IX/X.4 ПОИСКИ ДАЛЕКОЙ ПЛАНЕТЫ

О.С. Угольников

Условие. В настоящее время ведутся поиски возможной девятой планеты Солнечной системы, которая может иметь диаметр в 10 диаметров Земли и располагаться в 280 а.е. от Солнца. Астероид какого диаметра в главном поясе будет иметь такую же яркость на Земле в противостоянии, как и эта планета? Отражательную способность поверхности астероида считать аналогичной лунной, а планеты – аналогичной Нептуну. Оба тела располагаются в плоскости эклиптики.

Решение. Пусть тело имеет диаметр D и сферическое альбедо A и обращается вокруг Солнца по круговой орбите на расстоянии L от него. Тогда плотность потока солнечной энергии около этого объекта составит $J/4\pi L^2$, где J – светимость Солнца. Перехватывая эту энергию площадью $\pi D^2/4$, тело будет отражать в пространство ее часть, соответствующую альбедо A. Будем считать, что свет телом отражается изотропно. Так как тело при наблюдении с Земли находится в противостоянии с Солнцем, его расстояние от Земли равно $(L - L_0)$, где L_0 – расстояние от Земли до Солнца. В итоге, плотность потока энергии от тела на Земле составит

$$j = \frac{J}{4\pi L^2} \cdot \frac{\pi D^2 A}{4} \cdot \frac{1}{4\pi (L - L_0)^2} = \frac{J D^2 A}{64\pi L^2 (L - L_0)^2}.$$

Сравним теперь астероид главного пояса (индекс 1) и гипотетическую девятую планету Солнечной системы (индекс 2). Так как нас не интересуют абсолютные значения яркости, мы можем выражать расстояния в астрономических единицах, и тогда L_0=1, а также опустить все константы в предыдущем выражении. Условие одинакового видимого блеска на Земле выражается как

$$\frac{D_1^2 A_1}{L_1^2 (L_1 - 1)^2} \quad \frac{D_2^2 A_2}{L_2^2 (L_2 \quad 1)^2}.$$

Отсюда мы получаем выражение для диаметра астероида

$$D_1 = D_2 \frac{L_1 (L_1 \quad 1)}{L_2 (L_2 \quad 1)} \sqrt{\frac{\ _2}{\ _1}}.$$

В качестве расстояния от Солнца до главного пояса астероидов L_1 возьмем 2.8 а.е. или $L_2/100$. Величина D_1 оказывается равной 15 км.

Система оценивания (от одного члена жюри). Основой решения задачи является зависимость яркости планеты в противостоянии от ее диаметра, альбедо и расстояния от Солнца. Она может быть выведена или взятая как известная, ее правильная полная запись оценивается в 4 балла. Если при этом не учтен фактор альбедо, оценка снижается на 2 балла, но дальнейшие вычисления (с ответом около 7-8 км) оцениваются в полной мере.

Если неверно учтена зависимость от расстояния L – опущен один из множителей L или $(L–1)$ и получен ответ около 2000 км – за все решение выставляется не более 2 баллов. Если зависимости получены правильно, но опущено слагаемое «–1», то это не является ошибкой для планеты, но уменьшает оценку на 2 балла в случае астероида. В качестве расстояния от Солнца до главного пояса астероидов участники могут брать величины от 2.0 до 3.3 а.е, в противном случае оценка уменьшается на 2 балла. При выходе астероида из пространства между орбитами Марса и Юпитера оценка уменьшается на 4 балла.

Вычисление диаметра астероида оценивается еще в 4 балла. Если при решении диаметр путается с радиусом – оценка уменьшается на 2 балла.

X/XI.1 НАЗЕМНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Е.Н. Фадеев

Условие. В фокальной плоскости телескопа с диаметром объектива 20 см изображение звезды выглядит в виде равномерно засвеченного пятна диаметром 20 мкм. Установленная в фокальной плоскости ПЗС-матрица фиксирует, что в пятне звезды регистрируется в 40 раз больше квантов света, чем в таком же по площади участке фона. Определить звездную величину звезды и относительное отверстие телескопа. Диаметр атмосферного диска дрожания точечного источника равен 2″, а яркость фона неба составляет 4.5^m с квадратного градуса.

Решение. Звезда – точечный источник. В условии сказано, что из-за влияния атмосферы каждая точка видна в виде диска с угловым диаметром 2″ или 10^{-5} радиан. Линейный диаметр изображения объекта в фокальной плоскости a связан с его угловым размером α по формуле:

$$\alpha = a/f.$$

Здесь f – фокусное расстояние объектива, которое получается равным 2 м. Относительное отверстие – размер апертуры, выраженный в ее фокусных расстояниях (отношение диаметра объектива к фокусному расстоянию), оно равно 1/10 ($f/10$).

Для ответа на второй вопрос надо заметить, что изображение звезды формируется не только светом звезды, но и фоном. Однако, по условию задачи звезда в 40 раз ярче, поэтому вклад фона в изображение звезды можно не учитывать. С площади диска дрожания звезды, равного $\pi\alpha^2/4$ или $2.4\cdot10^{-7}$ квадратного градуса, фон будет давать звездную величину

$$m = 4.5 - 2.5 \lg 2.4\cdot10^{-7} = 21.$$

Изображение от звезды в 40 (если быть совсем точным, то в 39) раз ярче, что соответствует разнице в 4 звездных величины. Итак, звезда имеет блеск 17^m.

Система оценивания (от одного члена жюри). Решение задачи разбивается на две независимые части, которые могут выполняться в произвольном порядке. Каждая из них оценивается в 4 балла. Одна из них связана с определением относительного отверстия. Для этого необходимо найти фокусное расстояние объектива, что оценивается в 2 балла. Окончательный вывод оценивается еще в 2 балла.

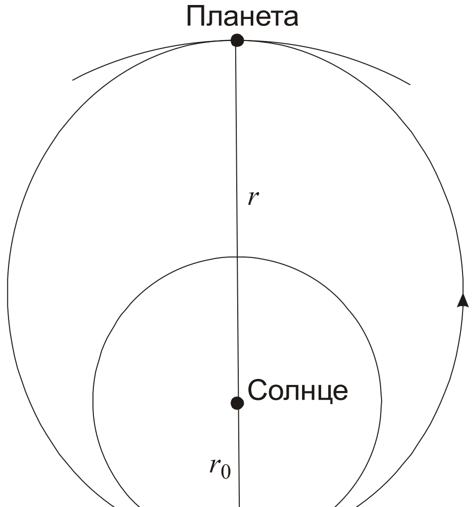
Вторая часть решения связана с вычислением звездной величины звезды. Для этого нужно определить площадь, занимаемую изображением звезды в произвольных единицах, что оценивается в 1 балл. Он не выставляется при отсутствии множителя ($\pi/4$) или при сложении радиуса с радиусом кружка Эри (0.7″). Далее находится звездная величина фона с этой площади (2 балла) и, наконец, звездная величина звезды (1 балл). Альтернативный порядок действий предусматривает вычисление звездной величины фона с квадратной секунды (2 балла), звездной величины звезды с квадратной секунды (1 балл) и полной звездной величины звезды (1 балл). Ошибки, сделанные на начальных этапах, могут приводить к снижению оценок за последующие этапы в случае существенного расхождения численного ответа с правильным.

X.2 КОРОТКИЙ ВИЗИТ

О.С. Угольников

Условие. Аппарат совершил перелет с Земли к некоторой другой большой планете Солнечной системы по энергетически оптимальной траектории. Пролетев рядом с планетой, он сразу же отправился в обратный путь к Земле. В течение всей миссии аппарат, не включая двигателей, совершил один оборот вокруг Солнца и вернулся на нашу планету в точке старта миссии. Для какой ближайшей к Солнцу планеты такое возможно? Орбиту Земли считать круговой, действие планеты на аппарат не учитывать.

Решение. Как известно, энергетически оптимальная траектория – эллипс, перигелий которого располагается на орбите Земли, афелий – на орбите планеты. Коль скоро аппарат после сближения с планетой продолжил движение по той же орбите и достиг Земли в той же точке, в которой он стартовал, можно сделать вывод, что весь полет занял целое число лет. Очевидно, что это невозможно в случае полета к внутренней планете, так как в этом случае полет занял бы меньше года. Нам необходимо рассмотреть случай внешней планеты. Изобразим схему всей миссии:



Обозначим расстояние от Солнца до планеты (в астрономических единицах) через r. Большая полуось орбиты аппарата равна $(r+1)/2$, а время всей миссии, выраженное в годах, составляет:

$$t = \left(\frac{r+1}{2}\right)^{3/2} = N.$$

Здесь N – целое число. Выражая t через N, получаем:

$$r = 2N^{2/3} - 1.$$

Определим величину r для целых значений N:

t, годы	r, а.е.	t, годы	r, а.е.
1	1.00	7	6.32
2	2.17	8	7.00
3	3.16	9	7.65
4	4.04	10	8.28
5	4.85	11	8.89
6	5.60	**12**	**9.48**

Мы видим, что подобный полет не мог происходить к Марсу (диапазон расстояний r от 1.38 до 1.67 а.е.) и к Юпитеру (от 4.95 до 5.45 а.е.). А вот к Сатурну такая миссия возможна, так как он может располагаться в 9.48 а.е. от Солнца. Весь полет туда и обратно занял бы 12 лет.

Система оценивания (от одного члена жюри). В начале решения участники олимпиады должны указать (текстом и рисунком), что вся траектория аппарата во время миссии есть эллипс с точкой перигелия у орбиты Земли и точкой афелия у орбиты планеты. Этот вывод оценивается в 1 балл. Выражение для продолжительности миссии в годах оценивается еще в 3 балла. Решение уравнения и нахождение ближайшей возможной планеты оценивается в 4 балла. Этот анализ должен включать в себя внутренние планеты или содержать вывод, почему для них эта ситуация невозможна, в противном случае за третий этап выставляется не более 2 баллов. Если числа $r(N)$ получены верно, но планета не определена правильно из-за ошибок в вычислениях диапазонов расстояний (либо вообще не учтены эксцентриситеты), то оценка за 3 этап составляет не более 1 балла.

X/XI.3 НЕЙТРИННЫЙ ДЕТЕКТОР

С.Г. Желтоухов

Условие. Оцените длину свободного пробега нейтрино малых энергий в галлии, если нейтринный детектор, содержащий 60 тонн галлия, позволит регистрировать одно низкоэнергетическое солнечное нейтрино в сутки. При превращении четырех протонов в атом гелия выделяется 26.8 МэВ энергии и два нейтрино энергией примерно 0.3 эВ каждое. Плотность галлия составляет 6 г/см^3.

Решение. Пусть один атом галлия взаимодействует с нейтрино в том случае, если оно пролетает на расстоянии не больше r от центра атома. Другими словами, атом «перехватывает» нейтрино площадью $\sigma=\pi r^2$, которая называется эффективным сечением взаимодействия. Если нейтрино за малое время Δt пролетает со скоростью света c путь $\Delta l = c\Delta t$, то малая вероятность его взаимодействия с атомом равна среднему числу атомов в трубке длиной Δl и сечением σ:

$$\Delta P = N\,\sigma\,\Delta l = N\,\sigma\,c\,\Delta t.$$

Здесь N – концентрация атомов. Длина свободного пробега l – такое расстояние, на котором ожидаемое число встреченных атомов достигнет единицы:

$$l = 1 / N\sigma.$$

Пусть на Землю летят солнечные нейтрино с плотностью потока F (количество нейтрино, пролетающее через площадку 1 м^2 за 1 сек, размерность м$^{-2}$сек$^{-1}$). Тогда объемная концентрация нейтрино будет равна

$$n = F / c.$$

Обозначим объем галлиевого детектора как V. В любой момент времени количество нейтрино внутри детектора будет равно nV. Суммарный путь, пройденный всеми этими нейтрино за время T, составит

$$L = n\,V\,c\,T = F\,V\,T.$$

Если за время T фиксируется только одно взаимодействие, значит, суммарный путь L равен длине свободного пробега l, которую нам и нужно найти. Объем детектора есть отношение его массы M к плотности r и составляет 10 м^3 (значение плотности нужно перевести в систему СИ), время T также известно. Остается найти плотность потока нейтрино F.

Самый простой способ сделать это следующий. Нам известно, что за один цикл протон-протонных реакций выделяется энергия

$$E = 2.68 \cdot 10^{7} \text{ эВ} = (2.68 \cdot 10^{7} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}) \text{ Дж} = 4.29 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

При этом же выделяются два нейтрино. И нейтрино, и энергия Солнца распространяются от Солнца изотропно. В итоге, каждому нейтрино соответствует энергия $E/2$. Зная плотность потока энергии от Солнца на Земле (солнечную постоянную) F_S, мы находим плотность потока нейтрино:

$$F = \frac{F_S}{E/2} = 6.34 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}.$$

В итоге, длина свободного пробега оказывается равной

$$L = F\,M\,T / \rho = 5.5 \cdot 10^{20} \text{ м} = 18 \text{ кпк}.$$

Получается, чтобы зафиксировать все солнечные нейтрино, нужен галлиевый детектор с такой же плотностью и размером порядка нашей Галактики! К счастью, для нейтрино высоких энергий вероятность их реакции с веществом сильно возрастает, что облегчает их регистрацию.

Система оценивания (от одного члена жюри). Решение задания разделяется на два основных этапа, которые могут выполняться в разной последовательности. Первый этап состоит в вычислении плотности потока нейтрино вблизи Земли. Она может быть определена как числом, так и математическим выражением, которое подставляется далее для получения окончательного ответа. Плотность потока можно вычислять через солнечную постоянную (как сделано выше), так и через величину полного количества нейтрино, выделяемого Солнцем в единицу времени. Весь этап оценивается в 4 балла. Если при решении делается ошибка в связи светимости и темпа испускания нейтрино (например, в 2 раза в процессе анализа протон-протонной реакции), то за этот этап выставляется только 2 балла, но оставшееся решение оценивается в полной мере. Более грубые ошибки (в частности, как результат неверного перевода единиц величин) могут быть основанием для снижения оценки за этап до 0 баллов.

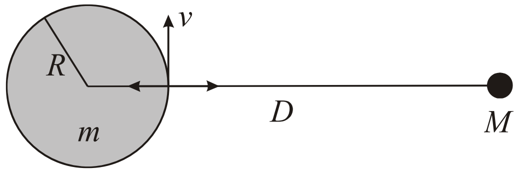
Второй этап решения состоит в связи длины свободного пробега, плотности потока нейтрино и объема детектора. Эта связь может выводиться из разных принципов (в том числе, из принципа размерности). Корректный вывод этой связи оценивается в 3 балла. Наконец, 1 балл выставляется за формулировку ответа. Он ставится только при условии правильного численного значения длины свободного пробега.

X/XI.5 ОПАСНОЕ СБЛИЖЕНИЕ

О.С. Угольников

Условие. Шаровое звездное скопление радиусом 20 пк и массой 400 тысяч масс Солнца пролетает вблизи сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики с массой 4 миллиона масс Солнца. При каком максимальном расстоянии между центром скопления и черной дырой скопление может начать терять массу? Взаимодействие скопления с другими телами вблизи центра Галактики, кроме черной дыры, и эффекты тесных сближений звезд в скоплении не учитывать.

Решение. Информации, заданной в условии, недостаточно, чтобы в точности воссоздать картину всех явлений, которые произойдут при сближении скопления с черной дырой. Прежде всего, неизвестна скорость, с которой скопление пролетает мимо черной дыры. Если эта скорость невелика, то некоторые звезды скопления могут перейти на орбиту вокруг черной дыры. При большей скорости звезды могут просто покинуть скопление. При еще большей скорости действие поля тяжести черной дыры будет кратковременным, и потеря массы будет возможна только при небольших расстояниях между черной дырой и скоплением. Оценим из общих соображений максимальное расстояние, при котором какие-либо звезды скопления смогут покинуть его под действием черной дыры.



Рассмотрим звезды, расположенные на краю скопления. Они двигаются вокруг его центра либо по вытянутым орбитам, которые можно считать эллиптическими лишь в некотором приближении, либо по круговым орбитам. В первом случае они располагаются вблизи апоцентров своих орбит, и их скорости меньше, чем в случае кругового движения. Итак, максимальная скорость звезды на краю скопления равна ее круговой скорости:

$$v = \sqrt{\frac{Gm}{R}}.$$

Здесь m и R – масса и радиус скопления. Предположим теперь, что на расстоянии D от центра скопления в том же направлении, что и рассматриваемая звезда, располагается черная дыра с массой M. Результирующее ускорение от гравитационных сил, действующих на звезду, будет равно

$$g = \frac{Gm}{R^2} - \frac{GM}{(D-R)^2} = \frac{Gm'}{R^2}.$$

Здесь мы сравниваем его с действием некоторой эффективной массы m' в центре скопления, которая равна

$$m' = m - \frac{MR^2}{(D-R)^2}.$$

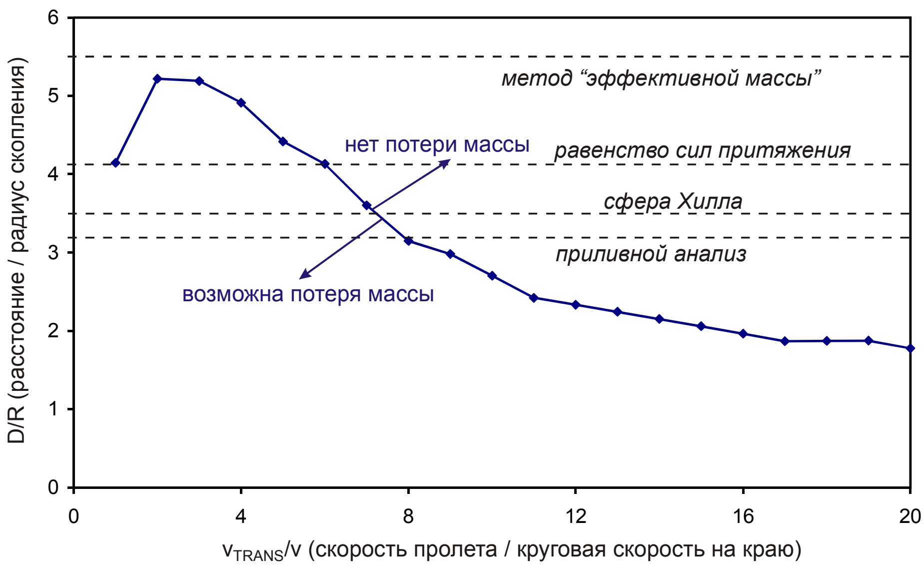
Очевидно, если сила притяжения черной дыры скомпенсирует силу притяжения скопления, и m' обратится в ноль, звезда может покинуть скопление. Но если действие черной дыры займет некоторое время, звезда может уйти из скопления и при положительной массе m'. Для этого ее скорость должна превысить вторую космическую для этой массы:

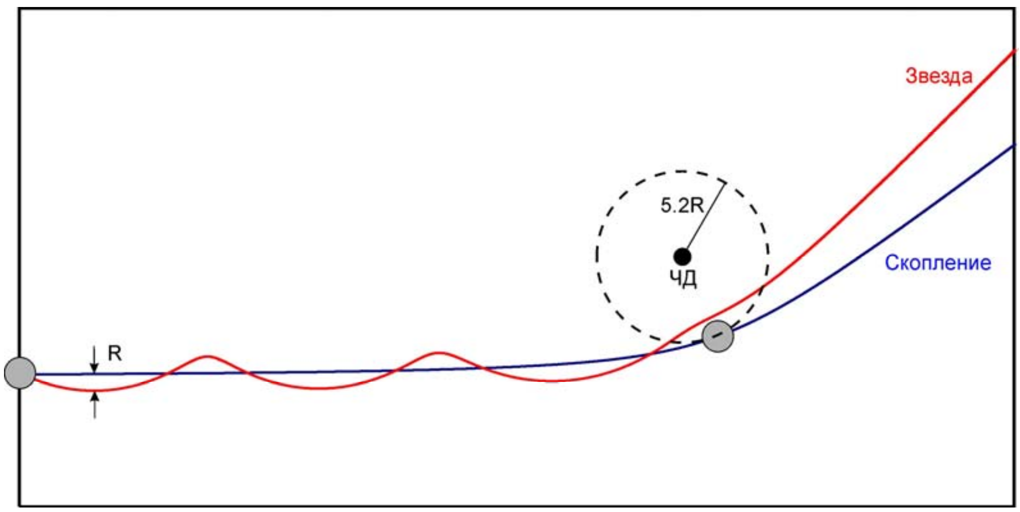
$$v = \sqrt{\frac{Gm}{R}} \geq \sqrt{\frac{2Gm'}{R}}.$$

Отсюда мы получаем:

$$m' \leq m/2; \quad \frac{R^2}{(D-R)^2} \geq \frac{m}{2M}; \quad D \leq R \cdot \left(\sqrt{\frac{2M}{m}} + 1 \right) = 5.5R = 110\ пк.$$

Легче всего покинуть скопление будет звездам, которые в момент сближения будут двигаться относительно центра скопления в ту же сторону, что и черная дыра. Численное моделирование движения звезды в поле двух центров тяжести для разных значений их относительных скоростей показывает, что полученная оценка близка к истине. Если скорость движения скопления относительно черной дыры не очень велика, то небольшое количество звезд могут покидать скопление при его приближении к черной дыре примерно на 5.0 – 5.5 радиусов скопления, в чем можно убедиться из графика. На втором рисунке показаны траектории скопления и покидающей его звезды при наибольшем расстоянии от черной дыры.





Другой способ понять, на каких расстояниях звезда может покинуть скопление – представить притяжение черной дыры как приливную силу. Будем считать, что звезда на краю скопления покинет его, если приливное ускорение (разность ускорений притяжения черной дыры на краю и в центре скопления) будет не меньше ускорения притяжения центра скопления:

$$\frac{GM}{(D-R)^2}-\frac{GM}{D^2}\geq\frac{Gm}{R^2}.$$

Если D существенно превосходит R, то это выражение упрощается:

$$\frac{2GMR}{D^3}\geq\frac{Gm}{R^2}.$$

Отсюда

$$D\leq R\cdot\left(\frac{2M}{m}\right)^{1/3}=2.7R.$$

Мы видим, что предположение $R<<D$ не вполне оправдано. Точный анализ уравнений выше дает ограничение $D\leq 3.2R$~65 пк. Близкие значения мы получим, если предположим, что для потери массы внешний край скопления должен попасть во внутреннюю точку Лагранжа системы «черная дыра – скопление». Тогда приближенный анализ дает

$$D\leq R\cdot\left(\frac{3M}{m}\right)^{1/3}=3.1R,$$

а точный численный расчет: $D\leq 3.5R$. Величина D оказалась примерно в полтора раза меньше, чем при вычислении первым методом и при численном анализе. Это связано с тем, что «приливной» метод не учитывает возможное движение звезд в скоплении и в большей степени относится к тем звездам, которые в момент сближения с черной дырой будут в апоцентре своих орбит и почти неподвижны относительно центра скопления. Так как в задаче требуется найти максимальное расстояние, при котором скопление начнет терять массу, первый метод является более правильным.

Система оценивания (от одного члена жюри). В задаче не существует единственно точного решения, оценка должна определяться обоснованностью метода, предложенного участником олимпиады, правильностью его математической реализации и адекватностью ответа. Максимальная оценка выставляется, если метод учитывает движение звезд в скоплении и приводит к ответу $D\leq 5$-$6R$. При этом он не должен базироваться на каком-то известном значении скорости скопления относительно черной дыры и не должен предполагать, что сила притяжения от черной дыры должна превысить силу притяжения от скопления.

При использовании приливного метода определения расстояния или аналогичного метода, не учитывающего движения звезд, максимальная оценка составляет 4 балла при условии правильного ответа ($D\leq 3R$). Если участник олимпиады при этом получает большие значения D как следствие ошибок при решении, оценка еще уменьшается в зависимости от характера ошибки. Использование упрощающей модели $R<<D$ в этом случае без проверки ее точности уменьшает оценку еще на 1 балл (максимум – 3 балла).

Если участник олимпиады напрямую сравнивает силы притяжения от скопления и черной дыры, получая в итоге ограничение $D \leq 4.1R$, максимальная оценка также составляет 4 балла.

В случае получения заведомо неверного ответа (максимальное расстояние D меньше $2R$ или больше $10R$) оценка снижается вплоть до нуля вне зависимости от используемого метода.

X.6 ДАЛЕКАЯ ЗЕМЛЯ

О.С. Угольников

Условие. Считая, что светимость L и масса M желтых и красных карликов связаны как $L \sim M^4$, определите, у каких звезд можно найти планету с массой, альбедо и температурными условиями, аналогичными Земле, используя спектрограф с разрешением 10^8.

Решение. Разрешение спектрографа R есть отношение длины волны λ, на которой ведутся наблюдения, к минимальной разнице длин волн спектральных линий $\Delta\lambda$, которые можно зафиксировать по отдельности:

$$R = \lambda/\Delta\lambda.$$

При таком разрешении у объекта можно измерить лучевую скорость, если она приводит к смещению спектральной линии на величину больше $\Delta\lambda$, то есть:

$$\frac{V}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq \frac{1}{R}.$$

Предположим, что вокруг звезды с массой M обращается планета со значительно меньшей массой m. Расстояние от планеты до звезды составляет D. Если считать орбиту круговой, то скорость движения планеты составит

$$v = \sqrt{\frac{GM}{D}}.$$

Звезда также будет двигаться относительно общего с планетой центра тяжести. Ее скорость V по направлению противоположна скорости v. Сам центр масс не вращается, поэтому $MV = mv$. Скорость звезды будет во столько же раз меньше скорости планеты, во сколько раз звезда массивнее планеты:

$$V = v\frac{m}{M} = \sqrt{\frac{Gm^2}{MD}}.$$

Чтобы зафиксировать эту скорость спектрографом, описанным в условии, эта скорость должна создавать эффект Доплера, описанный выше, то есть:

$$\sqrt{\frac{Gm^2}{MD}} \geq \frac{c}{R}.$$

В условии сказано, что планета по своим свойствам похожа на Землю, то есть, она должна получать от звезды столько же тепла, сколько Земля от Солнца. Это количество тепла пропорционально светимости звезды и обратно пропорционально расстоянию до нее. Обозначив массу и светимость Солнца через M_0 и L_0, а расстояние Земли до Солнца – через D_0, записываем это условие математически:

$$\frac{L}{D^2} = \frac{L_0}{D_0^2}.$$

С учетом соотношения «масса-светимость» получаем:

$$D = D_0\sqrt{\frac{L}{L_0}} = D_0\left(\frac{M}{M_0}\right)^2.$$

Подставим это в неравенство, полученное ранее:

$$\sqrt{\frac{Gm^2 M_0^2}{M^3 D_0}} \geq \frac{c}{R}.$$

Отсюда получаем

$$\left(\frac{M}{M_0}\right)^3 \leq \frac{R^2 G m^2}{c^2 D_0 M_0} = \left(R\frac{m}{M_0}\cdot\frac{v_0}{c}\right)^2.$$

Здесь v_0 – орбитальная скорость Земли. Учитывая, что отношение (m/M_0) составляет $3\cdot10^{-6}$, а (v_0/c) равно 10^{-4}, получаем, что планету с указанными свойствами можно будет открыть у звезд с массой не более 0.1 массы Солнца.

Система оценивания (от одного члена жюри). Решение задачи подразумевает использование четырех базовых факторов, первые три из которых могут идти в произвольном порядке:

1. Соотношение орбитальных скоростей планеты и звезды, вывод выражения для скорости звезды.
2. Минимальная измеряемая скорость звезды, исходя из величины спектрального разрешения;
3. Соотношение между радиусом орбиты планеты и светимостью (и, следовательно, массой) звезды;
4. Получение ограничения сверху на массу звезды (ответ должен быть сформулирован как неравенство либо должно быть указано, что найдена *максимальная* масса звезды).

Каждый из этапов равнозначен по своему вкладу в решение, и его выполнение оценивается в 2 балла. Однако, ошибка, сделанная на каком-либо этапе, может приводить к снижению оценки и за другие этапы, если в итоге получается заведомо неверный вывод в решении. Так, четвертый (финальный) этап не засчитывается полностью в каждом из следующих случаев:

1. Численный ответ не получен;
2. Ответ не выглядит (математически или в тексте) как ограничение на массу звезды сверху;
3. Пороговое значение массы не соответствует звездным массам (менее 0.05 массы Солнца);
4. Пороговое значение массы, наоборот, слишком велико и не соответствует красным карликам (более 1 массы Солнца).

Последний этап также не оценивается, если ответ (даже близкий к правильному) получается на основе неверных рассуждений и вычислений.

При решении участник олимпиады может спутать скорости звезды и планеты, что приведет к очень высокому верхнему пределу на массу звезд (без множителя m/M_0 в финальной формуле и численному ответу около 500 масс Солнца). В этом случае ввиду заведомо неверного ответа общая оценка за решение не может превышать 2 баллов. Она не увеличивается и в том случае, если итоговая масса оказывается меньше вследствие математических ошибок при решении.

При решении задачи участник олимпиады может предполагать, что достаточно различить спектральную линию звезды при двух противоположных значениях ее скорости, что эквивалентно увеличению разрешения R в 2 раза и итоговой пороговой массы – в 1.6 раза. Эта ошибка считается несущественной и в случае правильных вычислений не влияет на оценку. Решение может производиться полностью в системных единицах без выражения масс в массах Солнца и радиусов орбит – в астрономических единицах. Данный подход более сложен для вычислений, но также правилен.