

Задача 2. Антиматерия

Необходимо написать рецензию на фильм, снятый по книге Д. Брауна «Ангелы и демоны», в которой говорится об украденных из ЦЕРН 1/4 грамма антивещества, взорвавшихся в небе над Ватиканом. Для этого необходимо ответить ряд вопросов: действительно ли

1) возможно в начале XXI века создать четверть грамма антиматерии и сколько это будет стоить,

2) «ловушку» для четверти грамма антиматерии можно переносить в руках,

3) взрыв четверти грамма антиматерии над Ватиканом не принесет никаких разрушений?

Рассмотрим, что такое антивещество.

Таблица 1 - Перевод единиц измерения

1 МэВ	$4,45 \cdot 10^{-20}$ кВт·ч	$3,5 \cdot 10^{-26}$ килотонн тринитротолуола	$1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж
-------	-----------------------------	--	-------------------------

После открытия Д. Томсоном электрона, английский физик А.Шустер в 1898 г. выдвинул гипотезу, что если в природе торжествует симметрия, то существование отрицательно заряженного электрона предполагает и существование положительно заряженного антиэлектрон.

1. Продолжая гипотезу Шустера, для частиц, вещества и материи, состоящих из частиц, необходимо предположить существование ...

В 1928 г. Поль Дирак вывел уравнение, описывающее поведение электрона, которое имело одновременно два решения: для электрона и идентичной ему частицы с противоположным зарядом. Эта частица была обнаружена через 4 года в космических лучах и получила название «позитрон».

2. Выскажите предположение, почему идею А. Шустера современные ему физики не приняли, а Дирак за свое предсказание получил Нобелевскую премию?

3. Дирак был убежден, что античастицы должны быть у всех частиц, за исключением истинно нейтральных. С помощью таблицы 2 среди указанных частиц определите истинно нейтральные, т.е. частицы, не имеющие античастиц (античастица является самой частицей).



Таблица 2 - Характеристики некоторых частиц и античастиц

Характеристика	Электрон, e^-	Позитрон, e^+	Протон, p	Антипротон, \bar{p}	Фотон, γ	Антифотон, γ	Нейтрон, n	Антинейтрон, \bar{n}	Нейтрино, ν	Антинейтрино, $\bar{\nu}$
Масса m_0 , кг	$9,109 \cdot 10^{-31}$		$1,673 \cdot 10^{-27}$		зависит от частоты		$1,675 \cdot 10^{-27}$		ненулевая	
Масса (энергия покоя) $m_0 c^2$, МэВ	0,511		938,27		0		939,565		<0,28	
Спин, \hbar	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$		1		$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$	
Электрический заряд	-e	+e	+e	-e	0	0	0	0	0	0
Барионное число	0	0	+1	-1	0	0	+1	-1	0	0
Лептонное число	+1	-1	0	0	0	0	0	0	+1	-1
Изоспин	0		$\frac{1}{2}$		0		$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$	
Проекция изоспина			$+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$			$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
Магнитный момент, μ_N	-1	+1	+2,79	-2,79	0	0	-1,91	+1,91	< 10^{-10}	
Время жизни, с	∞		∞		стабилен		$885,7 \pm 0,8$		стабилен	

К истиннонейтральным также относятся бозон Хиггса, нейтральные мезоны, состоящие из кварков и антикварков одинакового сорта (майорановские частицы).

4. Главная героиня книги Виттория Ветро говорит: «Антивещество полностью идентично нашему, за исключением того, что все частицы в нем имеют противоположный заряд». Прокомментируйте корректность ее высказывания с точки зрения логики и опираясь на данные таблицы 2.

5. Определите общие и отличающиеся черты частиц и их античастиц:

А) у частицы и античастицы должны быть одинаковы _____

Б) у частицы и античастицы могут быть неодинаковы _____

В) исходя из общих и отличающихся черт сделайте вывод о реакции антивещества на гравитацию.

Утверждение, что античастицы имеют ту же массу, что и частицы, следует из CPT-теоремы. А эксперимент BASE (ЦЕРН) обнаружил, что (инертная) масса антипротона совпадает с массой протона с очень высокой точностью и действие гравитации на антипротоны совпадает с действием на протоны с точностью до одной миллионной.

6. Опишите словами ситуации, записанные в форме уравнений:

1) $e^- + e^- \rightarrow 2\gamma$ (рис. 2.1)

2) $n + \bar{n} \rightarrow 2\gamma$

3) $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$

4) $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ (маловероятный

процесс, но является значимым при потере энергии звездой в ходе её эволюции)

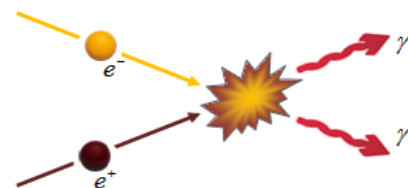


Рис. 2.1. Аннигиляция пары электрон-позитрон

7. Поясните, почему математические уравнения процессов можно считать моделями процессов? На примере задания 6 укажите различные виды моделей (описательные, математические, наглядные)

8. Рассмотрите модель «корпускула» ("частица")

1) приведите общий критерий использования модели «частица»,

2) в чем различие между моделью «свободная корпускула» и «несвободная корпускула»?

3) какие свойства корпускулы характеризуются такими характеристиками, как масса, импульс и энергия?

4) почему именно масса, импульс и энергия оказываются наиболее информативными фундаментальными характеристиками корпускулы?

А. Эйнштейн переносчика электромагнитного взаимодействия назвал «световым квантом». Но прижилось название «фотон» от греческого слова φῶς («свет»), которое было введено в 1926 году химиком Гилбертом Н. Льюисом, считавшего фотоны «несоздаваемыми и неуничтожимыми».

9. Подтвердилась ли теория Льюиса о «несоздаваемости и неуничтожимости» фотонов экспериментальными данными?

Планк определил, что энергия фотона равна:

$$E_{\gamma} = h \nu,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка, ν - частота излучения.

Энергия каждой из частиц складывается из ее энергии покоя $m_0 c^2$ ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - скорость света в вакууме) и ее кинетической энергии W_i :

$$E = m_0 c^2 + W_i.$$

10. Напишите для первых трех процессов задания 6 закон сохранения энергии (то есть запишите уравнение, где в левой части - величина суммарной энергии системы в начальный момент времени, а в правой - суммарная энергия системы в конечный момент времени).

11. Найдите энергию (в МэВ) образовавшихся фотонов в уравнениях задания 10, если начальная кинетическая энергия частиц ничтожно мала.

То есть при аннигиляции частицы и античастицы Вся энергия покоя превращается в энергию микровзрыва. Это самое эффективное превращение массы в тепловую энергию, в сотни раз превосходящее по эффективности ядерный взрыв.

12. Определите

А) частоту фотона, излучаемого в процессе аннигиляции медленной пары электрон-позитрон

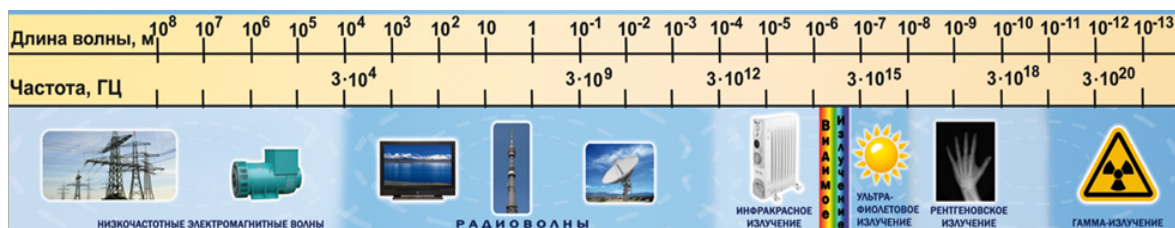


Рис. 2.3. Шкала электромагнитных волн

Б) к какой области электромагнитных волн относится такой фотон (рис. 2.3) и можно ли его увидеть с помощью невооруженного глаза?

В) что можно сказать о проникающей способности полученных фотонов, если она зависит от длины волны и энергии?

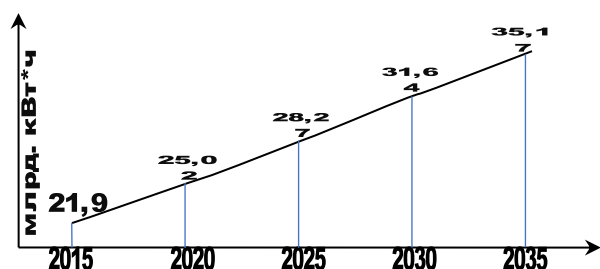


Рис. 2.4. Потребление электричества в мире (прогноз компании Asea Brown Boveri Ltd.)

13. Заполните таблицу

Величина	Единицы измерения	Решение	Ответ
Энергию, выделившуюся при аннигиляции почти неподвижных 1 электрона и 1 позитрона	МэВ		
Количество античастиц в грамме	штук		
Энергию, выделившуюся при аннигиляции почти неподвижных 1 грамма электронов и 1 грамма позитронов	МэВ		
	кВт·час		
Прогнозируемое потребление энергии, обеспечивающей все	кВт·час		

потребности человечества в 2030 году (рис. 2.4)			
Количество грамм позитронов, которые должны аннигилировать для получения энергии, обеспечивающей все потребности человечества в 2030 году	г		
Стоимость для потребителя энергии, полученная путем аннигиляции антиматерии, если по оценкам НАСА 2006 года, производство 1 грамма позитронов стоило примерно 25 миллиардов долларов США	Долларов за 1 кВт*ч		
Актуальная стоимость для потребителя электроэнергии на сегодняшний день в вашем городе (посмотреть в Интернете)	Долларов (или рублей) за 1 кВт*ч		

В фильме «Ангелы и демоны» фигурирует CERN, но ко времени создания фильма самым мощным производителем антивещества являлась лаборатория Ферми, где до 2011 года производились на ускорителе антипротоны. Полученные антипротоны хранились, вращаясь по круговой орбите в магнитном поле, и за 16 часов накапливалось в количестве примерно 10^{12} штук, после чего накопленные антипротоны сбрасывали в другой ускоритель, где с ними проводились эксперименты - их еще разгоняли и сталкивали с протонами.

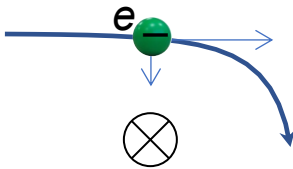


Рис. 2.5. Изменение траектории движения заряженной частицы под действием

14. За какое время Фермилаб могла бы создать четверть грамма антивещества?

Долгое время инструментом для наблюдения ядерных излучений и космических лучей служила камера Вильсона (названа по имени изобретателя - шотландского физика Ч. Вильсона). Внутри камеры находится перенасыщенные пары воды, спирта или эфира. Заряженная частица, проходя сквозь камеру, оставляет на своём пути цепочку ионов. Пар конденсируется на ионах, делая видимым след (трек) частицы. В 1927 г. советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын предложили помещать камеру в сильное магнитное поле. Под действием поля траектория движения заряженной частицы изменяется (рис. 2.5).

15. Если в камеру Вильсона поместить свинцовую пластинку и облучать её γ -квантами, то можно наблюдать две частицы (рис. 2.6), рождающиеся в одной точке, которые магнитным полем B отклоняются в противоположные стороны.

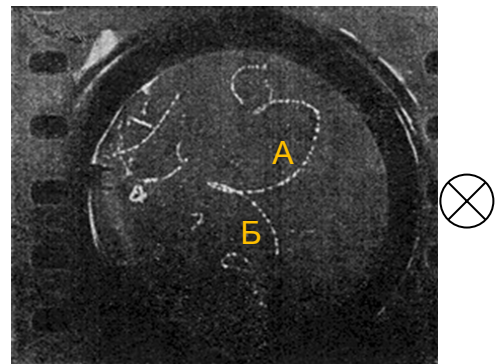


Рис. 2.6. Рождение частиц в камере

А) Напишите уравнение процесса рождения частиц (см. пункт 6).

Б) Какой из треков на фотографии принадлежит электрону, а какой – позитрону?

В) Какой минимальной энергией должен обладать фотон, пролетающий через вещество, чтобы было возможным процесс рождения пары «частица – античастица»?

Г) Если фотон обладал энергией, равной 2МэВ, то какую суммарную кинетическую энергию получили электрон и позитрон?

16*. Прокомментируйте утверждение В. Ветро, что

А) для разделения частицы и античастицы было использовано «сильное магнитное поле, где частицы вещества ушли по дуге вправо, а антивещества – влево». Что можно сказать на основании этой фразы о том, какие античастицы были получены в эксперименте?

Б) «антивещество невозможно хранить в сосудах из нашей обычной материи: вещество и антивещество мгновенно вступят в реакцию».

17*. Виртуальный эксперимент. На сайте oscteam.com/index.php слева под рубрикой «Забавы» найдите игру «Коллайдер». Если запустить ее не получается, то либо установите временно, либо пропустите это задание. Если виртуалб запускается, то выберите электрон и позитрон, настройте магниты так, чтобы частица и античастицы двигались по своим круговым траекториям и столкнулись. Повторите эксперимент с протоном и антипротоном. Зарисуйте (вставьте скриншот) схемы столкновений и запишите название получившихся частиц и научных центров, в которых впервые были реализованы данные столкновения.



Рис. 2.7. Контейнер с антивеществом. Кадр из фильма «Антивещество»

В романе, написанном в 2000 г. и экранизированном в 2009 г. показана «ловушка антивещества» (рис. 2.7), в которой антивещество находится «в точке пересечения двух магнитных полей». В реальности впервые «поймать» 38 атомов антиводорода в ловушку Пеннинга на 173 миллисекунд удалось только в 2010 году. К 2019 году отдельные антипротоны могут храниться более года. К 2022 году планируется создать усовершенствованную ловушку размером с грузовик для переноса облака из примерно 1 миллиарда антипротонов от установки, где их синтезируют, к другой установке, где добывают очень недолговечные редкие радиоактивные атомные ядра (эксперимент PUMA (CERN)).

18. Для «ловушки антивещества»

А) оцените возможные размеры ловушки для удержания четверти грамма антивещества, ориентируясь на размеры ловушки в эксперименте PUMA и сравните с ловушкой, показанной на рис. 2.7.

Б) объясните принцип действия.

19. В фильме «Ангелы и демоны» говорится об украденных 1/4 грамма антивещества, которые в тротиловом эквиваленте содержат энергию около 5 килотонн (см. таблицу 1). Правильный ли расчет сделали сценаристы, если антивещество состояло из позитронов?

20*. ***Виртуальный эксперимент.** Зайдите на сайт nuclearsecrecy.com/nuketap/, установите маркер на карте над Ватиканом, мощность бомбы установите из ваших расчетов. Выберите «воздушный взрыв». Высоту (в дополнительных параметрах) определите исходя из того, что вертолет поднимался 2 мин с вертикальной скоростью 2,5 м/сек. Запишите количество погибших и глубину воронки и сравните с разрушениями, показанными в фильме.*

Главный герой книги «Ангелы и демоны» Лэнгдон упоминает, что «антивещество служит главным топливом для двигателей звездного крейсера «Энтерпрайз» из сериала «Звездный путь», который благодаря этому может достигать скоростей, близких к скорости света.

21. Запишите

А) возможные уравнения происходящих в двигателях звездолета управляемых встреч вещества с антивеществом,

Б) ваше мнение, какие основные проблемы необходимо решить инженерам и ученым, чтобы создание аннигиляционного фотонного двигателя стало реальным?

Антивещество сейчас является самой дорогой в производстве субстанции на Земле. Поэтому ведется его поиск во Вселенной.

Предполагается, что после Большого взрыва антиматерия возникла одновременно с материей: в первые три минуты существования Вселенной образовались водород, его изотопы дейтерий и тритий, гелий (рис. 2.7), а так же их античастицы. Считается, что на ранней стадии развития Вселенной при температурах порядка 10^{13} К количество частиц и античастиц почти совпадало. Ученые фактически повторили последовательность «создания Вселенной», когда научились получать именно эти античастицы.

22. Определите, из каких античастиц синтезированы (рис. 2.8):

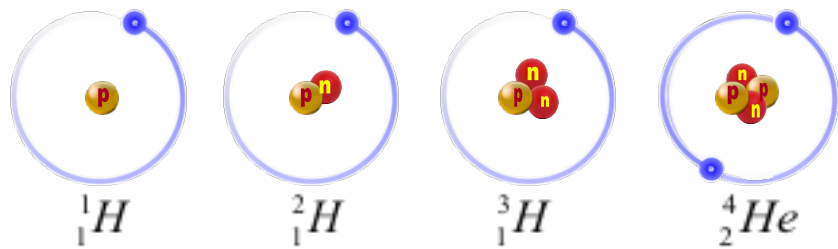
1) ядро антиводорода (1955 г., ускоритель Беватрон, США, Нобелевская премия 1959 г.)

2) антиводород (в 1995 г. в ЦЕРНе)

3) ядра антидейтерия (в 1965 г. в США)

4) ядра антитрития (в 1970 г. в Серпухове, СССР)

5) ядра антигелия (в 2010 г. в США).



водород дейтерий тритий гелий
Рис. 2.8. Модели элементов первичного звездного вещества

23. Объясните на примере водорода, почему следует различать природный объект (химический элемент) и его модель? Приведите примеры типов моделей водорода (наглядный, описательный, аналоговый).

24. Выскажите гипотезу

А) Если наша Вселенная прошла путь от кварков – протонов (ядер водорода) – водорода – звезд (в недрах которых образовались дальнейшие химические элементы) и галактик, то тогда для антипротона должна существовать цепочка....

Б) почему мы не наблюдаем антигалактики и в конечном итоге анитиВселенную, например, по грандиозным космическим взрывам при столкновении вещества и антивещества, которые неминуемы в постоянно эволюционирующей Вселенной.

25. Исходя из того, что сейчас в видимой части Вселенной наблюдается преобладание вещества над антивеществом (Барионная асимметрия Вселенной), а так же из уравнений, описывающих аннигиляцию частиц и античастиц (задание 6), сделайте предположение

А) что, вероятнее всего, изначально преобладало (частицы или античастицы);

Б) из чего состояла бы Вселенная, если бы не было асимметрии.

Сейчас считается, что при остывании Вселенной все частицы и античастицы проаннигилировали, породив фотоны, а из ничтожного избытка протонов возникло все, что нас теперь

окружает. Аннигиляционные (реликтовые) фотоны, постепенно охлаждаясь, дожили до наших дней в виде реликтового излучения.

26. Отношение современной плотности протонов во Вселенной к плотности реликтовых фотонов равно 10^{-9} . Определите, насколько сильно отличалось изначальное количество протонов и антипротонов (т.е. примерно на сколько пар частица-античастица, которые аннигилировали, приходилась одна «лишняя» частица, из которых и создан окружающий нас мир).

Позитроны применяются для диагностики рака. Пациент принимает радиофармпрепарат (РФП). РФП содержит примеси радиоактивных веществ, подверженных позитронному бета-распаду ($p \rightarrow n + e^+ + \nu$) в дозировке, не наносящей вреда здоровью. В опухолях обмен веществ происходит гораздо быстрее, чем в здоровых тканях. Поэтому опухолевые клетки захватывают больше радиоактивного маркера, чем здоровые, и РФП накапливается в активно растущих раковых клетках.



Рис. 2.9. ПЭТ

27. Запишите

А) уравнение аннигиляции, происходящей в опухоли при накоплении РФП,

Б) вашу гипотезу, для чего нужен кольцо детекторов (рис. 2.9) и что он регистрирует,

В) описание метода диагностики и определения местоположения опухоли, который называется позитронно-эмиссионной томографией, на основе рис. 2.9 и 2.10 (рис. 2.10 обычно строится как пространственная карта распределения вещества с высоким пространственным разрешением и с минимальной радиационной дозой),

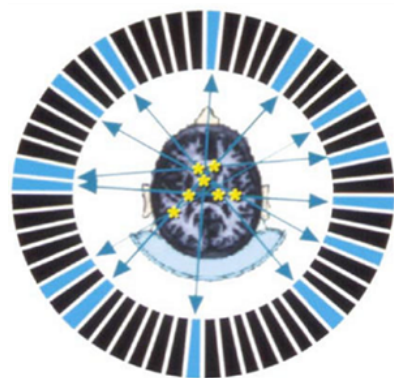


Рис. 2.10. Схема кольца томографа с рядом детекторов

Г) как формируется изображение, подобное рис.2.9, если фотоны видимого света не проходят сквозь ткани и кожу человека?

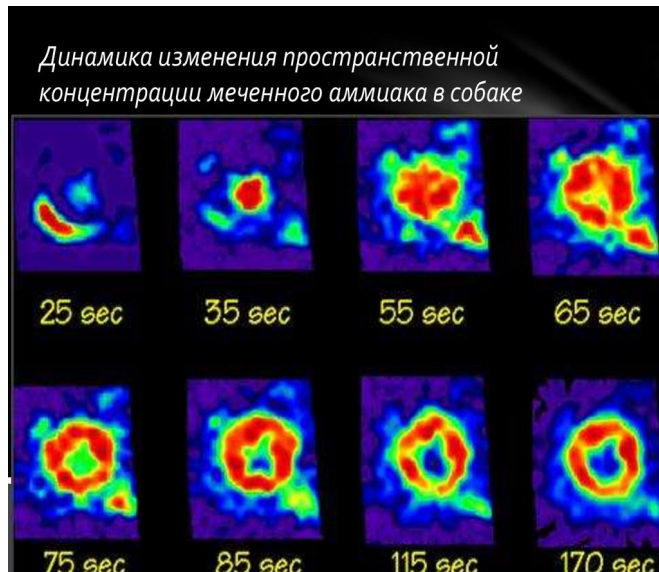


Рис. 2.10. Динамика изменения распределения активности ^{13}N - аммиака в сердце и легких собаки как результат регистрации в течение 10 с. (взято с <http://onlib.ru/random/view/1250994>)

заряженные частицы на своем пути сквозь вещество выделяют основную долю энергии на последних сантиметрах перед остановкой. Настроив энергию частиц, можно варьировать глубину, на которой останавливаются частицы.

28. Радиотерапия протонным пучком используется во многих хорошо оснащенных клиниках мира. Выскажите предположение о преимуществах использования антипротонного пучка

А) хирургами относительно рентгеновских лучей и лазера.

Б) антипротонного пучка относительно протонного (эксперимент ACE).

Позитроны появляются в космических лучах, возникают в грозовых разрядах, в распадах ряда распространенных на Земле элементов.

29*. Изотоп калия K_{19}^{40} , который присутствует в живых организмах, воде, продуктах питания, испускает 1 позитрон примерно раз в 75 минут. Средний банан содержит около 0,42 грамма калия. Содержание

и

з

о

т

о

Д) к каким методам относится позиционно-эмиссионная томография (общелогическим, общенаучным, частнонаучным)?

В ЦЕРНе проводится эксперимент ACE, который изучает воздействие антипротонного пучка на живые клетки. Его цель — изучить перспективы использования антипротонов для терапии раковых опухолей. Тяжелые

А) Оцените, сколько примерно позитронов за 16 часов «производит» банан.

Б) Сравните «производительность банана» с производительностью лаборатории Ферми до 2011 года (см. текст перед заданием 14).

Банановый эквивалент — понятие, характеризующее активность радиоактивного источника путём сравнения с активностью калия-40 в банане.

Весь имеющийся на Земле K_{19}^{40} образовался до возникновения Солнечной системы и с тех пор постепенно распадался в соответствии с одним из трех вариантов:

$K_{19}^{40} \rightarrow X + e^0 + \bar{\nu}_e$ вероятность 89,28% ,

$K_{19}^{40} \rightarrow Y + e^0 + \nu_e$ вероятность 0,001% ,

$K_{19}^{40} \rightarrow e^0 + Z + \bar{\nu}_e$ вероятность 10,72% .

30. Определите

А) какие вещества образуются в организме человека в результате данной реакции (т.е. с помощью таблицы Менделеева определите вещества X, Y, Z),

Б) испускает ли организм фотоны как следствие данных процессов

В) выделяется ли еще в данных реакциях какие-либо частицы или античастицы.

Г*) если в организме человека весом 70 кг ежесекундно происходит около 4000 радиоактивных распадов K_{19}^{40} , то сколько позитронов испускается в организме человека за 10 минут.

С 1990-х годов космические обсерватории наблюдали всплески γ -излучения, приходящие со стороны Земли. Например, в декабре 2009 г. космический телескоп "Ферми" во время грозы над Замбией зафиксировал γ -кванты с энергией в 511 кэВ. 6 февраля 2017 г. в Японии обнаружили, что двойная молния вызвала всплеск γ -лучей энергией 10 МэВ длительностью в 1 миллисекунду. За ним в течение приблизительно секунды следовало небольшое послесвечение, которое заканчивалось почти минутным γ -сигналом с энергией

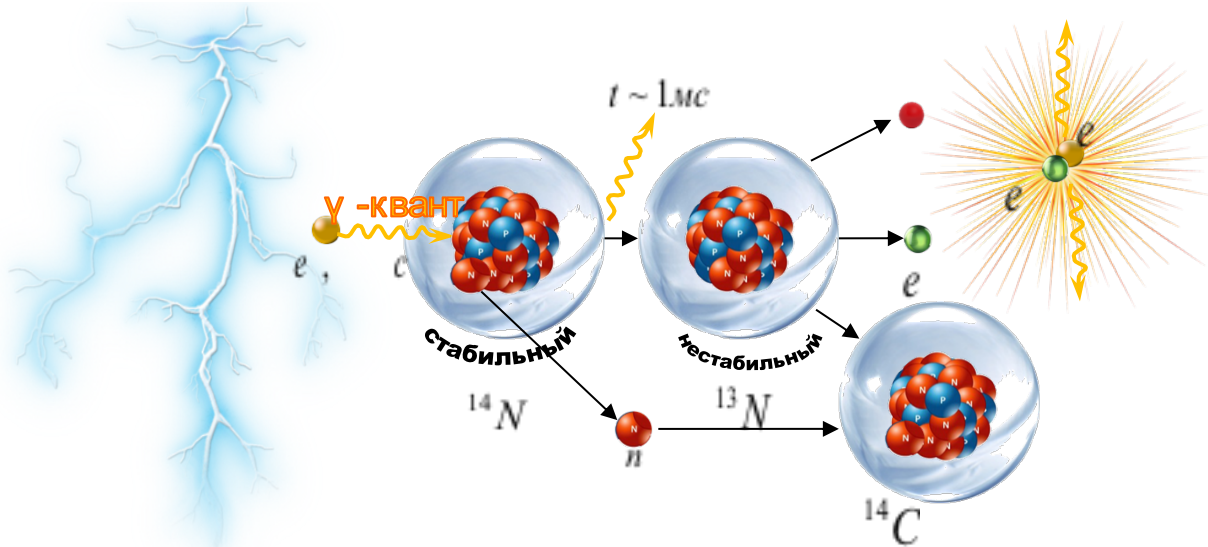


Рис. 2.110. Схема образования радиоактивного изотопа углерода-14 в атмосфере

квантов в 511 кэВ.

31. На что указывал γ -сигнал с энергией квантов в 511 кэВ? Опишите с помощью рисунка 2.11 процесс, объясняющий наблюдаемые свечения.

32. Виттория Ветро говорит: «Ученым еще с 1918 года известно, что Большой взрыв породил два вида вещества. Один – тот, который мы имеем здесь, на Земле. Из него состоят скалы, деревья, люди. Другой вид вещества находится где-то в иных частях Вселенной» и на Земле его нет. Прокомментируйте корректность высказывания.