Всероссийская олимпиада школьников по астрономии – 2022
Региональный этап
Решения заданий и критерии оценивания

<u>9 класс</u>

1. Условие. В некотором пункте на экваторе Земли далекая звезда 1 с прямым восхождением 02ч00м взошла над горизонтом в 01ч00м по местному времени. В какое местное время в этом пункте в этот день зайдет за горизонт далекая звезда 2 с прямым восхождением 08ч00м? Атмосферной рефракцией пренебречь.

1. Решение. На экваторе, если не учитывать рефракцию, восход любой звезды на 6 часов по звездному времени предшествует ее верхней кульминации, при которой звездное время равно прямому восхождению звезды. То есть, звезда 1 восходит в 20 часов по звездному времени. Заход звезды происходит через 6 звездных часов после кульминации, то есть для звезды 2 он произойдет в 14 часов по звездному времени.

Коль скоро восход звезды 1 произошел в начале суток, имеет смысл искать последующий заход звезды 2, который отделен от момента восхода звезды 1 на 18 звездных часов. Как известно, звездные сутки (24 звездных часа) соответствуют примерно 23ч56м по среднему солнечному (местному) времени. Интервал в 18 звездных часов или 3/4 звездных суток есть 17ч57м в шкале местного (солнечного) времени. Следовательно, ближайший заход звезды 2 произойдет в 18 часов 57 минут по местному времени в этот день.

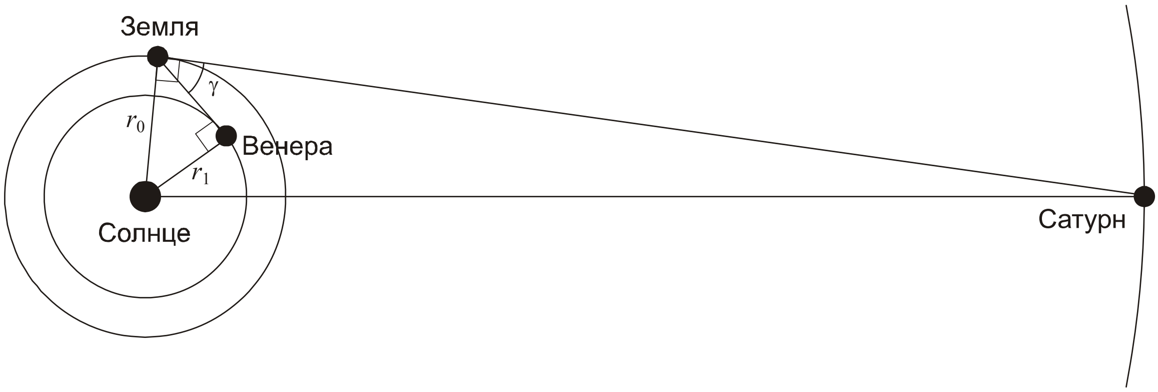
1. Система оценивания. Решение этой задачи разделяется на два основных этапа, при этом в решении участника они могут быть объединены, без указания промежуточных численных результатов.

1 этап (4 балла): определение интервала от восхода звезды 1 до захода звезды 2 по звездному времени. Если участник путает заход звезды с ее восходом и получает в итоге 6 часов вместо 18, то за весь этап выставляется 1 балл, при этом следующий этап, при условии его правильного выполнения (ответ 6ч59м) оценивается полностью.

2 этап (4 балла): переход от шкалы звездного времени к шкале местного времени и формулировка ответа. Если разница звездных и солнечных суток не учтена, и получен ответ 19 часов, за второй этап выставляется 1 балл.

2. Условие. 30 октября 2021 года планета Венера оказалась в наибольшей восточной элонгации в небе Земли, а сама Земля – в наибольшей западной элонгации в небе Сатурна. Определите угловое расстояние между Венерой и Сатурном при наблюдении с Земли в этот день. Орбиты всех планет считать круговыми и лежащими в одной плоскости.

2. Решение. Изобразим положение всех трех планет на своих орбитах в указанный день:



Коль скоро Земля оказалась в наибольшей западной элонгации при наблюдении с Сатурна, угол «Солнце – Земля – Сатурн» составляет 90°, то есть Сатурн при наблюдении с Земли находится в квадратуре, причем в восточной. Венера при наблюдении с Земли также располагается к востоку от Солнца. Угол «Солнце – Венера – Земля» также равен 90°, и угловое расстояние Венеры от Солнца в небе Земли есть $\arcsin (r_1/r_0) = 46°$. Здесь r_0 и r_1 – радиусы орбит Земли и Венеры. Таким образом, угловое расстояние между Сатурном и Венерой в этот день:

$$\gamma = 90° - \arcsin (r_1/r_0) = \arccos (r_1/r_0) = 44°.$$

Система оценивания.

1 этап (2 балла): определение углового расстояния между Солнцем и Сатурном на небе (либо вывод о том, что Сатурн находится в квадратуре). Вывод может быть сделан в явном текстовом или численном виде либо отражен на рисунке. Значение 90° в рамках оговоренной в задаче модели является точным, при любых других значениях углового расстояния Сатурна от Солнца, указанных в явном виде или следующих из хода решения, этап не засчитывается. Следующие этапы, кроме последнего, оцениваются в полной мере, если после сделанной здесь ошибки они могут быть выполнены.

2 этап (2 балла): правильное указание, что Сатурн находится в 90° к востоку от Солнца в небе Земли, то есть квадратура восточная. Вывод может быть записан в текстовом виде или отражен на рисунке. Если делается ошибочный вывод, что квадратура западная, и Сатурн в небе Земли располагается с другой стороны от Солнца, нежели Венера, данный этап, как и последний, не засчитываются, общая оценка не может превышать 5 баллов.

3 этап (3 балла): вычисление углового расстояния между Солнцем и Венерой. Допускается отклонение в результате на 1°. В частности, участники могут по памяти записать, что наибольшая восточная элонгация Венеры осенью 2021 года составляла 47° (в реальности это связано с вытянутостью орбиты Земли), подобный вывод засчитывается в полной мере. Численное значение элонгации Венеры может не записываться, ее выражение может переходить в виде формулы в следующий этап.

Вероятная ошибка при выполнении этапа: участник записывает выражение с arctg вместо arcsin, фактически предполагая, что Венера удалена на 90° от Земли по гелиоцентрической долготе, угол элонгации составляет при этом 36°. В этом случае за этап выставляется максимум 1 балл, при этом не засчитывается следующий этап (максимальный итог – 5 баллов).

4 этап (1 балл): формулировка окончательного ответа. Засчитывается только в случае верного значения с возможной погрешностью в 1°, перешедшей из предыдущего этапа решения.

Вероятная ошибка при выполнении задания: выводы делаются на основе рисунка, на котором Венера и/или Сатурн располагаются с другой стороны от Солнца. Если ошибка делается для одной из планет с итоговым ответом 136°±1°, то общая оценка не превышает 5 баллов, данный случай описан выше. Если ошибочно указаны оба направления, и ответ при этом правильный, то решение засчитывается полностью *только* в том случае, если участник в явном виде указал, что рисунок построен для наблюдателя, располагающегося со стороны южного полушария Земли. Во всех иных случаях этап 2 не засчитывается, максимальная оценка за решения составляет 6 баллов, апелляции о неявном представлении южной проекции не принимаются.

Вероятная ошибка при выполнении задания: участник путает угловое расстояние между Венерой и Сатурном (43-44°) и между Венерой и Солнцем (46-47°), что эквивалентно перестановке arccos и arcsin в последней формуле решения. Если при этом выполнены первые три этапа (вычислены угловые расстояния Сатурна и Венеры от Солнца), и ошибка сделана случайно на финальной стадии решения, то не засчитывается только эта финальная стадия с общей оценкой до 7 баллов. Если же ошибка делается на этапе вычисления элонгации Венеры (arccos вместо arcsin), то за 3 этап выставляется не более 1 балла с максимумом до 5 баллов.

3. Условие. В романе Жюля Верна «Таинственный остров» герои оказываются на неизвестном острове и называют его островом Линкольна. В ходе действий книги они узнают, что координаты острова Линкольна – 34°57′ ю. ш., 150°30′ з. д. Позже они нашли карты и узнали, что такого острова на них нет, но поблизости есть риф Марии-Терезы (он же остров Табор, координаты 37°11′ ю. ш., 151°15′ з. д.). Герои произведения путешествовали к нему и обратно на самодельном небольшом корабле. Какое расстояние они прошли (туда и обратно вместе), если считать, что двигались они по самому короткому пути?

3. Решение. Острова находятся недалеко друг от друга, поэтому можно рассматривать картину как евклидову на плоскости, но помня при этом, что длина дуги в 1° вдоль меридиана и параллели отличается, так как дело происходит вдали от экватора. Определим разницу широт и долгот островов Линкольна и Табор:

$$\Delta\varphi = 2°14' = 2.23°;$$
$$\Delta\lambda = 45' = 0.75°.$$

Длина дуги большого круга на поверхности Земли, проходящего через эти два острова, составит:

$$\gamma = \sqrt{\Delta\varphi^2 + (\Delta\lambda \cos\varphi)^2} = 2.31° .$$

В качестве широты φ правильней всего взять среднее значение из широт двух островов (–36°). Мы видим, что полное смещение мало отличается от смещения вдоль меридиана. Учитывая, что длина дуги меридиана в 1° составляет $L=2\pi R/360° = 111.2$ км (здесь R – радиус Земли), получаем, что полное расстояние, которое преодолели путешественники туда и обратно, есть $2L\gamma = 515$ км.

3. Система оценивания.
1 этап (2 балла). Определение разности долгот и широт двух островов. Может выполняться в численном или общем виде. Разность долгот может быть сразу умножена участником на фактор cosφ (получается 0.6° или 36′). Выставляется по 1 баллу за каждый правильный ответ. При ошибке соответствующий балл не ставится, но последующие этапы оцениваются в полной мере.

2 этап (4 балла). Вычисление расстояния между островами в километрах или градусах дуги большого круга. Если участник опускает фактор cosφ и получает чуть завышенную итоговую длину (524 км) – оценка уменьшается на 1 балл. Также 3 баллами оценивается приближенное решение, в котором считается, что путешественники двигались вдоль меридиана (итоговая длина 497 км). В обоих случаях последующий этап оценивается в полной мере.

3 этап (2 балла). Формулировка окончательного ответа. Максимальная погрешность без учета допущений и неточностей на предыдущих этапах – 5 км. При ошибке в 2 раза, вызванной невнимательным чтением условия и определения длины пути в одну сторону, оценка уменьшается на 1 балл.

4. Условие. Астрономическая обсерватория будущего построена на одном из карликовых тел Солнечной системы, обращающемся вокруг Солнца по круговой орбите. Астрометрические измерения одной звезды показали, что в своем движении относительно более далеких звезд в этой области неба она описывает окружность радиусом 0.5″ с периодом 200 лет. Определите расстояние до этой звезды. Известно, что звезда не входит в состав какой-либо двойной или кратной системы.

4. Решение. Положение звезды измеряется относительно более далеких звезд и при этом описывает окружность. Известно также, что звезда не входит в двойную систему. Следовательно, это есть параллактическое смещение звезды за счет движение обсерватории вокруг Солнца.

Таким образом, T = 200 лет – это период обращения карликовой планеты вокруг Солнца. Пользуясь простой формулировкой III закона Кеплера, мы можем получить величину радиуса ее орбиты в астрономических единицах: $a = T^{2/3} = 34.2$, обсерватория построена на транснептуновом теле. Параллактическое смещение звезды при наблюдении с этой обсерватории будет в 34.2 раза больше, чем на Земле. Смещение в 1″ испытывала бы звезда на расстоянии 34.2 пк, а смещение в 0.5″ – звезда на расстоянии 68.4 пк.

4. Система оценивания.
1 этап (4 балла): определение расстояние карликовой планеты от Солнца в соответствии с III законом Кеплера. Допустимая погрешность – 1 а.е. При ошибке в интерпретации периода (умножение/деление на 2 и т.д.) этап не засчитывается, последующий оценивается исходя из правильности его выполнения.

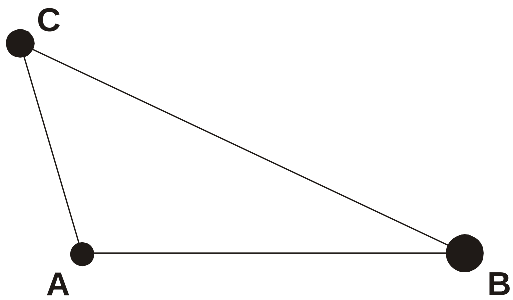
2 этап (4 балла): определение расстояния до звезды. Допустимая погрешность – 5 пк. Возможные ошибки: опускание фактора большого расстояния до планеты (ответ – 2 пк, 1 балл за этап), путаница диаметра и радиуса параллактического круга (ошибка в 2 раза, 2 балла за этап).

Вероятная ошибка участника: попытка учета аберрации света, которая не отражена в программе регионального этапа в 9 классе и никак не влияет на картину, описанную в задании, так как речь идет о движении относительно других звезд. Эта ошибка не влияет на выполнение первого этапа, так как период планеты остается тем же. Соответственно, первый этап засчитывается полностью при условии правильного выполнения. Если смещение связывать только с аберрацией, то второй этап решения не может быть выполнен, любое конкретное решение будет неверным, второй этап не засчитывается.

Даже при попытке интерпретации смещения как комбинации аберрации и параллакса мы приходим к противоречию, так как аберрационное смещение на круговой орбите с радиусом 34 а.е. равно около 3.5″, и итоговый эффект не может быть меньшим. За второй этап в этом случае выставляется не более 1 балла.

5. Условие. При наблюдении из окрестностей звезды A звезды B и C имеют одинаковую звездную величину 1^m. При наблюдении из окрестностей звезды B звезды A и C имеют одинаковую звездную величину 2^m. Какая из звезд – A или B – выглядит ярче из окрестностей звезды C и на сколько звездных величин? Межзвездным поглощением пренебречь.

5. Решение. Из условия задания мы видим, что звезда B при наблюдении со звезды A имеет блеск 1^m, а звезда A при наблюдении со звезды B, с того же расстояния, на одну звездную величину слабее. Следовательно, звезда B физически ярче звезды A на одну звездную величину.



Одна и та же звезда C выглядит со звезды A ярче на одну звездную величину, нежели со звезды B. Следовательно, звезда C ближе к звезде A, чем к звезде B, в $2.512^{1/2} = 1.6$ раз (хотя численное значение для решения не нужно). Будь звезды A и B одинаковы, звезда A светила в небе звезды C на 1^m ярче звезды B. Но мы знаем, что звезда A физически на 1^m слабее. В итоге, в небе звезды C звезды A и B имеют одинаковую звездную величину.

Интересно, что тот же ответ в принципе сохранился бы и при наличии межзвездного поглощения. Заметное отклонение может быть только в том случае, если звезды сильно отличаются по температуре, а межзвездное поглощение существенно зависит от длины волны излучения.

5. Система оценивания.
Задание можно выполнить качественным описанием, как сделано выше, а также с применением формул связи видимой и абсолютной звездной величины с расстоянием. Оба подхода в равной степени обоснованы.

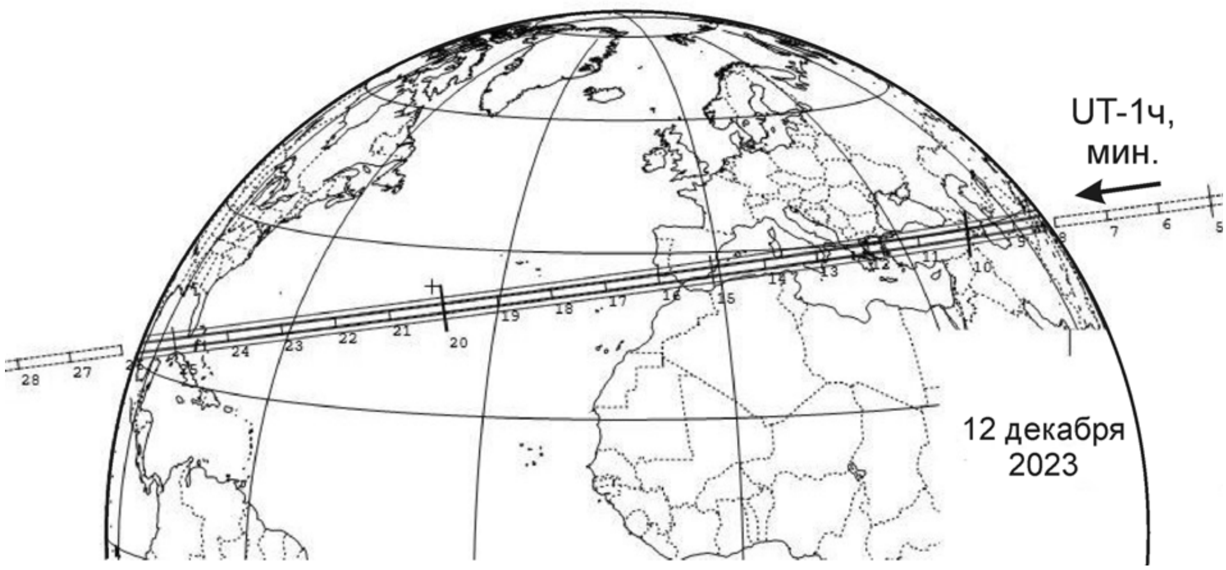
Этап 1 (2 балла). Вывод о том, что светимость звезды B на одну звездную величину (или в 2.512 раз) больше, чем у звезды A. Вывод может быть сделан через соотношение абсолютных звездных величин: $M_B = M_A - 1$.

Этап 2 (3 балла). Вывод о том, что звезда C удалена от звезды B в 1.6 раз больше, чем от звезды A. Его можно сформулировать как разница модулей расстояний BC и AC на 1 звездную величину или еще проще: «звезда C дальше от звезды B, чем от звезды A. Соотношение расстояний соответствует разнице видимой звездной величины на 1^m».

Этап 3 (3 балла). Вывод о том, что звезды A и B будут выглядеть из окрестностей звезды C равными по звездной величине.

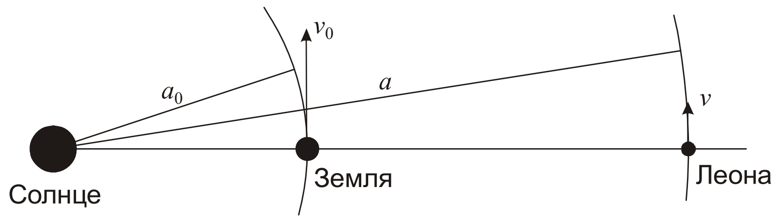
При наличии ошибок в решении участника этап, на котором делается ошибка, не засчитывается.

6. Условие. 12 декабря 2023 года произойдет редкое явление – покрытие яркой звезды Бетельгейзе (α Ориона, $\alpha = 05ч55.2м$, $\delta = +7°24'$) астероидом Леона. Перед Вами карта видимости этого явления, на которой указана полоса видимости (границы соответствуют внутренним жирным линиям) и моменты середины покрытия в разных пунктах Земли по Всемирному времени в минутах после 1ч. Считая орбиту Леоны круговой, оцените ее видимую звездную величину в момент явления. Считать сферическое альбедо Леоны равным 0.05, а Бетельгейзе – точечным источником на небе.



6. Решение. По координатам Бетельгейзе и дате явления мы видим, что в это время звезда и астероид будут располагаться практически в противостоянии с Солнцем, причем недалеко от эклиптики. Это значительно упрощает все оценки.

Так как Бетельгейзе располагается несравнимо дальше Леоны, скорость области покрытия относительно Земли есть просто скорость Леоны относительно Земли. Сравнив перемещение тени Леоны за какое-то время с диаметром Земли, мы определяем эту скорость: u = 10.8 км/с. Обратим внимание, что эта скорость значительно больше скорости поверхности Земли за счет ее осевого вращения, поэтому последнюю мы можем не принимать в расчет. Также мы пренебрежем наклоном скорости Леоны к эклиптике, что также можно делать, судя по карте.



Обратим внимание, что скорость u направлена с востока на запад, то есть противоположно орбитальному движению Земли. Это связано с тем, что Леона располагается дальше от Солнца, и ее гелиоцентрическая скорость v меньше, чем у Земли (v_0). Мы можем найти эту скорость:

$$v = v_0 - u = 19.0 \text{ км/с}.$$

По условию задачи, мы считаем орбиту Леоны круговой, Тогда для скоростей Леоны и Земли справедливо соотношение: $(v/v_0)^2 = (a_0/a)$, где a и a_0 – радиусы орбит Леоны и Земли. Отсюда мы находим расстояние от Солнца до Леоны: a = 2.5 а.е, Учитывая, что явление на небе происходит недалеко от эклиптики, мы можем считать расстояние от Земли до Леоны равным $a - a_0$ = 1.5 а.е. Отметим, что реальное расстояние Леоны от Солнца в момент покрытия будет немного больше – 2.8 а.е., причина нашей неточности в том, что реальная орбита Леоны вытянута, и скорость движения в этот день будет больше круговой для данного расстояния от Солнца.

Чтобы определить видимую звездную величину Леоны, найдем ее диаметр. Он равен ширине полосы покрытия, которую мы можем приближенно оценить по карте как 100 км. Если радиус Леоны r равен 50 км, а сферическое альбедо A равно 0.05, то мы можем определить звездную величину Леоны, сравнив ее в небе Земли с Солнцем:

$$m = m_0 - 2.5\lg \frac{\dfrac{J_0}{4\pi a^2} \cdot A\pi r^2 \cdot \dfrac{1}{4\pi(a-a_0)^2}}{\dfrac{J_0}{4\pi a_0^2}} = m_0 - 2.5\lg \frac{a_0^2 \cdot Ar^2}{4a^2(a-a_0)^2} \approx +13.$$

Здесь J_0 – светимость Солнца. Здесь мы фактически предположили, что Леона отражает солнечный свет в равной степени во всех направлениях, что конечно не вполне соответствует действительности. Подобная оценка была бы более оправдана для фазы около 0.5, что неосуществимо для внешних астероидов. Мы можем уточнить оценку и считать, что Леона отражает свет только в одну полусферу (тогда мы получим звездную величину чуть слабее 12^m) или даже в четверть сферы, что является хорошим приближением для противостояния (результат около 11.5^m). Такой же ответ мы получим, если сравним Леону с Луной (радиус R, альбедо A_L, звездная величина m_L), расположенной на расстоянии a_0 от Солнца и l от Земли:

$$m = m_L - 2.5\lg \frac{A}{A_L} \frac{a_0^2 \cdot r^2 \cdot l^2}{a^2 R^2 (a-a_0)^2} \approx +11.$$

Здесь мы считаем, что Леона, как и Луна, особенно хорошо отражает свет в обратном направлении, что справедливо для твердых тел без атмосферы с пористой поверхностью, это и является причиной большей итоговой яркости. Однако, в реальности блеск Леоны составит примерно $13\text{-}14^m$. Дело в том, что в реальности астероид будет дальше от Солнца и Земли (его орбита эллиптическая), а его размер несколько меньше: при расчете ширины видимости явления был также учтен видимый диаметр Бетельгейзе.

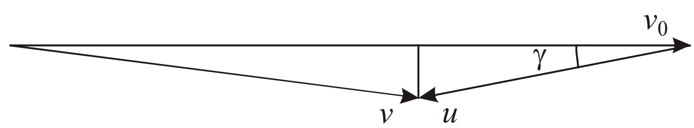
6. Система оценивания. Задание имеет практический характер, все параметры, определяемые из карты, могут иметь существенные погрешности. В отличие от других заданий, данная задача оценивается ***по 10-балльной системе***.

Этап 1 (3 балла): определение геоцентрической скорости Леоны. Допустимая погрешность – 0.5 км/с. Участники могут учитывать осевое вращение Земли, направленное в противоположную сторону, что уменьшит итоговое значение скорости на 0.4 км/с.

Этап 2 (4 балла): определение расстояния до Леоны. С учетом погрешности в определении скорости, расстояние может отличаться от найденного выше на 0.2 а.е.

Вариант излишне усложненного выполнения этапа: учет того, что Бетельгейзе и Леона в момент покрытия не будут точно в противостоянии с Солнцем. Бетельгейзе вступает в противостояние за день до зимнего солнцестояния, то есть 20 декабря. Покрытие происходит на 8 дней раньше, и Бетельгейзе с Леоной отстоят от противосолнечной точки по долготе на λ=8°. Учет этого эффекта достаточно сложен и при этом не требуется для решения данной задачи по оценке звездной величины Леоны, так как в реальности он увеличивает значение радиуса орбиты Леоны всего на 0.04 а.е., эффект значительно меньше допустимой погрешности. Подобное решение засчитывается при условии правильного выполнения – ответ не должен выходить за рамки допустимой погрешности.

Вариант излишне усложненного выполнения этапа: попытка учесть наклон скорости движения Леоны к плоскости эклиптики γ. По рисунку мы можем определить угол между геоцентрической скоростью Леоны и экватором Земли (8°). Если считать, что прямое восхождение Бетельгейзе близко к 6ч, то угол между геоцентрической скоростью Леоны и эклиптикой будет таким же – 8°, в реальности он мало отличается от этого значения: 7.5°. Гелиоцентрическая скорость Леоны в этом случае определяется из треугольника скоростей:



$$v^2 = (v_0 - u\cos\gamma)^2 + (u\sin\gamma)^2 = v_0^2 + u^2 - 2v_0u\cos\gamma; \quad v = 19.2 \text{ км/с}.$$

Тот же результат можно получить из теоремы косинусов. Радиус орбиты Леоны a при этом получается равным 2.4 а.е. Таким образом, учет наклона орбиты не выводит ответ за рамки указанных выше погрешностей и, вообще говоря, для решения данной задачи также не нужен.

Аналогичная ситуация имеет место, если далее при вычислении расстояния от Земли до Леоны участник принимает во внимание удаление Бетельгейзе на небе от эклиптики на β=16°. Записывая аналогичное соотношение, мы получаем расстояние от Земли до Леоны:

$$d^2 = a_0^2 + a^2 - 2a_0a\cos\beta; \quad d = 1.5 \text{ а.е.}$$

Изменение расстояния составляет менее 0.1 а.е., более того – при учете трех описанных выше уточнений они частично компенсируют друг друга, и расстояние от Земли до Леоны вновь оказывается около 1.5 а.е. Решение с одним или несколькими уточнениями оценивается полностью, если выполняется верно, и ответы оказываются в рамках допустимых погрешностей.

Вероятная ошибка при выполнении этапа: участник путает геоцентрическую и гелиоцентрическую скорость Леоны, полагая последнюю равной около 11 км/с и расстояние Леоны от Солнца 7±1 а.е. В этом случае за этап выставляется максимум 1 балл, если есть иные математические ошибки – 0 баллов. Последующий этап оценивается исходя из правильности его выполнения с учетом полученного расстояния до Леоны.

Вероятная ошибка при выполнении этапа: неверное направление геоцентрической скорости Леоны, в результате гелиоцентрическая скорость получается ее сложением, а не вычитанием из гелиоцентрической скорости Солнца. Итог составляет 40.6 км/с, что невозможно для тела на круговой орбите, превосходящей по радиусу орбиту Земли. За данный этап выставляется 1 балл, при этом не оценивается следующий этап, так как его выполнение становится абсурдным.

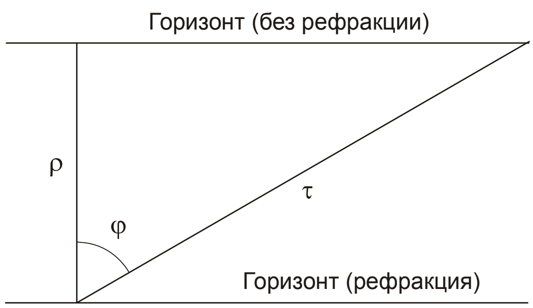
Этап 3 (3 балла). Вычисление видимой звездной величины Леоны. Участник может сравнивать Леону с Солнцем, Луной или любой внешней планетой Солнечной системы в противостоянии, каждый подход трактуется как верный. Это может вносить существенную разницу в итоговый ответ, так как фактически при этом предполагается разный характер неравномерности распределения отраженного света. Правильный ответ зависит от методики решения (сравнения с Луной, с Солнцем или иными источниками, предположение о характере отражения света), то есть один и тот же численный ответ участника может трактоваться как правильный или нет в зависимости от подхода, а также от величин, полученных на предыдущих этапах. Отклонение ответа участника относительно приведенных выше значений за счет погрешностей на первых этапах решения может достигать 2^m.

<u>10 класс</u>

1. Условие. Пункты A и B находятся на широте +60° в одном часовом поясе. Некоторая далекая звезда, расположенная на небесном экваторе, в один день взошла над горизонтом в пункте A в 06ч00м по поясному времени. Она же зашла за горизонт в этот день в пункте B в 17ч55м по времени того же пояса. Найдите расстояние между пунктами A и B по поверхности Земли. Рельефом Земли пренебречь.

1. Решение. По условию задачи, звезда находится на небесном экваторе. Если бы не эффект атмосферной рефракции, то в любой точке Земли, кроме полюсов, звезда находилась бы над горизонтом ровно половину звездных суток, то есть 11 часов и 58 минут, а потом такое же время располагалась под горизонтом. Однако, рефракция несколько увеличивает период нахождения звезды над горизонтом. Если мы обозначим угловую величину рефракции у горизонта через ρ, то восход звезды на широте φ произойдет раньше, чем в случае отсутствия атмосферы, на величину

$$\tau = \rho / \cos \varphi.$$



Если принять рефракцию на уровне моря равной 34′, то во временном выражении величина τ составляет 4.5 звездных минут. Мы можем считать ее равной 4.5 солнечным или поясным минутам, разница будет несущественна для данной задачи. Такой же интервал времени добавляется на заходе звезды за горизонт. В итоге, время от восхода до захода звезды в одном пункте на широте 60 увеличивается на 9 минут и достигает 12ч07м.

Если звезда на небесном экваторе взошла в пункте A в 06ч00м, то она зайдет в этом пункте в 18ч07м. В другом пункте B она зашла в 17ч55м, то есть на 12 минут раньше. Вновь пренебрегая разницей хода звездного и поясного времени на столь малом интервале, мы получаем, что пункт B должен располагаться на 12 минут или на 3° восточней пункта A. Это не столь большая разница долгот $\Delta\lambda$. Выражая ее в радианах, мы можем определить расстояние между пунктами по простой формуле:

$$L = R \cos \varphi \, \Delta\lambda = 167 \text{ км}.$$

Здесь R – радиус Земли.

1. Система оценивания. Итоговая оценка за решение задачи определяется правильным учетом всех необходимых факторов, влияющих на время восхода/захода звезды. Если тот или иной фактор опускается, соответствующее число баллов участнику не выставляется, но все оставшееся решение, если оно выполнено верно с уже иным ответом, оценивается полностью. Если тот или иной фактор учтен неточно (с ошибкой не более чем в 2 раза), соответствующий этап задания засчитывается частично, вновь без влияния на другие этапы при условии их правильного выполнения. Дополнительное понижение (в 2 раза) всей итоговой оценки производится, если участник получил заведомо абсурдное большое расстояние между пунктами A и B, несовместимое с их расположением в одном часовом поясе (более 15° по долготе или более 800 км по расстоянию).

Фактор 1 (2 балла). Отличие звездных суток от солнечных. Если его не учитывать, но не делать иных ошибок, то звезда находилась бы над горизонтом на 2 минуты дольше – 12ч09м. Соответственно, разница долгот пунктов A и B составила бы 14 минут или 3.5°, расстояние между ними – 195 км.

Фактор 2 (3 балла). Учет атмосферной рефракции. Если его не производить, то время нахождения звезды над горизонтом составит 11ч58м, разница долгот пунктов A и B – 3м или 0.75°, расстояние составит 40 км. Участник может брать несколько иные значения рефракции, приводящие к сдвигу времени восхода/захода звезды от 4 до 5 минут. Это меняет разницу долгот пунктов A и B на ±1 минуту, что соответствует изменению расстояния на 13-14 км, не влияя на оценку.

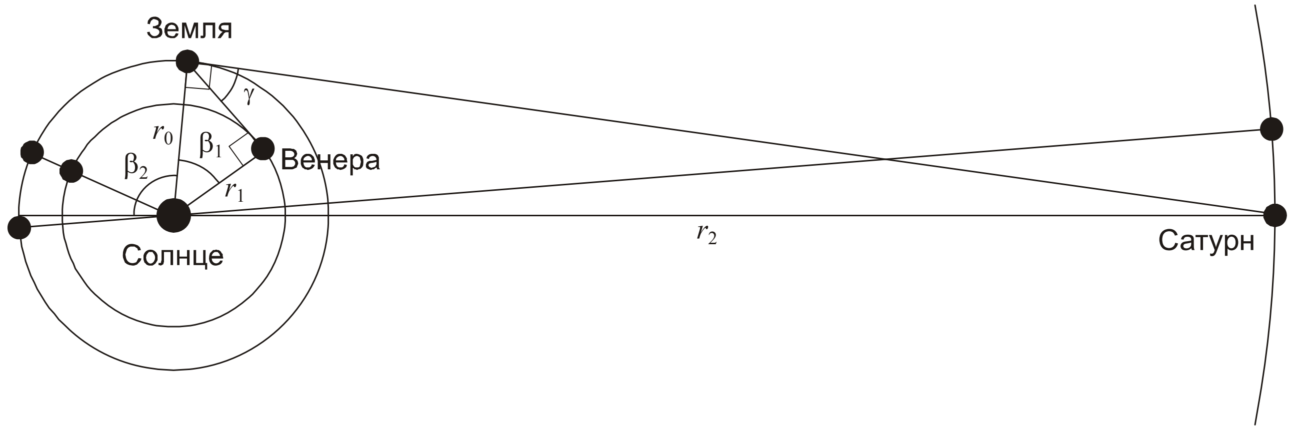
Возможная ошибка при учете фактора: опускание множителя 2 при вычислении увеличения времени наблюдения звезды за счет рефракции из-за а) учета широты места; б) учета как восхода, так и захода звезды. В таком случае время нахождения звезды над горизонтом уменьшается до 12ч02м-12ч03м, разница долгот – 7-8 минут, расстояние – 100-110 км. В этом случае за учет фактора 2 ставится 1 балл. Если делаются обе ошибки, и фактор рефракции занижается в 4 раза – этап не засчитывается.

Фактор 3 (2 балла). Учет уменьшения длины параллели на Земле при удалении от экватора. Если его опустить, то расстояние между пунктами A и B увеличивается в 2 раза до 330 км.

Фактор 4 (1 балл). Вычисление окончательного расстояния. Ошибки, сделанные на предыдущих этапах, не влияют на оценивание финального этапа, если в итоге не получается абсурдная величина (см. выше).

2. Условие. 30 октября 2021 года планета Венера оказалась в наибольшей восточной элонгации в небе Земли, а сама Земля – в наибольшей западной элонгации в небе Сатурна. Какая из планет – Венера или Сатурн – после этого раньше вступит в соединение (любое) с Солнцем в небе Земли и на сколько времени? Орбиты всех планет считать круговыми и лежащими в одной плоскости.

2. Решение. Изобразим положение всех трех планет на своих орбитах в указанный день:



Коль скоро Земля оказалась в наибольшей западной элонгации при наблюдении с Сатурна, угол «Солнце – Земля – Сатурн» составляет 90°, то есть Сатурн при наблюдении с Земли находится в квадратуре, причем в восточной. Венера при наблюдении с Земли также располагается к востоку от Солнца. Угол «Солнце – Венера – Земля» также равен 90°. Венера отстает от Земли в своем орбитальном движении на угол

$$\beta_1 = \arccos(r_1/r_0) = 43.7°.$$

Здесь r_0 и r_1 – радиусы орбит Земли и Венеры. Постепенно Венера, как внутренняя планета, будет догонять Землю, и этот угол будет уменьшаться. Если перейти в систему отсчета, связанную с направлением «Солнце-Земля», то Венера будет совершать в ней полный круг с синодическим периодом S_1 = 583.9 сут. Таким образом, время до ближайшего нижнего соединения Венеры с Солнцем равно

$$T_1 = S_1\, \beta_1 / 360° = 71 \text{ сут.}$$

В случае Сатурна ситуация несколько иная – Земля уже опережает его в своем движении по орбите и продолжает удаляться. Соединение Сатурна и Солнца в небе Земли наступит, когда Земля и Сатурн окажутся с разных сторон от Солнца. Для этого разность их долгот должна возрасти на угол

$$\beta_2 = 180° - \arccos(r_0/r_2) = 96.0°.$$

Здесь r_2 – радиус орбиты Сатурна. Обозначив синодический период Сатурна (378.1 суток) через S_2, найдем время, оставшееся до его соединения с Солнцем:

$$T_2 = S_2\, \beta_2 / 360° = 101 \text{ сут.}$$

В итоге, нижнее соединение Венеры произойдет на 30 дней раньше соединения Сатурна. В реальности, нижнее соединение Венеры действительно наступает 9 января 2022 года, через 71 дней после ситуации, описанной в условии задачи, а соединение Сатурна – 4 февраля, через 97 дней. Различие связано с эллиптичностью орбит планет.

2. Система оценивания.
1 этап (2 балла): Правильное текстовое или графическое описание взаимной конфигурации Земли и Венеры (1 балл) и Земли и Сатурна (1 балл).

2 этап (4 балла): Определение величин, на которые должны измениться разности долгот Венеры и Земли (2 балла) и Земли и Сатурна (2 балла), чтобы наступили соединения, в численном или аналитическом виде. Требуемая точность – 1°.

Вероятная ошибка участника: неверная интерпретация понятия соединения, что может изменить искомые величины на 180°: поиск момента верхнего соединения Венеры либо противостояния Сатурна. В этом случае не засчитывается часть этапа, соответствующая данной планете, и следующий этап.

Вероятная ошибка участника: вместо угла β_2 находится его дополнение до 180° (84°), что приближает соединение Сатурна на 13 дней. В этом случае не засчитывается часть данного этапа, связанная с Сатурном, последующий этап засчитывается наполовину.

3 этап (2 балла): определение разницы времен до ближайших соединений Венеры и Сатурна с Солнцем. Этап проще всего выполнить, используя величины синодических периодов обеих планет, приведенные в справочных данных, можно также производить вычисления через орбитальные периоды. Требуемая точность – 1 сутки, при правильной очередности (соединение Венеры происходит раньше).

3. Условие. Двойная система состоит из одинаковых звезд, идентичных Солнцу и обращающихся по круговым орбитам на расстоянии 1 а.е. друг от друга. В результате близкого пролета еще одной такой же звезды система распалась, все три звезды навсегда покинули окрестности друг друга. Определите минимальную скорость третьей звезды относительно центра двойной системы до сближения.

3. Решение. Обозначим массы каждой звезды как M, расстояние между ними – a. Каждая из них движется по окружности радиусом $a/2$ со скоростью v_0, для которой справедливо соотношение:

$$\frac{GM^2}{a^2} = \frac{2Mv_0^2}{a}; \quad v_0 = \sqrt{\frac{GM}{2a}}.$$

Полная энергия двойной системы равна

$$E_0 = 2 \cdot \frac{Mv_0^2}{2} - \frac{GM^2}{a} = -\frac{GM^2}{2a}.$$

Третья звезда до сближения не взаимодействует с двойной системой и имеет скорость v. Тем самым, энергия системы из трех звезд в системе отсчета, связанной с положением центра масс двойной системы до сближения с третьей звездой, есть

$$E = \frac{Mv^2}{2} - \frac{GM^2}{2a}.$$

Нас интересует минимальное значение скорости v, при котором система распадется, то есть у звезд не останется потенциальной энергии взаимодействия друг с другом. Однако, в данной системе отсчета полная кинетическая энергия движения трех звезд не может обратиться в ноль, так как ее центр масс системы из всех трех звезд движется со скоростью $v/3$, и эта скорость не может измениться в результате взаимодействия. Наименьшая кинетическая энергия системы после взаимодействия будет в том случае, если все звезды на большом расстоянии друг от друга будут иметь скорость $v/3$. Тогда мы можем записать закон сохранения полной энергии:

$$\frac{Mv^2}{2} - \frac{GM^2}{2a} = 3 \cdot \frac{M(v/3)^2}{2} = \frac{Mv^2}{6}.$$

Отсюда мы получаем выражение для минимальной скорости третьей звезды до взаимодействия:

$$v = \sqrt{\frac{3GM}{2a}} = \sqrt{3}v_0 = 36.5 \text{ км/с}.$$

Вероятные потери энергии при взаимодействии звезд могут привести только к увеличению требуемой для распада системы скорости звезды, поэтому полученное значение действительно является минимальным.

3. Система оценивания. При проверке необходимо учитывать, что решение может вестись как в системе отсчета, связанной с центром масс двойной системы до взаимодействия, как сделано выше, так и в системе отсчета, связанной с общим центром масс всех звезд, оба подхода в равной степени обоснованы.

1 этап (2 балла). Выражение для полной энергии системы до взаимодействия. Предложенный выше ход решения наиболее полный, участники олимпиады вправе сразу написать, что полная энергия системы из двух звезд есть $-GM^2/2a$, как общеизвестный факт.

2 этап (4 балла). Выражение для минимальной полной энергии системы после взаимодействия.
Вероятная ошибка участника: решение ведется в системе отсчета, связанной с изначальным центром двойной системы, а минимальная полная энергия после взаимодействия считается равным нулю, что противоречит закону сохранения импульса. Это приводит к ответу без коэффициента 3/2 под знаком корня и численному значению 29.8 км/с. В этом случае второй этап решения не засчитывается полностью (0 баллов), третий этап оценивается, исходя из правильности его выполнения (максимум за решение – 4 балла).

3 этап (2 балла). Вычисление минимальной скорости звезды, погрешность не выше 1 км/с.

4. Условие. Астрономическая обсерватория будущего построена на одной из карликовых планет Солнечной системы, обращающейся по круговой орбите. Измерения положения звезды, удаленной от Солнца на 10 пк, показали, что ее параллактическое и аберрационное смещения в течение одного оборота планеты вокруг Солнца имеют одинаковые амплитуды. Найдите орбитальный период планеты, на которой построена обсерватория.

4. Решение. Амплитуда параллактического смещения звезды при наблюдении с планеты составляет

$$p'' = 206265'' \, r/L = r \text{ (а.е.)} / L \text{ (пк)},$$

где r – радиус орбиты планеты, L – расстояние до звезды. Амплитуда аберрационного смещения есть

$$a'' = 206265'' \, v/c = 206265'' \, (r/r_0)^{-1/2} \, v_0/c = 20.5''/ (r \text{ (а.е.)})^{1/2}.$$

Здесь r_0 – радиус орбиты Земли, v_0 – орбитальная скорость Земли (29.8 км/с). По условию задачи, амплитуды одинаковы, а расстояние до звезды составляет 10 пк. Опуская обозначения единиц измерения, получаем выражение для радиуса орбиты:

$$r / 10 = 20.5 / r^{1/2}; \quad r = 205^{\,2/3} = 34.8 \text{ а.е.}$$

Очевидно, обсерватория располагается на транснептуновом теле. Период его обращения легко определить, так как при выражении в годах он равен $T = r^{3/2} = 205$ – величине, которая была определена по ходу выкладок в предыдущей формуле.

4. Система оценивания.
1 этап (2 балла). Правильная связь амплитуды параллактического смещения и радиуса орбиты обсерватории. Если участник делает ошибку, приводящую к появлению численного коэффициента, но не меняющую характер зависимости $p \sim r$ – этап не засчитывается, но все остальные, при условии их правильного выполнения, оцениваются в полной мере. Если ошибка приводит к изменению самого характера зависимости – этап не засчитывается, этап 2 оценивается исходя из правильности его выполнения, этапы 3 и 4 засчитываются не более чем наполовину.

2 этап (2 балла). Правильная связь амплитуды аберрационного смещения и радиуса орбиты обсерватории. Участник может не представлять выкладок, а сразу написать аберрационное смещение на орбите Земли как известное (20″ или 20.5″) Если участник делает ошибку, приводящую к появлению численного коэффициента, но не меняющую характер зависимости $a \sim r^{-1/2}$ – этап не засчитывается, но все остальные, при условии их правильного выполнения, оцениваются в полной мере. Если ошибка приводит к изменению самого характера зависимости – этап не засчитывается, этап 1 оценивается исходя из правильности его выполнения, этапы 3 и 4 засчитываются не более чем наполовину.

3 этап (2 балла). Формулировка выражения либо численное определение радиуса орбиты тела, на котором установлена обсерватория. При численном исполнении допустимая погрешность составляет 0.5 а.е.

4 этап (2 балла). Вычисление орбитального периода карликовой планеты. Допустимая погрешность – 5 лет (в частности, значение ровно в 200 лет получится, если использовать величину аберрации на орбите Земли ровно в 20″, и это допустимо).

5. Условие. При наблюдении из окрестностей звезды A звезды B и C имеют одинаковую звездную величину 1^m. При наблюдении из окрестностей звезды B звезды A и C имеют одинаковую звездную величину 2^m. Какая из звезд – A или B – выглядит ярче из окрестностей звезды C и на сколько звездных величин? Межзвездным поглощением пренебречь.

5. Решение и система оценивания. См. задание 5 для 9 класса.

6. Условие. 12 декабря 2023 года произойдет редкое явление – покрытие яркой звезды Бетельгейзе (α Ориона, α = 05ч55.2м, δ = +7°24′) астероидом Леона. Перед Вами карта видимости этого явления, на которой указана полоса видимости (границы соответствуют внутренним жирным линиям) и моменты середины покрытия в разных пунктах Земли по Всемирному времени в минутах после 1ч. Считая орбиту Леоны круговой, оцените ее видимую звездную величину в момент явления. Считать сферическое альбедо Леоны равным 0.05, а Бетельгейзе – точечным источником на небе.

6. Карта, решение и система оценивания. См. задание 6 для 9 класса.

<u>11 класс</u>

1. Условие. В первый день нового года, 1 января, Луна оказалась в фазе полнолуния, одновременно на ее диске наблюдались максимальные либрации по широте к югу и по долготе к западу, то есть наилучшим возможным образом были видны участки южного и западного полушарий Луны (см. рисунок). В какую дату начавшегося года можно ожидать полное солнечное затмение? Драконический месяц (период между двумя прохождениями Луны одного узла своей орбиты) составляет 27.2122 суток.

1. Решение. Полная Луна 1 января располагается на той же эклиптической долготе, на которой Солнце оказывается в конце июня – начале июля. Коль скоро максимума достигла южная либрация Луны по широте, можно сделать вывод, что Луна находилась на максимальном удалении к северу от эклиптики, на полпути от восходящего к нисходящему узлу орбиты. Таким образом, сами узлы орбиты – точки, около которых возможны затмения – удалены от данной точки на 90° вправо и влево, располагаясь на участках эклиптики, которые Солнце пройдет в конце марта – начале апреля и в конце сентября – начале октября.

Кроме этого, максимума достигла либрация по долготе к западу. Это можно трактовать как опережение осевого вращения Луны, идущего от запада к востоку, относительно ее орбитального движения. Осевое вращение Луны происходит равномерно, а вот орбитальное – нет, оно ускоряется вблизи перигея и замедляется в апогее. Таким образом, можно сделать вывод, что Луна на рисунке находится на пути от апогея, где ее орбитальное движение отстало от осевого, к перигею, где оно будет его догонять. Таким образом, в данный момент перигей орбиты Луны находится примерно в четверти дуги орбиты впереди ее нынешнего положения, то есть на эклиптических долготах, на которых Солнце будет в сентябре – октябре.

Таким образом, солнечные затмения в начинающемся году случатся вблизи равноденствий, когда видимый диаметр Солнца будет близок к среднему значению. Полным из них может быть то, которое окажется ближе к перигею лунной орбиты, то есть осеннее. Для того, чтобы максимально точно указать дату, учтем, что драконический месяц (период прохода Луны мимо одного узла своей орбиты) меньше периода его обращения, и за предстоящие 9 месяцев узлы сместятся навстречу движению видимому годовому движению Солнца. Солнечное затмение случится в новолуние, от 1 января до затмения пройдет 8.5 синодических периодов Луны или 251 суток. За это же время Луна сделает 9 и 1/4 оборота относительно линии узлов (9.25 драконических месяцев) и окажется вблизи нисходящего узла орбиты. Полное солнечное затмение можно ожидать через 251 день после 1 января, то есть 8 или 9 сентября.

Можно обратить внимание, хотя это и не требуется для решения данной задачи, что 8.5 синодических месяцев (251.0 суток) чуть меньше, чем 9.25 драконических месяцев (251.7 суток), поэтому во время сентябрьского новолуния и затмения Луна чуть не дойдет до нисходящего узла своей орбиты, и затмение будет наблюдаться в северном полушарии Земли.

Ситуация, смещенная на 3 дня относительно условия задачи, имела место в 1950 году. 4 января произошло полнолуние, совпавшее с максимальной южной и западной элонгацией Луны. Полное солнечное затмение наблюдалось на Чукотском полуострове и прилегающих акваториях 12 сентября 1950 года.

1. Система оценивания.
1 этап (2 балла). Вывод о том, что Луна 1 января располагается примерно посередине между двумя узлами своей орбиты. Вывод может быть сделан в текстовом и графическом виде. Участник может оперировать как понятием «узла», так и понятием дат и сезонов года, когда может произойти затмение.

2 этап (2 балла). Вывод о том, что перигей орбиты Луны находится в передней дуге ее орбиты по отношению к ее текущему положению 1 января. Участник может написать, что он располагается в 90° спереди, хотя это и не является точным, оценка за это не снижается.

3 этап (2 балла). Определение месяца, в котором произойдет затмение. Оба балла выставляются, если участник учитывает движение узлов лунной орбиты и делает вывод, что затмение случится в сентябре. В случае двойного ответа (сентябрь или октябрь) или однозначного ответа «октябрь» этап оценивается 1 баллом. При указании других месяцев этап не засчитывается, последующий оценивается, исходя из его выполнения.

4 этап (2 балла). Определение даты затмения, допустимая погрешность при решении описанным выше методом 1 день. Участник должен определить интервал времени до затмения как (N–0.5) синодических периодов Луны, где N – номер месяца затмения (в правильном варианте N=9, ошибка в числе N, идущая из предыдущего этапа, не влияет на оценку за этот этап). Участник может (но не обязан) сравнить его с интервалом в (N+0.25) драконических месяцев, чтобы сделать вывод о том, что Луна действительно окажется вблизи узла. Однако, если делается только расчет интервала в (N+0.25) драконических месяцев, то такое решение считается неточным, так как затмение может произойти на некотором удалении от узла орбиты, оценка снижается на 1 балл.

Участник может пытаться учесть неравномерность движения Луны по орбите вследствие эллиптичности орбиты. В реальности, это не выводит ответ из рамок принятой погрешности (1 день). Тем не менее, при попытке учета этих факторов величина допустимой погрешности в решении участника увеличивается до 3 дней.

Вероятная ошибка участника: вместо полнолуния считается, что Луна располагалась рядом с Солнцем, в новолунии (либо же предполагается полнолуние, но далее ищется момент лунного затмения вместо солнечного). Если дальнейшее решение ведется без иных ошибок, то в итоге должно получиться, что затмение произойдет через 3 синодических периода Луны, то есть около 30 марта. В этом случае могут быть засчитаны первые два этапа решения, а также выставлен 1 балл за последний этап, максимальная оценка – 5 баллов.

Вероятная ошибка участника: неверная интерпретация либрации по долготе и определение положения перигея (на 180° от истинного значения). При отсутствии иных ошибок участник должен получить, что затмение случится через 2.5 лунных месяца после 1 января, то есть около 15 марта (возможен еще неточный ответ 13-14 апреля). При таком решении не засчитывается второй этап, последний этап засчитывается наполовину – максимальная оценка также 5 баллов.

Наиболее сложный случай: участник делает обе описанные выше ошибки, предполагая, что затмение отстоит на целое число лунных месяцев от 1 января, а точка перигея отстает на 90° от текущего положения Луны на орбите. В этом случае наиболее вероятная дата солнечного затмения будет отстоять на 9 лунных месяцев от 1 января, то есть затмение состоится около 27 сентября. Хотя дата оказывается не так далеко от верной, это дважды ошибочное решение, при котором не засчитываются второй и третий этапы, четвертый может быть зачтен только наполовину, если участник не делает иных ошибок. Максимальная оценка за решение составляет 3 балла.

При формулировке правильного или частичного правильного ответа на третьем-четвертом этапах с недостатком или вовсе без соответствующих обоснований (первые этапы решения) третий этап оценивается в соответствии с описанными выше критериями, а за первые два этапа оценка выставляется исходя из наличия и обоснованности их выполнения.

2. Условие. 30 октября 2021 года планета Венера оказалась в наибольшей восточной элонгации в небе Земли, а сама Земля – в наибольшей западной элонгации в небе Сатурна. Какая из планет – Венера или Сатурн – после этого раньше вступит в соединение (любое) с Солнцем в небе Земли и на сколько времени? Орбиты всех планет считать круговыми и лежащими в одной плоскости.

2. Решение и система оценивания. См. задачу 2 для 10 класса.

3. Условие. Двойная система состоит из одинаковых звезд, идентичных Солнцу и обращающихся по круговым орбитам на расстоянии 1 а.е. друг от друга. В результате близкого пролета еще одной такой же звезды система распалась, все три звезды навсегда покинули окрестности друг друга. Определите минимальную скорость третьей звезды относительно центра двойной системы до сближения.

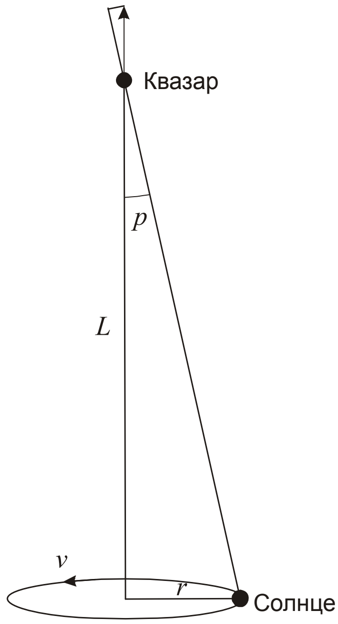
3. Решение и система оценивания. См. задачу 3 для 10 класса.

4. Условие. Система радиотелескопов проводит точные астрометрические наблюдения далекого квазара вблизи галактического полюса на небе. Его красное смещение 0.25, он не имеет тангенциальной скорости относительно центра нашей Галактики. Чтобы исключить влияние движения Земли и получить гелиоцентрическое собственное движение, наблюдения проводятся строго с интервалом в один звездный год. Считая, что Солнце движется вокруг неподвижного галактического центра по круговой траектории радиусом 8.5 кпк со скоростью 230 км/с, определите значение собственного движения квазара, которое будет получено в результате наблюдений (угол между измеренными положениями объекта с интервалом в 1 звездный год).

4. Решение. Из условия задачи может показаться, что собственного движения у квазара нет или же оно настолько мало, что не сможет быть зарегистрировано даже современными мощными астрометрическими средствами. Тем не менее, рассмотрим различные факторы, которые могут привести к видимым изменениям направления на квазар, и оценим их количественно.

Во-первых, мы можем случайно забыть о свойствах космологического красного смещения и считать, что квазар просто удаляется по линии от центра нашей Галактики со скоростью

$$V = c\,z = 75\,000 \text{ км/с.}$$



В соответствии с законом Хаббла, расстояние до квазара есть

$$L = V\,/\,H = 1.1 \text{ Гпк.}$$

Галактический параллакс квазара равен

$$p = r\,/\,L = 7.7\cdot10^{-6} = 1.6''.$$

Если мы считаем, что квазар летит от центра галактики со скоростью V, то при наблюдении с Солнца у него появится тангенциальная скорость $V_T = Vp = 0.6$ км/с и собственное движение:

$$\mu_T = V_T/L \sim 10^{-10}\ ''/\text{ год}$$

Такое собственное движение не сможет зафиксировать никакой современный астрометрический прибор, к тому же мы определили его из неверных физических соображений. Однако, существуют и другие факторы, которые могут привести к видимому движению квазара. В частности, Солнце движется вокруг центра Галактики со скоростью v=230 км/с. Это движение вызывает параллактическое смещение квазара:

$$\mu_P = v/L \sim 4.4\cdot10^{-8}\ ''/\text{ год}$$

Это «собственное движение» – часть параллактической окружности, которую квазар, расположенный у галактического полюса на небе, опишет за один оборот Солнца вокруг центра Галактики. Этот эффект уже сильнее, но тоже пока за пределами возможностей современной астрометрии. Наконец, положение квазара смещается за счет аберрации света:

$$\alpha = v\,/\,c = 7.7\cdot10^{-4} = 158''.$$

По ходу движения Солнца вокруг центра Галактики аберрационное смещение квазара у галактического полюса на небе будет также описывать окружность. Соответствующая угловая скорость составит

$$\mu_A = 2\pi\alpha/T = v\alpha/r = v^2/rc = a/c = 4.4\cdot10^{-6}\ ''/\text{ год.}$$

Здесь T – период вращения Солнца, a – его центростремительное ускорение. Такое собственное движение обнаружимо современными средствами радиоинтерферометрии и уже на пределе возможностей оптической астрометрии уровня телескопа GAIA. Этот эффект кажущегося собственного движения квазаров, не зависящий от расстояния до них, учитывается при обработке астрометрических данных.

4. Система оценивания. Оценка участника за решение этой задачи определяется тем механизмом возникновения эффекта собственного движения, который укажет участник, и правильностью оценки его величины. Если участник указывает сразу несколько таких механизмов, оценивается тот, который дает максимальный эффект. То есть, правильное оценивание величины аберрационного собственного движения само по себе достаточно для выставления максимальной оценки за решение.

Случай 1 – оценка собственного движения за счет тангенциальной скорости квазара относительно Солнца. Подобное представление противоречит свойствам космологического красного смещения. Выполнение подобной оценки с правильным ответом порядка 10^{-10} ″/ год оценивается в **2 балла** (1 балл за оценку расстояния до Галактики и 1 балл за оценку скорости). Данные расчеты не оцениваются, если далее участник рассматривает более адекватные механизмы появления собственного движения.

Случай 2 – оценка собственного движения за счет параллактического смещения. При правильном выполнении оценивается в **4 балла**, если далее не приводится анализ аберрации света. Эти 4 балла раскладываются по 2 балла за определения расстояния и собственного движения квазара. Промежуточные результаты могут не выводиться в численном виде, тогда оцениваются формулы, по которым они получались. В случае ошибки на каком-либо этапе решения остальные оцениваются в полной мере.

Случай 3 – оценка аберрационного смещения. Правильное выполнение оценивается в **8 баллов**. При этом участнику не требуется вычислять расстояние до квазара. Достаточно определить величину аберрационного смещения квазара в общем или численном виде (4 балла, при численном определении допустимая погрешность 10%) и угловую скорость смещения квазара (4 балла, такое же требование по точности). Прямое использование формулы a/c для аберрационного собственного движения, как общеизвестной без вывода – также допускается и не является основанием для снижения оценки.

Элементарное неверное решение: вывод о том, что собственное движение квазара будет равно нулю. Данный ответ не может быть оценен выше 1 балла.

5. Условие. Звезда ровно в 3 раза больше Солнца по радиусу, температура ее поверхности 10000 K. Расстояние до нее 10 пк, видимая звездная величина $+1.0^m$. Эта звезда окружена шарообразной пылевой туманностью, угловой диаметр которой в небе Земли равен 2.0″. Найдите эффективную температуру туманности. Межзвездным поглощением за пределами туманности пренебречь.

5. Решение. Определим светимость звезды через ее радиус R и температуру T, сравнив звезду с Солнцем (индекс «0»):

$$L = L_0\left(\frac{R}{R_0}\right)^2\left(\frac{T}{T_0}\right)^4 = 80L_0.$$

Абсолютная звездная величина звезды равна

$$M = M_0 - 2.5\lg\,(L/L_0) = 0.$$

Так как расстояние до звезды D равно 10 пк, ее видимая звездная величина, по идее, должна была быть также равна 0. Но в реальности звезда на одну величину, то есть в K=2.512 раз слабее. Связано это с тем, что значительная $((K–1)/K)$ часть излучения звезды задерживается в пылевой туманности. Это излучение нагревает туманность и в конечном итоге высвечивается в ней, но уже в невидимом глазу инфракрасном диапазоне. Определить эффективную температуру туманности мы можем по закону Стефана-Больцмана. Радиус туманности равен

$$r = D\delta/2 = 10 \text{ а.е.} = 2.14 \cdot 10^3\ R_0 = 7.1 \cdot 10^2\ R.$$

где δ – угловой диаметр туманности. Ее светимость равна $L(K–1)/K$. Отсюда мы имеем:

$$\frac{L(K-1)}{K} = L_0 \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 \frac{K-1}{K} = L_0 \left(\frac{r}{R_0}\right)^2 \left(\frac{t}{T_0}\right)^4.$$

Температура туманности равна

$$t = T \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{1/2} \left(\frac{K-1}{K}\right)^{1/4} = 330\text{K}.$$

5. Система оценивания.

1 этап (2 балла): Определение светимости звезды. Требуемая точность – 5%. Если в качестве эффективной температуры Солнца участник берет величину 6000 K, итоговая погрешность оказывается несколько большей. Оценка за этап уменьшается на 1 балл, остальные оцениваются в полной мере.

2 этап (2 балла). Определение части светимости звезды, которая задерживается в пылевой туманности (фактически, определение светимости туманности). Требуемая точность – 10%.

3 этап (2 балла). Вычисление радиуса туманности. В процессе выполнения участник может спутать радиус с диаметром, что даст ошибку в 2 раза на этом этапе и в 1.4 раза – в итоговом значении температуры. В этом случае данный этап не засчитывается, последующий оценивается исходя из точности его выполнения.

4 этап (2 балла). Определение температуры туманности. Ввиду того, что зависимость от фактора $(K – 1)/K$ у температуры слабая, а фактор (R/r) участники должны определить достаточно точно, допустимая погрешность составляет 5%.

Возможное приближенное решение: участник не вычисляет или неверно вычисляет долю излучения звезды, которая задерживается в туманности, и считает, что ее светимость по порядку величины просто совпадает со светимостью звезды. Это исключает множитель $(K – 1)/K$ из последней формулы и весьма незначительно меняет температуру туманности, которая становится равной 375 K. При таком решении не засчитывается его второй этап, остальные, при условии верного выполнения, оцениваются полностью, итоговая оценка не превышает 6 баллов.

6. Условие. 12 декабря 2023 года произойдет редкое явление – покрытие яркой звезды Бетельгейзе (α Ориона, α = 05ч55.2м, δ = +7°24′) астероидом Леона. Перед Вами карта видимости этого явления, на которой указана полоса видимости (границы соответствуют внутренним жирным линиям) и моменты середины покрытия в разных пунктах Земли по Всемирному времени в минутах после 1ч. Считая орбиту Леоны круговой, оцените ее видимую звездную величину в момент явления. Считать сферическое альбедо Леоны равным 0.05, а Бетельгейзе – точечным источником на небе.

6. Карта, решение и система оценивания. См. задание 6 для 9 класса.