Космические обсерватории

С поверхности Земли человек издавна наблюдает космические объекты в видимой части спектра электромагнитного излучения (диапазон видимого света включает волны с длиной примерно от 380 нм до 760 нм).

При этом большой объём информации о небесных телах не доходит до поверхности Земли, т. к. большая часть инфракрасного и ультрафиолетового диапазона, а также рентгеновские и гамма-лучи космического происхождения недоступны для наблюдений с поверхности нашей планеты. Для изучения космических объектов в этих лучах необходимо вывести телескопы за пределы атмосферы. Результаты, полученные в космических обсерваториях, перевернули представление человека о Вселенной. Общее количество космических обсерваторий превышает уже несколько десятков.

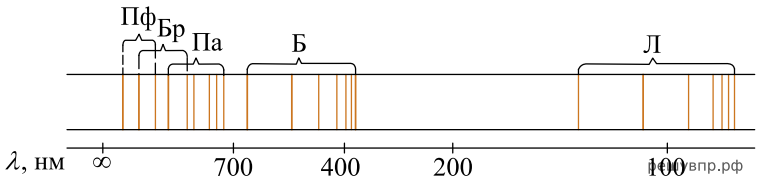
Так, с помощью наблюдений в инфракрасном (ИК) диапазоне были открыты тысячи галактик с мощным инфракрасным излучением, в том числе такие, которые излучают в ИК-диапазоне больше энергии, чем во всех остальных частях спектра. Активно изучаются инфракрасные источники в газопылевых облаках. Интерес к газопылевым облакам связан с тем, что, согласно современным представлениям, в них рождаются и вспыхивают звёзды.

Ультрафиолетовый спектр разделяют на ультрафиолет-А (УФ-А) с длиной волны 315–400 нм, ультрафиолет-В (УФ-В) – 280–315 нм и ультрафиолет-С (УФ-С) – 100–280 нм. Практически весь УФ-С и приблизительно 90% УФ-В поглощаются озоновым слоем при прохождении лучей через земную атмосферу. УФ-А не задерживается озоновым слоем.

С помощью ультрафиолетовых обсерваторий изучались самые разные объекты: от комет и планет до удалённых галактик. В УФ-диапазоне исследуются звёзды, в том числе, с необычным химическим составом.

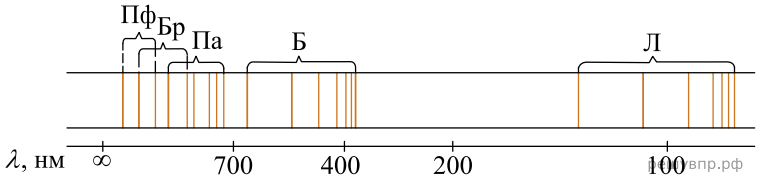
Гамма-лучи доносят до нас информацию о мощных космических процессах, связанных с экстремальными физическими условиями, в том числе и ядерных реакциях внутри звёзд. Детекторы рентгеновского излучения относительно легки в изготовлении и имеют небольшую массу. Рентгеновские телескопы устанавливались на многих орбитальных станциях и межпланетных космических кораблях. Оказалось, что рентгеновское излучение во Вселенной явление такое же обычное, как и излучение оптического диапазона. Большое внимание уделяется изучению рентгеновского излучения нейтронных звёзд и чёрных дыр, активных ядер галактик, горячего газа в скоплении галактик.

1. В спектре излучения (поглощения) атомарного водорода выделяют несколько серий спектральных линий: серия Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэкетта, Пфунда и др. (см. рис.)



К какой части спектра электромагнитного излучения принадлежит серия Бальмера (Б)? *В ответе заполните пропуск в предложении «Серия Бальмера относится к _____ части электромагнитного спектра».*

2. В спектре излучения (поглощения) атомарного водорода выделяют несколько серий спектральных линий: серия Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэкетта, Пфунда и др. (см. рис.)



К какой части спектра электромагнитного излучения принадлежит серия Лаймана (Л)?
Ответ приведите в именительном падеже. Например, «инфракрасная».

Космические обсерватории

С поверхности Земли человек издавна наблюдает космические объекты в видимой части спектра электромагнитного излучения (диапазон видимого света включает волны с длиной примерно от 380 нм до 760 нм).

При этом большой объём информации о небесных телах не доходит до поверхности Земли, т. к. большая часть инфракрасного и ультрафиолетового диапазона, а также рентгеновские и гамма-лучи космического происхождения недоступны для наблюдений с поверхности нашей планеты. Для изучения космических объектов в этих лучах необходимо вывести телескопы за пределы атмосферы. Результаты, полученные в космических обсерваториях, перевернули представление человека о Вселенной. Общее количество космических обсерваторий превышает уже несколько десятков.

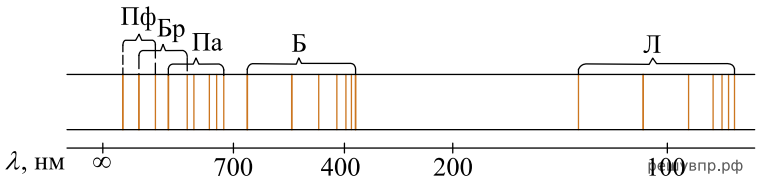
Так, с помощью наблюдений в инфракрасном (ИК) диапазоне были открыты тысячи галактик с мощным инфракрасным излучением, в том числе такие, которые излучают в ИК-диапазоне больше энергии, чем во всех остальных частях спектра. Активно изучаются инфракрасные источники в газопылевых облаках. Интерес к газопылевым облакам связан с тем, что, согласно современным представлениям, в них рождаются и вспыхивают звёзды.

Ультрафиолетовый спектр разделяют на ультрафиолет-А (УФ-А) с длиной волны 315–400 нм, ультрафиолет-В (УФ-В) – 280–315 нм и ультрафиолет-С (УФ-С) – 100–280 нм. Практически весь УФ-С и приблизительно 90% УФ-В поглощаются озоновым слоем при прохождении лучей через земную атмосферу. УФ-А не задерживается озоновым слоем.

С помощью ультрафиолетовых обсерваторий изучались самые разные объекты: от комет и планет до удалённых галактик. В УФ-диапазоне исследуются звёзды, в том числе, с необычным химическим составом.

Гамма-лучи доносят до нас информацию о мощных космических процессах, связанных с экстремальными физическими условиями, в том числе и ядерных реакциях внутри звёзд. Детекторы рентгеновского излучения относительно легки в изготовлении и имеют небольшую массу. Рентгеновские телескопы устанавливались на многих орбитальных станциях и межпланетных космических кораблях. Оказалось, что рентгеновское излучение во Вселенной явление такое же обычное, как и излучение оптического диапазона. Большое внимание уделяется изучению рентгеновского излучения нейтронных звёзд и чёрных дыр, активных ядер галактик, горячего газа в скоплении галактик.

3. В спектре излучения (поглощения) атомарного водорода выделяют несколько серий спектральных линий: серия Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэкетта, Пфунда и др. (см. рис.)



К какой части спектра электромагнитного излучения принадлежит серия Брэкетта (Бр)?
Ответ приведите в именительном падеже. Например, «инфракрасная».

Рентгеновское излучение

Рентгеновские лучи (первоначально названные Х-лучами) были открыты в 1895 г. немецким физиком Рентгеном. Открыв Х-лучи, Рентген тщательными опытами выяснил условия их образования. Он установил, что эти лучи возникают при торможении на веществе быстро летящих электронов. Исходя из этого обстоятельства, Рентген сконструировал и построил специальную трубку, удобную для получения рентгеновских лучей (см. рис. 1).

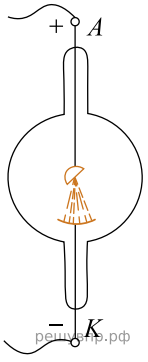


Рис. 1. Рентгеновская трубка

Рентгеновские трубки представляют собой стеклянные вакуумные баллоны с расположенными внутри электродами. Разность потенциалов на электродах нужна очень высокая — до сотен киловольт. На вольфрамовом катоде, подогреваемом током, происходит термоэлектронная эмиссия, то есть с него испускаются электроны, которые, ускоряясь электрическим полем, «бомбардируют» анод. В результате взаимодействия быстрых электронов с атомами анода рождаются фотоны рентгеновского диапазона.

Было установлено, что чем меньше длина волны рентгеновского излучения, тем больше проникающая способность лучей. Рентген назвал лучи с высокой проникающей способностью (слабо поглощающиеся веществом) жёсткими.

Различают тормозное и характеристическое рентгеновское излучение. Электроны могут, встречаясь с анодом, тормозиться, то есть терять энергию в электрических полях его атомов. Эта энергия излучается в виде рентгеновских фотонов. Такое излучение называется тормозным. Тормозное излучение содержит фотоны разных частот и, соответственно, длин

волн. Поэтому спектр его является сплошным (непрерывным). Энергия излучаемого фотона не может превышать кинетическую энергию порождающего его электрона. Кинетическая же энергия электронов зависит от приложенной к электродам разности потенциалов.

Механизм получения характеристического излучения следующий. Быстрый электрон может проникнуть внутрь атома и выбить какой-либо электрон с одной из нижних орбиталей, то есть передать ему энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера. Образовавшаяся в результате выбивания вакансия заполняется электроном с одного из вышележащих уровней. Занимая более низкий уровень, электрон излучает излишек энергии в форме кванта характеристического рентгеновского излучения. Наиболее быстрые электроны могут выбить электрон с K-оболочки, менее быстрые — с L-оболочки и т. д. (рис. 2а).

Электронная структура атома — это дискретный набор возможных энергетических состояний электронов. Поэтому рентгеновские фотоны, излучаемые в процессе замещения электронных вакансий, также могут иметь только строго определённые значения энергии, соответствующие разности уровней. Вследствие этого характеристическое рентгеновское излучение обладает спектром не сплошного, а линейчатого вида. Такой спектр позволяет характеризовать вещество анода — отсюда и название этих лучей. На рис. 2б показан характеристический спектр на фоне тормозного спектра.

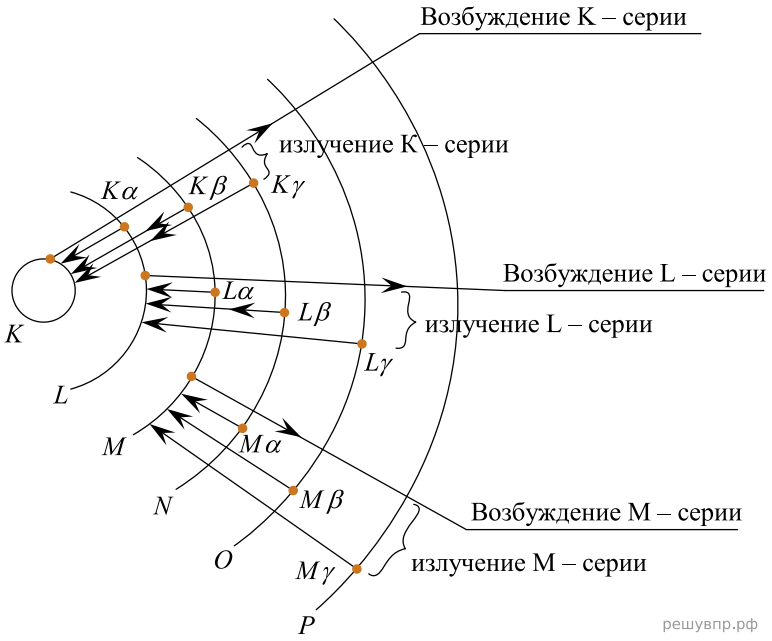


Рис. 2а. Схема образования линий характеристического спектра

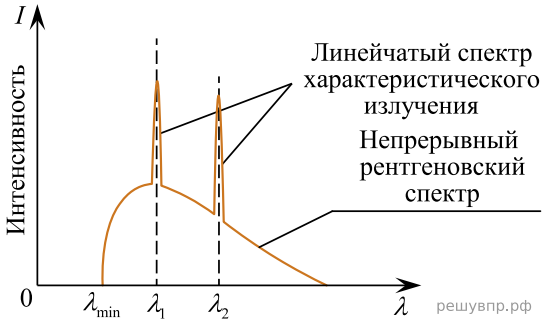
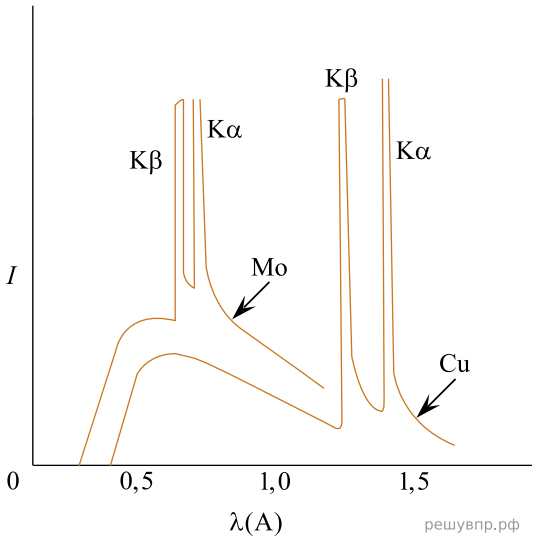


Рис. 2б. Рентгеновский спектр (тормозной и характеристический)

4. На рис. 2а схематически представлено образование линий характеристического спектра при выбивании электронов с нижних орбиталей. Для выбивании электрона с какой орбитали (K, L или M) необходима наибольшая энергия?

5. На рисунке представлены рентгеновские спектры, полученные при торможении быстрых электронов на молибдене и меди. У какого из металлов характеристическое излучение является более жёстким?
Ответ приведите в именительном падеже.



Длина пробега альфа-частицы в воздухе

Альфа-частицы (α-частицы) испускаются веществами в результате радиоактивного распада. Характерные значения скорости α-частиц в этом случае составляют десятки тысяч километров в секунду. Скорость α-частиц уменьшается при прохождении через вещество. Если поместить на пути однородного пучка α-частиц экран из какого-нибудь материала, то скорость α-частиц уменьшится вследствие затрат кинетической энергии на ионизацию атомов и молекул приблизительно одинаково. В воздухе движение α-частиц практически прямолинейно. Расстояние, на котором скорость α-частиц в воздухе падает настолько, что они неспособны ни ионизировать его, ни вызывать сцинтилляцию[1], ни засвечивать фотографическую пластинку, называют максимальной длиной пробега α-частиц в воздухе.

Чтобы исследовать постепенное поглощение α-лучей в воздухе, У. Брегг использовал очень тонкий слой радиоактивного вещества — радия, выделяя с помощью диафрагмы тонкий пучок α-частиц, перпендикулярный излучающей поверхности. Бреггом была впервые получена кривая ионизации. Для радиоактивного висмута $\left(^{214}\mathrm{Bi}\right)$ она резко обрывалась на расстоянии около 7 см от источника (см. рис. 1).

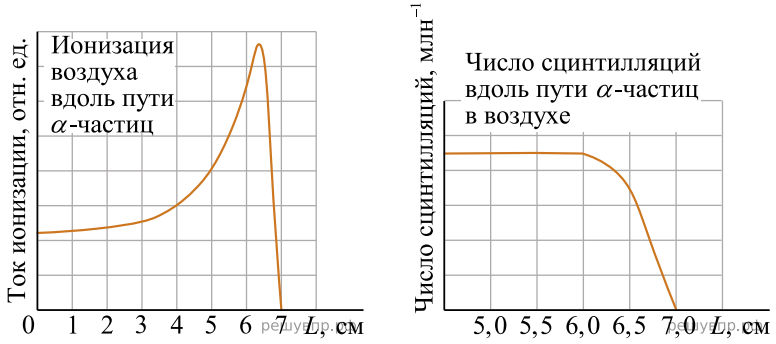


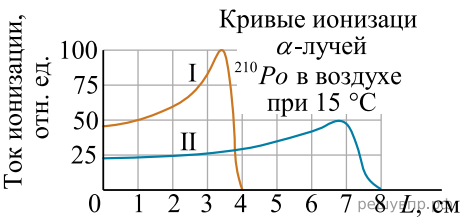
Рисунок 1. Определение длины пробега α-частицы, испущенных ^{214}Bi

В опытах было установлено, что длина пробега ($R_{\text{проб}}$) обратно пропорциональна плотности воздуха (ρ), при этом плотность воздуха, как известно, зависит от его давления и температуры $\left(p \sim \frac{p}{T}\right)$. В таблицах приводят значения, соответствующие давлению 760 мм рт. ст. и температуре 15 ºС. Так, α-частицы, испущенные $\left(^{214}\mathrm{Bi}\right)$, обладают длиной пробега в воздухе 7 см. Если на пути таких частиц поставить преграду, например алюминиевую фольгу, то длина пробега в воздухе уменьшится с 7 до 5 см. В этом случае говорят, что тормозящая способность этого листка алюминия эквивалентна 2 см воздуха. Разные радиоактивные материалы испускают α-частицы с разной скоростью, но все частицы, испущенные одним и тем же веществом, имеют примерно одинаковую скорость.

Установлено, что при прочих равных условиях $R_{\text{проб}} \sim v^3$. Экспериментальное измерение максимального пробега α-частиц в воздухе — один из методов определения скорости этих частиц, а значит, и их кинетической энергии.

[1]Сцинтилляция — кратковременная вспышка света, возникающая при попадании α-частицы на экран, покрытый сульфидом цинка ZnS.

6. На рисунке приведены кривые ионизации α-частиц, испущенных ^{210}Po, в воздухе. В опыте М. Кюри кривые I и II были получены для пробега α-частиц при двух разных плотностях воздуха. Каково было соотношение плотностей воздуха $\frac{\rho_I}{\rho_{II}}$?



Фотолюминесценция

Световая волна, падающая на тело, частично отражается от него, частично проходит насквозь, частично поглощается. Часто энергия поглощённой световой волны целиком переходит во внутреннюю энергию вещества, что проявляется в нагревании тела. Однако известная часть этой поглощённой энергии может вызвать и другие явления: фотоэлектрический эффект, фотохимические превращения, фотолюминесценцию.

Так, некоторые тела при освещении не только отражают часть падающего на них света, но и сами начинают светиться. Такое свечение, или фотолюминесценция, отличается важной особенностью: свет люминесценции имеет иной спектральный состав, чем свет, вызвавший свечение (см. рис.). Наблюдения показывают, что свет люминесценции характеризуется бóльшей длиной волны, чем возбуждающий свет. Это правило носит название правила Стокса в честь английского физика Георга Стокса (1819—1903). Вещества, обладающие ярко выраженной способностью люминесцировать, называются люминофоры.

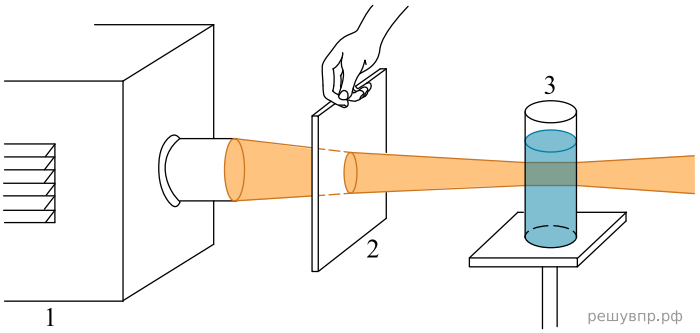


Рисунок 1. Опыты по фотолюминесценции: *1*: – источник света (фонарь); *2* – светофильтр; *3* – сосуд с веществом (Пропустим, например, свет от фонаря через фиолетовое стекло, задерживающее практически все голубые и более длинные волны. Если пучок фиолетового света направить на колбочку, в которой содержится раствор флюоресцеина, то освещённая жидкость начинает ярко люминесцировать зелёно-жёлтым светом)

Свечение вещества (люминесценция) связано с переходами атомов и молекул с высших энергетических уровней на низшие уровни. Люминесценции должно предшествовать возбуждение атомов и молекул вещества. При фотолюминесценции возбуждение происходит под действием видимого или ультрафиолетового излучения.

Некоторые тела сохраняют способность светиться некоторое время после того, как освещение их прекратилось. Такое послесвечение может иметь различную длительность. В некоторых объектах оно продолжается очень малое время (десятитысячные доли секунды и меньше), и для его наблюдения требуются особые приспособления. В других оно тянется много секунд и даже минут (часов), так что его наблюдение не представляет никаких трудностей. Принято называть свечение, прекращающееся вместе с освещением, флюоресценцией, а свечение, имеющее заметную длительность, — фосфоресценцией.

Люминесценция нашла применение при изготовлении ламп дневного света. Возникающий в лампе, заполненной парами ртути, газовый разряд вызывает электролюминесценцию паров ртути. В спектре излучения ртути имеется ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,257 мкм, которое, в свою очередь, возбуждает фотолюминесценцию люминофора, нанесённого на внутреннюю сторону стенок лампы и дающего видимый свет. Изменяя состав люминофора, можно изготавливать лампы с требуемым спектром фотолюминесценции. При смещении максимума излучения в длинноволновую область видимого спектра получают тёпло-белый (желтоватый) свет, в коротковолновую — холодно-белый (голубоватый) свет.

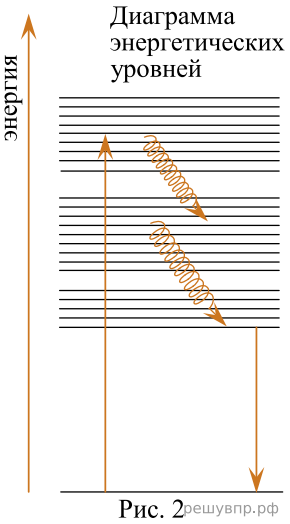


Рис. 2 решувпр.рф

7. Кристалл флюоресцирует в жёлтой части спектра. Какой(-ие) фильтр(ы) — синий или красный — можно использовать для перевода кристалла в возбуждённое состояние?

Длина пробега альфа-частицы в воздухе

Альфа-частицы (α-частицы) испускаются веществами в результате радиоактивного распада. Характерные значения скорости α-частиц в этом случае составляют десятки тысяч километров в секунду. Скорость α-частиц уменьшается при прохождении через вещество. Если поместить на пути однородного пучка α-частиц экран из какого-нибудь материала, то скорость α-частиц уменьшится вследствие затрат кинетической энергии на ионизацию атомов и молекул приблизительно одинаково. В воздухе движение α-частиц практически прямолинейно. Расстояние, на котором скорость α-частиц в воздухе падает настолько, что они неспособны ни ионизировать его, ни вызывать сцинтилляцию[1], ни засвечивать фотографическую пластинку, называют максимальной длиной пробега α-частиц в воздухе.

Чтобы исследовать постепенное поглощение α-лучей в воздухе, У. Брегг использовал очень тонкий слой радиоактивного вещества — радия, выделяя с помощью диафрагмы тонкий пучок α-частиц, перпендикулярный излучающей поверхности. Бреггом была впервые получена кривая ионизации. Для радиоактивного висмута $\left(^{214}\mathrm{Bi}\right)$ она резко обрывалась на расстоянии около 7 см от источника (см. рис. 1).

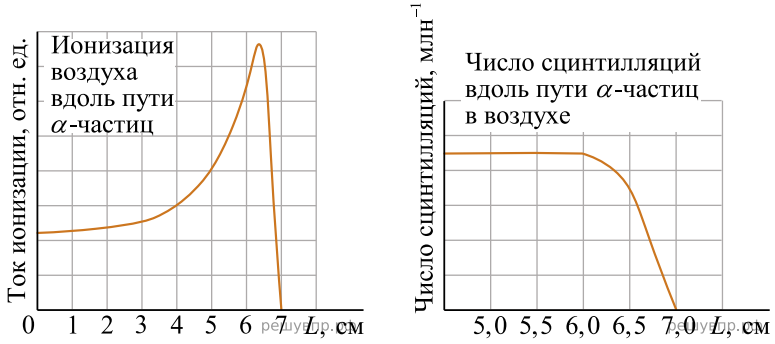


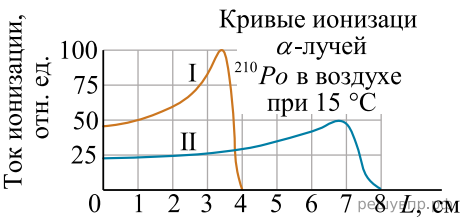
Рисунок 1. Определение длины пробега α-частицы, испущенных ^{214}Bi

В опытах было установлено, что длина пробега ($R_{\text{проб}}$) обратно пропорциональна плотности воздуха (ρ), при этом плотность воздуха, как известно, зависит от его давления и температуры $\left(p \sim \frac{p}{T}\right)$. В таблицах приводят значения, соответствующие давлению 760 мм рт. ст. и температуре 15 ºС. Так, α-частицы, испущенные $\left(^{214}\mathrm{Bi}\right)$, обладают длиной пробега в воздухе 7 см. Если на пути таких частиц поставить преграду, например алюминиевую фольгу, то длина пробега в воздухе уменьшится с 7 до 5 см. В этом случае говорят, что тормозящая способность этого листка алюминия эквивалентна 2 см воздуха. Разные радиоактивные материалы испускают α-частицы с разной скоростью, но все частицы, испущенные одним и тем же веществом, имеют примерно одинаковую скорость.

Установлено, что при прочих равных условиях $R_{\text{проб}} \sim v^3$. Экспериментальное измерение максимального пробега α-частиц в воздухе — один из методов определения скорости этих частиц, а значит, и их кинетической энергии.

[1]Сцинтилляция — кратковременная вспышка света, возникающая при попадании α-частицы на экран, покрытый сульфидом цинка ZnS.

8. На рисунке приведены кривые ионизации α-частиц, испущенных ^{210}Po, в воздухе. В опыте М. Кюри кривые I и II были получены для пробега α-частиц при двух разных давлениях воздуха и одинаковой температуре. Каково было соотношение давлений воздуха $\frac{p_1}{p_2}$ в этих двух опытах?



Фотолюминесценция

Световая волна, падающая на тело, частично отражается от него, частично проходит насквозь, частично поглощается. Часто энергия поглощённой световой волны целиком переходит во внутреннюю энергию вещества, что проявляется в нагревании тела. Однако известная часть этой поглощённой энергии может вызвать и другие явления: фотоэлектрический эффект, фотохимические превращения, фотолюминесценцию.

Так, некоторые тела при освещении не только отражают часть падающего на них света, но и сами начинают светиться. Такое свечение, или фотолюминесценция, отличается важной особенностью: свет люминесценции имеет иной спектральный состав, чем свет, вызвавший свечение (см. рис.). Наблюдения показывают, что свет люминесценции характеризуется бóльшей длиной волны, чем возбуждающий свет. Это правило носит название правила Стокса в честь английского физика Георга Стокса (1819—1903). Вещества, обладающие ярко выраженной способностью люминесцировать, называются люминофоры.

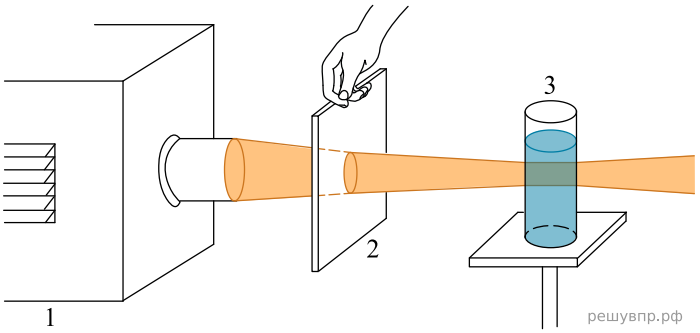


Рисунок 1. Опыты по фотолюминесценции: *1*: – источник света (фонарь); *2* – светофильтр; *3* – сосуд с веществом (Пропустим, например, свет от фонаря через фиолетовое стекло, задерживающее практически все голубые и более длинные волны. Если пучок фиолетового света направить на колбочку, в которой содержится раствор флюоресцеина, то освещённая жидкость начинает ярко люминесцировать зелёно-жёлтым светом)

Свечение вещества (люминесценция) связано с переходами атомов и молекул с высших энергетических уровней на низшие уровни. Люминесценции должно предшествовать возбуждение атомов и молекул вещества. При фотолюминесценции возбуждение происходит под действием видимого или ультрафиолетового излучения.

Некоторые тела сохраняют способность светиться некоторое время после того, как освещение их прекратилось. Такое послесвечение может иметь различную длительность. В некоторых объектах оно продолжается очень малое время (десятитысячные доли секунды и меньше), и для его наблюдения требуются особые приспособления. В других оно тянется много секунд и даже минут (часов), так что его наблюдение не представляет никаких трудностей. Принято называть свечение, прекращающееся вместе с освещением, флюоресценцией, а свечение, имеющее заметную длительность, — фосфоресценцией.

Люминесценция нашла применение при изготовлении ламп дневного света. Возникающий в лампе, заполненной парами ртути, газовый разряд вызывает электролюминесценцию паров ртути. В спектре излучения ртути имеется ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,257 мкм, которое, в свою очередь, возбуждает фотолюминесценцию люминофора, нанесённого на внутреннюю сторону стенок лампы и дающего видимый свет. Изменяя состав люминофора, можно изготавливать лампы с требуемым спектром фотолюминесценции. При смещении максимума излучения в длинноволновую область видимого спектра получают тёпло-белый (желтоватый) свет, в коротковолновую — холодно-белый (голубоватый) свет.

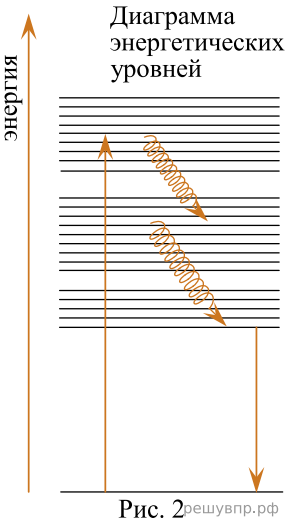
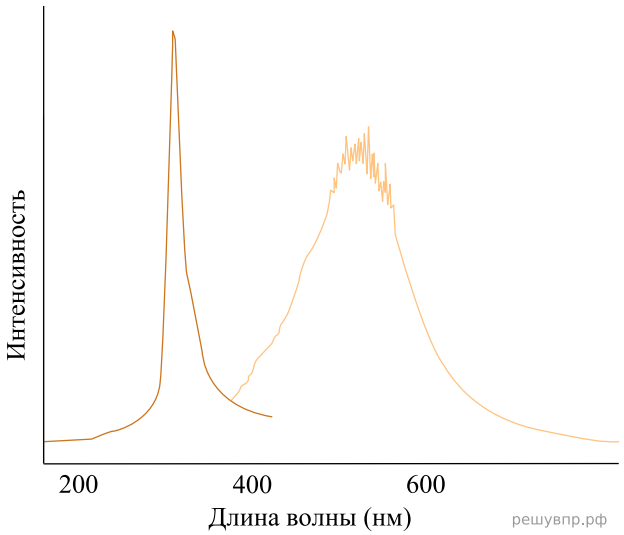


Рис. 2 решувпр.рф

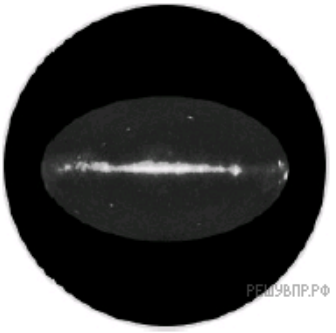
9. На рисунке представлены графики результатов опытов по наблюдению фотолюминесценции для некоторого кристалла: график излучения и график поглощения при предварительном облучении.



Запишите в ответе длину волны, на которую приходится максимум спектра излучения кристалла при фотолюминесценции.
В ответе запишите длину волны с точностью до десятков нм. Ответ приведите в нм.

Гамма-излучение

Гамма-излучение было открыто в начале XX в. при изучении радиоактивного излучения радия. Гамма-излучение – широкий диапазон электромагнитного спектра, поскольку он не ограничен со стороны высоких энергий. Мягкое гамма-излучение с энергией от 100 кэВ образуется при энергетических переходах внутри атомных ядер. Более жёсткое, с энергией от 10 МэВ, — при ядерных реакциях. Существуют космические гамма-лучи, которые почти полностью задерживаются атмосферой Земли, поэтому наблюдать их можно только из космоса.



На рисунке — фотография неба в гамма-лучах с энергией 100 МэВ. Обзор в диапазоне жёсткого гамма-излучения выполнен космической гамма-обсерваторией «Комптон», которая была запущена по программе NASA «Великие обсерватории» и с 1991 по 2000 г. вела наблюдения в диапазоне от жёсткого рентгена до жёсткого гамма-излучения. На фотографии отчётливо видна плоскость Галактики, где излучение формируется в основном остатками сверхновых. Яркие источники вдали от плоскости Галактики имеют в основном внегалактическое происхождение.

Гамма-кванты сверхвысоких энергий (от 100 ГэВ) рождаются при столкновении заряженных частиц, разогнанных мощными электромагнитными полями космических объектов или земных ускорителей элементарных частиц. В атмосфере они разрушают ядра атомов, порождая каскады частиц, летящих с околосветовой скоростью. При торможении эти частицы испускают свет, который наблюдают с помощью специальных телескопов на Земле.

Где и как образуются гамма-лучи ультравысоких энергий (от 100 ТэВ[1]), пока не вполне ясно. Земным технологиям такие энергии недоступны. Самые энергичные наблюдаемые кванты (10^{20}–10^{21} эВ), приходят из космоса крайне редко — примерно один квант в 100 лет на квадратный километр.



Гамма-кванты негативно воздействуют на организм человека и являются мутагенным фактором. Обладая высокой проникающей способностью, они ионизуют и разрушают молекулы, которые, в свою очередь, начинают ионизировать следующую порцию молекул. Происходит трансформация клеток и появление мутированных клеток, которые не способны исполнять возложенные на них функции.

Несмотря на опасность таких лучей, их используют в различных областях, соблюдая необходимые меры защиты, например для стерилизации продуктов, обработки медицинского инструментария и техники, контроля над внутренним состоянием ряда изделий, а также для культивирования растений. В последнем случае мутации сельскохозяйственных культур позволяют использовать их для выращивания на территории стран, изначально к этому не приспособленных. Применяются гамма-лучи и при лечении различных онкологических заболеваний. Метод получил название лучевой терапии.

---

[1] 1 ТэВ = 10^{12} эВ; 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж

10. Энергия кванта определяется по формуле $E = h\nu$. Оцените частоту гамма-излучения, образующегося при энергетических переходах внутри атомных ядер. *Считайте, что энергия перехода равна 100 кэВ. Ответ приведите в герцах с точностью до целых, разделив его на 10^{19}.*

Гамма-излучение

Гамма-излучение было открыто в начале XX в. при изучении радиоактивного излучения радия. Гамма-излучение – широкий диапазон электромагнитного спектра, поскольку он не ограничен со стороны высоких энергий. Мягкое гамма-излучение с энергией от 100 кэВ образуется при энергетических переходах внутри атомных ядер. Более жёсткое, с энергией от 10 МэВ, — при ядерных реакциях. Существуют космические гамма-лучи, которые почти полностью задерживаются атмосферой Земли, поэтому наблюдать их можно только из космоса.

Гамма-кванты сверхвысоких энергий (от 100 ГэВ) рождаются при столкновении заряженных частиц, разогнанных мощными электромагнитными полями космических объектов или земных ускорителей элементарных частиц. В атмосфере они разрушают ядра атомов, порождая каскады частиц, летящих с околосветовой скоростью. При торможении эти частицы испускают свет, который наблюдают с помощью специальных телескопов на Земле.

Где и как образуются гамма-лучи ультравысоких энергий (от 100 ТэВ[1]), пока не вполне ясно. Земным технологиям такие энергии недоступны. Самые энергичные наблюдаемые кванты (10^{20}–10^{21} эВ), приходят из космоса крайне редко — примерно один квант в 100 лет на квадратный километр.



Гамма-кванты негативно воздействуют на организм человека и являются мутагенным фактором. Обладая высокой проникающей способностью, они ионизуют и разрушают молекулы, которые, в свою очередь, начинают ионизировать следующую порцию молекул. Происходит трансформация клеток и появление мутированных клеток, которые не способны исполнять возложенные на них функции.

Несмотря на опасность таких лучей, их используют в различных областях, соблюдая необходимые меры защиты, например для стерилизации продуктов, обработки медицинского инструментария и техники, контроля над внутренним состоянием ряда изделий, а также для культивирования растений. В последнем случае мутации сельскохозяйственных культур позволяют использовать их для выращивания на территории стран, изначально к этому не приспособленных. Применяются гамма-лучи и при лечении различных онкологических заболеваний. Метод получил название лучевой терапии.

---

[1] 1 ТэВ = 10^{12} эВ; 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж

11. Энергия кванта определяется по формуле $E = h\nu$. Определите частоту гамма-излучения, которое порождает в атмосфере Земли каскады частиц, летящих со скоростями, близкими к скорости света. *Считайте, что энергия гамма-квантов равна перехода равна 100 ГэВ. Ответ приведите в герцах с точностью до целых, разделив его на 10^{25}.*

Прочитайте текст и выполните задания 16, 17 и 18.

Прохождение бета-излучения сквозь вещество

Через несколько лет после открытия А. Беккерелем радиоактивности был установлен сложный состав радиоактивного излучения, одна из компонент которого получила название «β-лучи». Исторически под β-лучами понимали потоки электронов, появляющиеся в результате радиоактивного распада ядер атомов, причём скорости их могут составлять до 99% от скорости света. Они обладают и относительно большой кинетической энергией.



Рис. 1. Рассеяние β-лучей, по Г. Хевеши

Первые исследования показали, что, взаимодействуя с веществом, β-лучи поглощаются им, рассеиваются, нагревают и ионизируют вещество, воздействуют на фотопластинку. Рассеяние узкого потока β-лучей наблюдается уже на тонких Al фольгах. В вакууме при отсутствии преграды на фотопластинке появлялось тёмное пятно с чёткими ровными краями, если на пути β-лучей помещали фольги разной толщины, то края пятна размывались, а изображение тускнело, при этом поглощение лучей было не велико, а весь поток рассеивался по всё большему телесному углу, всё более равномерно засвечивая фотопластинку, пока при фольге, толщиной 50 мкм, его действие не сравнивалось с действием сопутствующего γ-излучения.

Поглощение излучения в веществе характеризуют толщиной слоя половинного поглощения d. Например, Al фольга, d = 0,16 мм, снижает β-излучение вдвое, а слой Al в $0{,}32d$мм — вчетверо и т. д. Радиоактивные вещества при распаде выделяют разную энергию, испускают β-лучи разной интенсивности. При этом коэффициент поглощения μ для одного и того же вещества будет разным, см. таблицу 1. Для одного и того же излучения коэффициент μ для воздуха и Al различается в тысячу раз. Одна из видимых причин — различие в плотности, см. таблица 2.

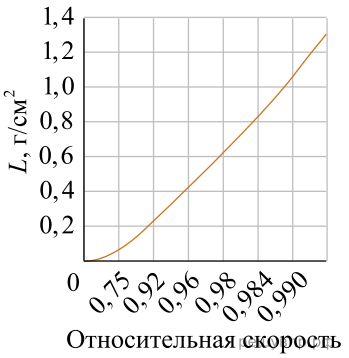
Таблица 1. Коэффициент поглощения β-лучей и энергия радиоактивного распада

Изотоп	μ, $см^{-1}$		W, Мэв
	Al	Воздух, $t = 22\ ^\circ C$, $p = 760$ мм рт. ст.	
торий	510	—	0,273
протактиний	14	—	2,197
висмут	43	0,0152	1,426
свинец	—	0,090	0,570
свинец	5500	0,64	0,064

Таблица 2. Коэффициент поглощения β-лучей $^{234}_{91}Pa$ и плотность материала

Материал	ρ, $г/см^3$	$\frac{\mu}{\rho}$, $см^2/г$
Уголь	1,8	4,4
Сера	2,0	6,6
Бор	2,4	4,65
Алюминий	2,7	5,26
Барий	3,8	8,8
Йод	4,9	10,8
Олово	7,3	9,46
Медь	8,9	6,8
Свинец	11,3	10,5
Золото	19,8	9,5

Было отмечено, что α-частицы, испускаемые Po, перестают засвечивать фотопластинку в воздухе на расстоянии R = 3,83 см, они не ионизуют воздух на больших расстояниях. Расстояние R получило название длины свободного пробега. Этой же величиной можно характеризовать расстояние воздействия не только α-, но и β-лучей. Длина свободного пробега β-лучей обычно определяется в материалах более плотных, чем воздух. Опыт показал, что величина $L = R \times \rho$ практически не зависит от ρ и приблизительно одинакова для веществ с не слишком разными атомными номерами. Для Al, по данным Г. Хевеши, зависимость L от скорости электронов, отнесённой к скорости света, представлена на рис. 2. При движении по веществу скорость β-лучей падает, так, Al пластина (2 мм) снижает скорость примерно на 30%. При этом, если для β-лучей, имеющих скорость $0{,}95c$, слой половинного поглощения есть d, то для $0{,}67c$ — только $0{,}1d$.



12. Каков должен быть слой Al, ослабляющий β-излучение от протактиния вчетверо?

Фотолюминесценция

Световая волна, падающая на тело, частично отражается от него, частично проходит насквозь, частично поглощается. Часто энергия поглощённой световой волны целиком переходит во внутреннюю энергию вещества, что проявляется в нагревании тела. Однако известная часть этой поглощённой энергии может вызвать и другие явления: фотоэлектрический эффект, фотохимические превращения, фотолюминесценцию.

Так, некоторые тела при освещении не только отражают часть падающего на них света, но и сами начинают светиться. Такое свечение, или фотолюминесценция, отличается важной особенностью: свет люминесценции имеет иной спектральный состав, чем свет, вызвавший свечение (см. рис.). Наблюдения показывают, что свет люминесценции характеризуется бóльшей длиной волны, чем возбуждающий свет. Это правило носит название правила Стокса в честь английского физика Георга Стокса (1819—1903). Вещества, обладающие ярко выраженной способностью люминесцировать, называются люминофоры.

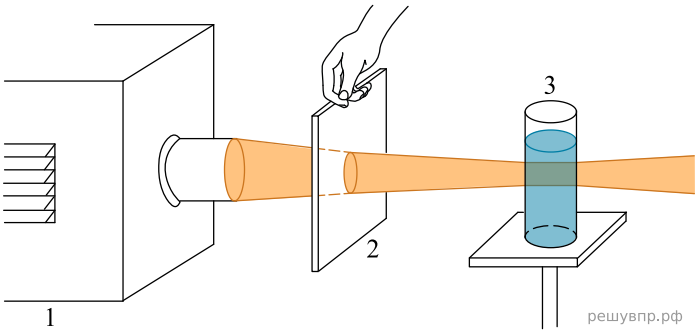


Рисунок 1. Опыты по фотолюминесценции: *1*: – источник света (фонарь); *2* – светофильтр; *3* – сосуд с веществом (Пропустим, например, свет от фонаря через фиолетовое стекло, задерживающее практически все голубые и более длинные волны. Если пучок фиолетового света направить на колбочку, в которой содержится раствор флюоресцеина, то освещённая жидкость начинает ярко люминесцировать зелёно-жёлтым светом)

Свечение вещества (люминесценция) связано с переходами атомов и молекул с высших энергетических уровней на низшие уровни. Люминесценции должно предшествовать возбуждение атомов и молекул вещества. При фотолюминесценции возбуждение происходит под действием видимого или ультрафиолетового излучения.

Некоторые тела сохраняют способность светиться некоторое время после того, как освещение их прекратилось. Такое послесвечение может иметь различную длительность. В некоторых объектах оно продолжается очень малое время (десятитысячные доли секунды и меньше), и для его наблюдения требуются особые приспособления. В других оно тянется много секунд и даже минут (часов), так что его наблюдение не представляет никаких трудностей. Принято называть свечение, прекращающееся вместе с освещением, флюоресценцией, а свечение, имеющее заметную длительность, — фосфоресценцией.

Люминесценция нашла применение при изготовлении ламп дневного света. Возникающий в лампе, заполненной парами ртути, газовый разряд вызывает электролюминесценцию паров ртути. В спектре излучения ртути имеется ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,257 мкм, которое, в свою очередь, возбуждает фотолюминесценцию люминофора, нанесённого на внутреннюю сторону стенок лампы и дающего видимый свет. Изменяя состав люминофора, можно изготавливать лампы с требуемым спектром фотолюминесценции. При смещении максимума излучения в длинноволновую область видимого спектра получают тёпло-белый (желтоватый) свет, в коротковолновую — холодно-белый (голубоватый) свет.

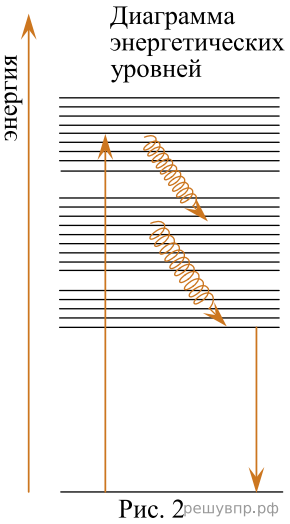


Рис. 2 решувпр.рф

13. В опыте по фотолюминесценции вещество излучает свет с максимумом, соответствующим голубому свету. Какие лучи видимого света могли вызвать процесс фотолюминесценции?

Прочитайте текст и выполните задания 16, 17 и 18.

Радиоактивные минеральные воды

Радиоактивность минеральных вод была обнаружена в начале XX века, среди первооткрывателей был Дж. Дж. Томсон. Радиоактивность вод обусловлена, в основном, наличием в них радия (Ra) и растворённого газа — радона (Rn). За единицу активности (А), названной в честь А. Беккереля, принят один беккерель (1 Бк), характеризующий активность вещества, в котором за одну секунду происходит в среднем один радиоактивный распад. В случае источников вод используют единицы 1 Бк/дм3 = 1 Бк/л.

Наиболее радиоактивные воды выходят из гранитных пород, содержащих заметное количество Ra. Для медицины значение имеют радоновые воды, в которых растворён радиоактивный Rn (период полураспада 3,82 сут.). Эти воды принято характеризовать по активности радона, см. таблицу 1.

Таблица 1. Радоновые источники

Тип	***A*, Бк/л**
Очень слаборадоновый	185–740
Слаборадоновый	740–1480
Слаборадоновый	1480–7400
Сильнорадоновый	> 7400

В начале XX века определение активности было основано на ионизации воздуха под воздействием радиоактивного излучения и измерении скорости разрядки электрически заряженного тела вследствие проводимости воздуха. Для этого в замкнутый заземлённый металлический контейнер (сосуд) помещали заряженное тело, соединённое с электрометром, и впускали, например, Rn. При этом показания электрометра в течение первых 3–4 ч возрастали, а затем падали. Возрастание показаний связывали с радиоактивным налётом, образованным твёрдыми продуктами распада Rn:

$$\text{радон } (^{222}\text{Rn}) \rightarrow \text{полоний } (^{218}\text{Po}) \rightarrow \text{свинец } (^{214}\text{Pb}) \rightarrow \text{висмут } (^{214}\text{Bi}) \rightarrow \ldots.$$

Первые два шага цепочки сопровождаются испусканием α-частицы, радоновые воды α-радиоактивны. Ослабление активности налёта представлено в таблице 2. За активность радоновых вод принимают величину, измеряемую прибором через 3–4 ч после введения Rn.

Таблица 2. Изменение активности налёта, по М. Кюри

t, мин.	**0**	**15**	**30**	**45**	**60**	**75**	**90**	**105**	**120**
A, %	100	92,3	78,0	62,7	48,7	36,9	27,5	20,3	14,8

Для определения радиоактивности минерального источника либо через известный объём воды продували воздух, либо взбалтывали его с воздухом. При этом бóльшая часть Rn переходила в воздух, который исследовался в приборе. При определении окончательного значения, характеризующего активность источника, вводились поправки, связанные с тем, что не весь Rn переходит в воздух и не все α-частицы, испущенные при распаде Rn, ионизуют воздух. 10

Rn может содержаться не только в природной воде, но и в воздухе, поступая в жилые помещения как с водопроводной водой, так и с бытовым газом. При этом предельно допустимые концентрации Rn в воздухе для жилой комнаты 0,2 кБк/м^3, для кухни — 3 кБк/м^3, для ванной комнаты — 8,5 кБк/м^3.

Изучение активности многих сотен источников минеральных вод по всему миру в начале XX века, в том числе и в России (см. таблицу 3) было связано с тем, что, откликнувшись на новое явление, врачи полагали, что многие хронические болезни можно излечить, принимая радоновые ванны. Сегодня назначают 10–15-минутные радоновые ванны с активностью воды 1,4–4,5 кБк/л.

Таблица 3. Активность источников, по Л. Бертенсону

Источник	**Местность**	***A*, Бк/л**
Молоковский	Забайкалье	4730
Ямкунский	Забайкалье	3750
Нерчинский	Забайкалье	1435
Ларгинский	Забайкалье	315
Теплосерный № 1	Пятигорск	845
Теплосерный № 2	Пятигорск	950
Теплосерный № 3	Пятигорск	660
У-ба Бражникова	Пятигорск	40

14. Приведите пример слаборадонового источника из числа упомянутых в тексте.

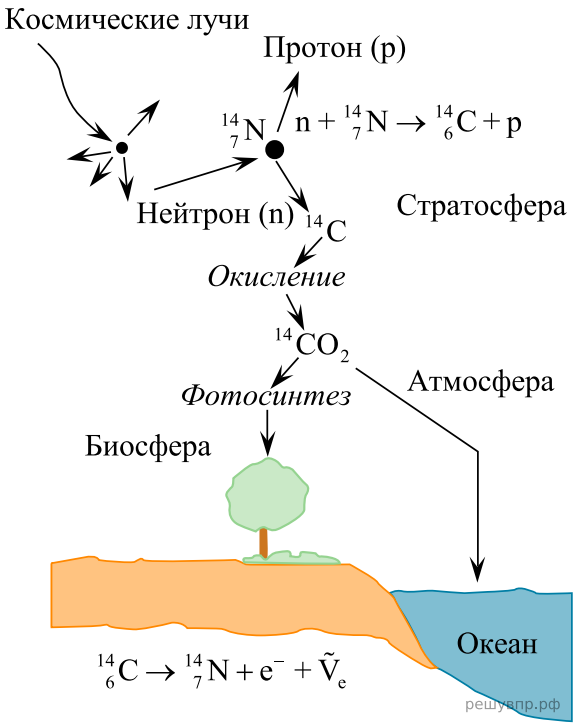
Прочитайте текст и выполните задания 16, 17 и 18.

Применение радиоактивного углерода в археологии

Интересное применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (дерева, древесного угля, тканей и т. д.) получил метод радиоактивного углерода.

В растениях всегда имеется бета-радиоактивный изотоп углерода ^{14}C с периодом полураспада $T = 5700$ лет. Изотоп ^{14}C постоянно образуется в стратосфере Земли в результате бомбардировки атомов азота нейтронами (см. рис.). В свою очередь, нейтроны возникают за счёт ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые поступают в атмосферу из космоса (космическими лучами). Соединяясь с кислородом, углерод ^{14}C образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. Один грамм углерода из образцов молодого леса испускает около 15 бета-частиц в секунду.

Пока организм находится в состоянии обмена веществ с окружающей его средой (например, дерево получает углерод в виде углекислого газа из атмосферы в результате фотосинтеза), содержание ^{14}C в нём остаётся постоянным и находится в равновесии с концентрацией данного изотопа в атмосфере. Когда организм отмирает, обмен углеродом с внешней средой прекращается; содержание радиоактивного изотопа начинает уменьшаться, так как уже нет притока «свежего» ^{14}C извне.



Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50 000 и даже до 100 000 лет.

Радиоуглеродный метод позволяет определить возраст целого ряда объектов, которые можно условно разделить на следующие группы: геологические — карбонатные осадки океанов и пресноводных водоёмов; биологические — древесина, семена, останки животных и человека; антропогенные — керамика, пригоревшие остатки пищи, ткани, папирус, пергамент и бумага.

15. Сколько электронов в секунду испускает 44 г углекислого газа в атмосфере?