

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

Состав ядра атома. Ионы. Изотопы.

Состав атомного ядра. Будучи «кирпичиками», из которых строится ядро, протоны и нейтроны получили общее название нуклонов (от лат. *nucleus* — ядро).

Масса протона и нейтрона соответственно в сравнении с массой электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг:

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1836m_e$$

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1839m_e$$

Отсюда видно, что основная масса атома сосредоточена в ядре.

Массы атомов и молекул очень малы. Поэтому была введена новая единица измерения массы. Атомная единица массы (а.е.м.) — внесистемная единица, применяемая для выражения масс атомов, молекул, атомных ядер и элементарных частиц. Определяется как $\frac{1}{12}$ массы атома углерода ^{12}C в основном состоянии.

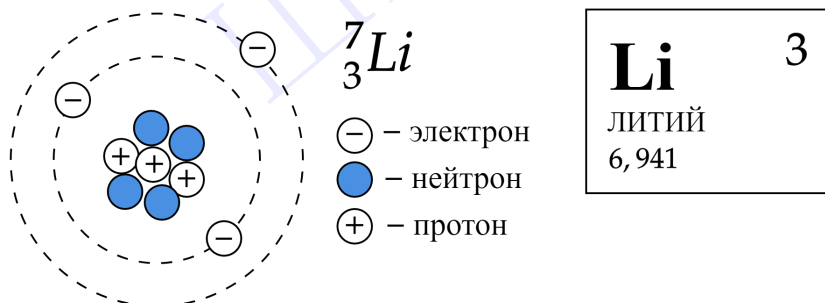
$$1 \text{ а.е.м} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Выразим массы элементарных частиц через атомную единицу массы:

$$m_e = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$$

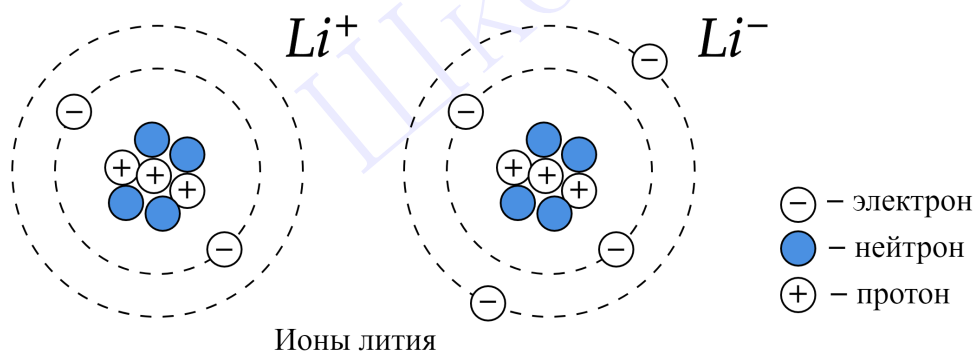
$$m_p = 1,007 \text{ а.е.м.} \quad m_n = 1,008 \text{ а.е.м.}$$

Параметры ядра. Число протонов в ядре называется зарядовым числом и обозначается Z . Заряд ядра, следовательно, равен Ze . Поскольку атом в целом электрически нейтрален, величина Z совпадает с числом электронов в атоме.

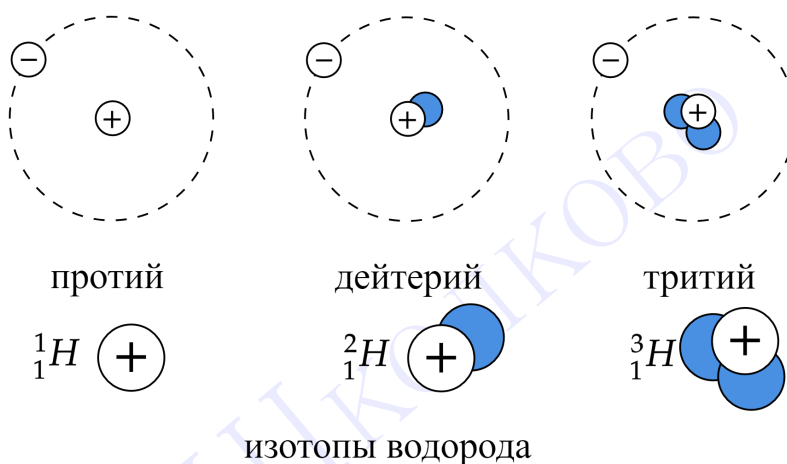


Зарядовое число, таким образом, есть не что иное, как порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева. Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом и обозначается A . Число нейтронов в ядре тогда будет равно $(A - Z)$. Запись A_ZX означает, что в ядре элемента X содержится A нуклонов, из которых Z являются протонами.

Ионы. Ионы — это микроскопические электрически заряженные и химически активные частицы. Они обладают положительным (катионы) или отрицательным (анионы) зарядом. Ионы образуются из атомов или групп атомов, приобретающих электроны или, наоборот, теряющих их.



Изотопы — это разновидности одного и того же химического элемента, различающиеся числом нейтронов в ядре. Они имеют одинаковые химические свойства, но различные физические свойства и «время жизни» у них тоже разное.



Принцип неопределенности Гейзенберга

Согласно двойственной корпускулярно-волновой природе частиц вещества, для описания микрочастиц используются то волновые, то корпускулярные представления. Поэтому приписывать им все свойства частиц и все свойства волн нельзя. Естественным, что необходимо внести некоторые ограничения в применении к объектам микромира понятий классической механики.

Соотношение неопределенности Гейзенберга говорит о том, что микрочастица (микрообъект) не может иметь одновременно и определенную координату (x, y, z) , и определенную соответствующую проекцию импульса (p_x, p_y, p_z) , причем неопределенности этих величин удовлетворяют условиям:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar; \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar; \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar$$

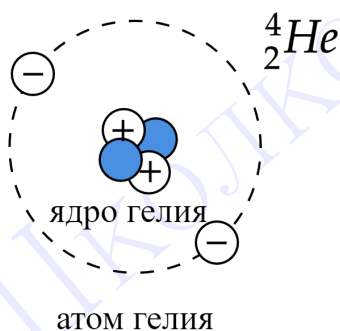
То есть произведение неопределенностей координаты и соответствующей ей проекции импульса не может быть меньше величины порядка $\hbar$. Соотношение неопределенностей является **квантовым ограничением применимости классической механики к микромиру**.

В квантовой теории также рассматривается соотношение неопределенностей для энергии и времени (ограничение по энергетическим уровням):

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Энергия связи атомных ядер. Дефект масс

Дефект масс. Рассмотрим ядро гелия ${}^4_2\text{He}$.



В таблице имеется значение массы нейтрального атома гелия: она равна 4,00260 а.е.м. Для нахождения массы M ядра гелия нужно из массы нейтрального атома вычесть массу двух электронов, находящихся в атоме:

$$M = 4,00260 - 2 \cdot 0,0005486 = 4,00150 \text{ а.е.м.}$$

В то же время, суммарная масса двух протонов и двух нейтронов, из которых состоит ядро гелия, равна

$$2m_p + 2m_n = 2 \cdot 1,00728 + 2 \cdot 1,00867 = 4,03190 \text{ а.е.м.}$$

Мы видим, что сумма масс нуклонов, составляющих ядро, превышает массу ядра на

$$\Delta m = 2m_p + 2m_n - M = 4,03190 - 4,00150 = 0,0304 \text{ а.е.м.}$$

Величина Δm называется дефектом массы. В силу формулы Эйнштейна ($E = mc^2$) дефекту массы отвечает изменение энергии

$$\boxed{\Delta E = \Delta mc^2}$$

Энергия связи атомных ядер. Величина ΔE обозначается также $E_{\text{св}}$ и называется энергией связи ядра.

Чтобы расщепить ядро на составляющие его протоны и нейтроны, нужно совершить работу против действия ядерных сил. Эта работа не меньше определенной величины A_{min} ; минимальная работа A_{min} по разрушению ядра совершается в случае, когда высвободившиеся протоны и нейтроны покоятся. Если над системой совершается работа, то энергия системы возрастает на величину совершенной работы. Поэтому суммарная энергия покоя нуклонов, составляющих ядро и взятых по отдельности, оказывается больше энергии покоя ядра на величину A_{min} . Следовательно, и суммарная масса нуклонов, из которых состоит ядро, будет больше массы самого ядра. Вот почему возникает дефект массы.

Итак, энергия связи ядра — это минимальная работа, которую необходимо совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны. Энергия связи ядра есть разность энергий покоя нуклонов ядра, взятых по отдельности, и энергии покоя самого ядра. Если ядро массы M состоит из Z протонов и N нейтронов, то для энергии связи $E_{\text{св}}$ имеем

$$\boxed{E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M)c^2}$$

Величина

$$\boxed{\Delta m = Zm_p + Nm_n - M}$$

как мы уже знаем, называется дефектом массы.

Радиоактивность

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 завёрнутую фотопластинку с насыпанной поверх урановой солью на солнечный свет, подержал несколько часов и затем проявил фотопластинку. После проявления на фотопластинке проступили очертания кристаллов соли урана. Полагая, что и впрямь обнаружились рентгеновские лучи, испускаемые урановой солью под действием солнечного света.

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, завёрнутой в чёрную бумагу. Неизвестно почему, но Беккерель решил проявить фотопластинку, лежащую 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 рассказал 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. 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.

Элементарные частицы

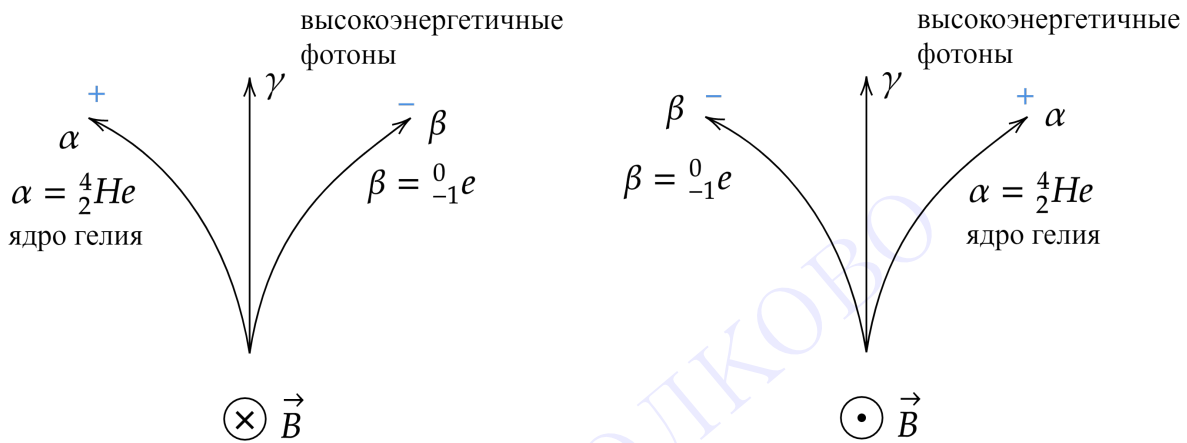
название	обозначение
α – частица	${}^4_2\text{He}$
электрон	${}^0_{-1}e$
позитрон	${}^0_{+1}e$
нейтрино	${}^0_0\nu$
антинейтрино	${}^0_0\bar{\nu}$
фотон	${}^0_0\gamma$

Радиоактивное излучение, его виды и свойства

Радиоактивное излучение (или ионизирующее) — это энергия, которая высвобождается атомами в форме частиц или волн электромагнитной природы.

Радиоактивные вещества испускают три типа лучей, различающихся по своим физическим свойствам. Эти три компоненты обнаруживаются в результате пропускания радиоактивного излучения через сильное магнитное поле.

- **Альфа-излучение.** Положительно заряженной компоненте была присвоена буква α ; ее назвали α -излучением, потоком α -частиц. Альфа-лучи достаточно слабо отклонялись магнитным полем. Тщательные исследования Резерфорда показали, что α -частицы — это полностью ионизованные атомы гелия, то есть ядра гелия.
- **Бета-излучение.** Отрицательно заряженная компонента была названа β -излучением. Они отклонялись магнитным полем значительно сильнее, чем α -частицы. Бета-лучи оказались потоком электронов, мчащихся со скоростями, близкими к скорости света.



- **Гамма-излучение.** Нейтральная компонента получила название γ -излучения. Гамма-лучи оказались электромагнитными волнами чрезвычайно высокой частоты — выше, чем у рентгеновского излучения. Соответственно, проникающая способность гамма-лучей также больше, чем у рентгеновских лучей.

Среди трех 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: хватит нескольких миллиметров свинца, чтобы поглотить их полностью. Слабее всего проникают сквозь вещество α -частицы: они не могут, например, пройти через лист бумаги.

Правила смещения



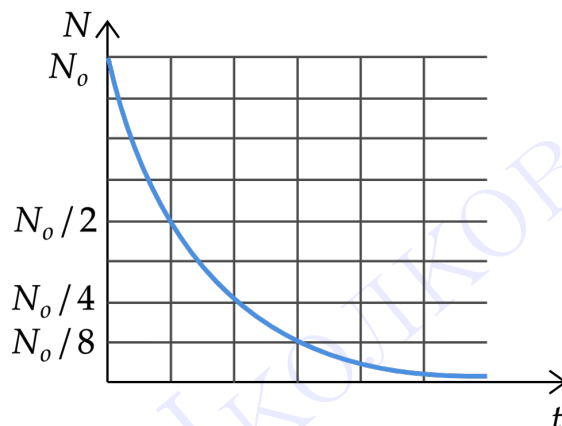
Закон радиоактивного распада

Под радиоактивным распадом понимают естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется материнским, возникающее ядро — дочерним.

Закон радиоактивного распада: число радиоактивных атомов уменьшается со временем по экспоненциальному закону. Данный закон выражается формулой:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

где N_0 — начальное число нераспавшихся ядер (в момент времени $t = 0$); N — нераспавшееся число ядер в момент времени t ; T — период полураспада.



Период полураспада — это время, за которое исходное число радиоактивных ядер уменьшается вдвое.

Активностью A в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

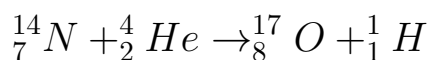
Единицы измерения: [Бк] — беккерель.

Понятие о ядерных реакциях

Ядерная реакция — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов.

В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях.

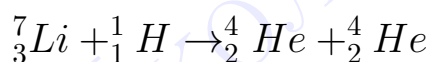
Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер. Резерфорд бомбардировал атомы азота α -частицами. При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



При ядерных реакциях выполняется несколько законов сохранения: импульса, энергии, момента импульса, заряда. В дополнение к этим классическим законам

при ядерных реакциях выполняется закон сохранения так называемого барионного заряда (т. е. числа нуклонов — протонов и нейтронов). Выполняется также ряд других законов сохранения, специфических для ядерной физики и физики элементарных частиц.

Ядерные реакции могут протекать при бомбардировке атомов быстрыми заряженными частицами (протоны, нейтроны, α -частицы, ионы). Первая реакция такого рода была осуществлена с помощью протонов большой энергии, полученных на ускорителе, в 1932 году:



Цепная ядерная реакция

Появление двух-трёх нейтронов в процессе деления ядра урана — важнейший факт. Эти нейтроны «первого поколения» могут попасть в новые ядра и вызвать их деление; в результате деления новых ядер возникнут нейтроны «второго поколения», которые попадут в следующие ядра и вызовут их деление; возникнут нейтроны «третьего поколения», которые приведут к делению очередных ядер и т.д. Так идёт **цепная ядерная реакция**, в ходе которой высвобождается колоссальное количество энергии. Для протекания цепной ядерной реакции необходимо, чтобы число N_i высвободившихся нейтронов в очередном поколении было не меньше числа $N_i - 1$ нейтронов в предыдущем поколении. Величина

$$k = \frac{N_i}{N_i - 1}$$

называется коэффициентом размножения нейтронов.

Таким образом, цепная реакция идёт при условии $k \geq 1$. Если $k < 1$, то цепная реакция не возникает.

В случае $k > 1$ происходит лавинообразное нарастание числа освобождающихся нейтронов, и цепная реакция становится неуправляемой. Так происходит взрыв атомной бомбы. В ядерных реакторах происходит управляемая цепная реакция деления с коэффициентом размножения $k = 1$.

Термоядерная реакция

Наряду с реакцией деления тяжёлых ядер энергетически выгодным оказывается и обратный в некотором смысле процесс — синтез лёгких ядер, то есть слияние ядер лёгких элементов с образованием более тяжёлого ядра. Чтобы на-

чалось слияние ядер, их нужно сблизить вплотную — чтобы вступили в действие ядерные силы. Для такого сближения нужно преодолеть кулоновское отталкивание ядер, резко возрастающее с уменьшением расстояния между ними. Это возможно лишь при очень большой кинетической энергии ядер, а значит — при очень высокой температуре. Поэтому реакция ядерного синтеза называется **термоядерной реакцией**.