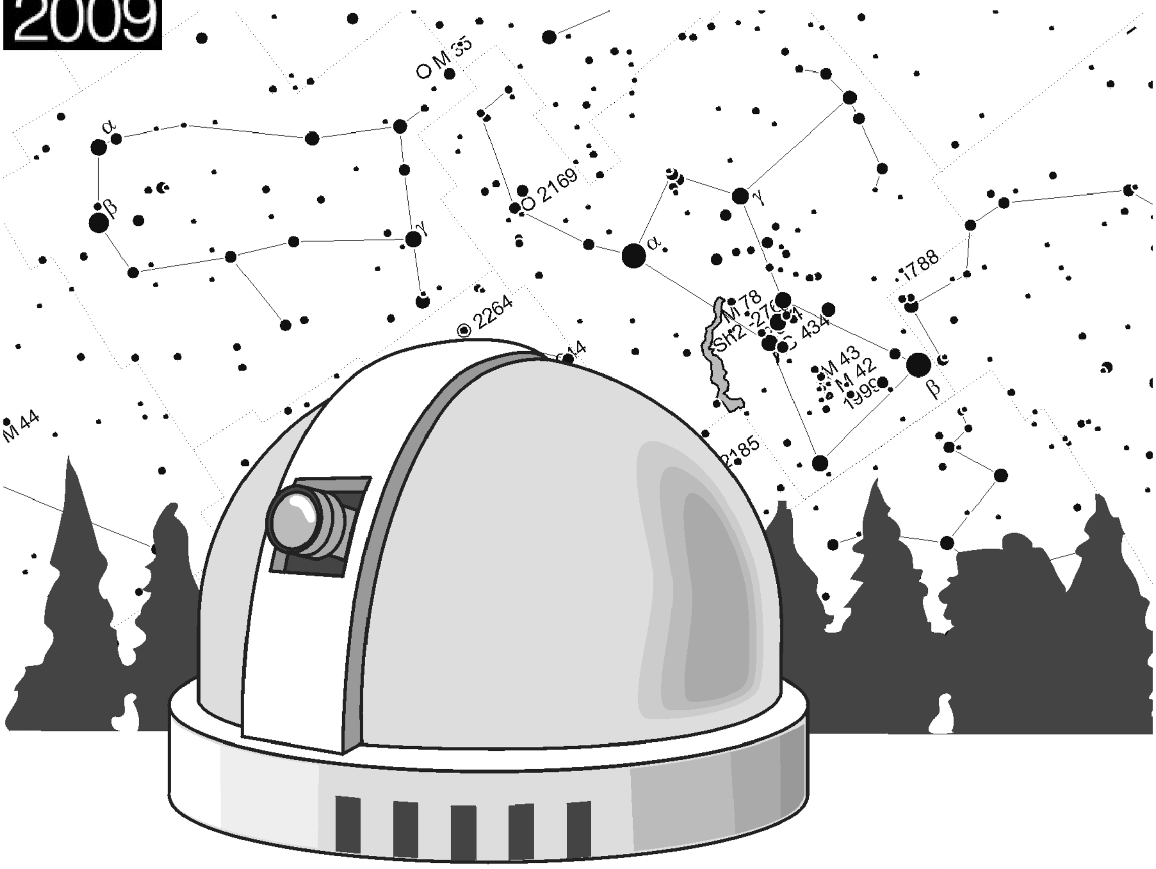
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Академия повышения квалификации и профессиональной переподготовки работников образования



XVI Всероссийская Олимпиада школьников по астрономии

Условия и решения задач

Анапа, 2009 г.

XVI Всероссийская олимпиада школьников по астрономии. Анапа, 12-18 апреля 2009 года. Условия и решения задач теоретического и практического туров. Сборник под редакцией А.С. Расторгуева, О.С. Угольникова, А.М. Татарникова, Е.Н. Фадеева. 2009. 28 стр.

Оригинал-макет и верстка: О.С. Угольников.

Кульминации звезд (Е.Н. Фадеев)

Класс: 9 10 Задача: 1

? Склонение звезды A больше склонения звезды B в два раза. На какой широте верхняя кульминация этих звезд будет происходить на одном альмукантарате, если нижняя кульминация звезды A происходит на горизонте? Рефракцией пренебречь. Наблюдения проводятся в северном полушарии вдали от полюса.

! Пусть δ_A – склонение звезды **A**, а δ_B – склонение звезды **B**, причем $\delta_A=2\delta_B$. Наблюдения проводятся не в полюсе, поэтому склонение звезды **A** не равно нулю. Следовательно, склонения обеих звезд различаются. Очевидно, что для выполнения условия задачи необходимо, чтобы кульминация звезды **A** с большим склонением проходила к северу от зенита, а кульминация звезды **B** – к югу от зенита. Обозначив широту места через φ, а зенитное расстояние звезд **A** и **B** в верхней кульминации через z, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases}\varphi + z_A = \delta_A \\ \varphi - z_B = \delta_B\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}\varphi + z = 2\delta_B \\ \varphi - z = \delta_B\end{cases}$$

Складывая уравнения, получаем:

$$2\varphi = 3\delta_B.$$

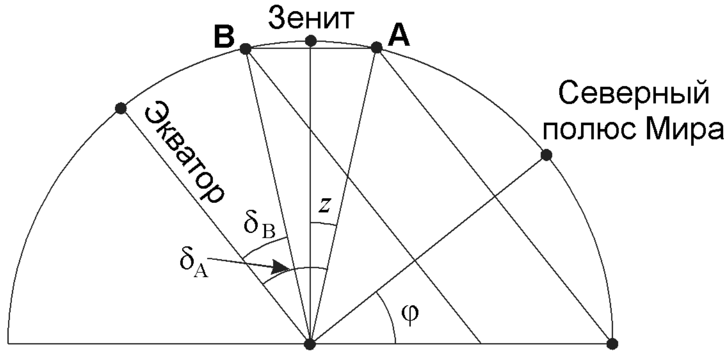
Из условия, что нижняя кульминация звезды **A** происходит на горизонте, имеем:

$$2\delta_B + \varphi = 90°.$$

В результате:

$$\frac{4}{3}\varphi + \varphi = 90°.$$

Широта φ составляет 38.6°.



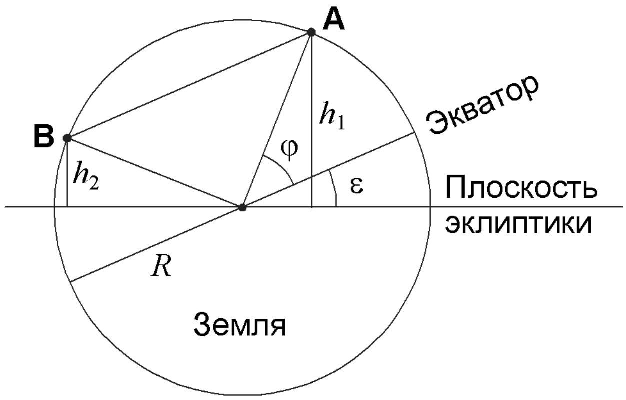
Плоскость эклиптики (О.С. Угольников)

Класс: 9 Задача: 2

? Определите максимальное и минимальное расстояние (в км) города Анапа (широта +45°) от плоскости эклиптики.

! На рисунке показано положение Земли относительно плоскости эклиптики. Плоскость земного экватора наклонена к плоскости эклиптики на угол ε, равный 23.4°. Пункт проведения олимпиады, город Анапа, имеет широту φ, составляющую 45°. За счет осевого вращения Земли положение Анапы относительно плоскости эклиптики перемещается вдоль параллели с указанной широтой, которая показана на рисунке в виде отрезка **AB**.

Находясь севернее тропической зоны, Анапа не пересекает плоскость эклиптики, оставаясь всегда севернее нее. Из рисунка видно, что максимальное расстояние пункта проведения олимпиады достигается в точке **A**, минимальное – в точке **B**. Обозначая радиус Земли через R, получаем значения этих расстояний:



$$h_1 = R \cdot \sin(\varphi + \varepsilon) = 5920 \text{ км};$$

$$h_2 = R \cdot \sin(\varphi - \varepsilon) = 2345 \text{ км}.$$

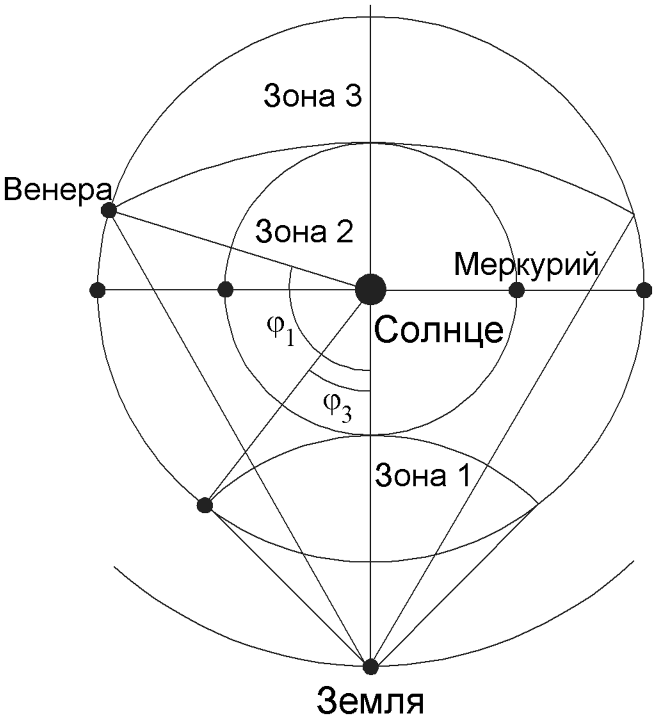
Близкая планета (М.Е. Прохоров)

Класс: 9 10 11 Задача: 3

? Какая из внутренних планет большую часть времени является ближайшей к Земле? Считать орбиты планет круговыми, лежащими в одной плоскости.

! Перед тем, как произвести точное решение, приведем некоторые предварительные рассуждения, которые могут достаточно легко привести к правильному ответу, но без строгого доказательства.

Изобразим на рисунке внутреннюю часть Солнечной системы с орбитами первых трех планет. Для удобства перейдем в систему отсчета, вращающуюся вокруг Солнца вместе с Землей, так что сама Земля в ней оказывается неподвижной.



Проведем через центр Солнца линию, перпендикулярную направлению на Землю. Она разделит все орбиты на две половины – более удаленную и менее удаленную от Земли. Назовем расстояние до планеты, когда она находится на этой линии, медианным. Очевидно, что для каждой планеты это расстояние ровно половину времени будет больше медианного, а половину времени – меньше медианного. Само медианное расстояние легко вычислить из теоремы Пифагора, учитывая, что по условию задачи все орбиты круговые.

Медианное расстояние Меркурия меньше медианного расстояния Венеры. Большую часть времени Меркурий оказывается ближе медианного положения Венеры, а значит, с вероятностью более 50% в это время он будет ближе к Земле, чем Венера. Это дает основания предположить, что именно Меркурий чаще всего оказывается самой близкой к Земле планетой. Теперь перейдем к более строгому доказательству этого факта.

Минимальное и максимальное расстояние от *i*-й внутренней планеты до Земли будет составлять

$$R_{i,\min} = R_0 - a_i, \quad R_{i,\max} = R_0 + a_i,$$

где R_0 – радиус земной орбиты, a_i – радиус орбиты планеты. Расстояние от Земли до *i*-й планеты R_i выражается по теореме косинусов:

$$R_i^2 = R_0^2 + a_i^2 - 2R_0 a_i \cos\varphi = A_i - B_i \cos\varphi,$$

здесь φ – разность гелиоцентрических долгот Земли и планеты. Как видно из формулы, вместо расстояния до планет удобнее оперировать с их квадратами. Рассмотрим различные интервалы возможных значений величины R^2. На расстоянии $R^2<0.08$ планет быть не может. В интервале $0.08<R^2<0.37$ может быть только Венера, эта зона помечена на рисунке номером 1. В интервале $0.37<R^2<1.93$ могут быть обе планеты (зона 2). В интервале $1.93<R^2<2.96$ также может быть только Венера (зона 3), еще большие значения R^2 внутренними планетами не достигаются.

Рассмотрим, какую часть времени планета Венера проводит в каждом из трех интервалов. Чтобы Венера оказалась в зоне 1 и была гарантированно ближе Меркурия, разница гелиоцентрических долгот Венеры и Земли по модулю должна быть не больше

$$\varphi_1 = \arccos\frac{R_0^2 + a_2^2 - R_{1,\min}^2}{2R_0a_2} = \arccos\frac{a_2^2 - a_1^2 + 2R_0a_1}{2R_0a_2} = 37.5^{\circ}.$$

Зона 1 охватывает две таких дуги на орбите Венеры. Деля последнюю величину на 180°, получаем, что Венера проводит в первой зоне 21% времени. Чтобы Венера оказалась в зоне 3 и была гарантированно дальше Меркурия, разница долгот по модулю должна быть не меньше

$$\varphi_3 = \arccos\frac{R_0^2 + a_2^2 - R_{1,\max}^2}{2R_0a_2} = \arccos\frac{a_2^2 - a_1^2 - 2R_0a_1}{2R_0a_2} = 106.1^{\circ}.$$

Зона 3 вырезает на орбите Венеры 2 симметричные дуги длиной 73.9° каждая, и Венера находится там 41% времени. Оставшиеся 38% времени Венера располагается в зоне 2, в которой всегда находится и Меркурий.

Для решения задачи мы вполне можем предполагать, что из 38% времени, которые Венера располагается в зоне 2, она с равной вероятностью будет ближе или дальше Меркурия. Тогда мы получаем, что Венера находится ближе Меркурия 21% времени, соответствующие зоне 1, а также 19% времени, соответствующие зоне 2. Суммируя эти величины, мы получаем, что лишь 40% времени Венера оказывается ближайшей к Земле внутренней планетой. В оставшихся 60% случаев это будет Меркурий, его и нужно указать в качестве ответа на задачу.

Докажем последнее утверждение еще более строго. Медианное расстояние Меркурия составляет 1.072 а.е, его квадрат R_{1m}^2 равен 1.15. Квадрат расстояния до Меркурия половину времени оказывается больше и половину времени – меньше этого значения. Разделим зону 2 на две части, назовем их ближней и дальней. Граница между ними соответствует модулю разницы гелиоцентрических долгот Венеры и Земли

$$\varphi_m = \arccos\frac{R_0^2 + a_2^2 - R_{1m}^2}{2R_0a_2} = 75.1^{\circ}.$$

Венера проводит в ближней части зоны 2 (угол φ от 37.5° до 75.1°) 21% времени, а в ее дальней части – 17% времени. В первом случае Венера либо однозначно ближе Меркурия (если последний находится позади медианной линии), либо ближе его с вероятностью около 0.5 (если Меркурий ближе медианной линии). Будем считать, что, находясь в ближней части зоны 2, Венера будет ближе Меркурия с вероятностью 0.75. Соответственно, в ее дальней части вероятность составит 0.25. Тогда общая вероятность для Венеры быть ближе к Земле, чем Меркурий, составит

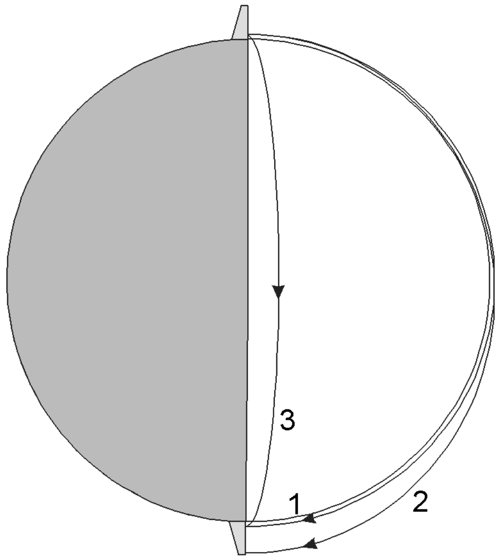
$$0.21 + (0.21\cdot0.75) + (0.17\cdot0.25) = 0.41,$$

что несильно отличается от предшествующей приближенной оценки и меньше, чем соответствующая вероятность для Меркурия. Итак, Меркурий чаще оказывается ближайшей к Земле внутренней планетой (а также ближайшей планетой вообще), нежели Венера.

Космический футбол (О.С. Угольников)

Класс: 9 10 Задача: 4

? Половина сферической поверхности астероида с радиусом 1 км и плотностью 3 г/см³ оборудована под большое футбольное поле. Ворота шириной 7 м и высотой 3 м установлены на полюсах астероида. Мяч находится на линии одних ворот точно в ее середине. В каком интервале должны находиться направление и величина скорости, которые нужно задать мячу, чтобы после горизонтального удара он попал в противоположные ворота, не касаясь в полете поверхности астероида? Вращением астероида пренебречь.



! Определим вначале, в каком интервале должна заключаться скорость мяча после горизонтального удара, чтобы он попал в противоположные ворота. Так как мяч не должен касаться поверхности астероида, то он должен пролететь над астероидом по крайней мере половину оборота. А для этого его скорость должна быть не менее первой космической:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = R\sqrt{\frac{4\pi G\rho}{3}} = 0.9157 \text{ м/с}.$$

Здесь M, R и ρ — масса, радиус и плотность астероида. В этом случае мяч пролетит по траектории 1 на рисунке и попадет в нижнюю часть противоположных ворот. Максимальная скорость соответствует траектории 2, попадающей в верхнюю часть ворот. При этом орбита мяча будет эллиптической с расстоянием в перицентре R и расстоянием в апоцентре $(R+h)$, где h — высота ворот. Заметим, что значение h значительно меньше R. С учетом этого эксцентриситет орбиты и скорость в перигелии составят

$$e = \frac{(R+h)-R}{(R+h)+R} \approx \frac{h}{2R},$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{GM}{a}\cdot\frac{1+e}{1-e}} = \sqrt{\frac{GM}{R}(1+e)} \approx \sqrt{\frac{GM}{R}}(1+\frac{e}{2}) = v_1(1+\frac{h}{4R}) = 0.9163 \text{ м/с}.$$

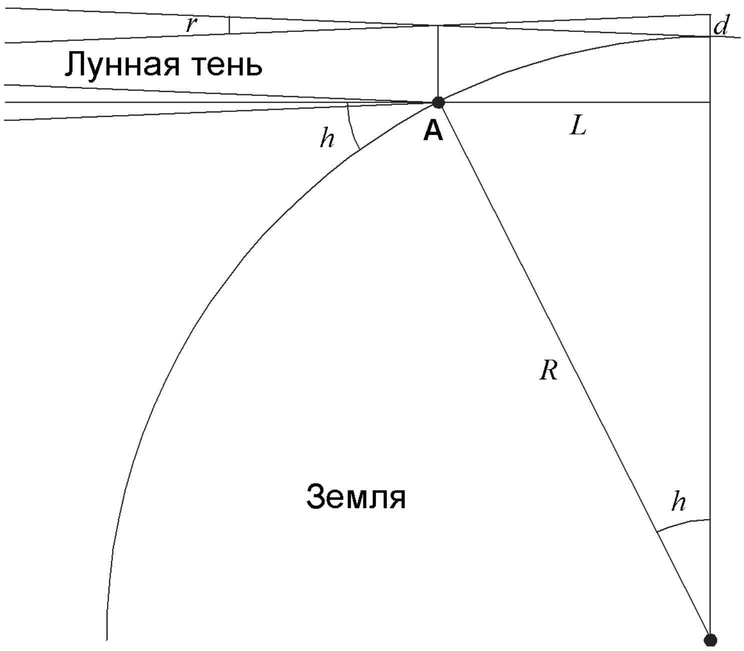
Мы видим, что для попадания в ворота космическим футболистам будет необходимо достичь высокой точности выполнения удара. А вот высокая точность по направлению, по крайней мере, в горизонтальной плоскости, не потребуется. Как видно на рисунке, орбита мяча, близкая к круговой, будет обязательно проходить через противоположный полюс астероида, где находятся ворота, даже если мяч будет лететь по траектории 3. Область возможных направлений удара из центра своих ворот охватывает угол в 180°, то есть все футбольное поле.

Кольцеобразно-полное затмение (О.С. Угольников)

Класс: 9 Задача: 5

? На Земле начинается кольцеобразно-полное солнечное затмение. В начале полосы центрального затмения на поверхности Земли наблюдается кольцеобразное затмение продолжительностью 20 секунд. На какой высоте над горизонтом на Земле будет наблюдаться начало полного затмения (центральное полное затмение с фазой, в точности равной единице)? Рефракцией пренебречь.

! Как известно, кольцеобразно-полные затмения наступают, когда конус лунной тени не дотягивается до края Земли в начале и конце центрального затмения на нашей планете, но достигает поверхности Земли в середине затмения. Изобразим это на рисунке.



В момент начала центрального затмения на Земле ширина области видимости кольцеобразного затмения d есть произведение орбитальной скорости Луны (1 км/с) и продолжительности кольцеобразного затмения (20 секунд), то есть 20 км. Осевое вращение Земли в этот момент на продолжительность затмения не влияет, так как наблюдатель движется перпендикулярно движению тени. Угол раствора конуса лунной тени равен видимому диаметру Солнца r, что составляет 32′ или 0.0093 радиана. Конус тени не дотягивается до области наблюдения на расстояние L, равное d/r или 2150 км.

Центральное затмение будет наблюдаться как полное, начиная с точки **A**, в которой конец тени вступит на поверхность Земли. Из рисунка видно, что высота Солнца над горизонтом составит

$$h = \arcsin\frac{L}{R} = 20°.$$

Здесь R – радиус Земли. Данный вывод не зависит от того, пересекает ли лунная тень Землю по диаметру (в плоскости рисунка) или по хорде.

Незнакомое небо (О.С. Угольников)

Класс: 9 Задача: 6

? **Астронавты прибыли на поверхность обитаемой планеты. Наблюдая звездное небо, они обнаружили естественный спутник этой планеты, а также еще одну планету, расположенную ближе к центральной звезде. Синодические периоды спутника и планеты совпадали, а сидерический период планеты был вдвое меньше сидерического периода спутника. Во сколько раз внутренняя планета располагалась ближе к звезде, чем планета, с которой велись наблюдения? Все орбиты в системе круговые и лежат в одной плоскости.**

! Период обращения внутренней планеты вокруг центральной звезды (ее сидерический период) T_1 меньше периода обращения той планеты, куда прибыли путешественники, T_0. Период обращения спутника вокруг планеты (сидерический период спутника) T_2 также меньше, нежели T_0, иначе спутник потерял бы гравитационную связь с планетой и перешел бы на орбиту вокруг центральной звезды. Величины синодических периодов внутренней планеты и спутника выражаются одинаковыми соотношениями:

$$\frac{1}{S_{1,2}} = \frac{1}{T_{1,2}} \pm \frac{1}{T_0}.$$

Знак "−" берется, если вращение внутренней планеты (спутника) вокруг звезды (планеты) происходит в ту же сторону, что и вращение обитаемой планеты вокруг звезды, а знак "+" в противоположном случае. Если бы все три тела обращались по своим орбитам в одну и ту же сторону, то равенство сидерических периодов $T_{1,2}$ означали бы равенство синодических периодов $S_{1,2}$ и наоборот. Астронавты же зарегистрировали равенство синодических периодов S_1 и S_2, при том, что сидерический период спутника T_2 превосходил сидерический период планеты T_1 ровно вдвое. Такое могло быть только в том случае, если спутник обращался вокруг планеты в направлении, противоположном направлению вращения обеих планет вокруг звезды. В итоге, мы имеем:

$$\frac{1}{S_1} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}, \qquad \frac{1}{S_2} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_0}.$$

Учитывая, что $S_1 = S_2$ и $T_2 = 2T_1$, получаем:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2T_1} + \frac{1}{T_0}; \quad T_1 = \frac{T_0}{4}.$$

Искомое отношение радиусов орбит получается из III закона Кеплера:

$$\frac{r_1}{r_0} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{2/3} = 0.4.$$

Приближение к тройной системе (А.М. Татарников)

Класс: 10 Задача: 2

? Визуально тройная звезда состоит из звезд с видимыми звездными величинами 6^m, 7^m, 8^m. Расстояния до звезд оставляют 10, 15 и 20 пк соответственно. Наблюдатель пролетел 5 пк в сторону этой тройной звезды. Определите суммарный блеск этой системы для наблюдателя после перелета.

! После перелета расстояния до трех звезд составили 5, 10 и 15 парсек соответственно. Вычислим видимые величины каждой из трех звезд:

$$m_1 = 6 + 5\ (\lg 5 - \lg 10) = 4.50,$$
$$m_2 = 7 + 5\ (\lg 10 - \lg 15) = 6.12,$$
$$m_3 = 8 + 5\ (\lg 15 - \lg 20) = 7.38.$$

В соответствии с формулой Погсона суммарная звездная величина визуальной тройной системы составит

$$m = -2.5\lg\left(10^{-0.4\cdot m_1} + 10^{-0.4\cdot m_2} + 10^{-0.4\cdot m_3}\right) = 4.22.$$

Мира Кита (А.М. Татарников)

Класс: 10 11 Задача: 5

? Известно, что в видимом диапазоне длин волн амплитуда изменения блеска звезды Мира Кита составляет 8^m, а в инфракрасной области – около 1.5^m. Считая излучение звезды чернотельным, определите, во сколько раз изменяется радиус звезды, если ее эффективная температура в максимуме и минимуме равна соответственно 2800 и 2300 K.

! Оценим, на какой длине волны находится максимум излучения звезды:

$$\lambda = 2900/T \sim 1\text{-}1.2 \text{ мкм}.$$

Здесь T – эффективная температура звезды. Практически всю свою энергию звезда излучает в инфракрасной области спектра, поэтому для определения радиуса звезды нужно использовать данные измерений блеска в этом электромагнитном диапазоне. По закону Стефана-Больцмана светимость звезды составляет

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Для отношения светимостей в максимуме и минимуме имеем:

$$\frac{R_{\max}^2 T_{\max}^4}{R_{\min}^2 T_{\min}^4} = 10^{0.4\cdot\Delta m}; \quad \frac{R_{\max}}{R_{\min}} = 10^{0.2\cdot\Delta m}\,\frac{T_{\min}^2}{T_{\max}^2} = 1.35.$$

Световое давление Солнца (Е.Н. Фадеев, М.Е. Прохоров)

Класс: 10 11 Задача: 6

? Сравните давление солнечного света и давление солнечного ветра на расстоянии Земли от Солнца. До какой скорости сможет разогнаться сферическая углеродная пылинка плотностью 2 г/см^3 и радиусом 0.2 мкм под действием этих эффектов, если изначально пылинка находилась на расстоянии 1 а.е. от Солнца и была неподвижна? Концентрация частиц солнечного ветра вблизи Земли $8.7\cdot10^6$ м$^{-3}$, их скорость – 450 км/с.

! Световое давление Солнца и давление солнечного ветра сходны: и то, и другое давление создается потоком частиц. Давление света создается потоком фотонов, в то время как солнечный ветер состоит в основном из протонов и электронов с небольшой примесью альфа-частиц (ядер гелия ^{4}He).

Обозначим площадь поперечного сечения пылинки как S. За время Δt в пылинку попадет $nSv_w\Delta t$ частиц, где n – концентрация частиц, v_w – их скорость. Импульс каждой частицы равен mv_w. Суммарный импульс всех частиц, попавших в пылинку за указанный интервал времени, составит $mnSv_w^2\Delta t$. Деля этот импульс на интервал времени, мы получаем силу давления частиц на пылинку, а деля также на площадь – давление потока частиц:

$$P_w = mnv_w^2$$

Подставляя численные данные для солнечного ветра, получаем около $3\cdot10^{-9}$ Па. Газовое давление, обусловленное тепловыми скоростями частиц, значительно меньше, так как тепловые скорости меньше направленной скорости солнечного ветра.

Давление излучения проще посчитать исходя из тех соображений, что количество солнечной энергии приходящейся на единицу поверхности равно солнечной постоянной A, 1367 Вт/м^2. Солнечная постоянная – это полное количество солнечной лучистой энергии проходящей через единицу площади за единицу времени на расстоянии Земли от Солнца. Известно, что энергия фотонов равна

$$\varepsilon = h\nu = mc^2,$$

а их импульс:

$$p = mc = \frac{\varepsilon}{c}.$$

Отсюда видно, что давление излучения равно

$$P = \frac{A}{c} = 4.6\cdot10^{-6}\ \text{Па}.$$

В итоге, давление солнечного излучения в 1500 раз больше давления солнечного ветра.

Для ответа на второй вопрос задачи запишем выражения для двух сил, действующих на пылинку с указанными характеристиками: притяжения

Солнца и давления солнечного излучения (давлением солнечного ветра, как было показано выше, можно пренебречь):

$$F_1 = \frac{GM\mu}{R^2} = \frac{4}{3}\frac{GM\rho\pi r^3}{R^2}; \quad F_2 = -\frac{J \cdot \pi r^2}{4\pi \cdot cR^2} = -\frac{AR_0^2\pi r^2}{cR^2}.$$

Здесь M и μ — массы Солнца и пылинки, ρ и r — плотность и радиус пылинки, R_0 и R — расстояние от Солнца до Земли и пылинки соответственно, J — светимость Солнца. Во втором выражении стоит знак минус, что указывает, что данная сила действует противоположно первой. Равнодействующая двух сил составит

$$F = F_1 + F_2 = \frac{\pi r^2}{R^2}\left(\frac{4GM\rho r}{3} - \frac{AR_0^2}{c}\right) = \frac{4G\pi\rho r^3}{3R^2}\left(M - \frac{3AR_0^2}{4Gc\rho r}\right) = \frac{4G\pi\rho r^3}{3R^2}M^*.$$

Действие силы давления света приводит к тому, что пылинка движется в поле тяжести с уменьшенной эффективной массой Солнца M^*. Если же эффективная масса, стоящая в скобках в последней формуле, окажется меньше нуля, пылинка будет не притягиваться, а отталкиваться от Солнца. Чтобы выяснить, так ли это, подставим численные значения в выражение, стоящее в скобках. В результате мы получаем, что эффективная масса составляет $-0.44M$, и пылинка действительно будет отталкиваться от Солнца.

Так как результирующая сила пропорциональна R^{-2}, то аналогичный вид сохранит и выражение для потенциальной энергии взаимодействия пылинки с Солнцем:

$$E = -\frac{GM^*\mu}{R} = +0.44\frac{GM\mu}{R}.$$

По закону сохранения энергии, пылинка, неподвижная на расстоянии R_0 от Солнца, вылетит из Солнечной системы со скоростью

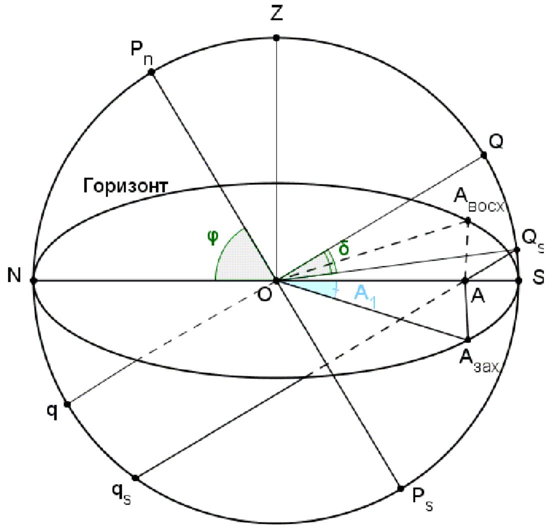
$$v = \sqrt{\frac{-2GM^*}{R_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.44 \cdot GM}{R_0}} = v_0\sqrt{0.44},$$

где v_0 — средняя орбитальная скорость Земли. В итоге, мы получаем значение скорости, до которой действие Солнца разгонит пылинку: 19.8 км/с.

Заходящая звезда (Е.Н. Фадеев)

Класс: **11** Задача: **1**

? Астрономический азимут захода звезды на широте +60° равен 20°. На какое минимальное расстояние и в каком направлении нужно уехать, чтобы в течение последующих суток можно было увидеть эту звезду в зените?



! Поскольку азимут захода звезды меньше 90°, она находится в южной полусфере, то есть в зените она может быть только в южном полушарии. Звезда проходит через зенит, если широта места наблюдения равна склонению звезды. Найдем его. Обозначим радиус небесной сферы как R. Длина отрезка $\mathbf{OA_{зах}}$ равна этой же величине R. Тогда длина отрезка **OA** составляет $R \cdot \cos A_1$, где A_1 есть азимут точки захода звезды, составляющий 20°.

В треугольнике $\mathbf{OQ_sA}$ угол $\mathbf{OQ_sA}$ с точностью до знака есть искомое склонение звезды δ, угол $\mathbf{OAQ_s}$ равен 90°+φ, где φ — широта места наблюдения. Из теоремы синусов получаем:

$$\frac{R\cos A}{-\sin\delta} = \frac{R}{\sin(90° + \varphi)},$$

$$\delta = -\arcsin(\cos A \cos\varphi) = -28°.$$

Значит, данная звезда проходит через зенит на широте −28° ю.ш. Нужно уехать на юг на 88° или, принимая радиус Земли равным 6370 км, на

$$6370 \cdot \frac{\pi}{180°} 88° = 9783\,\text{км}.$$

Компенсатор рефракции (О.С. Угольников)

Класс: **11** Задача: **2**

? С каким периодом должен вращать телескоп часовой механизм, чтобы удерживать точечный источник (звезду) со склонением 0, находящийся высоко над горизонтом, на экваторе в центре поля зрения с учетом атмосферной рефракции? Наблюдатель находится на уровне моря при стандартных атмосферных условиях (температура +20°С, давление 760 мм рт. ст.)

! Звезда со склонением 0 движется по небесной сфере на экваторе вертикально, восходя на востоке, проходя через зенит и заходя на западе. Рефракция смещает положение звезды вдоль ее же суточного пути, и ее вполне можно компенсировать изменением угловой скорости, придаваемой телескопу часовым механизмом.

Пусть t_0 — время очередного прохода указанной звезды через зенит. Тогда в течение последующих 6 часов до захода звезды ее истинное зенитное расстояние будет зависеть от времени t как

$$z = \omega_0 (t - t_0),$$

где ω_0 – угловая скорость суточного вращения небесной сферы (или, что правильнее, угловая скорость осевого вращения Земли). Эту же формулу можно распространить и на период до кульминации звезды, условно считая ее зенитное расстояние отрицательным.

Если зенитное расстояние не очень велико (меньше 50-60°), то величина астрономической рефракции при указанных условиях составляет

$$r = 56.0'' \operatorname{tg} z = 2.7 \cdot 10^{-4} \operatorname{tg} z.$$

При зенитных расстояниях меньше 20-30° эта формула выглядит еще проще:

$$r = 2.7 \cdot 10^{-4} \cdot z,$$

причем z в ней выражается в радианах. Зависимость видимого зенитного расстояния звезды z_V от времени будет выражаться как

$$z_V = z - r = z - 2.7 \cdot 10^{-4} z = \omega_0 (1 - 2.7 \cdot 10^{-4}) \cdot (t - t_0).$$

Эту формулу также можно распространить на период времени до кульминации звезды. В результате, если уменьшить угловую скорость телескопа на $2.7 \cdot 10^{-4}$ часть, то он в течение достаточно длительного времени будет очень хорошо отслеживать положение звезды. Период вращения небесной сферы T_0, как известно, составляет 23 часа 56 минут и 4 секунды. Для решения поставленной задачи его нужно умножить на 1.00027. В результате, мы получаем 23 часа 56 минут 27 секунд.

Взрыв в звездном трио (О.С. Угольников)

Класс: **11** Задача: **4**

? Три звезды с равной массой обращаются вокруг общего центра тяжести по одинаковой круговой траектории, находясь в вершинах равностороннего треугольника. В один момент одна из звезд взрывается как сверхновая, и ее масса без остатка быстро покидает систему. Найдите эксцентриситет новых орбит оставшихся двух звезд.

! Обозначим расстояние между звездами попарно (сторону равностороннего треугольника) как R, а массу каждой звезды как M.

Рассмотрим движение каждой звезды. По свойствам равностороннего треугольника, радиус орбит звезд составляет

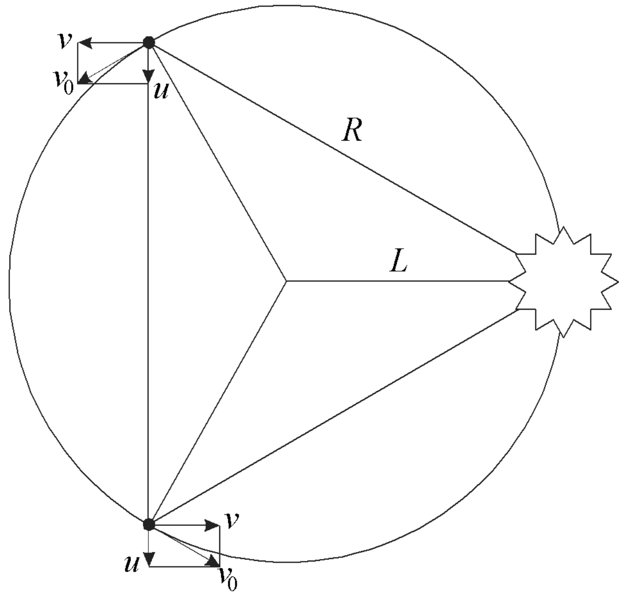
$$L = \frac{R}{\sqrt{3}}.$$

Центростремительное ускорение каждой звезде придает равнодействующая сил притяжения двух других звезд:

$$M \cdot a = \frac{2GM^2 \cos 30°}{R^2}; \quad a = \frac{\sqrt{3}GM}{R^2}.$$

Скорость движения каждой из звезд составляет

$$v_0 = \sqrt{a \cdot L} = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$



После взрыва одной из звезд две остальные продолжают двигаться со скоростями v_0, как показано на рисунке. Компонента этой скорости, направленная вдоль прямой, соединяющей звезды, u, одинакова для обеих звезд и является скоростью центра масс системы, образованной двумя звездами; она в дальнейшем не изменяется. А вот перпендикулярная компонента v у двух звезд совпадает по модулю, но противоположна по направлению. Она становится орбитальной скоростью звезд. Ее величина составляет

$$v = v_0 \cos 30° = \sqrt{\frac{3GM}{4R}}.$$

Орбитальная скорость перпендикулярна радиусу-вектору, следовательно, положения звезд сразу после взрыва соответствуют либо перицентрам, либо апоцентрам новых орбит. Пусть через половину орбитального периода, в апоцентре или перицентре соответственно, расстояние между звездами будет равно D, а скорости каждой будут равны v_1. Запишем законы сохранения момента импульса и энергии:

$$2 \cdot \frac{v \cdot R}{2} = 2 \cdot \frac{v_1 \cdot D}{2}; \quad 2 \cdot \frac{M \cdot v^2}{2} - \frac{GM^2}{R} = 2 \cdot \frac{M \cdot v_1^2}{2} - \frac{GM^2}{D}.$$

Делая подстановки

$$v_1 = \frac{v \cdot R}{D}; \quad \frac{GM}{R} = \frac{4v^2}{3},$$

получаем уравнение

$$v^2 - \frac{4v^2}{3} = v^2 \frac{R^2}{D^2} - \frac{4v^2}{3} \frac{R}{D}$$

и далее:

$$3(R/D)^2 - 4(R/D) + 1 = 0$$

Это уравнение имеет два корня, соответствующие двум точкам на орбитах звезд. Первое решение ($D=R$) связано с положением звезд сразу после взрыва, а второе ($D=3R$) — через половину нового орбитального периода. Мы видим, что сразу после взрыва звезды оказываются в перицентрах своих новых орбит, а в апоцентрах они будут втрое дальше друг от друга. Эксцентриситет новых орбит составит

$$e = (D-R)/(D+R) = 0.5.$$

Полет к звездам (А.М. Татарников)

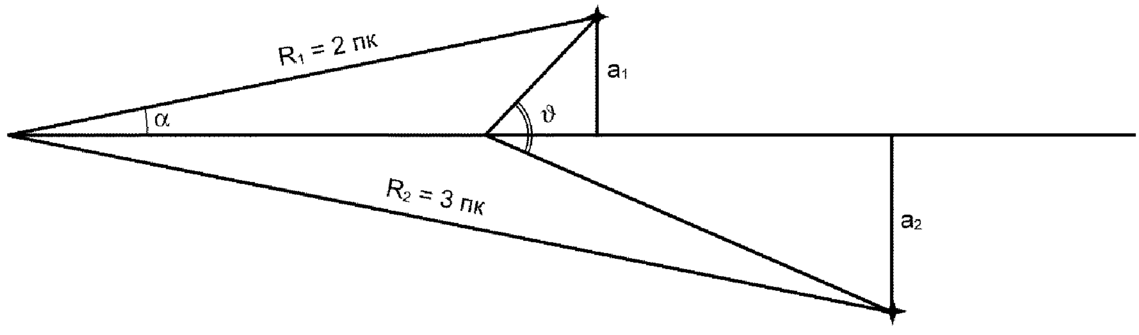
Класс: 9 Задача: 1

? Прямо по курсу звездолета находится визуально двойная звезда с угловым расстоянием между звездами 1′. Расстояние от звездолета до первой звезды этой пары составляет 2 пк, до второй – 3 пк. Звездолет летит между этими звездами. Нарисуйте схематический график изменения углового расстояния между звездами, видимого со звездолета, летящего со скоростью в 0.5 скорости света, со временем на ближайшие 30 лет, считая звезды неподвижными. Влиянием звезд на движение звездолета пренебречь. Все измерения сделаны в системе отсчета, связанной со звездолетом. Релятивистские эффекты не учитывать.

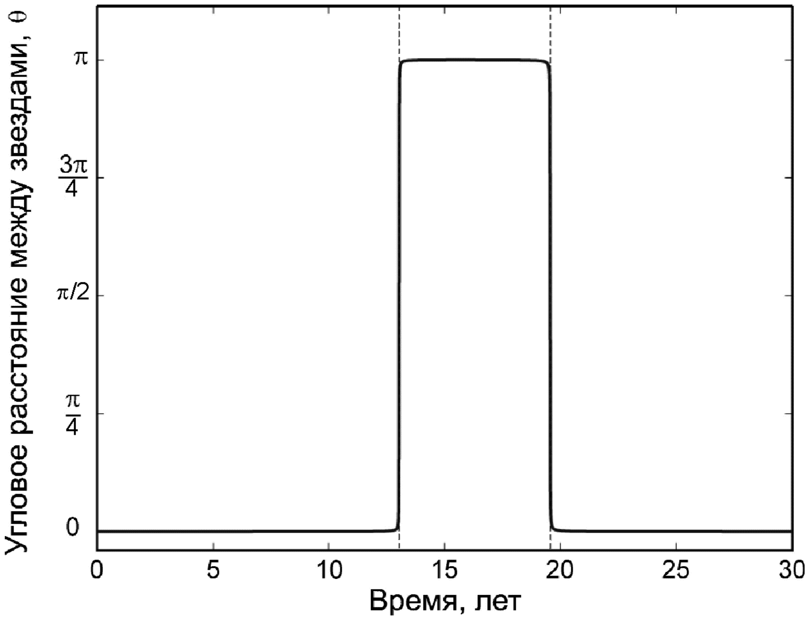
! Оценим характерное время изменения угловых расстояний в задаче. Для этого найдем так называемое "прицельное расстояние" a (см. рисунок). Оно равно $R{\cdot}\alpha$, где α – угловое расстояние звезды от направления полета, R – расстояние до звезды. Для первой звезды прицельное расстояние получается равным 60 а.е., для второй – 90 а.е.

Вычислим, за какое время t звездолет пройдет расстояние, равное величине a. Для этого разделим ее на скорость звездолета v. Получаем, что это время по порядку величины составляет 1 сутки. Данная величина несравнимо меньше тех периодов времени, которые требуются звездолету, чтобы долететь до окрестностей первой и второй звезды. Эти периоды, как нетрудно вычислить, составляют 13.0 и 19.5 года.

Таким образом, угловое расстояние θ между звездами сначала крайне медленно увеличивается (на графике это изменение не заметно). Затем, через 13 лет полета, за очень короткий промежуток времени, почти мгновенно, увеличивается почти до 180°, после чего очень медленно продолжает расти (и этот рост на графике незаметен). В какой-то момент после пролета мимо первой звезды и до пролета мимо второй угловое расстояние между звездами достигает 180° и начинает очень медленно



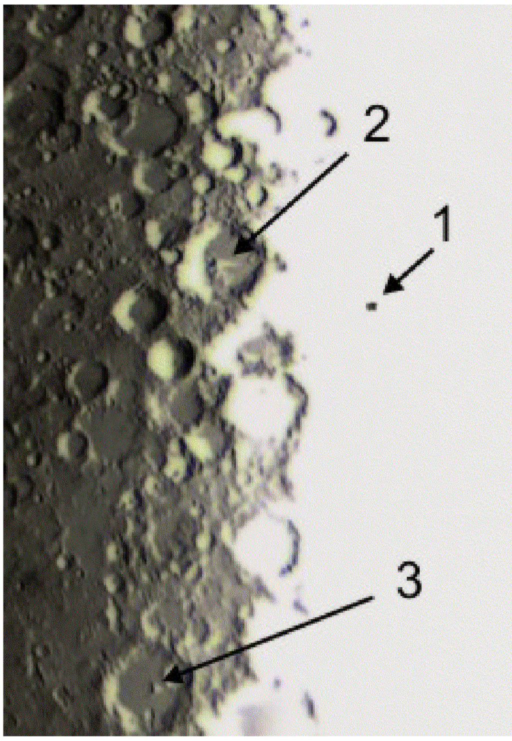
уменьшаться. Через 6.5 лет после сближения с первой звездой происходит пролет мимо второй звезды, когда угловое расстояние между ними опять резко изменяется почти до нуля, после чего продолжает медленно уменьшаться весь дальнейший полет.



Лунная вершина (А.М. Татарников)

Класс: 9 10 Задача: 2

? На рисунке показан снимок Луны (негатив). Определите высоту горы, обозначенной цифрой 1 (видна справа от терминатора). Селенографические координаты центров кратеров №2 и №3 соответственно равны λ_2=1°10', β_2=0°20' и λ_3=2°40', β_3=−10°15'. Оцените погрешность, с которой определена высота горы.

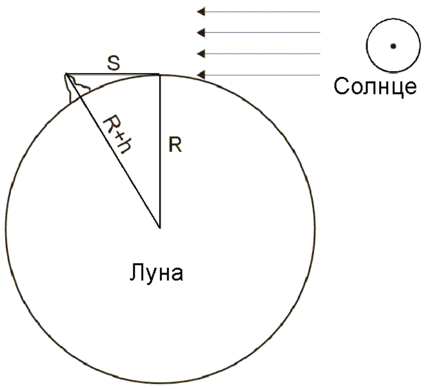


! Для того, чтобы определить масштаб фотографии, вычислим длину одного градуса лунного меридиана:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot R}{360} = 30.3\,\text{км}.$$

Кратеры 2 и 3 находятся вблизи лунного экватора, а расстояние между ними, как видно из их координат, существенно меньше радиуса Луны. Поэтому его можно вычислить, пользуясь теоремой Пифагора:

$$L = \omega\sqrt{(\lambda_3 - \lambda_2)^2 + (\beta_3 - \beta_2)^2} = \\ = 325\,\text{км}.$$



Расстояние от горы до терминатора на рисунке составляет чуть более 0.2 от расстояния между кратерами. Следовательно, величина расстояния между горой и терминатором S составляет примерно 70 км.

Вершина горы освещается Солнцем, как показано на рисунке. Высота горы h мала по сравнению с радиусом Луны R, и для нее справедливо выражение:

$$h = \sqrt{R^2 + S^2} - R \approx \frac{S^2}{2R} = 1.4\,\text{км}.$$

Для оценки погрешности надо понять, что вносит наибольшую погрешность в измерения. Прежде всего, это неопределенность в проведении линии терминатора, которая для данного снимка может достигать 10 км. Подставляя в качестве величины S 60 и 80 км, получаем значение высоты горы 1.0 и 1.8 км. Соответственно, ошибка в определении высоты составит 0.4 км.

Ночь средь бела дня (О.С. Угольников)

Класс: 9 10 Задача: 3

В таблице приведены результаты измерений яркости фона неба в зените (звездные величины 1 квадратной секунды) перед началом и во время полной фазы солнечного затмения 1 августа 2008 года в Новосибирске. Приведены также значения фазы затмения и (для частных фаз) ослабления Солнца в звездных величинах. Пользуясь этими данными, сделайте вывод, является ли засветка от солнечной короны основным фактором, формирующим свечение неба во время полного солнечного затмения. Считать, что по своей яркости солнечная корона близка к полной Луне.

Время, UT	Яркость фона неба, m	Фаза затмения	Ослабление Солнца, m
10.40	7.14	0.935	3.93
10.41	7.39	0.952	4.36
10.42	7.83	0.969	4.99
10.43	8.09	0.986	6.17
10.44	12.55	1.003	–
10.45	12.40	1.019	–

! При условии стабильного состояния атмосферы, если весь фон неба определяется рассеянием света одного ярчайшего источника, у которого высота над горизонтом меняется мало, яркость фона должна быть пропорциональна яркости этого источника. Соответственно, звездная величина площадки неба должна меняться синхронно со звездной величиной источника. Разность одной и другой величины должна оставаться постоянной.

Очевидно, что ясным солнечным днем, в том числе и во время частных фаз затмения, фон неба определяется свечением самого Солнца. За 5 минут, в ходе которых проводились измерения, высота Солнца над горизонтом существенно не изменилась. Для проверки гипотезы о вкладе свечения солнечной короны в фон неба составим таблицу, в которую занесем звездную величину источника (частично затмившегося Солнца или солнечной короны), звездную величину одной квадратной секунды неба и разность обеих величин. Если эта разность с началом полной фазы не изменится, значит, вклад свечения короны в фон неба во время полной фазы столь же принципиален, как и для свечения Солнца днем.

Время, UT	Звездная величина Солнца/короны	Яркость фона неба, m	Разность, m
10.40	–22.85	7.14	29.99
10.41	–22.42	7.39	29.81
10.42	–21.79	7.83	29.62
10.43	–20.61	8.09	28.70
10.44	–12.7	12.55	25.25
10.45	–12.7	12.40	25.1

Мы видим, что с началом полной фазы разность двух величин достаточно резко уменьшается. Если бы фон неба создавался рассеянием свечения короны, он был бы примерно на 4-5^m слабее. Следовательно, вклад свечения короны не является определяющим. В этом можно убедиться еще и потому, что солнечная корона не так резко выделяется на фоне неба во время затмения, как, к примеру, полная Луна на ночном небе. Свечение неба во время затмения создается, прежде всего, многократным рассеянием (диффузией) света из областей, не попадающих в тень Луны в данный момент. Этот же свет создает явление "заревого кольца".

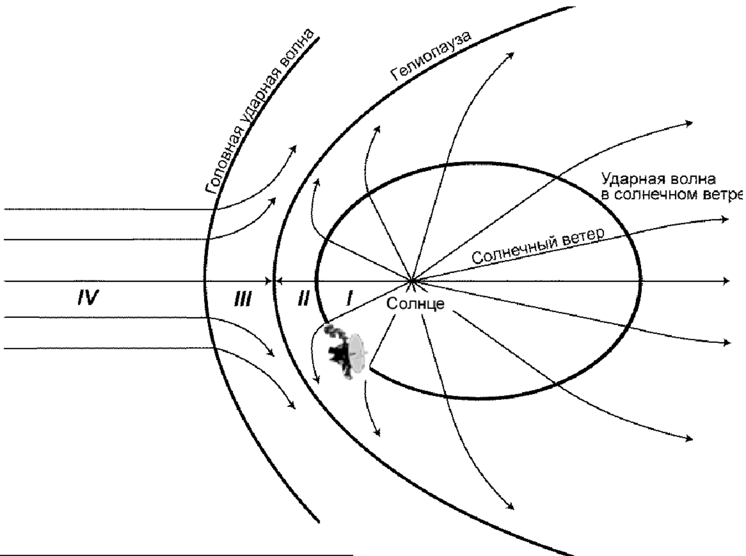
Автор задания выражает благодарность Е.Ю. Цимеринову (проект Meteoweb.ru) за предоставление данных измерений фона неба во время солнечного затмения.

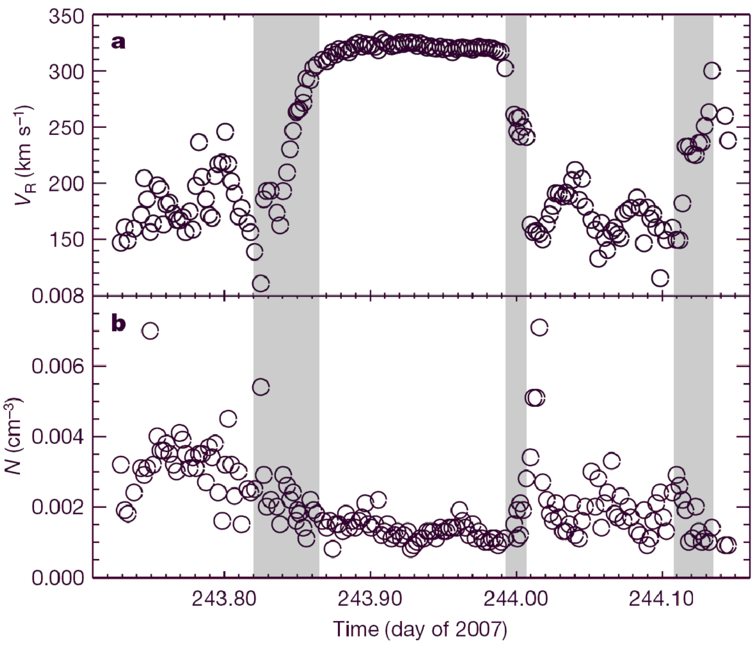
Вояджер 2 (Е.Н. Фадеев)

Класс: 10 11 Задача: 1

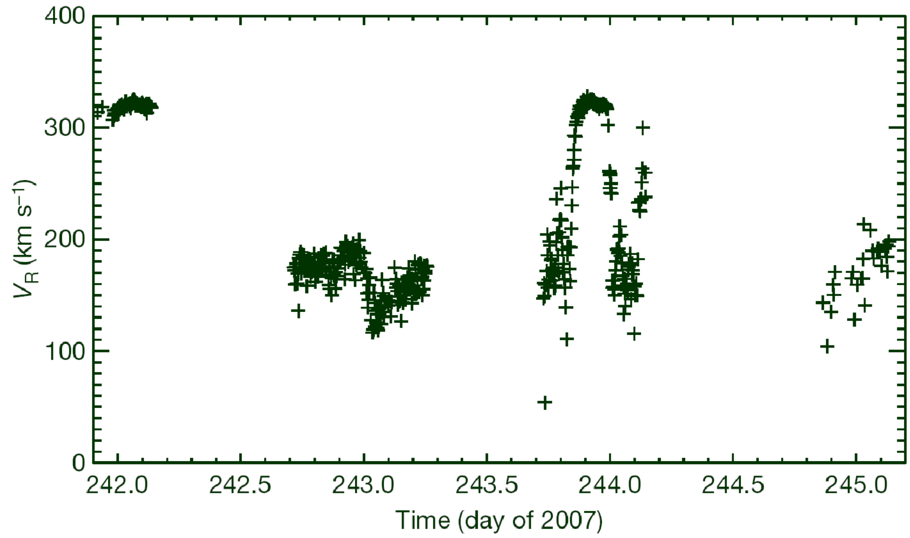
? Космический аппарат Вояджер 2 в августе 2007 года пересек ударную волну в солнечном ветре на границе гелиосферы. Схема гелиосферы показана на рисунке. Момент прохождения сквозь ударную волну характеризовался резкой сменой характеристик солнечного ветра: плотности, скорости, температуры. Вам предоставлен график изменения скорости и плотности солнечного ветра. Серым цветом показаны участки пересечения ударной волны. На втором графике показано изменение скорости солнечного ветра на большем масштабе времени: в самой левой части Вояджер 2 всё еще находился в области невозмущенного солнечного ветра, в самой правой части — окончательно прошел ударную волну.

Объясните, почему было зарегистрировано несколько участков пересечения ударной волны. Оцените толщину зоны, в которой можно встретиться с ударной волной. Оцените толщину ударной волны. Гелиоцентрическая скорость Вояджера 2 — 3.3 а.е. в год.





! Расстояние до ударной волны определяется скоростью и плотностью потока как межзвездного газа, так и солнечного ветра. Поскольку эти величины не строго постоянны, ударная волна колеблется около своего среднего положения. Этим и объясняется повторные входы и выходы в область пространства, называемую в английской литературе *heliosheath* (примерный русский термин — "оболочка гелиосферы").



К сожалению, сеанс связи на интересуемом участке прерывался трижды. Верхняя оценка толщины зоны перехода между двумя областями – 2.7 дня, она соответствует интервалу от конца последнего сеанса, до которого аппарат постоянно пребывал во внутренней зоне (242.2 дня) до начала первого сеанса, после которого аппарат постоянно оставался во внешней зоне (244.9 дня). Двигаясь со скоростью 3.3 а.е. в год или 16 км/с, аппарат пролетел за это время 3.7 млн км. Минимальное время пролета зоны перехода составляет 1.5 дня (от начала сеанса, где Вояджер во внутренней зоне, 242.7 дня, до конца сеанса, в котором он переходит из одной зоны в другую, 244.2 дня). Это соответствует ее толщине 2 млн км. Таким образом, внутренняя ударная волна колеблется относительно точки равновесия на $1.0\text{-}1.8 \cdot 10^6$ км.

При каждом прохождении сквозь ударную волну относительная скорость аппарата и волны была разной. Из трех измеренных прохождений дважды ударная волна догоняла Вояджер, и однажды, вероятно, прошла ему на встречу. В первом и третьем случае ударная волна догоняла Вояджер 2, вследствие чего он двигался с неизвестной скоростью относительно ударной волны. Во втором случае неизвестно, в каком направлении двигалась ударная волна относительно Солнца. Вполне возможно, что Вояджер 2 догнал волну, медленно удаляющуюся от Солнца. Однако, можно предположить что в этом случае волна покоилась, или двигалась по направлению к Солнцу. Прохождение сквозь волну длилось примерно 0.015 дня, за которые Вояджер 2 прошел 20 тысяч км. Эту величину можно считать нижней оценкой на толщину ударной волны.

Балдж и звездное скопление (А.С. Расторгуев)

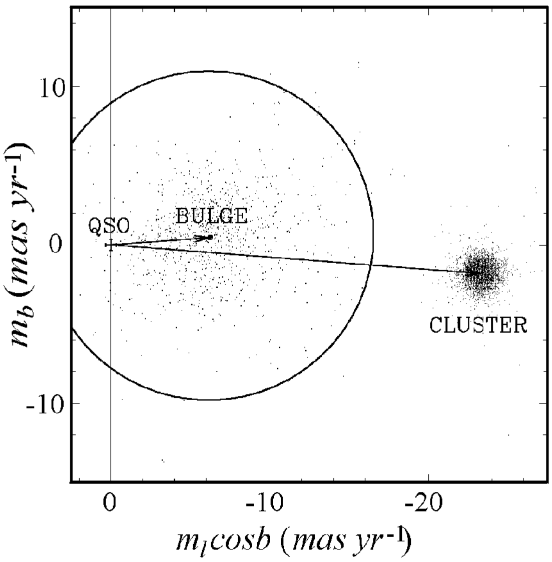
Класс: 11 Задача: 2

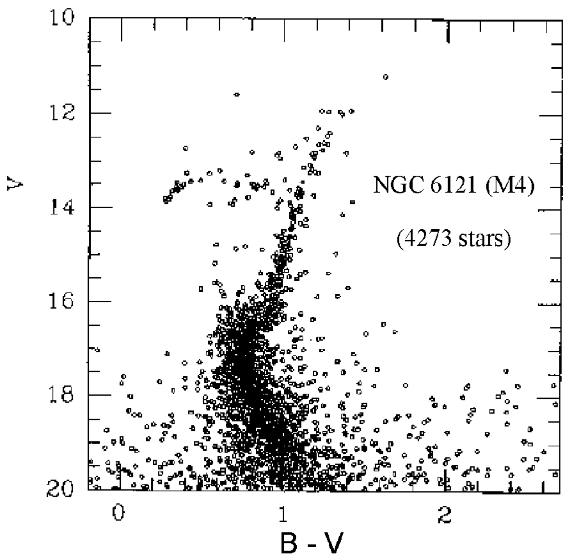
? На рисунке слева показана диаграмма собственных движений для звезд галактического балджа (центральной области Галактики) и шарового скопления M4 (NGC 6121), измеренных относительно далекого квазара. По горизонтальной оси отложено собственное движение вдоль галактической долготы (отсчитываемой в плоскости Галактики), а по вертикальной оси – собственное движение по галактической широте (в направлении, перпендикулярном к плоскости Галактики). Собственные движения даны в единицах 0.001 угловой секунды в год. Измерения собственных движений проводились с помощью Космического телескопа им. Хаббла.

На рисунке справа показана диаграмма "цвет – величина" V–(B–V) для шарового скопления M4. Шаровое скопление находится на небе недалеко от центра Галактики.

Исходя из известной скорости вращения Галактики на расстоянии Солнца (220 км/с), оцените расстояние до центра Галактики. В предположении равноправности всех направлений движения звезд балджа, определить характерную величину их пространственной скорости.

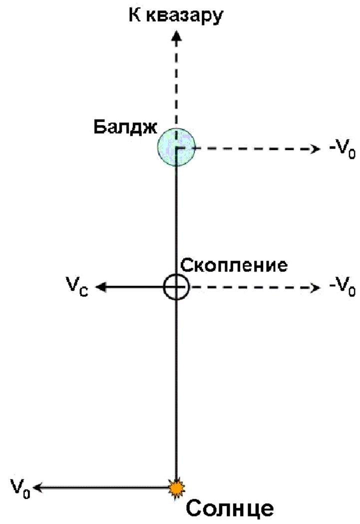
Оцените также полную пространственную скорость шарового скопления M4 в Галактике, если его лучевая скорость равна +70 км/с. Для простоты можно считать, что скопление находится на луче зрения, соединяющем Солнце и центральную область Галактики (балдж).





! Для начала вспомним, что квазары являются очень далекими внегалактическими объектами (активными ядрами галактик), фактически задающими современную астрономическую систему отсчета, близкую к лабораторной. Это означает, что система отсчета практически не обладает собственным вращением, и видимое смещение звезд и звездных скоплений относительно квазаров (собственное движение) есть проявление их абсолютных пространственных движений, спроектированных на небесную сферу.

Вспомним также, что измерения собственных движений звезд и звездных скоплений проводятся наблюдателем, движущимся в Галактике вместе с Солнцем. Поэтому смещение звезд балджа относительно квазара является простым отражением солнечного движения со скоростью около V_0, составляющей 220 км/с и направленной в сторону вращения Галактики. Более того, в собственных движениях всех объектов Галактики (включая указанное в условии шаровое скопление) также содержится "отраженная" компонента, равная по величине и направленная противоположно скорости Солнца V_0.



Приводимый рисунок иллюстрирует движение объектов относительно Солнца в проекции на плоскость Галактики. В нем учтено, что скопление М4 находится практически на луче зрения, соединяющем Солнце с центральной областью Галактики (балджем).

Штриховыми стрелками показано отраженное движение Солнца в скоростях объектов (балджа и скопления). Пусть V_C есть скорость шарового скопления поперек луча зрения (будем считать ее положительной, если скопление движется в ту же сторону, что и Солнце в Галактике). Обозначим через R_0 расстояние от Солнца до центра Галактики (оно же – среднее расстояние до звезд балджа), а через d – расстояние от Солнца до шарового скопления. Обозначим также через $\mu_Б$ и μ_C компоненты среднего собственного движения звезд балджа и скопления соответственно относительно квазара, измеренные в направлении галактической долготы (параллельно горизонтальной оси). Из рисунка следует, что собственные движения $\mu_Б$ и μ_C составляют 6 mas/год и 23.5 mas/год соответственно (mas обозначает угловую меру, равную миллисекунде дуги). Собственные движения представляют собой угловые скорости объектов, вычисленные относительно Солнца.

Теперь, очевидно, мы можем оценить расстояние до центра Галактики из выражения для среднего собственного движения звезд балджа:

$$\mu_Б = V_0/R_0 \quad (1).$$

Аналогично вычисляется собственное движение скопления относительно квазара:

$$\mu_C = (V_0 - V_C)/d.$$

По их разности можно рассчитать один из компонентов пространственной скорости скопления (скорость вдоль галактической плоскости) V_C из выражения

$$\mu_C - \mu_Б = (V_0 - V_C)/d - V_0/R_0,$$

откуда получаем

$$V_C = V_0\,(1 - d/R_0) - d\,(\mu_C - \mu_Б) \quad (2).$$

Для расчетов необходимо оценить расстояние до скопления *d*. Для этого используем приведенную на втором рисунке диаграмму "цвет-величина". На ней указаны видимые величины в фотометрической полосе V и наблюдаемые цвета (B−V). Оценку видимого модуля расстояния $(V-M_V)$ можно выполнить тремя способами:

(а) По звездам горизонтальной ветви, абсолютная величина которых близка к $M_V(HB)\sim+1^m$. Согласно рисунку, их видимая величина приблизительно равна $V(HB)\sim+13.5^m$. Следовательно,

$$(V-M_V)_{HB} = 12.5^m.$$

(б) По ярчайшим звездам скопления − красным гигантам, абсолютная величина которых составляет примерно $M_V(RG)\sim-1^m$. К сожалению, на приведенной на рисунке диаграмме ГР виден всего 1 яркий красный гигант с $V(RG)=11.2^m$. В итоге,

$$(V-M_V)_{RG} = 12.2^m.$$

(в) По звездам вблизи точки поворота от главной последовательности в область красных гигантов, светимость котых немного превышает солнечную и для большинства шаровых скоплений близка к $M_V(TP)\sim+4^m$. Согласно рисунку, их видимая величина составляет приблизительно $V(TP)\sim17^m$. Следовательно,

$$(V-M_V)_{TP} = 13^m.$$

Разброс этих значений невелик, поэтому можно в качестве среднего из трех значений принять для видимого модуля расстояний величину $\langle V-M_V\rangle=12.5^m$. К сожалению, величину межзвездного поглощения оценить сложно, однако можно вспомнить, что звезды в точке поворота (самые голубые звезды главной последовательности) в шаровых скоплениях должны иметь нормальный цвет (неискаженный поглощением) примерно

$$(B-V)_0 = 0.4^m,$$

откуда избыток цвета можно оценить как

$$E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0 = 0.34^m,$$

а полную величину поглощения как

$$A_V = 3\,E(B-V) = 0.9^m.$$

Расстояние до скопления оценим из полного выражения для видимого модуля расстояния:

$$\langle V-M_V\rangle = 5\lg d\,(\text{пк}) - 5 + A_V.$$

Подставляя найденные величины, получаем оценку расстояния до скопления: 2 кпк. Полученная величина очень хорошо согласуется со значениям по каталогам. Если же влиянием поглощением пренебречь, расстояние оценивается в 3 кпк. Далее, из выражения (1) получаем

$$R_0 = (220\text{ км/с}) \;/\; (6\text{ mas/год}) = 7.6\text{ кпк},$$

где было учтено учитывая, что 1 км/с соответствует 10^{-6} пк/год, а 1 mas − $4.85\cdot10^{-9}$ радиан. Подставляя найденные значения и исходно заданные величины в выражение (2), получим

$$V_C = 220\text{ км/с}\,(1 - 2/7.6) - 2000\text{ пк}\,(23.5 - 6)\text{ mas/год} \cdot 4.85 \cdot 10^{-3} = -8\text{ км/с}.$$

На рисунке видно, что скопление имеет вертикальную скорость (собственное движение по галактической широте около 2 mas/год), которую можно оценить в

$$V_C\,(b) = d\,\mu_b = 2000\text{ пк } 2\text{ mas/год} \cdot 4.85 \cdot 10^{-3} = 19\text{ км/с}$$

Следовательно, полная пространственная скорость скопления (с учетом лучевой скорости V_R) составляет приблизительно

$$V = \sqrt{V_C^2 + V_C(b)^2 + V_R^2} = 73\text{ км/с}.$$

Наконец, ответим на вопрос о характерных скоростях звезд в балдже Галактики. Для этого рассмотрим рассеяние точек на первом рисунке, представляющих звезды балджа. На глаз среднее собственное движение звезд оценить сложно, однако видно, что максимальное собственное движение равно примерно 10 mas/год. Для нормального (Гауссового) распределения максимальное отклонение примерно втрое больше среднеквадратического (дисперсии), следовательно, в качестве характерного значения собственного движения можно взять 2-3 mas/год. Наблюдательные ошибки собственных движений не даны, поэтому ими придется пренебречь.

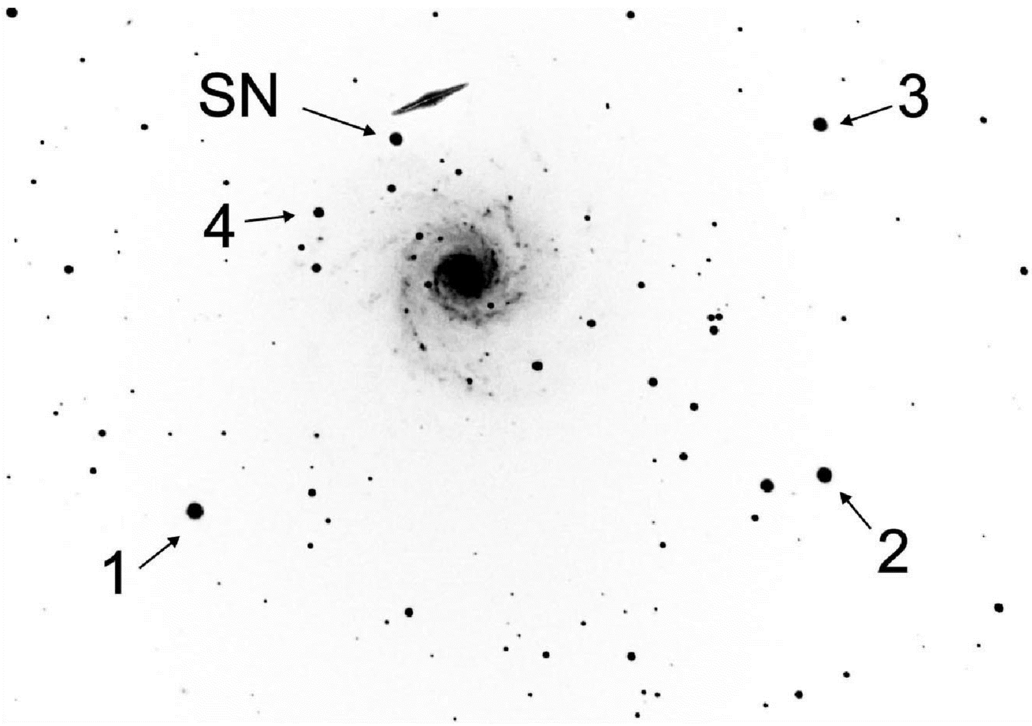
На расстоянии 7.6 кпк указанное собственное движение по одной координате соответствует линейной скорости около 70-110 км/с. Если все три пространственных направления равноправны, характерная пространственная скорость будет в $\sqrt{3}$ раза выше, т.е. около 120-190 км/с. Если ошибки измерений не учтены, то это будет, скорее всего, верхний предел характерных скоростей.

Далекая Сверхновая (А.А. Татарникова, А.М. Татарников)

Класс: 11 Задача: 3

? На рисунке (негатив, стр. 26) приведен снимок сверхновой II типа, полученный на фотопластинку в фильтре V (сверхновая отмечена стрелкой). На этом снимке цифрами от 1 до 4 обозначены фотометрические стандарты (координаты и блеск звезд даны в таблице). Определите пространственное расстояние между сверхновой и центром галактики, в которой она вспыхнула. Известно, что абсолютная звездная величина данной сверхновой равна -16^m.

№ звезды	m_V	α	δ
1	15.0	10h 30m 47.4s	18°09′41″
2	15.5	10h 30m 12.0s	18°10′12″
3	15.7	10h 30m 12.2s	18°15′10″
4	16.5	10h 30m 40.4s	18°13′54″



! Для начала необходимо выяснить, в какой из двух галактик, представленных на снимке, вспыхнула сверхновая. Речь идет о сверхновой II типа, предшественником которой является массивная молодая звезда, принадлежащая дисковой составляющей галактики. Следовательно, сверхновая не могла вспыхнуть в галактике, видимой с ребра, так как при этом она окажется очень далеко от галактической плоскости. Значит, она вспыхнула в спиральной галактике, запечатленной на снимке плашмя, причем на ее периферии, не проработавшейся на этом снимке. Искомое расстояние между сверхновой и центром галактики может послужить хорошей оценкой радиуса самой галактики.

Найдем сначала угловое расстояние α между звездой и центром галактики. Из рисунка можно получить, что оно составляет 0.45 от углового расстояния между звездами 2 и 3. Последнее, в свою очередь, равно 298″, исходя из координат звезд. В итоге, сверхновая располагается в 2.25′ от центра галактики.

Сравнивая размер изображения сверхновой звезды с размерами изображений звезд с известными величинами, оцениваем видимый блеск сверхновой: 16^m. Исходя из координат звезд, участок неба находится в созвездии Льва, вдали от Млечного Пути, и межзвездным поглощением можно пренебречь. Это позволяет найти расстояние до сверхновой и галактики в парсеках:

$$\lg r = 1 + \frac{m - M}{5}.$$

Расстояние до сверхновой получается равным 25 Мпк. При таких расстояниях еще не нужно учитывать космологические эффекты. Умножая его на угол α в радианной мере, получаем искомое расстояние между сверхновой и центром галактики: 16 кпк.