

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Лекция 4.

Атомное ядро. Элементарные частицы

Характеристики атомного ядра.

Атом состоит из положительно заряженного ядра и окружающих его электронов. Атомные ядра имеют размеры примерно $10^{-14} \dots 10^{-15}$ м (линейные размеры атома – 10^{-10} м).

Атомное ядро состоит из элементарных частиц – *протонов и нейтронов*. Протон (p) имеет положительный заряд, равный заряду электрона, и массу покоя $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, где m_e – масса электрона. Нейтрон (n) – нейтральная частица с массой покоя $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$. Массу протонов и нейтронов часто выражают в других единицах – в атомных единицах массы (а.е.м., единица массы, равная 1/12 массы атома углерода ${}^{12}_6\text{C}$). Массы протона и нейтрона равны приблизительно одной атомной единице массы. Протоны и нейтроны называются *нуклонами* (от лат. *nucleus* – ядро). Общее число нуклонов в атомном ядре называется массовым числом (A).

Радиусы ядер возрастают с увеличением массового числа в соответствии с соотношением $R = 1,4 A^{1/3} 10^{-13}$ см.

Эксперименты показывают, что ядра не имеют резких границ. В центре ядра существует определенная плотность ядерного вещества, и она постепенно уменьшается до нуля с увеличением расстояния от центра. Из-за отсутствия четко определенной границы ядра его «радиус» определяется как расстояние от центра, на котором плотность ядерного вещества уменьшается в два раза. Среднее распределение плотности материи для большинства ядер оказывается не просто сферическим. Большинство ядер деформировано. Часто ядра имеют форму вытянутых или сплюснутых эллипсоидов

Атомное ядро характеризуется *зарядом Ze* , где Z – *зарядовое число* ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева.

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом: ${}^A_Z X$, где X – символ химического элемента, Z – атомный номер (число протонов в ядре), A – массовое число (число нуклонов в ядре). Массовое число A приблизительно равно массе ядра в атомных единицах массы.

Так как атом нейтрален, то заряд ядра Z определяет и число электронов в атоме. От числа электронов зависит их распределение по состояниям в атоме. Заряд ядра определяет специфику данного химического элемента, т. е. определяет число электронов в атоме, конфигурацию их электронных оболочек, величину и характер внутриатомного электрического поля.

Ядра с одинаковыми зарядовыми числами Z , но с разными массовыми числами A (т. е. с разными числами нейтронов $N = A - Z$), называются изотопами, а ядра с одинаковыми A , но разными Z – изобарами. Например, водород ($Z = 1$) имеет три изотопа: 1_1H – протий ($Z = 1, N = 0$), 2_1H – дейтерий ($Z = 1, N = 1$), 3_1H – тритий ($Z = 1, N = 2$), олово – десять изотопов и т. д. В подавляющем большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами.

Квантовая теория строго ограничивает значения энергий, которыми могут обладать составные части ядер. Совокупности протонов и нейтронов в ядрах могут находиться только в определенных дискретных энергетических состояниях, характерных для данного изотопа.

Когда электрон переходит из более высокого в более низкое энергетическое состояние, разность энергий излучается в виде фотона. Энергия этих фотонов имеет порядок нескольких электрон-вольт. Для ядер энергии уровней лежат в интервале примерно от 1 до 10 МэВ. При переходах между этими уровнями испускаются фотоны очень больших энергий (γ -кванты). Для иллюстрации таких переходов на рис.1 приведены пять первых уровней энергии ядра ${}^{10}_5B$. Вертикальными линиями указаны наблюдаемые переходы. Например, γ -квант с энергией 1,43 МэВ испускается при переходе ядра из состояния с энергией 3,58 МэВ в состояние с энергией 2,15 МэВ.

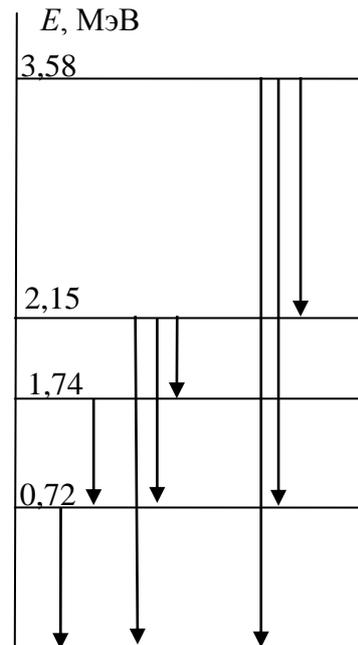


Рис.1.
Уровни энергии
и наблюдаемые переходы
для ядра атома Бора

Дефект массы и энергия связи ядра

Исследования показывают, что атомные ядра являются устойчивыми образованиями. Это означает, что в ядре между нуклонами существует определенная связь.

Массу ядер очень точно можно определить с помощью масс-спектрометров – измерительных приборов, разделяющих с помощью электрических и магнитных полей пучки заряженных частиц (обычно ионов) с разными удельными зарядами q/m . Масс-спектрометрические измерения показали, что *масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов.*

Величина

$$\Delta m = [Zm_p + (A-Z)m_n] - m_{я}, \quad (1)$$

называется *дефектом массы* ядра. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

Согласно соотношению Эйнштейна между массой и энергией

$$E=mc^2 \quad (2)$$

всякому изменению массы должно соответствовать изменение энергии. Следовательно, при образовании ядра должна выделяться определенная энергия. Из закона сохранения энергии вытекает и обратное: для разделения ядра на составные части необходимо затратить такое же количество энергии, которое выделяется при его образовании. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется *энергией связи ядра*.

Поэтому в соответствии с формулами (1,2) энергия связи нуклонов в ядре имеет вид

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A-Z)m_n] - m_{\text{я}}] c^2, \quad (3)$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ – соответственно массы протона, нейтрона и ядра.

В таблицах обычно приводятся не массы ядер $m_{\text{я}}$, а массы m атомов. Поэтому для энергии связи ядра пользуются формулой

$$E_{\text{св}} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m] c^2, \quad (4)$$

где m_H – масса атома водорода.

Ядерные силы

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые, специфические для ядра силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Они называются *ядерными силами*.

С помощью экспериментальных данных по рассеянию нуклонов на ядрах, ядерным превращениям и т. д. доказано, что ядерные силы намного превышают гравитационные, электрические и магнитные взаимодействия и не сводятся к ним. Ядерные силы относятся к классу так называемых сильных взаимодействий.

Перечислим основные свойства ядерных сил:

1) ядерные силы являются *силами притяжения*;
2) ядерные силы являются *короткодействующими* – их действие проявляется только на расстояниях примерно 10^{-15} м. При увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы быстро уменьшаются до нуля, а при расстояниях, меньших их радиуса действия, оказываются примерно в 100 раз больше кулоновских сил, действующих между протонами на том же расстоянии;

3) ядерным силам свойственна *зарядовая независимость*: ядерные силы, действующие между двумя протонами, или двумя нейтронами, или, наконец, между протоном и нейтроном, одинаковы по величине. Отсюда следует, что ядерные силы имеют неэлектрическую природу;

4) ядерным силам свойственно *насыщение*, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре (если не учитывать легкие ядра) при увеличении числа нуклонов не растет, а остается приблизительно постоянной;

5) ядерные силы зависят от взаимной *ориентации спинов* взаимодействующих нуклонов. Например, протон и нейтрон образуют дейтрон (ядро изотопа ${}^2_1\text{H}$) только при условии параллельной ориентации их спинов;

б) ядерные силы *не являются центральными*, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Французский физик А. Беккерель (1852 – 1908) в 1896 г. при изучении люминесценции солей урана случайно обнаружил *самопроизвольное* испускание ими излучения неизвестной природы, которое действовало на фотопластинку, ионизировало воздух, проникало сквозь тонкие металлические пластинки, вызывало люминесценцию ряда веществ. Продолжая исследование этого явления, супруги Кюри – Мария и Пьер – обнаружили, что такое излучение свойственно не только урану, но и многим другим тяжелым элементам, таким, как торий и актиний. Удалось выделить два новых элемента – носителя беккерелевского излучения: полоний ${}^{210}_{84}\text{Po}$ и радий ${}^{226}_{88}\text{Ra}$.

Обнаруженное излучение было названо *радиоактивным*, а само явление – испускание радиоактивного излучения – *радиоактивностью*. Дальнейшие опыты показали, что на характер радиоактивного излучения препарата не оказывают влияния вид химического соединения, агрегатное состояние, механическое давление, температура, электрические и магнитные поля, т. е. все те воздействия, которые могли бы привести к изменению состояния электронной оболочки атома. Следовательно, радиоактивные свойства элемента обусловлены лишь структурой его ядра.

В настоящее время под *радиоактивностью* понимают *способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц*. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется *материнским*, возникающее ядро – *дочерним*.

Радиоактивность подразделяется на *естественную* (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и *искусственную* (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций). Принципиального различия между этими двумя типами радиоактивности нет, так как законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

Радиоактивное излучение бывает трех типов: α -, β -, γ -излучение. α -излучение представляет собой поток ядер гелия: заряд α -частицы равен $+2e$, а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$. α -частица отклоняется элек-

трическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм).

β -излучение представляет собой поток быстрых электронов. β -частица отклоняется электрическим и магнитным полями, ее ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше, чем у α -частиц (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм).

β -излучение сильно рассеивается в веществе (зависит не только от вещества, но и от размеров и формы тел, на которые β -излучение падает).

γ -излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м и вследствие этого – ярко выраженными корпускулярными свойствами, т. е. является потоком частиц γ -квантов (фотонов). γ -излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью (например, проходит через слой свинца толщиной 5 см), при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.

Теория радиоактивного распада строится на предположении о том, что распад является спонтанным процессом, подчиняющимся законам статистики. Так как отдельные радиоактивные ядра распадаются независимо друг от друга, то можно считать, что число ядер dN , распавшихся в среднем за интервал времени от t до $t+dt$, пропорционально промежутку времени dt и числу N нераспавшихся ядер к моменту времени t :

$$dN = -\lambda N dt, \quad (5)$$

где λ – постоянная для данного радиоактивного вещества величина, называемая *постоянной радиоактивного распада*; знак минус указывает, что общее число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается. Разделив переменные и интегрируя

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

получим

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (6)$$

где N_0 – начальное число *нераспавшихся* ядер в момент времени $t = 0$; N – число *нераспавшихся* ядер в момент времени t . Формула (6) выражает *закон радиоактивного распада*, согласно которому число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону.

Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуют две величины: период полураспада $T_{1/2}$ и среднее время жизни τ радиоактивного ядра. *Период полураспада* $T_{1/2}$ – время, за которое исходное число радиоактивных ядер в *среднем* уменьшается вдвое. Тогда, согласно (6)

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Периоды полураспада для естественно-радиоактивных элементов колеблются от десятиmillionных долей секунды до многих миллиардов лет.

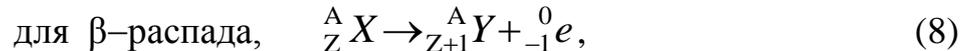
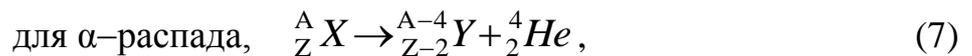
Суммарная продолжительность жизни dN ядер равна $t|dN| = \lambda N dt$. Проинтегрировав это выражение по всем возможным t (т.е. от 0 до ∞) и разделив на начальное число ядер N_0 , получим среднее время жизни τ радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Таким образом, среднее время жизни τ радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада λ .

Радиоактивный распад происходит в соответствии с так называемыми **правилами смещения**, позволяющими установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра.

Правила смещения:



где ${}^A_Z X$ – материнское ядро; Y – символ дочернего ядра; ${}^4_2 He$ – ядро гелия (α -частица); ${}^0_{-1} e$ – символическое обозначение электрона (заряд его равен $-e$, а массовое число – нулю). Правила смещения являются ничем иным, как следствием двух законов, выполняющихся при радиоактивных распадах, – закона сохранения электрического заряда и закона сохранения массового числа: сумма зарядов (массовых чисел) возникающих ядер и частиц равна заряду (массовому числу) исходного ядра. Возникающие в результате радиоактивного распада ядра могут быть, в свою очередь, радиоактивными. Это приводит к возникновению цепочки или ряда радиоактивных превращений, заканчивающихся стабильным элементом. Совокупность элементов, образующих такую цепочку, называется радиоактивным семейством.