

5.3 Физика атомного ядра

5.3.1 Нуклонная модель ядра Гейзенберга-Иваненко. Заряд ядра. Массовое число ядра. Изотопы.

В 1911 году Резерфорд произвел опыт по «рассеиванию альфа и бета частиц».

Резерфорд сделал вывод что масса атома сосредоточена в центре атома в небольшом объеме и имеет положительный заряд.

Таким образом Резерфорд открыл атомное ядро, с этого момента и ведёт начало ядерная физика, изучающая строение и свойства атомных ядер. В ядре атома сосредоточена почти вся масса атома (99,95 %). Диаметр ядра не превышает 10^{-14} – 10^{-15} м.

После обнаружения стабильных изотопов элементов, ядру самого лёгкого атома была отведена роль структурной частицы всех ядер. С 1920 года ядро атома водорода имеет официальный термин — протон. После промежуточной протон-электронной теории строения ядра, имевшей немало явных недостатков, в первую очередь она противоречила экспериментальным результатам измерений спинов и магнитных моментов ядер, в 1932 году Джеймсом Чедвиком была открыта новая электрически нейтральная частица, названная нейтроном. В том же году Иваненко и, независимо, Гейзенберг выдвинули гипотезу о протон-нейтронной структуре ядра. В дальнейшем, с развитием ядерной физики и её приложений, эта гипотеза была полностью подтверждена.

По этой теории все ядра состоят из двух видов частиц — протонов и нейтронов.

Протоны и нейтроны называются нуклонами (от лат. nucleus — ядро).

Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом и обозначается буквой

A. Массовое число A численно равно массе ядра, выраженной в атомных единицах массы и округленной до целых чисел.

Атомная единица массы (1 а. е. м.) равна $\frac{1}{12}$ части массы атома углерода, внесистемная единица массы, применяемая для масс молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц.

Число протонов соответствует порядковому (атомному) номеру элемента.

Разница между массовым и зарядовым числом равна числу нейтронов.

Любой химический элемент периодической таблицы Д.И. Менделеева можно представить формулой:



A – массовое число, Z – зарядовое число. Массовое число равно сумме протонов и нейтронов. Зарядовое число – это атомный номер, который равен числу протонов в ядре.

В ядрах одного и того же химического элемента число нейтронов может быть различным, а число протонов всегда одно и то же. Такие ядра называются **изотопами** (от греческих слов isos — одинаковый и topos — место). Например, в ядрах водорода всегда 1 протон, а число нейтронов может быть равно 0, 1, 2. В настоящее время в лабораториях получены изотопы водорода с числом нейтронов 3, 4, и даже 6.

5.3.2 Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы

Силы, которые скрепляют отдельные протоны и нейтроны в ядре называются **ядерными**, а соответствующее взаимодействие **сильным**. Оно на много порядков величин превышает гравитационное притяжение между протонами и нейтронами в ядре и доминирует над электромагнитными силами кулоновского отталкивания одноименно заряженных протонов внутри ядра.

Важнейшей особенностью ядерных сил является короткий радиус их действия. Они действуют только внутри атомного ядра, то есть на масштабах фемтометров (10^{-15} м). Законы ядерных взаимодействий — это законы квантовой физики, и они носят совершенно другой характер, чем уже известные нам гравитационные взаимодействия.

Отметим два **свойства ядерных сил**:

1) На расстоянии между нуклонами внутри ядра порядка 1 фм и больше силы носят характер **притяжения**, но при сближении протонов или нейтронов на расстоянии меньше 1 фм возникают силы **отталкивания**. Это препятствует сжатию ядер до еще меньших размеров.

2) Экспериментально доказано, что ядерные силы между двумя протонами, двумя нейтронами и протоном и нейтроном практически одинаковы. Это свойство называют **зарядовой независимостью** ядерных сил.

Минимальная энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра.

Энергию связи любого ядра можно определить с помощью формулы Эйнштейна, которая устанавливает взаимосвязь между массой и энергией:

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2$$

где Δm — дефект массы, c — скорость света в вакууме.

Вычислим энергию связи ядра гелия.

Для того чтобы энергию связи получить в джоулях, дефект масс нужно выразить в килограммах.

Учитывая, что $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, получим

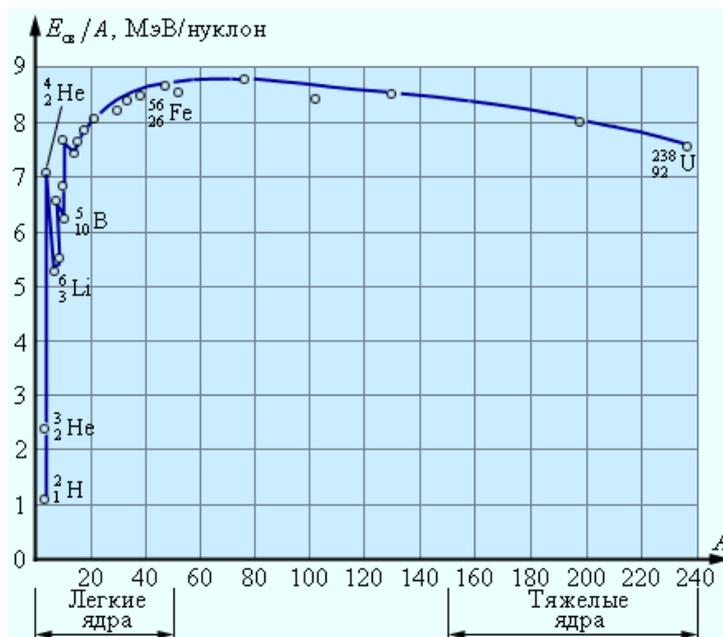
$$\Delta m = 0,0294 \text{ а.е.м.} = 0,0488 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$E_{\text{св}} = 0,0488 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 0,4388 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$$

Это огромная величина. Образование всего 1 г гелия сопровождается выделением энергии порядка 10^{12} Дж. Примерно такая же энергия выделяется при сгорании почти целого вагона каменного угля.

Устойчивость ядер характеризует физическая величина, называемая удельной энергией связи. Она равна энергии связи, которая приходится только на одну ядерную частицу (протон или нейтрон): $E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$

По графику зависимости удельной энергии связи от массового числа элементов можно заметить, что для легких ядер энергия связи очень мала. Удельная энергия связи имеет наибольшее значение для ядер атомов, расположенных в средней части периодической системы элементов с массовыми числами от 28 до 138. С дальнейшим ростом массового числа энергия связи убывает.



5.3.3 Дефект массы ядра

Разность между суммой масс отдельных нуклонов и массой ядра называют **дефектом масс**.

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}$$

Дефект массы ядра гелия равен

$$\Delta m = (2 \cdot 1,0073 \text{ а.е.м.} + 2 \cdot 1,0087 \text{ а.е.м.}) - 4,0026 \text{ а.е.м.} = 0,0294 \text{ а.е.м.}$$

Для того чтобы разбить ядро на отдельные, не взаимодействующие между собой нуклоны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, то есть сообщить ядру энергию. Из закона сохранения энергии следует, что эта энергия равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

5.3.4 Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад (электронный и позитронный распад). Гамма-излучение.

Радиоактивность была открыта в 1896 году французским физиком А. Беккерелем. Он занимался исследованием связи люминесценции и недавно открытых рентгеновских лучей.

Своим открытием Беккерель делится с учёными, с которыми он сотрудничал. В 1898 г. Мария Кюри и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория, позднее ими были открыты радиоактивные элементы полоний и радий.

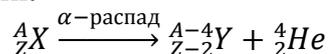
Э. Резерфорд экспериментально установил (1899), что соли урана испускают лучи трёх типов, которые по-разному отклоняются в магнитном поле:

- лучи первого типа отклоняются так же, как поток положительно заряженных частиц, их назвали α -лучами;
- лучи второго типа обычно отклоняются в магнитном поле так же, как поток отрицательно заряженных частиц, их назвали β -лучами (существуют, однако, позитронные бета-лучи, отклоняющиеся в противоположную сторону);
- лучи третьего типа, которые не отклоняются магнитным полем, назвали γ -излучением.

Радиоактивность – способность ядер некоторых атомов самопроизвольно превращаться в другие ядра, при этом испуская частицы.

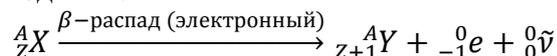
Альфа-распад — это самопроизвольное испускание атомным ядром α -частицы. В результате вылета α -частицы (ядра атома гелия) из атомного ядра с числом протонов Z и нейтронов N оно превращается в другое ядро, содержащее число протонов $Z - 2$ и нейтронов $N - 2$.

Правило смещения: **При α -распаде одного химического элемента образуется другой химический элемент, который в таблице Менделеева расположен на 2 клетки ближе к ее началу, чем исходный.**



Бета-распад (или бета-минус распад, или электронный бета распад) — это самопроизвольное испускание атомным ядром β -частицы (электрона). Внутри ядер электроны существовать не могут. Но в результате бета-распада нейтрон превращается в протон, электрон и частицу антинейтрино. Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, а протон остается. В результате β -распада число протонов увеличивается на единицу.

Правило смещения: **При β -распаде одного химического элемента образуется другой химический элемент, который расположен в таблице Менделеева в следующей клетке за исходным.**



Существуют также другие типы бета-распада. В позитронном распаде (бета-плюс-распаде) ядро испускает позитрон и электронное нейтрино. При β^+ -распаде заряд ядра уменьшается на единицу (ядро смещается на одну клетку к началу таблицы Менделеева), то есть один из протонов ядра превращается в нейтрон, испуская позитрон и нейтрино



Гамма-квантами являются фотоны с высокой энергией. Считается, что энергии квантов гамма-излучения превышают 10^5 эВ, хотя резкая граница между гамма- и рентгеновским излучением не определена. На шкале электромагнитных волн гамма-излучение граничит с рентгеновским излучением, занимая диапазон более высоких частот и энергий. В области 1—100 кэВ гамма-излучение и рентгеновское излучение различаются только по источнику: если квант излучается в ядерном переходе, то его принято относить к гамма-излучению; если при взаимодействиях электронов или при переходах в атомной электронной оболочке — к рентгеновскому излучению. С точки зрения физики, кванты электромагнитного излучения с одинаковой энергией не отличаются, поэтому такое разделение условно.

Гамма-лучи, в отличие от α -лучей и β -лучей, не содержат заряженных частиц и поэтому не отклоняются электрическими и магнитными полями и характеризуются

большой проникающей способностью при равных энергиях и прочих равных условиях. Гамма-кванты вызывают ионизацию атомов вещества.

Легче всего защититься от α -излучения, так как оно обладает низкой проникающей способностью и поэтому задерживается, например, листом бумаги, одеждой, кожей человека. В то же время α -частицы, попавшие внутрь организма (с пищей, воздухом, через открытые раны), представляют большую опасность.

β -Излучение имеет гораздо большую проникающую способность, поэтому от его воздействия труднее защититься. β -Излучение может проходить в воздухе расстояние до 5 м; оно способно проникать и в ткани организма (примерно на 1—2 см). Защитой от β -излучения может служить, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Еще большей проникающей способностью обладает γ -излучение, оно задерживается толстым слоем свинца или бетона. Поэтому γ -радиоактивные препараты хранят в толстостенных свинцовых контейнерах. По этой же причине в ядерных реакторах используют толстый бетонный слой, защищающий людей от γ -лучей и различных частиц (α -частиц, нейтронов, осколков деления ядер и пр.).

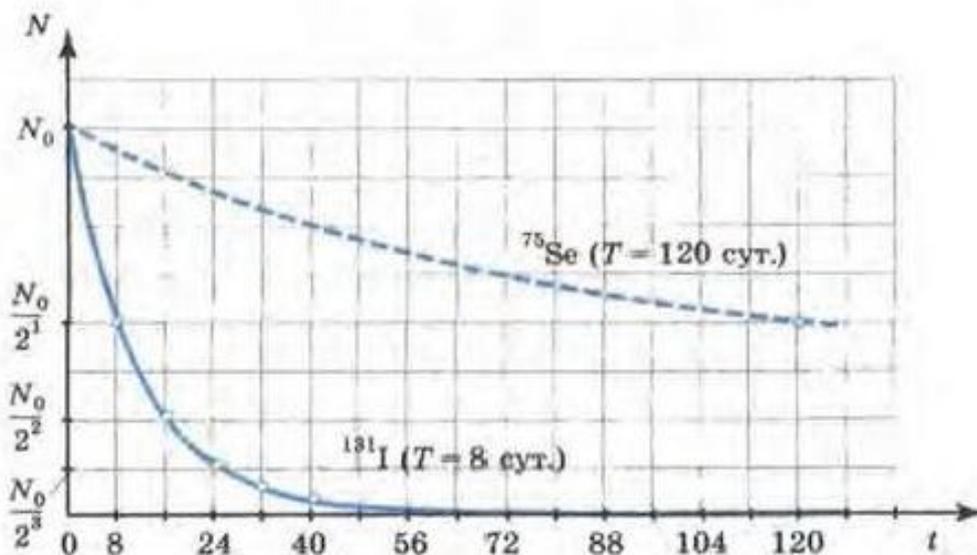
5.3.5 Закон радиоактивного распада

Период полураспада (T) — это промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое.

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

Закон радиоактивного распада.

Значит, чем больше период полураспада элемента, тем дольше он «живет и излучает, представляя опасность для живых организмов. В этом со всей наглядностью убеждают представленные на рисунке графики зависимости N от t , построенные для изотопов йода (^{131}I , $T_{\text{I}} = 8$ сут.) и селена (^{75}Se , $T_{\text{Se}} = 120$ сут.).



5.3.6 Ядерные реакции. Деление и синтез ядер

Ядерная реакция — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра. Последствием взаимодействия может стать деление ядра, испускание элементарных частиц или фотонов. Кинетическая энергия вновь образованных частиц может быть гораздо выше первоначальной, при этом говорят о выделении энергии ядерной реакцией.

Ядерные взаимодействия с частицами носят весьма разнообразный характер, их виды и вероятности той или иной реакции зависят от вида бомбардирующих частиц, ядер-мишеней, энергий взаимодействующих частиц и ядер и многих других факторов.

Ядерная реакция деления — процесс расщепления атомного ядра на два (реже три) ядра с близкими массами, называемых осколками деления. В результате деления

могут возникать и другие продукты реакции: лёгкие ядра (в основном, альфа-частицы), нейтроны и гамма-кванты. Деление бывает спонтанным (самопроизвольным) и вынужденным (в результате взаимодействия с другими частицами, прежде всего, с нейтронами). Деление тяжёлых ядер — экзотергический процесс, в результате которого высвобождается большое количество энергии в виде кинетической энергии продуктов реакции, а также излучения.

Деление ядер служит источником энергии в ядерных реакторах и ядерном оружии.

Ядерная реакция синтеза — процесс слияния двух атомных ядер с образованием нового, более тяжелого ядра.

Кроме нового ядра, в ходе реакции синтеза, как правило, образуются также различные элементарные частицы и (или) кванты электромагнитного излучения.

Без подвода внешней энергии слияние ядер невозможно, так как положительно заряженные ядра испытывают силы электростатического отталкивания — это так называемый «кулоновский барьер». Для синтеза ядер необходимо сблизить их на расстояние порядка 10^{-15} м, на котором действие сильного взаимодействия будет превышать силы электростатического отталкивания. Это возможно в случае, если кинетическая энергия сближающихся ядер превышает кулоновский барьер.

Такие условия могут сложиться в двух случаях:

- Если атомные ядра (ионы, протоны или α -частицы), обладающие большой кинетической энергией, встречаются на своем пути другие атомные ядра. В природе это возможно, например, при столкновении частиц ионизированного газа, например, в ионосфере Земли, с частицами космических лучей. Таким путём были получены первые искусственные ядерные реакции синтеза и многие искусственно синтезированные химические элементы.
- Если вещество нагревается до чрезвычайно высоких температур в звезде или термоядерном реакторе. Согласно кинетической теории, кинетическую энергию движущихся микрочастиц вещества (атомов, молекул или ионов) можно представить в виде температуры, а, следовательно, нагревая вещество, можно достичь ядерной реакции синтеза. В таком случае говорят о термоядерном синтезе или термоядерной реакции.