

## Радиоактивность

*Темы кодификатора ЕГЭ:* радиоактивность, альфа-распад, бета-распад, гамма-излучение, закон радиоактивного распада.

Явление радиоактивности обнаружил французский физик Анри Антуан Беккерель, и произошло это совершенно случайно.

В начале 1896 года всё научное сообщество было охвачено интересом к недавно открытым всепроникающим рентгеновским лучам. Беккерель решил выяснить, не появляются ли рентгеновские лучи при освещении солнечным светом некоторых минералов, и выбрал для своих экспериментов весьма редкую соль урана.

Опыт Беккереля был чрезвычайно прост. Кристаллы соли выставлялись на солнце и лежали при этом на фотопластинке. Разумеется, фотопластинка заворачивалась в чёрную бумагу, чтобы её не засветил солнечный свет. Но чёрная бумага — не помеха рентгеновским лучам, и если они действительно возникают, то засветят фотопластинку.

Итак, Беккерель положил завернутую фотопластинку с насыпанной поверх урановой солью на солнечный свет, подержал несколько часов и затем проявил фотопластинку. Ожидания подтвердились! После проявления на фотопластинке проступили очертания кристаллов соли урана.

Полагая, что и впрямь обнаружись рентгеновские лучи, испускаемые урановой солью под действием солнечного света, Беккерель доложил об этом на заседании Французской академии. Доклад вызвал большой интерес, и было решено, что на следующем заседании, то есть через неделю, Беккерель расскажет о результатах новых опытов.

А погода тем временем испортилась, и солнце на всю неделю скрылось за облаками. Медный крест, покрытый урановой солью и приготовленный для опытов, в ожидании солнца несколько дней пролежал в ящике письменного стола — поверх фотопластинки, завернутой в чёрную бумагу.

Накануне нового доклада облачность так и не рассеялась, и докладывать Беккерелю было нечего. Однако отчаяние и удачу порой разделяет лишь один шаг. Неизвестно почему, но Беккерель решил проявить фотопластинку, лежавшую в столе. Каково же было его удивление, когда он увидел проступившие на ней почернения в виде отчётливой тени креста!

Таким образом, солнце оказалось совершенно ни при чём. Было обнаружено новое явление природы: урановая соль без каких-либо внешних факторов, сама по себе испускает некоторое излучение, пронизывающее чёрную бумагу.

На следующий день Беккерель доложил об этом на заседании Французской академии и затем приступил к интенсивным исследованиям. В ходе своих экспериментов он обнаружил следующие черты нового явления.

- Новые лучи могут проникать сквозь предметы и ионизировать воздух.
- Засвечивают фотопластинку только те вещества, которые содержат уран.
- Интенсивность излучения зависит только от количества урана в веществе. Само химическое соединение при этом роли не играет. *Максимально интенсивным является излучение чистого урана.*

Новое явление было впоследствии названо *радиоактивностью*. Из опытов Беккереля следовало, что радиоактивность есть свойство химического элемента урана самого по себе — то есть свойство, которым обладают *атомы* урана.

Уран оказался не единственным радиоактивным элементом. Мария Склодовская-Кюри спустя два года после открытия Беккереля обнаружила аналогичное излучение *тория*. Вместе с мужем, Пьером Кюри, они открыли новый радиоактивный химический элемент — *полоний*. Наконец, вручную переработав 11 тонн руды, Мария Склодовская-Кюри получила маленькую капельку чистого *радия*, который излучал в три миллиона раз интенсивнее урана.

## Виды радиоактивных излучений

Каков состав радиоактивного излучения? Оказалось, что радиоактивные вещества испускают три типа лучей, различающихся по своим физическим свойствам.

Эти три компонента обнаруживаются в результате пропускания радиоактивного излучения солей урана через сильное магнитное поле (рис. 1).

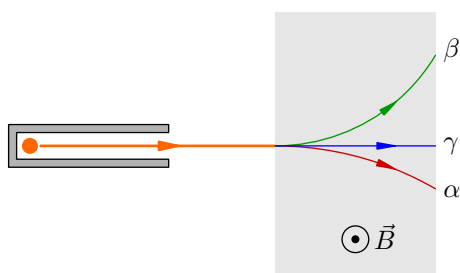


Рис. 1. Виды радиоактивных излучений

А именно, излучение радиоактивного препарата, находящегося внутри свинцового контейнера с узким каналом, направляется на фотопластинку. В отсутствие магнитного поля на фотопластинке наблюдается одно тёмное пятно. Но если пропустить излучение сквозь область магнитного поля, то пятен становится *три* — одно на прежнем месте и два по бокам от него на разных расстояниях. Это означает, что радиоактивное излучение в магнитном поле распалось на три существенно различные части.

То, что две компоненты отклонились в разные стороны, означает, что они являются соответственно потоками положительных и отрицательных зарядов. Третья компонента, не отклоняющаяся магнитным полем, электрического заряда не несёт.

Положительно заряженной компоненте была присвоена буква  $\alpha$ ; её называли  *$\alpha$ -излучением*,  *$\alpha$ -лучами* или потоком  *$\alpha$ -частиц*. Альфа-лучи достаточно слабо отклонялись магнитным полем. Тщательные исследования Резерфорда показали, что  $\alpha$ -частицы — это полностью ионизованные атомы гелия, то есть *ядра гелия*.

Отрицательно заряженная компонента была названа  *$\beta$ -излучением* (или  *$\beta$ -лучами*). Они отклонялись магнитным полем значительно сильнее, чем  $\alpha$ -частицы. Бета-лучи оказались потоком *электронов*, мчащихся со скоростями, близкими к скорости света.

Нейтральная компонента получила название  *$\gamma$ -излучения* (или  *$\gamma$ -лучей*). Гамма-лучи оказались электромагнитными волнами чрезвычайно высокой частоты — выше, чем у рентгеновского излучения<sup>1</sup>. Соответственно, проникающая способность гамма-лучей также больше, чем у рентгеновских лучей.

Среди трёх компонент радиоактивного излучения наибольшей проникающей способностью также обладают гамма-лучи — они могут пробиться сквозь слой свинца толщиной в несколько сантиметров. Сильнее поглощаются веществом бета-лучи: тут хватит нескольких миллиметров свинца, чтобы поглотить их полностью. Слабее всего проникают сквозь вещество  $\alpha$ -частицы: они не могут, например, пройти через лист бумаги.

<sup>1</sup>Электромагнитная природа гамма-излучения была установлена экспериментально: обнаружилась дифракция гамма-лучей на кристаллических решётках. Эти же опыты позволили измерить и длину волны гамма-излучения.

## Радиоактивные превращения

Многочисленные эксперименты с радиоактивными веществами показали, что *радиоактивность сопровождается изменениями атомов, и в результате этих изменений одни химические элементы превращаются в другие.*

Положение химического элемента в таблице Менделеева определяется числом электронов в нейтральном атоме, или, что то же самое — зарядом ядра атома. Поэтому превращения химических элементов означают, что *в результате радиоактивных процессов изменения претерпевают атомные ядра.*

Ядра атомов радиоактивных элементов являются *нестабильными*. Каждое такое ядро в некоторый момент распадается, поэтому явление радиоактивности называют ещё *радиоактивным распадом*.

В процессе радиоактивного распада исходное вещество постепенно исчезает. Новые вещества, являющиеся продуктами распада, также могут быть нестабильными и распадаться дальше. Наблюдаются целые цепочки радиоактивных распадов — вплоть до образования стабильных элементов.

Самой известной такой цепочкой является *радиоактивное семейство урана*. Начинается эта цепочка с *альфа-распада* ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , в результате которого образуется ядро тория  ${}_{90}^{234}\text{Th}$  и вылетает  $\alpha$ -частица:



Затем родившееся ядро тория испытывает *бета-распад*, испуская электрон и превращаясь в ядро протактиния  ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ :



Обратите внимание, что электрону приписывается зарядовое число  $-1$  (так как заряд электрона равен  $-e$ ) и массовое число  $0$  (так как электрон не содержит нуклонов).

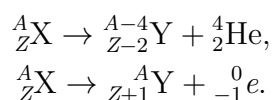
В обеих формулах (1) и (2) мы наблюдаем два важных момента.

- *Сумма массовых чисел продуктов распада равна массовому числу исходного ядра.* Этот баланс массовых чисел отражает неизменность общего числа нуклонов до и после распада.
- *Сумма зарядовых чисел продуктов распада равна зарядовому числу исходного ядра.* Этот факт служит одним из многочисленных экспериментальных подтверждений закона сохранения заряда.

Поскольку  $\alpha$ -частица уносит заряд  $+2e$ , а электрон уносит заряд  $-e$ , то возникает следующая закономерность превращения химических элементов при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах.

**Правило смещения.** *После  $\alpha$ -распада элемент смещается на две клетки назад, то есть к началу периодической системы. После  $\beta$ -распада элемент смещается на одну клетку вперёд, то есть к концу периодической системы.*

Общие формулы, выражающие правило смещения при альфа- и бета-распадах, выглядят так:



Формулы (1) и (2) — это самое начало радиоактивного семейства урана. Всего в этой цепочке происходит восемь  $\alpha$ -распадов и шесть  $\beta$ -распадов (причём при каждом  $\beta$ -распаде вдобавок излучается  $\gamma$ -квант), пока в самом конце цепочки не образуется стабильное ядро свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ .

Излучение всех элементов радиоактивного семейства урана как раз и засветило фотопластинку Беккереля, и именно эта смесь излучений была впервые разложена на компоненты в магнитном поле (рис. 1).

## Закон радиоактивного распада

Нестабильное ядро распадается *самопроизвольно* (или, как ещё говорят, *спонтанно*). Происходит это в случайный момент времени, так что невозможно предсказать, когда именно распадётся каждое конкретное ядро. Тем не менее, ядра каждого элемента обладают определённым *средним временем жизни*, характерным для данного элемента

А именно, опыт показывает, что *распад радиоактивного элемента происходит со строго определённой, присущей именно этому элементу скоростью*. Скорость распада у разных элементов различна; она является такой же неотъемлемой характеристикой радиоактивного элемента, как зарядовое или массовое число. Вне зависимости от условий опыта можно точно сказать, спустя какой промежуток времени интенсивность излучения данного элемента уменьшится, например, в два раза.

*Период полураспада* — это время, в течение которого распадается половина имеющихся радиоактивных атомов. Период полураспада как раз и является количественной характеристикой скорости радиоактивного распада.

Величина периода полураспада может быть очень разной. Например, период полураспада урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  равен 4,5 млрд. лет, радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  — 1600 лет, полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  — 138 дней, а у инертного газа радона  ${}_{86}^{222}\text{Rn}$  он составляет всего 3,8 суток.

Выведем теперь закон радиоактивного распада, а именно — найдём, как зависит от времени количество  $N$  атомов, не претерпевших пока радиоактивный распад. Начальное число радиоактивных атомов равно  $N_0$ , период полураспада равен  $T$ .

Имеем следующую простую цепочку рассуждений.

Спустя время  $t_1 = T$  количество оставшихся атомов будет равно

$$N_1 = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot 2^{-1}.$$

Спустя время  $t_2 = 2T$  атомов останется

$$N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{4} = N_0 \cdot 2^{-2}.$$

Спустя время  $t_3 = 3T$  атомов останется

$$N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0}{8} = N_0 \cdot 2^{-3}.$$

Становится ясно, что спустя время  $t_k = kT$  атомов останется

$$N_k = N_0 \cdot 2^{-k}.$$

Поставляя сюда  $k = t_k/T$ , получим:

$$N_k = N_0 \cdot 2^{-t_k/T}.$$

Отбрасывая индекс  $k$ , находим число оставшихся атомов в зависимости от времени:

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T}. \quad (3)$$

Мы получили *закон радиоактивного распада*. Количество нераспавшихся атомов оказывается показательной функцией, убывающей с течением времени.

Непосредственной характеристикой скорости распада радиоактивного элемента является *активность* — число радиоактивных распадов, происходящих в единицу времени. Активность  $A$  есть производная по времени от числа  $N_0 - N$  распавшихся атомов:

$$A = \frac{d(N_0 - N)}{dt} = -\frac{dN}{dt} = N_0 \frac{\ln 2}{T} \cdot 2^{-t/T}.$$

Обозначая множитель перед показательной функцией через  $A_0$  (это будет активность в начальный момент времени), получим:

$$A = A_0 \cdot 2^{-t/T}.$$

Мы видим, что зависимость активности от времени имеет точно такой же вид, как и закон радиоактивного распада (3). График зависимости активности от времени приведён на рис. 2.

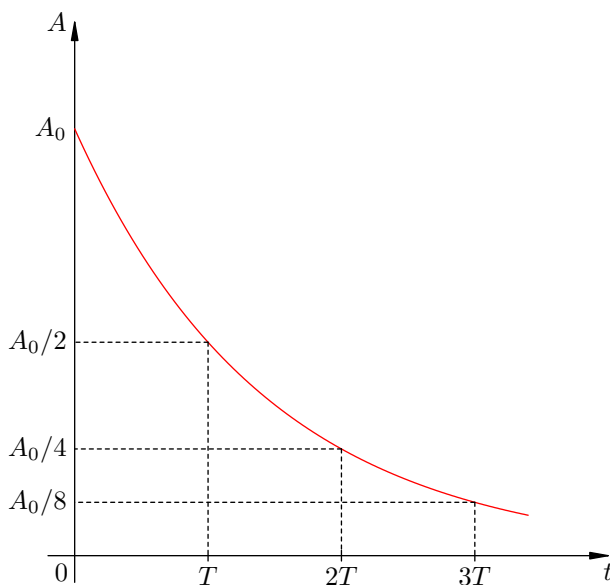


Рис. 2. Зависимость активности от времени

Ясно, что активность убывает тем быстрее, чем меньше период полураспада. И наоборот, при большом периоде полураспада активность меняется медленно. Например, активность радона ( $T = 3,8$  суток) уменьшается буквально на глазах, а активность солей урана ( $T = 4,5$  млрд. лет) остаётся практически неизменной на протяжении человеческой жизни.