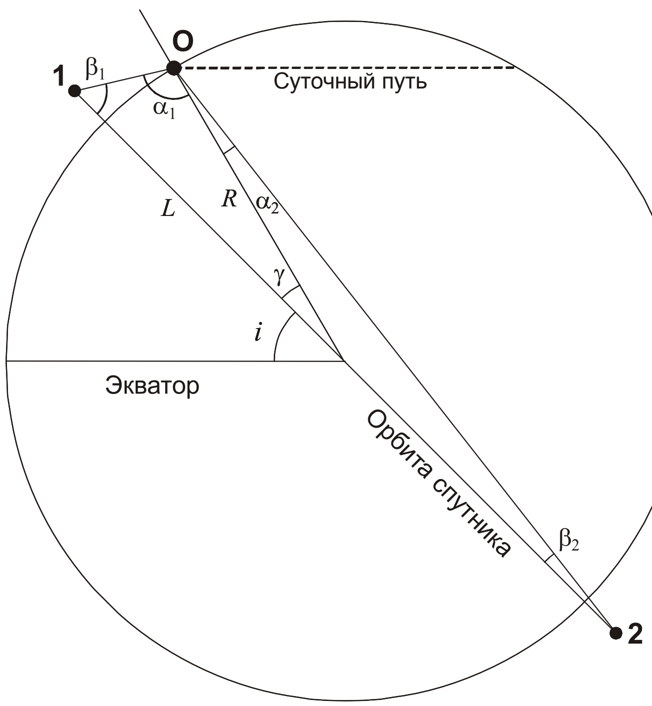
Всероссийская олимпиада школьников по астрономии
Заключительный этап – 2022 год
Первый (базовый) тур

БАЗОВЫЙ ТУР

9/10.1. СПУТНИК В НЕБЕ

Условие. Искусственный спутник Земли движется по круговой орбите. При наблюдении из некоторой точки на поверхности Земли он может располагаться на высотах от –80° (спутник под горизонтом) до +10° (спутник над горизонтом). Найдите высоту спутника над поверхностью Земли. Рефракцией пренебречь.

Решение. Изобразим Землю в плоскости, содержащей ее полюса, и перпендикулярной плоскости орбиты спутника.



Орбита спутника наклонена на некоторый угол i к плоскости экватора. Коль скоро в указанной в условии точке Земли **O** спутник не поднимается в зенит и не опускается в надир, эта точка находится на широте, по модулю большей, чем угол i. Положим для определенности, что эта точка располагается в северном полушарии, ее широта есть $i+\gamma$, причем этот угол должен быть меньше 90°. Отметим точки **1** и **2** – положения спутника, при котором он окажется на наибольшей и наименьшей высоте над горизонтом. Обратим внимание, что оба случая относятся к одному и тому же положению точки **O** в ходе ее суточного вращения, показанного пунктиром.

Обозначим как α_1 (α_2) углы между направлениями на спутник и центр Земли. Эти углы определяются высотами спутника над горизонтом:

$$\alpha_1 = 90° + h_1 = 100°;$$
$$\alpha_2 = 90° + h_2 = 10°.$$

Углы с вершинами в положениях спутника, образованные направлениями на наблюдателя и центр Земли, равны

$$\beta_1 = 180° - \alpha_1 - \gamma;$$
$$\beta_2 = 180° - \alpha_2 - (180° - \gamma) = \gamma - \alpha_2.$$

Обозначим радиус Земли как R, радиус орбиты спутника как L. Запишем выражение теоремы синусов в треугольниках «спутник – наблюдатель – центр Земли»:

$$\frac{L}{\sin\alpha_1} = \frac{R}{\sin\beta_1} = \frac{R}{\sin(\gamma+\alpha_1)};$$
$$\frac{L}{\sin\alpha_2} = \frac{R}{\sin\beta_2} = \frac{R}{\sin(\gamma-\alpha_2)}.$$

Отсюда мы получаем:

$$\frac{L}{R} = \frac{\sin\alpha_1}{\sin(\gamma+\alpha_1)} = \frac{\sin\alpha_2}{\sin(\gamma-\alpha_2)}.$$

Используя свойства пропорции во втором равенстве, имеем:

$$\sin\alpha_1 \sin(\gamma - \alpha_2) = \sin\alpha_2 \sin(\gamma + \alpha_1);$$
$$\sin\alpha_1 (\sin\gamma \cos\alpha_2 - \cos\gamma \sin\alpha_2) = \sin\alpha_2 (\sin\gamma \cos\alpha_1 + \cos\gamma \sin\alpha_1).$$
$$\sin\gamma (\sin\alpha_1 \cos\alpha_2 - \sin\alpha_2 \cos\alpha_1) = 2 \cos\gamma \sin\alpha_1 \sin\alpha_2.$$

В итоге,

$$\gamma = \mathrm{arctg}\,\frac{2\sin\alpha_1\sin\alpha_2}{\sin(\alpha_1-\alpha_2)} = 19^{\circ}.$$

Обратим внимание, что указанная в условии картина может иметь место при наклонении орбиты спутника не более 71°. Высота спутника над поверхностью Земли равна

$$H = L - R = R\cdot\left(\frac{\sin\alpha_1}{\sin(\alpha_1+\gamma)} - 1\right) = 800 \text{ км}.$$

Система оценивания.
1 этап (3 балла). Правильное представление относительной конфигурации точки наблюдения и положения спутников. Для полного оценивания этапа достаточно текстового указания, что обе ситуации соответствуют одному и тому же положению наблюдателя на своем круге суточного вращения или рисунку, где будет отражен этот факт.

Вероятная ошибка участника: предположение, что случай наименьшей высоты спутника соответствует противоположному положению наблюдателя на суточном круге. В этом случае ответ оказывается функцией угла наклона орбиты спутника к экватору или широты места наблюдения, которые в условии не заданы. Таким образом, любое конкретное численное значение радиуса орбиты или высоты спутника, полученное в решении, является либо в корне неверным, либо соответствует какому-то одному значению наклона или широты, принятому участником по ходу решения. В первом случае все решение не может быть оценено выше, чем 1 баллом. Во втором случае за все решение может быть выставлено максимум 3 балла (0 баллов за первый этап и 50% баллов за оставшееся решение как за рассмотрение частного случая), если при этом не делается иных ошибок, и полученный ответ действительно соответствует принятому допущению.

2 этап (5 баллов). Вычисление радиуса орбиты спутника либо угла γ. Ответ может быть записан численно или аналитически. Возможны разные способы выполнения этапа. В частности, можно пользоваться теоремой косинусов и получать выражения для расстояния спутника от наблюдателя, что приводит к более сложным выкладкам, но также обосновано. Допустимая погрешность вычисления угла γ составляет 0.5°, что соответствует погрешности радиуса орбиты (и итоговой высоты) около 50 км.

Возможное приближенное решение: участник указывает, что радиус орбиты спутника незначительно превосходит радиус Земли, так как максимальная высота спутника невелика. Тогда мы можем приближенно считать, что $\beta_2 = \alpha_2 = \gamma/2 = 10°$, $\gamma = 20°$, и далее $H = 870$ км. Это приводит к погрешности вдвое больше допустимой, оценка за этап составляет 3 балла из 5, последний этап засчитывается наполовину (максимальная оценка за все решение – 7 баллов).

Возможное приближенное решение: графическое построение. При данном методе участник должен правильно указать взаимные конфигурации наблюдателя и спутника, соответствующие его максимальной и минимальной высоте, в частности, что они соответствуют одному и тому же положению наблюдателя на вращающейся Земле. Фактически – это выполнение первого этапа описанного выше решение, которое также оценивается в 3 балла при наличии всех обоснований. Далее участник может построить рисунок, аналогичный приведенному выше, где вместо отрезков **O1** и **O2** будут лучи, соответствующие заданным высотам спутника, а сами точки **1** и **2** однозначно выбираются на них из условия, что серединой отрезка **12** должен быть центр Земли. Этот подход считается приближенным выполнением этапа 2 и оценивается в 4 балла из 5 при верном выполнении. Последующий третий этап (определение высоты спутника) оценивается из критериев точности, описанных ниже.

Возможная ошибка при решении: участник забывает, что углы α_1 и α_2 отсчитываются в разные стороны от радиуса-вектора наблюдателя, и считает треугольник **1O2** прямоугольным. Это должно приводить к равенству радиусов орбиты спутника и Земли и нулевой высоте. Если подобный вывод делается, то за этап выставляется 1 балл, и еще 1 балл при наличии комментария о физической неосуществимости решения. Если же в этом случае получено какое-либо другое значение высоты спутника – этап не засчитывается. Во всех этих случаях также не засчитывается последний этап решения.

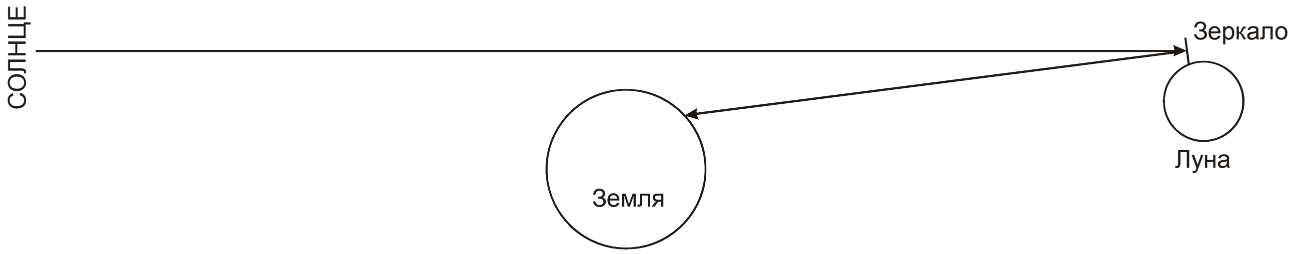
Этап 3 (2 балла) – вычисление высоты спутника. Оценивается в случае правильного ответа с допустимой погрешностью 50 км, при ошибке до 100 км выставляется 1 балл.

9.2. ЛУННЫЙ ОТРАЖАТЕЛЬ

Условие. На Луне установили отражатель – идеальное плоское зеркало, имеющее форму круга. В один момент зеркало отразило свет Солнца на Землю. При наблюдении с Земли в максимуме яркости пятно на Луне имело такую же звездную величину, как расположенный рядом на небе Юпитер в противостоянии. Определите диаметр зеркала. В момент наблюдений Земля Луну и зеркало не затеняла. Орбиты Луны и планет считать круговыми, потемнение диска Солнца к краю не учитывать.

Решение. Луна расположена существенно ближе к нам, чем Солнце, а отраженное изображение Солнца будет таким же по поверхностной яркости, как и сам диск Солнца. Но угловые размеры зеркала существенно меньше угловых размеров Солнца, поэтому пятно будет существенно слабее Солнца в небе Земли.

Коль скоро рядом с Луной располагается Юпитер в противостоянии с Солнцем, дело происходило в полнолуние, когда Земля и Солнце располагаются с одной стороны от Луны, но при этом Земля зеркало не затеняет. В этом случае свет Солнца, чтобы отразиться на Землю, должен падать под малым углом к нормали зеркала, и с Земли оно наблюдается «плашмя». В этом случае угловой радиус зеркала при наблюдении с Земли равен



$$\rho = r / l,$$

где r – радиус зеркала, l – расстояние от Земли до Луны. Угловой радиус Солнца есть

$$\rho_0 = R / L,$$

где R – радиус Солнца, L – расстояние от Солнца до Земли. Соотношение видимых площадей зеркала и Солнца есть

$$\eta = \frac{\pi\rho^2}{\pi\rho_0^2} = \frac{r^2L^2}{R^2l^2}.$$

По условию задачи, зеркало светит как Юпитер со звездной величиной m = –2.7 (величина приведена в справочных данных). Видимая звездная величина Солнца есть m_0 = –26.8. Запишем формулу Погсона:

$$m = m_0 - 2.5\lg\eta = m_0 - 5\lg\frac{rL}{Rl}.$$

Отсюда получаем диаметр зеркала:

$$d = 2r = \frac{2Rl}{L}\cdot 10^{0.2(m_0 - m)} = 54 \text{ м}.$$

Система оценивания:

1 этап (2 балла): вывод, что картина наблюдается в полнолуние, и зеркало повернуто плашмя к Солнцу и Земле. Вывод должен быть записан в текстовом виде или графически (рисунок с правильным расположением всех тел).

2 этап (4 балла): выражение для яркости отражения Солнца в зеркале. Проще всего его сделать через видимую площадь зеркала, хотя участники могут использовать и другие методы (например, записывать выражения для соответствующих потоков световой энергии, см. ниже). Величину углового радиуса или диаметра Солнца участники могут брать как известную, могут вычислять ее. Уменьшение расстояния до Луны за счет размеров Земли, если Луна находится вблизи зенита, изменяет итоговый ответ на 1 метр и не является обязательным для учета.

3 этап (4 балла): определение диаметра зеркала, точность 5 метров. При ошибке в 2 раза, вызванной путаницей понятий радиуса и диаметра, оценка уменьшается на 2 балла.

Альтернативный путь решения (2-3 этапы): расчет производится через энергетические величины. Участник может указать, что количество энергии, отражаемое зеркалом за секунду, есть $F_0 \cdot \pi r^2$, где F_0 – плотность энергии от Солнца на расстоянии Земли и Луны. Далее можно указать, что около Земли эта энергия будет распределена по кругу с радиусом $l\rho_0$. Следовательно, плотность потока энергии от зеркала на Земле есть

$$F = F_0 \cdot \pi r^2 / \pi l^2 \rho_0^2 = F_0 \cdot r^2 / l^2 \rho_0^2 = F_0 \cdot r^2 L^2 / l^2 R^2,$$

что эквивалентно полученным выше соотношениям и соответствует выполненному второму этапу. Расчет звездных величин аналогичен, весь подход при правильном выполнении оценивается полностью.

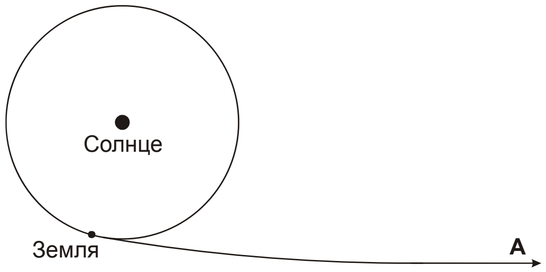
9/10.3. ПОСЛАНИЕ ЦИВИЛИЗАЦИЯМ

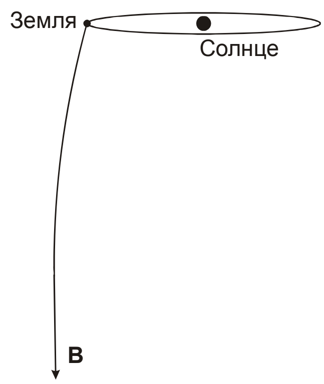
Условие. Астрономы открыли обитаемые планеты у двух далеких звезд. Одна из них (звезда A) располагалась на небе на эклиптике, другая (звезда B) – в полюсе эклиптики. Расстояние до обеих звезд оказалось одинаковым, звезды были неподвижны относительно Солнца. Было принято решение отправить к ним одинаковые космические аппараты с посланием от землян. Технические возможности позволяли отправить аппарат с Земли, придав ему стартовую геоцентрическую скорость ровно 54 км/с, далее он летел без двигателей, не встречаясь ни с какими другими телами на своем пути. Какая из двух обитаемых планет может быть достигнута аппаратом быстрее при оптимальном расчете траектории и во сколько раз? Орбиту Земли считать круговой, влиянием атмосферы Земли пренебречь.

Решение. Обозначим стартовую скорость аппарата как u_S. После запуска аппарату будет необходимо преодолеть притяжение Земли. Из закона сохранения энергии мы можем получить величину геоцентрической скорости аппарата, когда он выйдет из сферы действия Земли:

$$u_E = \sqrt{u_S^2 - u_P^2} = 52.8 \text{ км/с}.$$

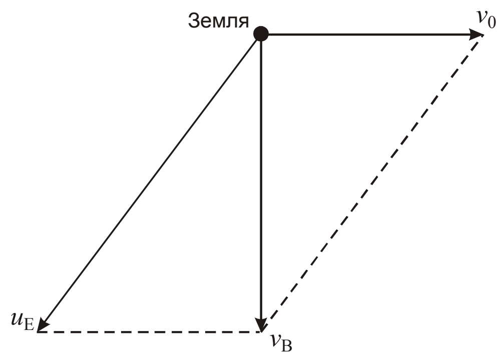
Здесь u_P – параболическая (вторая космическая) скорость для Земли, равная 11.2 км/с. Выйдя из сферы действия Земли, аппарат начнет движение по Солнечной системе. Его гелиоцентрическая скорость будет зависеть от направления движения относительно Земли и Солнца. Для полета к звезде A на эклиптике оптимально запустить аппарат так, чтобы его геоцентрическая скорость сложилась с орбитальной скоростью Земли v_0 = 29.8 км/с (рисунок слева).





Гелиоцентрическая скорость первого аппарата будет равна $v_A = u_E + v_0 = 82.6$ км/с. Со вторым аппаратом ситуация сложнее (правый рисунок сверху). Чтобы достичь звезды в полюсе эклиптики, он должен выйти на полярную орбиту, перпендикулярную плоскости эклиптики в Солнечной системе.

Обратим внимание, что из-за притяжения Солнца орбита аппарата не является прямой линией, и он не должен сразу отправляться в направлении полюса эклиптики. Тем не менее, для выхода на полярную орбиту его гелиоцентрическая скорость должна быть перпендикулярной гелиоцентрической скорости Земли. Рисунок справа изображен в плоскости, содержащей эти две гелиоцентрические скорости (но не в плоскости, перпендикулярной эклиптике).



Чтобы гелиоцентрическая скорость аппарата была направлена перпендикулярно движению Земли, его придется запускать с Земли несколько «назад» по отношению к движению нашей планеты. В итоге, гелиоцентрическая скорость аппарата составит:

$$v_{\mathrm{B}} = \sqrt{u_{\mathrm{E}}^2 - v_0^2} = \sqrt{u_{\mathrm{S}}^2 - u_{\mathrm{P}}^2 - v_0^2} = 43.6\ \text{км}/\text{с}.$$

Такими будут гелиоцентрические скорости аппаратов вблизи Земли. Далее им предстоит преодолеть притяжение Солнца. Вновь пользуясь законом сохранения энергии, определяем скорости аппаратов при их вылете из Солнечной системы:

$$v_{\mathrm{AB0}} = \sqrt{v_{\mathrm{AB}}^2 - v_{\mathrm{P}}^2} = \sqrt{v_{\mathrm{AB}}^2 - 2v_0^2}.$$

Здесь v_{P} – параболическая скорость относительно Солнца на расстоянии Земли. В итоге, мы получаем скорости, с которыми аппараты будут двигаться к далеким звездам:

$$v_{\mathrm{A0}} = \sqrt{(u_{\mathrm{E}} + v_0)^2 - 2v_0^2} = \sqrt{u_{\mathrm{E}}^2 + 2u_{\mathrm{E}}v_0 - v_0^2} = \sqrt{u_{\mathrm{S}}^2 - u_{\mathrm{P}}^2 + 2v_0\sqrt{u_{\mathrm{S}}^2 - u_{\mathrm{P}}^2} - v_0^2} = 71.1\ \text{км}/\text{с}.$$

$$v_{\mathrm{B0}} = \sqrt{u_S^2 - u_P^2 - 3v_0^2} = 11.2\ \text{км}/\text{с}.$$

Скорость аппарата, летящего к звезде A, после вылета из Солнечной системы будет примерно в 6.3 раза больше, чем скорость аппарата, летящего к звезде B, соответственно, планета у звезды A может быть достигнута в 6.3 раза быстрее.

Система оценивания. Итоговая оценка участника будет определяться теми факторами, которые он учтет при расчете скорости аппаратов при их движении к звездам. При пропуске или неверном учете того или иного фактора данный этап не засчитывается, учет последующих факторов проводится в полной мере. Финальный этап оценивается исходя из полученного результата.

Фактор 1 (2 балла) – притяжение Земли. В реальности, оно мало влияет на движение аппарата, отправляющегося к звезде A, и даже не является обязательным для этого аппарата. В то же время, для аппарата, летящего к звезде B, учет важен. Как мы можем видеть из последней формулы решения, его пропуск даст в итоге скорость v_{B0}, равную 15.9 км/с, и соотношение времен достижения звезд около 4.5.

Фактор 2 (4 балла) – учет движения Земли. Результатом учета должны быть правильные численные или аналитические выражения для гелиоцентрической скорости аппаратов относительно Солнца вблизи Земли (по 2 балла за каждый аппарат).

Возможная ошибка участника: предположение, что аппарат B нужно просто запустить перпендикулярно движению Земли, и его гелиоцентрическая скорость будет равна геоцентрической либо даже превышать ее. 2 балла, связанные с анализом данного этапа, не выставляются.

Фактор 3 (2 балла) – учет притяжения Солнца. Результатом учета должны быть правильные численные или аналитические выражения для гелиоцентрической скорости аппаратов относительно Солнца при вылете из Солнечной системы (по 1 баллу за каждый аппарат).

Финальный этап (2 балла) – определение соотношения времен достижения звезд. Этап оценивается, если сделан вывод, что звезда A будет достигнута раньше, а соответствующее соотношение времен окажется в интервале от 6 до 7. При большей погрешности, если в ответе участника звезда A достигается раньше, а отношение оказывается больше 4 (не ограничено сверху), этап оценивается 1 баллом. При иных выводах (в том числе в случае недостижимости звезды B) этап не оценивается.

9.4. СПАСЕНИЕ ПЛАНЕТЫ

Условие. В фантастическом сериале «Доктор Кто» главный герой, чтобы спасти свою планету – Галлифрей, переместил ее в пространстве к другой звезде. Каковы должны быть параметры орбиты, чтобы диапазон температур за местный год оставался таким же? Какова будет продолжительность года в этом случае (в земных годах)? Параметры родной системы Галлифрея: масса звезды M_1 = 2.5 M_0, радиус звезды R_1 = 1.84 R_0, температура поверхности звезды T_1 = 10700 K, большая полуось орбиты a_1 = 5.4 а.е., эксцентриситет $e_1 = 0.3$. Параметры новой звезды: M_2 = 0.5 M_0, R_2 = 0.15 R_0, T_2 = 3500 K. Индекс «0» относится к Солнцу. Считать, что альбедо и парниковые свойства атмосферы планеты не зависят от спектрального состава излучения звезды и не изменяются при перемещении планеты, масса планеты существенно меньше масс каждой из звезд.

Решение. Для того, чтобы тепловой режим на планете оставался неизменным, таким же должен оставаться поток энергии от звезды на расстоянии планеты L. Этот поток равен

$$F = \frac{J}{4\pi L^2} = \frac{4\pi\sigma R^2 T^4}{4\pi L^2} = \frac{\sigma R^2 T^4}{L^2}.$$

Расстояние до планеты L в ходе орбитального периода меняется от $a\,(1 - e)$ до $a\,(1 + e)$, и для сохранения диапазона температур эксцентриситет орбиты планеты e должен остаться тем же: $e_2 = e_1 = 0.3$. Для сохранения средней температуры должен сохраняться средний поток, который определяется предыдущей формулой с подстановкой большой полуоси a в качестве расстояния L. Таким образом, мы имеем:

$$\frac{R_1^2 T_1^4}{a_1^2} = \frac{R_2^2 T_2^4}{a_2^2}; \quad a_2 = a_1 \frac{R_2 T_2^2}{R_1 T_1^2} = 0.047 \text{ а.е.}$$

Нам остается найти новую продолжительность года. Это можно сделать из III закона Кеплера, выражая большую полуось в астрономических единицах, массу – в массах Солнца:

$$t = \left(\frac{a^3}{M}\right)^{1/2} = 0.014 \text{ лет}.$$

Система оценивания:

Этап 1 (1 балл): указание, что эксцентриситет орбиты планеты должен остаться без изменений и составить 0.3.

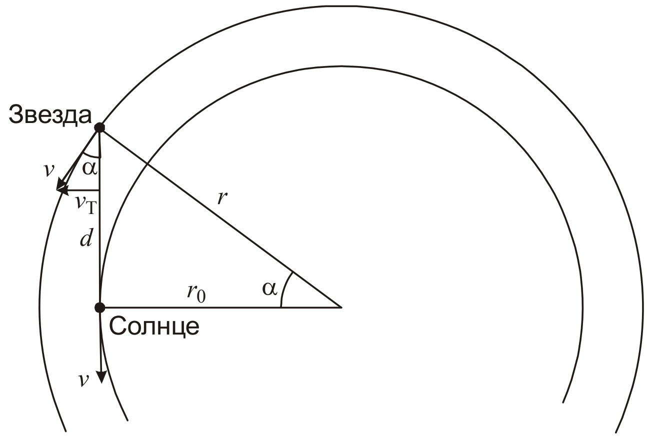
Этап 2 (5 баллов): определение большой полуоси новой орбиты планеты, точность 0.005 а.е. При проверке жюри необходимо обратить внимание на правильность учета температур и радиусов звезд, которые должны соотноситься с величиной большой полуоси в нужных степенях.

Этап 3 (4 балла): определение нового периода обращения планеты в годах, точность 0.003 года.

9/10.5. В ДИСКЕ ГАЛАКТИКИ

Условие. Некоторая звезда наблюдается в небе Земли в Млечном пути, в 90° от центра Галактики. Ее собственное движение на небе направлено вдоль Млечного пути и составляет 0.0050″ в год. Считая, что звезды в диске обращаются по круговым траекториям в одной плоскости в одном направлении со скоростью 230 км/с, не зависящей от расстояния до центра Галактики, определите расстояние от Солнца до звезды. Солнце удалено от центра Галактики на 8.5 кпк.

Решение. Звезда расположена в 90° от центра Галактики на небе Земли, следовательно, она располагается дальше в Галактике от ее центра, чем Солнце. Обозначим радиусы орбит Солнца и звезды в Галактике как r и r_0.



Скорость Солнца направлена в пространстве от звезды (либо к ней), и на видимое собственное движение звезды не влияет. Скорость звезды направлена под углом α к направлению на Солнце. Угловая скорость звезды при наблюдении с Солнца равна

$$\omega = \frac{v_T}{d} = \frac{v \sin\alpha}{r_0 \mathrm{tg}\alpha} = \frac{v}{r_0}\cos\alpha .$$

Обратим внимание, что эта угловая скорость равна угловой скорости движения звезды вокруг центра Галактики (v/r). Расстояние от Солнца до звезды есть

$$d = r_0 \mathrm{tg}\alpha = \frac{\sqrt{v^2 - \omega^2 r_0^2}}{\omega} \approx 4.7 \text{ кпк.}$$

Здесь угловую скорость (собственное движение) звезды ω необходимо выразить в радианах в секунду ($8 \cdot 10^{-16}$ рад/с), а расстояние до центра Галактики r_0 – в километрах ($2.5 \cdot 10^{17}$ км).

Система оценивания. Данное задание может решаться разными способами. По аналогии с конфигурациями планет, можно указать, что данная звезда является «внешней» по отношению к Солнцу и в указанный момент находится в квадратуре, тогда как Солнце по отношению к ней – в наибольшей элонгации. В этом случае угловая скорость Солнца в небе этой звезды (равная угловой скорости звезды в небе Солнца) совпадает с угловой скоростью центра Галактики, что сразу приводит нас к первой формуле решения, приведенного выше. Общая структура решения разбивается на следующие этапы:

1 этап (5 баллов) – связь угловой скорости движения звезды в нашем небе с пространственной скоростью звезд и расстоянием от центра Галактики до звезды (или до Солнца). Данная связь может быть выражена аналитически или численно или в явном виде следовать из выкладок участника. В случае ошибочной связи (например, иная функция угла α в виде множителя в первой формуле) за этап выставляется 3 балла, если ошибка не превышает 2 раз. Если же ошибка больше, а угловая скорость не равна отношению (v/r_0), умноженному на фактор, определяемым углом α – этап не засчитывается.

2 этап (5 баллов) – вычисление расстояния до звезды. Для выставления максимальной оценки значение, округленное до целых килопарсек, должно составлять 4 или 5. Если округленный до целых килопарсек ответ составляет 3 или 6 при правильном ходе решения, оценка за этап уменьшается до 4 баллов.

При больших ошибках жюри нужно обращать внимание на соотношение величин v и ωr_0 в решении участника, квадраты которых вычитаются в верном решении, приведенном выше. Если в результате численных ошибок у участника фактически получается соотношение $v \gg \omega r_0$ и, как следствие, $d = v/\omega \approx 10$ кпк, то оценка за этап не превышает 2 баллов и еще уменьшается при наличии иных ошибок.

В противоположном случае, при $v < \omega r_0$ участник должен прийти к выводу об отсутствии решения задачи. Оценка за этап в этом случае составляет 1 балл и уменьшается далее до нуля, если при подобном соотношении участник все же находит какое-то решение задания.

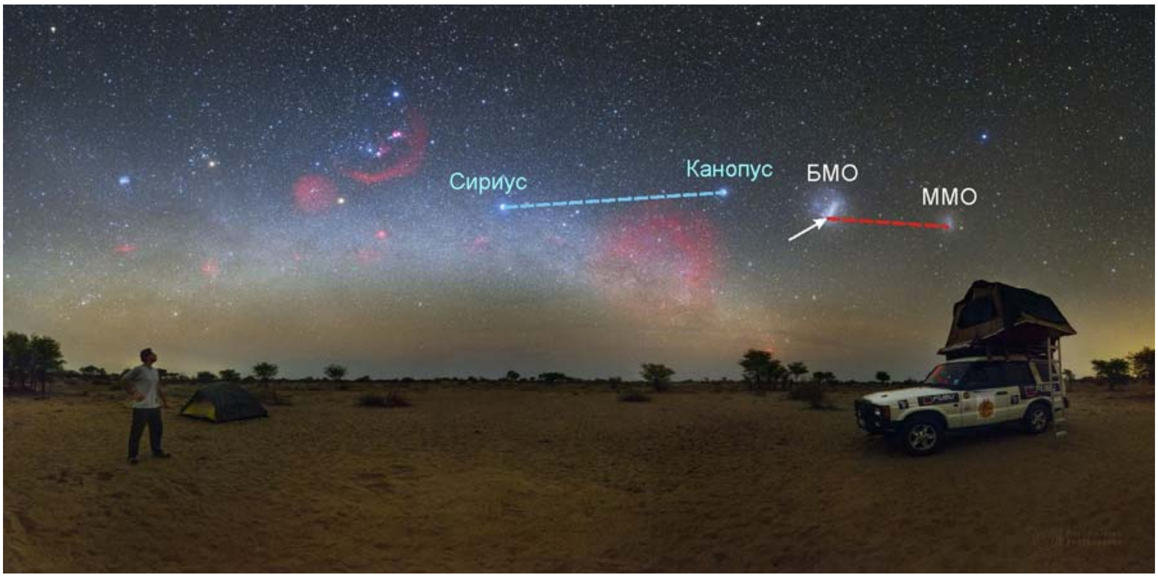
Если же величины v и ωr_0 (либо v/w и r_0) входят в выражение для расстояния не в виде разности квадратов (теорема Пифагора), а в ином виде (например, суммы или разности) – второй этап полностью не засчитывается.

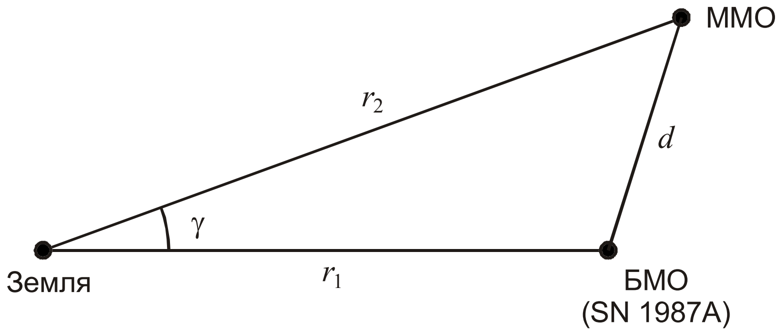
9.6. ДОМ ПОСЛЕДНЕЙ СВЕРХНОВОЙ

Условие. Перед Вами фото звездного неба (автор – Петр Горалек), в правой части которого видны Магеллановы облака – спутники нашей Галактики. В Большом Магеллановом облаке, в точке неба, помеченной стрелкой, в 1987 году наблюдалась последняя по сей день Сверхновая звезда, видимая невооруженным глазом: ее блеск достиг 3^m. Определите, каким был максимальный блеск этой Сверхновой при наблюдении из Малого Магелланова облака, которое находится на 20% дальше от нас, чем Большое. Межзвездным поглощением света пренебречь. В таблице приведены экваториальные координаты ярких звезд неба, попавших на фотографию. Неоднородность масштаба фотографии не учитывать.

Звезда	α (2000.0)	δ (2000.0)	Созвездие
Альдебаран	04ч 36м	+16.5°	Телец
Ахернар	01ч 38м	–57.2°	Эридан
Бетельгейзе	05ч 55м	+7.4°	Орион
Канопус	06ч 24м	–52.7°	Киль
Ригель	05ч 15м	–8.2°	Орион
Сириус	06ч 45м	–16.7°	Большой Пес

Решение. Данные о звездах нам нужны для того, чтобы определить масштаб фото и вычислить угловое расстояние между Магеллановыми облаками. В принципе, для этого достаточно пары звезд, которые не находились бы слишком близко друг к другу. Удобнее всего использовать две ярчайшие звезды ночного неба: Сириус и Канопус. Они имеют близкое прямое восхождение (разница $\Delta\alpha$=21 мин или чуть более 5°), а склонения отличаются на $\Delta\delta$=36°. Поэтому с точностью, достаточной для оценок в данной задаче, можно считать угловое расстояние между ними равным $\Delta\delta$ (погрешность будет меньше 0.5°). Соединяя одним (синим) отрезком Сириус с Канопусом, а другим (красным) место Сверхновой в Большом Магеллановом облаке с центром Малого Магелланова облака, мы получаем, что длина красного отрезка составляет примерно 0.55 от длины синего отрезка, а значит, искомое угловое расстояние составляет $\gamma=36°\cdot 0.55\approx 20°$. Погрешность в данном случае не превосходит 2-3°.





Расстояния до Магеллановых облаков нам в условии не заданы, но известно их соотношение r_2/r_1=1.2. Это позволяет нам найти расстояние между галактиками в относительных единицах:

$$d = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\gamma} = 0.43 \cdot r_1.$$

Звездная величина m_0 с расстояния r_1 нам известна. Пренебрегая межзвездным поглощением, находим звездную величину Сверхновой с расстояния d:

$$m = m_0 + 5\ \lg\,(d/r_1) \approx 1.$$

Несмотря на визуальное соседство галактик, Сверхновая в БМО не выглядела из ММО исключительно яркой.

Система оценивания:

1 этап (4 балла): определение углового расстояния между галактиками на небе. Определяется правильностью выбранного метода и точностью результата. Допустимая погрешность – 3° (при использовании пары Сириус-Канопус результат составляет 20°, Бетельгейзе-Ригель – 19°). Далее оценка уменьшается на 1 балл за каждые 3° дополнительной погрешности.

2 этап (4 балла): определение пространственного расстояния между галактиками. Приближенное вычисление расстояний $d = r_1\gamma$ или $d = 0.2r_1$ "в обход" теоремы косинусов оцениваются в 1 балл (во втором из этих случаев фактически не выполняется и не оценивается и первый этап). Требуемая точность (без учета погрешностей предыдущих этапов) составляет 20%.

3 этап (2 балла): определение звездной величины Сверхновой из Малого Магелланова облака. Ввиду оценочного характера задачи точность в 1^m является вполне достаточной. Ошибки на предыдущих этапах не являются основанием для снижения оценки за этот этап, при условии, что в предыдущих этапах было получено неабсурдное значение d (не менее $0.1r_1$ и не более r_1), а на этом этапе получена звездная величина, соответствующая найденному значению d.