

Условия и решение задач
Открытой городской олимпиады по астрономии, астрофизике
и физике космоса им. В. С. Троицкого
05 февраля 2023 г.

Каждая задача оценивается в 7 баллов

1. Выберите наиболее точный ответ на каждый вопрос.

- | | |
|--|---|
| <p>а) Небесное тело Плутон назвали в честь:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) древнегреческого философа; 2) древнегреческого героя; 3) римского бога; 4) химического элемента, обнаруженного на планете. | <p>б) Расстояние от Земли до Солнца равно:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 1 астрономической единице; 2) 1 парсеку; 3) 1 световому году; 4) 380 тыс. км? |
| <p>в) Самая близкая к Солнцу звезда находится в созвездии:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Кита; 2) Лебеда; 3) Ориона; 4) Центавра? | <p>г) Характерная толщина атмосферы Земли по сравнению с высотой горы Эверест:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) того же порядка величины; 2) существенно больше; 3) существенно меньше? |
| <p>д) Какое из перечисленных созвездий наименьшее по площади на небе:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Большая Медведица; 2) Кассиопея; 3) Пегас? | <p>е) Свет проходит расстояние от Земли до Луны и обратно примерно:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) за 3 миллисекунды, 2) за 3 секунды, 3) за 3 минуты. |
- ж) Скорость движения Луны как спутника Земли:
- 1) меньше,
 - 2) равна,
 - 3) больше,
- первой космической скорости на Земле.

2. Длина тени в Нижнем Новгороде в августовский полдень близка к высоте предметов. Какова длина тени от вертикального шеста высотой 1 метр в полдень того же дня в Кейптауне на широте 34° . Географическая широта Нижнего Новгорода равна 56° .

3. Во сколько раз Венера ближе к Солнцу, чем Земля, если максимальное угловое расстояние на небе между Солнцем и Венерой достигает 47° ?

4. Оцените, на какую долю своего радиуса смещается Солнце при вращении системы «Солнце — Юпитер» вокруг своего центра масс. Отношение массы Солнца к массе Юпитера и отношение расстояния от Солнца до Юпитера к радиусу Солнца примерно равны 1 000.

1. Выберите наиболее точный ответ на каждый вопрос.

- а) Ярчайшая звезда неба Сириус видна: б) Основной источник энергии Солнца:
- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1) зимой в Нижегородской области, | 1) химические реакции, |
| 2) летом в Нижегородской области, | 2) распад ядер, |
| 3) только в южной части России? | 3) синтез ядер, |
| | 4) гравитационное сжатие? |
- в) Расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 8 световых: г) Растущая Луна в первой четверти восходит в Нижнем Новгороде:
- | | |
|------------|----------------|
| 1) секунд; | 1) в 6 утра; |
| 2) минут; | 2) в полдень; |
| 3) часов; | 3) в 6 вечера. |
| 4) дней? | 4) в полночь? |
- д) Ядра железа на Земле образовались: е) Магнитные бури на Земле вызваны:
- | | |
|------------------------------|---|
| 1) в начале жизни Вселенной; | 1) гравитационными волнами в ионосфере; |
| 2) при взрывах сверхновых; | 2) солнечным ветром; |
| 3) при образовании Солнца; | 3) антициклонами в атмосфере; |
| 4) при формировании Земли? | 4) электрическими токами в Земле? |
- ж) Гравитационные волны зарегистрированы:
- | | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| 1) наземным телескопом VLT; | 2) интерферометром LIGO; |
| 3) орбитальным телескопом «Кеплер»; | 4) спутниками GPS и ГЛОНАСС? |

2. Каким станет период обращения Земли вокруг Солнца, если масса Земли увеличится до массы Солнца и объекты продолжат вращение с прежним расстоянием между ними по круговым орбитам?

3. Система отсчёта, связанная с вращающейся вокруг своей оси Землёй, представляет собой так называемую неинерциальную систему отсчёта. В этой системе Солнце обращается вокруг Земли за 1 сутки в основном под действием сил инерции: противоположно направленным друг другу «притягивающей» силы Кориолиса и «отталкивающей» центробежной силы. При этом сила Кориолиса в 2 раза превышает центробежную силу. Во сколько раз сила Кориолиса превышает силу гравитационного притяжения между Солнцем и Землёй, если масса Солнца в 333 000 раз больше массы Земли?

4. Когда космонавты долетят до Марса, смогут ли они увидеть без телескопа нашу Луну? Наблюдения проводят в момент наибольшего углового расстояния между Землёй и Солнцем на небе Марса; радиус орбиты Марса 1,5 а. е. (1 а. е. = 150 млн км); радиус орбиты Луны 380 тыс. км; Луна в первой четверти воспринимается на Земле как объект с видимой звёздной величиной $m_{\text{ЛЗ}} = -9,0^m$. Человек видит невооружённым глазом звёзды до величины 6^m , угловое разрешение глаза около $1'$.

1. Выберите наиболее точный ответ на каждый вопрос.

- а) Луна находилась в наивысшей точке над горизонтом ровно в полночь с субботы на воскресенье. Тогда предыдущая кульминация была:
- 1) в пятницу;
 - 2) в субботу;
 - 3) в воскресенье;
 - 4) в понедельник?
- б) Если бы Земля завращалась вокруг своей оси с той же скоростью в противоположном направлении относительно неподвижных звёзд, то солнечные сутки:
- 1) стали бы короче,
 - 2) стали бы длиннее,
 - 3) остались бы теми же?
- в) Галактика Млечный Путь:
- 1) клочковатая;
 - 2) линзовидная;
 - 3) спиральная;
 - 4) эллиптическая?
- г) Кольца Сатурна в основном состоят:
- 1) из силикатной пыли;
 - 2) из минеральных камней;
 - 3) из водяного льда;
 - 4) из метанового льда?
- д) Размер нейтронной звезды порядка:
- 1) Нижнего Новгорода,
 - 2) Земли,
 - 3) Солнца?
- е) Зонд «Розетта» обращался бы вокруг кометы Чурюмова—Герасименко, если бы его скорость была порядка:
- 1) 1 см/с;
 - 2) 1 м/с;
 - 3) 100 м/с;
 - 4) 8 км/с?
- ж) Пусть в полнолуние Луна занимает наиболее высокое возможное положение на небе. Тогда лунное или солнечное затмения можно ожидать примерно через:
- 1) две недели;
 - 2) три месяца;
 - 3) полгода;
 - 4) год?

2. Покажите, что сила притяжения Луны к Солнцу больше силы притяжения Луны к Земле. Попробуйте объяснить, почему же всё-таки Луна вращается вокруг Земли. Радиус орбиты Земли $R_З = 150$ млн. км, Луна удалена от Земли на расстояние $R_Л = 380$ тыс. км и делает один оборот вокруг Земли примерно за месяц.

3. Простейший телескоп (Галилея) представляет собой две фокусирующие линзы с некоторыми фокусными расстояниями f_1 и f_2 . Линзы располагают в трубе на расстоянии $d = f_1 + f_2$ (конфокальная конфигурация). Чему равно угловое увеличение телескопа, которое показывает, во сколько раз увеличивается видимый в телескоп угол между двумя объектами по сравнению с истинным угловым расстоянием между объектами на небе?

4. Оцените кинетическую энергию E частицы космических лучей, которые могут удерживаться в нашей Галактике межзвёздным магнитным полем с индукцией 10^{-10} Тл. Диаметр Галактики принять равным 90 тыс. световых лет. Энергия $E = pc$ релятивистской частицы пропорциональна её импульсу p и скорости света $c = 300\,000$ км/с. Электрический заряд частицы считать равным элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Ответ выразите в электронвольтах: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

1. а) 3) Римского бога.
 б) 1) 1 астрономической единице.
 в) 4) Центавра.
 г) 1) Того же порядка величины.
 д) 2) Кассиопея.
 е) 2) За 3 секунды.
 ж) 1) меньше.

2. 1 метр.

Сумма географических широт Нижнего Новгорода и Кейптауна составляет $56 + 34 = 90$ градусов. Следовательно, полуденные вертикали в Нижнем Новгороде и Кейптауне образуют прямой угол — 90° . Из равенства длины тени и высоты предмета в Нижнем Новгороде следует, что направление на Солнце составляет угол 45° с полуденной вертикалью в Нижнем Новгороде и отклонено к югу. Таким образом, направление на Солнце является биссектрисой прямого угла между полуденными вертикалями в Нижнем Новгороде и Кейптауне. Точки в Нижнем Новгороде и Кейптауне (в соответствующие полдни) расположены зеркально симметрично относительно направления на Солнце и, следовательно, одинаковые предметы в Нижнем Новгороде и Кейптауне отбрасывают равные тени. В частности, шест высотой 1 метр отбрасывает тень, равную своей высоте 1 метр.

3. В $1/\sin(47^\circ) \approx 1,37$ раза.

При движении Венеры по орбите вокруг Солнца луч зрения на планету максимально отклоняется от светила, когда он становится касательной к орбите. В такой конфигурации луч зрения «Земля — Венера» перпендикулярен отрезку «Солнце — Венера». Соответственно указанные отрезки «Земля — Венера» и «Солнце — Венера» образуют катеты в прямоугольном треугольнике, а гипотенуза — отрезок «Солнце — Земля». Тогда отношение катета «Солнце — Венера» к гипотенузе «Солнце — Земля» равно синусу угла 47° между Солнцем и Венерой. Искомое отношение расстояний «Солнце — Земля» и «Солнце — Венера» равно $1/\sin(47^\circ) \approx 1,37$.

4. Солнце смещается на расстояние порядка своего радиуса. В качестве ответа принимается как амплитуда смещения в один радиус, так и удвоенная амплитуда (размах) в два радиуса — диаметр Солнца.

Пусть $d_{Ю}$ — расстояние от Солнца до Юпитера, M_\odot и $M_{Ю}$ — массы Солнца и Юпитера. Согласно своему определению, центр масс системы «Солнце — Юпитер» удалён от центра Солнца на расстояние

$$r = \frac{M_{Ю}d_{Ю}}{M_\odot + M_{Ю}} = \frac{d_{Ю}}{(M_\odot/M_{Ю}) + 1} = \frac{d_{Ю}}{1\,000 + 1} \approx \frac{d_{Ю}}{1\,000},$$

где использовано данное в задаче отношение масс $M_\odot/M_{Ю} = 1\,000$. Вместе с тем согласно условию задачи радиус Солнца равен тому же расстоянию $d_{Ю}/1\,000$. Следовательно, центр масс системы находится на поверхности Солнца, и Солнце вращается вокруг этого центра масс по окружности радиуса r , который совпадает с радиусом звезды. Таким образом, в своём вращении Солнце смещается от центра масс на расстояние, равное своему радиусу.

Для справки приведём численные значения масс и расстояний: $M_{\odot} = 2,0 \cdot 10^{30}$ кг, $M_{\text{Ю}} = 1,9 \cdot 10^{27}$ кг, $d_{\text{Ю}} = 780$ млн. км = 5,2 а. е., радиус Солнца $R_{\odot} = 700$ тыс. км.

1. а) 1) Зимой в Нижегородской области.
- б) 3) Синтез ядер.
- в) 2) 8 минут.
- г) 2) В полдень.
- д) 2) При взрывах сверхновых.
- е) 2) Солнечным ветром.
- ж) 2) Интерферометром LIGO.

2. $(1 \text{ год})/\sqrt{2} \approx 8,5$ месяцев.

Объекты продолжают вращение вокруг общего центра масс, который уже будет находиться не в Солнце, а посередине между Солнцем и Землёй. Соответственно, радиус орбиты Земли (измеряемый от центра вращения) уменьшится в два раза. В свою очередь, центростремительное ускорение Земли останется прежним: сила гравитационного притяжения к Солнцу увеличится пропорционально гравитационной массе Земли, однако инерционная масса Земли увеличится во столько же раз.

Земля совершает оборот по окружности радиуса r со скоростью v за время $T = 2\pi r/v$. В свою очередь, центростремительное ускорение Земли $a = v^2/r$, что даёт выражение для скорости $v = \sqrt{ar}$. Подставляем его в выражение для периода: $T = 2\pi \sqrt{r/a}$. Видно, что уменьшение радиуса вращения в два раза при сохранении величины центростремительного ускорения приводит к уменьшению периода вращения в $\sqrt{2} \approx 1,4$ раз. Период обращения Земли станет равным $(1 \text{ год})/\sqrt{2} \approx 8,5$ месяцев.

3. Сила Кориолиса превышает силу тяготения в $9 \cdot 10^{10}$ раз.

Движение Солнца в неинерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй, представляет собой «быстрое» суточное вращение вокруг оси мира вместе с остальными звёздами, а также «медленное» периодическое годовое перемещение поперёк плоскости небесного экватора и постепенное отставание в суточном вращении от звёзд — перемещение по зодиакальным созвездиям. Суточное вращение Солнца обусловлено силой Кориолиса и центробежной силой, а более медленные движения — ещё и поступательной силой инерции, связанной с ускорением центра масс Земли в гравитационном поле Солнца.

Угол ϕ между направлением на Солнце и осью мира есть не что иное, как угол между направлением на Солнце и осью вращения Земли. Этот угол меняется в течение года (вместе с перемещением Солнца поперёк плоскости небесного экватора). Он достигает максимального значения 90° в дни весеннего и осеннего равноденствий (когда Солнце находится в плоскости небесного экватора в созвездиях Рыб и Девы, во времена Гиппарха — Овна и Весов) и уменьшается до $66,5^\circ = 90^\circ - 23,5^\circ$ в дни летнего и зимнего солнцестояний, когда Солнца поднимается (опускается) над плоскостью небесного экватора на максимальную высоту (глубину) $23,5^\circ$ — угол наклона земной оси к плоскости эклиптики.

Таким образом, если расстояние r от Земли до Солнца принять постоянным, то расстояние $r \sin \phi$ от Солнца до оси вращения — оси мира, — строго говоря, меняется в течение года. Однако последнее расстояние уменьшается от своего максимального значения менее чем на 10 %, поэтому для упрощения оценок пренебрежём этим изменением.

В таком случае Солнце совершает оборот вокруг Земли за одни сутки, что в 365 раз быстрее, чем годовое движение Земли вокруг Солнца в гелиоцентрической системе отсчёта.

та. Соответственно, в геоцентрической системе скорость движения Солнца в 365 раз, а ускорение — в 365^2 раз больше соответствующих величин для Земли в гелиоцентрической системе отсчёта. Но ускорение Земли в гелиоцентрической системе вызвано гравитационным взаимодействием с Солнцем. Следовательно, сумма сил инерции, действующих на Солнце, больше силы гравитации в отношении ускорений и масс объектов $365^2 \cdot 333\,000$ раз.

По условию задачи сила Кориолиса в 2 раза больше центробежной силы, следовательно, половина силы Кориолиса компенсирует центробежную силу, а вторая половина как раз и создаёт суммарную силу инерции, обеспечивающую необходимое центростремительное ускорение. Таким образом, сила Кориолиса в $2 \cdot 365^2 \cdot 333\,000 = 9 \cdot 10^{10}$ раз больше силы гравитационного притяжения Солнца и Земли.

4. Смогут. Видимая звёздная величина Луны на Марсе $4,3^m < 6^m$, угловое расстояние между Луной и Землёй достаточно большое — примерно четверть видимого диаметра Луны на Земле.

Когда угловое расстояние между Солнцем и Землёй на небе Марса достигает максимального значения (элонгация), луч зрения с Марса на Землю касается орбиты Земли. В такой конфигурации отрезки «Солнце — Земля» (1 а. е.) и «Марс — Земля» образуют катеты в прямоугольном треугольнике, а гипотенуза — отрезок «Солнце — Марс» (1,5 а. е.). Тогда по теореме Пифагора расстояние от Марса до Земли $r_{МЗ} = \sqrt{1,5^2 - 1^2}$ а. е. $\approx 1,12$ а. е. = 170 млн км. Увеличение расстояния до объекта в α раз уменьшает плотность потока принимаемого излучения в α^2 раз и, следовательно, увеличивает видимую звёздную величину объекта на $2,5 \lg(\alpha^2) = 5 \lg \alpha$ магнитуды. Таким образом, увеличение расстояния до Луны от 380 тыс. км до 170 млн км увеличивает её видимую звёздную величину на $5 \lg(170/0,38) \approx 13,3^m$.

Поскольку лучи от Солнца падают на Землю и Луну перпендикулярно лучу зрения с Марса на Землю, то Луна видна как серп в первой (или третьей) четверти (в зависимости от того, с какой из двух возможных сторон от Солнца находится Земля). Звёздная величина Луны в первой (или третьей) четверти составляет $m_{ЛЗ} = -9,0^m$.

Таким образом, видимая звёздная величина Луны составит «земную» величину $m_{ЛЗ} = -9,0^m$, увеличенную на найденное изменение $13,3^m$: $-9,0^m + 13,3^m = 4,3^m$. Найденная звёздная величина не превышает максимальную звёздную величину 6^m видимых невооружённым глазом звёзд. Поэтому Луна будет видна с Марса невооружённым глазом.

Угловое расстояние между Луной и Землёй составит 380 тыс. км / (170 млн км) рад = $0,13^\circ$ — примерно $1/4$ от видимого диаметра Луны на Земле $0,5^\circ$, что вполне позволяет глазу разрешить Луну и Землю как два объекта.

1. а) 1) В пятницу (ближайшую).
- б) 1) Стали бы короче.
- в) 3) Спиральная.
- г) 3) Из водяного льда.
- д) 1) Нижнего Новгорода.
- е) 2) 1 м/с.
- ж) 2) Три месяца.

2. На орбите Земли (и Луны) Солнце создаёт ускорение свободного падения $g_{\odot} = 0,60 \text{ см/с}^2$, тогда как Земля создаёт примерно в 2 раза меньшее ускорение $g_{\oplus} = 0,26 \text{ см/с}^2$ на орбите Луны. Луна вращается вокруг Земли, поскольку отклонение гравитационного поля от однородного на орбите Луны определяется именно Землёй, а не Солнцем.

Земля равномерно движется вокруг Солнца с некоторой скоростью v по круговой орбите с радиусом R_{\oplus} . Следовательно, планета имеет центростремительное ускорение

$$a_{\odot} = \frac{v^2}{R_{\oplus}}.$$

Это ускорение обеспечивается притяжением Солнца, оно одинаково для Земли, Луны, и равно ускорению свободного падения к Солнцу на орбите Земли $g_{\odot} = GM_{\odot}/R_{\oplus}^2$, где G — гравитационная постоянная, M_{\odot} — масса Солнца. Скорость v связана с периодом обращения $T_{\oplus} = 1$ год соотношением $vT = 2\pi R_{\oplus}$, так что ускорение $g_{\odot} = a_{\odot}$ перепишем как

$$g_{\odot} = \frac{(2\pi R_{\oplus}/T_{\oplus})^2}{R_{\oplus}} = \frac{(2\pi)^2 R_{\oplus}}{T_{\oplus}^2} = \frac{(2\pi)^2 \cdot (1,5 \cdot 10^{11})}{(365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)^2} \text{ м/с}^2 = 0,60 \text{ см/с}^2.$$

Аналогичным образом вычисляем ускорение свободного падения к Земле на орбите Луны, рассматривая движение Луны по круговой орбите вокруг Земли:

$$g_{\oplus} = \frac{(2\pi)^2 R_{\text{Л}}}{T_{\text{Л}}^2} = \frac{(2\pi)^2 \cdot (3,8 \cdot 10^8)}{(28 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)^2} \text{ м/с}^2 = 0,26 \text{ см/с}^2,$$

где $T_{\text{Л}} = 28$ дней ≈ 1 месяц — период обращения Луны. Ускорение свободного падения g_{\odot} больше g_{\oplus} , поэтому сила притяжения Луны к Солнцу

$$F_{\odot} = M_{\text{Л}}g_{\odot} = \frac{GM_{\text{Л}}M_{\odot}}{R_{\oplus}^2}$$

примерно в 2 раза больше силы притяжения к Земле

$$F_{\oplus} = M_{\text{Л}}g_{\oplus} = \frac{GM_{\text{Л}}M_{\oplus}}{R_{\text{Л}}^2},$$

где $M_{\text{Л}}$ и M_{\oplus} — массы Луны и Земли.

Тем не менее Луна вращается вокруг Земли (и одновременно вокруг Солнца). Действительно, если бы притяжение между Землёй и Луной вообще отсутствовало, то эти объекты всё равно могли двигаться рядом, например, по одной окружности вокруг Солнца (в гравитационном поле тела с разными массами движутся по одинаковым траекториям, если их

начальные координаты и скорости совпадают). Чтобы Луна не уходила от Земли и вращалась вокруг неё достаточно, чтобы на орбите Луны отклонения гравитационного поля от однородного определялись Землёй, а не Солнцем. Так, в диаметрально противоположных точках лунной орбиты центрально-симметричное гравитационное поле Земли одинаково по абсолютной величине, но направлено в противоположные стороны. Так что отклонение земного поля от однородного составляет $\Delta g_3 = 2g_3 = 0,51 \text{ см/с}^2$ — порядка самого g_3 . Напротив, солнечное гравитационное поле на орбите Луны практически однородно. Его неоднородность определяется небольшим изменением расстояния между Луной и Солнцем. Разность ускорений свободного падения, обусловленных Солнцем, в наиболее близкой и удалённой от Солнца точках лунной орбиты составляет

$$\begin{aligned} \Delta g_{\odot} &= \frac{GM_{\odot}}{(R_3 - R_{\text{Л}})^2} - \frac{GM_{\odot}}{(R_3 + R_{\text{Л}})^2} = GM_{\odot} \frac{4R_3 R_{\text{Л}}}{(R_3 - R_{\text{Л}})^2 (R_3 + R_{\text{Л}})^2} \approx \\ &\approx \frac{4GM_{\odot} R_{\text{Л}}}{R_3^3} = g_{\odot} \frac{4R_{\text{Л}}}{R_3} = 0,01g_{\odot} = 0,006 \text{ см/с}^2, \end{aligned}$$

что примерно в 100 раз меньше Δg_3 .

3. В f_1/f_2 раз.

Почти параллельный пучок лучей от звезды, распространяющийся под углом α к оптической оси телескопа, собирается в фокальной плоскости входной (первой) линзы на расстоянии $h = f_1 \operatorname{tg} \alpha \underset{\alpha \ll 1}{\approx} \alpha f_1$ от той же оптической оси. Выходная (вторая) линза преобразует полученное в фокальной плоскости изображение в параллельный пучок лучей, идущих под углом $\beta = \operatorname{arctg}(h/f_2) \underset{h/f_2 \ll 1}{\approx} h/f_2 = \alpha f_1/f_2$ к оптической оси телескопа. Таким образом, на выходе из телескопа лучи от звёзд распространяются под f_1/f_2 раза бóльшими углами к оптической оси по сравнению с исходными лучами до телескопа. Во столько же раз увеличиваются и видимые углы между звёздами.

4. Меньше $1,3 \cdot 10^{19}$ эВ.

Если частица с зарядом e движется со скоростью v поперёк магнитного поля с индукцией B , то на неё действует сила Лоренца $F = evB$. Сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости частицы, как центростремительное ускорение. Поэтому частица движется по окружности (с так называемым ларморовским радиусом). Изменение импульса частицы $d\vec{p}/dt$ направлено к центру окружности и равно ωp (по аналогии с центростремительным ускорением $a = \omega v$), где ω — круговая частота вращения по окружности (так называемая гирочастота). Согласно второму закону Ньютона

$$\omega p = evB,$$

что определяет гирочастоту $\omega = evB/p$ и ларморовский радиус

$$r = \frac{v}{\omega} = \frac{p}{eB}.$$

Межзвёздное магнитное поле удерживает частицу в Галактике, если диаметр ларморовской окружности $2r$ меньше диаметра Галактики D . Поэтому в Галактике удерживаются частицы с энергией

$$E \equiv pc < eBDc/2.$$

Подставляем в последнее неравенство диаметр Галактики в виде $D = ct$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света, а $t = 9 \cdot 10^4$ лет $= 9 \cdot 10^4 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ с $= 2,8 \cdot 10^{12}$ с, и выражаем энергию в электрон-вольтах $\mathcal{E}[\text{эВ}] = E[\text{Дж}]/e[\text{Кл}]$, получаем максимальную энергию удерживаемых частиц

$$\mathcal{E}_{\max}[\text{эВ}] = B[\text{Тл}] \cdot (c[\text{м/с}])^2 \cdot t[\text{с}]/2 = 10^{-10} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot (2,8 \cdot 10^{12})/2 = 1,3 \cdot 10^{19}.$$

Эта величина приходится на так называемую «лодыжку» в распределении космических лучей по энергии (но не является её причиной). Частицы с меньшей энергией существенно отклоняются магнитным полем Галактики и направление их прихода на Землю не совпадает с направлением на источник (если источник внегалактический).