

Радиоактивность

Атом и атомное ядро

Первые взгляды на дискретную природу материи возникли в философских школах древней Индии еще в первом тысячелетии до нашей эры. Философы древней Греции Эпикур, Демокрит, Левкипп утверждали, что мир состоит из атомов и пустоты, в которой атомы находятся в непрерывном движении. Они рассматривали атомы как мельчайшие неделимые частицы, вечные и неизменные, пребывающие в постоянном движении и различающиеся формой и величиной. В XVII веке М. Ломоносов ввел понятие об атомах, элементах и молекулах, и сделал вывод, что свойства веществ зависят от состава и строения. Его современник Д. Дальтон определил атом как мельчайшую частицу вещества с определенными массой и размерами, он же определил первые атомные веса элементов.

Представление об атомах как о монолитных, не изменяющихся шариках просуществовало до середины XVIII века. Открытие в 1897 году электрона показало, что атомы неоднородны, так как в них входят отрицательно заряженные электроны и что бы быть электронейтральными, атомы должны включать положительно заряженные субстанции. В 1898 году Дж. Томпсон вместо представления о монолитных шариках Д. Дальтона предложил новую теорию строения атома, согласно которой вся сфера атома равномерно заполнена некой положительно заряженной субстанцией, а в ней, как рыбки в аквариуме, хаотично движутся нейтрализующие ее электроны. Такая модель атома сравнивалась с кексом, внутри которого изюминки равномерно распределены по всей форме. Сама же теория успешно объясняла все известные к тому времени электромагнитные явления, например электролиз.

Однако в 1911 году в знаменитых опытах Э. Резерфорда по рассеиванию α -частиц на золотой фольге были получены доказательства того, что в центре атома находится компактное массивное атомное ядро, вокруг которого движутся электроны. Открытие существования у атома ядра имело колоссальную важность в эволюции учения о строении материи. Позднее Н. Бор объяснил движение электронов в атоме, а Д. Иваненко и В. Гейзенберг выдвинули гипотезу, что атомное ядро состоит из нейтронов и протонов. Фактически открытие ядра атома ознаменовало собой рождение атомной физики и новых физических представлений о строении и свойствах материи.

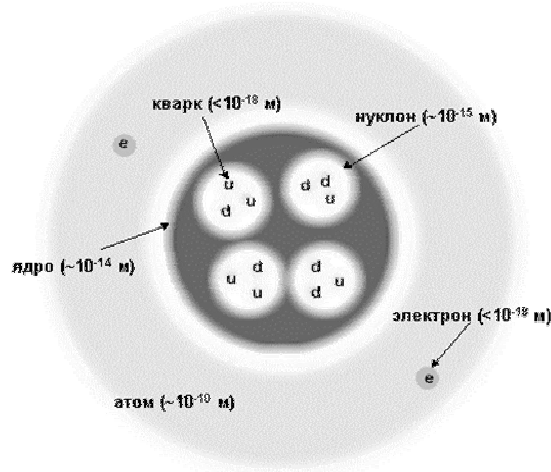
Согласно современной модели атома:

- Электроны движутся в пространстве вокруг ядра под действием реально существующих сил притяжения.
- Движение электрона характеризуется волновой функцией и определенной потенциальной энергией.

Ядром называется центральная часть атома, в которой сосредоточены практически вся масса атома и положительный заряд. Атомное ядро состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов, которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы – нуклона. Нуклоны также являются составными частицами – каждый нуклон содержит по три кварка, определяющих его свойства. Протон состоит из двух u - и одного d -кварков, нейтрон – из двух d - и одного u -кварка ($p(uud)$ и $n(udd)$).

Число нуклонов в ядре $A = N + Z$ называется массовым числом. N – количество нейтронов, Z – порядковый номер химического элемента в периодической системе элементов, равный числу протонов в ядре. Нуклонам (нейтрону и протону) приписываются массовое число, равное единице, электрону – нулевое значение A .

Ядра с одинаковыми Z , но различными A называются изотопами. Ядра, которые при одинаковом A имеют различные Z , называются изобарами. Ядро химического элемента Э обозначается ${}^A_Z\text{Э}$. На рисунке изображено ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$. Атомы, ядра которых характеризуются определенными значениями A и Z , называются нуклидами. Всего известно 2975 (2000 г.) естественных и искусственно полученных нуклидов, из которых около 300 устойчивых.



Радиоактивность ядер

В 1898 году Антуан Анри Беккерель, изучая фосфоресценцию солей урана, обнаружил потемнение фотопластинок, завернутых в бумагу вместе с солью без предварительного облучения ее солнечным светом. В дополнительном опыте Беккерель показал, что открытый им эффект наблюдается не только для солей, но и для металлического урана, т.е. является свойством самого элемента. Обнаруженный эффект самопроизвольного испускания ураном нового, неизвестного до того времени излучения был назван радиоактивностью.

Под радиоактивностью понимается превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц (излучение) и выделением энергии.

Через несколько лет после опытов Антуана Беккереля супруги Пьер и Мария Кюри открыли два новых радиоактивных элемента – полоний ${}_{84}\text{Po}$ и радий ${}_{88}\text{Ra}$, активность излучения которых оказалась в 10^7 раз выше, чем урана. Изучая свойства радиоактивного излучения, Мария Кюри обнаружила в его составе тяжелую компоненту. А Эрнест Резерфорд, исследовавший отклонение испускаемых частиц в электрическом и магнитном полях, доказал, что радиоактивное излучение содержит три компоненты, названные в то время α , β , γ - лучами.

Позднее было установлено, что γ -лучи – это сильно проникающее электромагнитное излучение; α -лучи – ядра гелия ${}^4_2\text{He}$, движущиеся со скоростью около 0,1 скорости света и поглощающиеся слоем алюминия толщиной несколько микрон; β -лучи – электроны, движущиеся со скоростью близкой к скорости света ($c = 10^8$ м/с), и поглощающиеся слоем алюминия толщиной порядка 1 мм. В 1904 году Эрнест Резерфорд совместно с Фредериком Содди сделали вывод, что все три вида радиоактивного излучения являются результатом распада ядра атома. Радиоактивность зависит от характеристик ядер, таких как энергия связи.

Энергия связи ядра

Нуклоны в ядрах находятся в состояниях, существенно отличающихся от из свободных состояний. За исключением ядра обычного водорода, во всех ядрах имеется не менее двух нуклонов, между которыми существует особое ядерное взаимодействие – притяжение, обеспечивающие устойчивость ядер, несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Ядро ${}^3_2\text{He}$ (гелий – три) состоит из двух протонов и нейтрона. Отношение сил гравитационного и электромагнитного взаимодействий двух протонов в ядре ${}^3_2\text{He}$ равно:

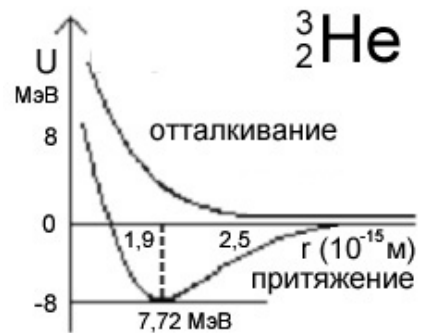
$$\frac{F_E}{F_G} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \right) / \left(G \frac{m_1 m_2}{r^2} \right) = \frac{1}{G \cdot 4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{m_1 m_2},$$

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{1}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг})^2} \approx 10^{36}.$$

Очевидно, что сила электромагнитного отталкивания значительно больше гравитационного притяжения. Следовательно, должна существовать третья фундаментальная сила, удерживающая нуклоны в связанном состоянии.

В современной физике, основанной на квантовых принципах, вместо сил принято использовать понятие потенциальной энергии взаимодействия, так как именно потенциальная энергия взаимодействия входит в уравнение Шредингера или его обобщения. Это позволяет найти состояния и характеристики системы (ядра атома). Систему из

двух протонов и нейтрона можно описать кривой на графике зависимости потенциальной энергии системы от расстояния между нуклонами. Видно, что на расстоянии примерно в $1,9 \cdot 10^{-15}$ м глубина потенциальной ямы, соответствующей минимальной полной потенциальной энергии, больше потенциальной энергии электростатического отталкивания двух протонов. В ядре ${}^3_2\text{He}$ протоны и нейтроны связаны друг с другом энергией 7,72 МэВ. Значение этой энергии можно получить, зная значения масс протона, нейтрона и гелия-3, которые равны соответственно 1,007276; 1,008665 и 3,014931 а.е.м. – энергия соответствующая 1 а.е.м. равна 931,5 МэВ. Формула связующая энергию связи между нуклонами и массами частиц:



$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 = [Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}}] \cdot c^2$$

где $E_{\text{св}}$ – энергия связи нуклонов в ядре, которая равна той работе, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны; Δm – дефект массы, характеризующий уменьшение суммарной массы при образовании ядра из составляющих его нуклонов.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{\text{я}},$$

или

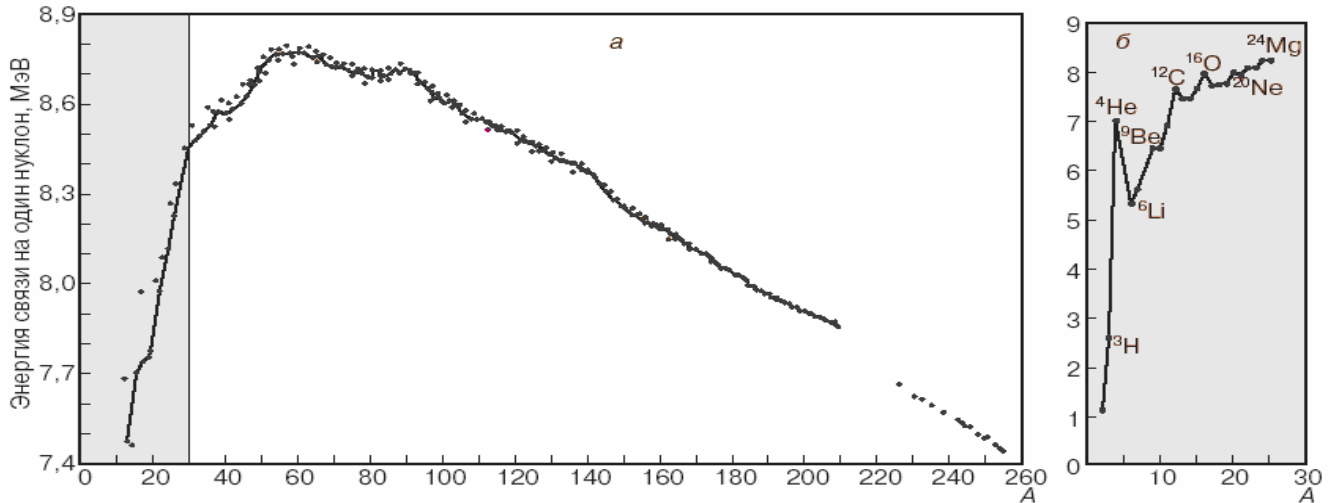
$$\Delta m = Z \cdot m_H + N \cdot m_n - M_a,$$

где $M_{\text{я}}$ – масса ядра атома, M_a – масса атома.

Для ядра ${}^3_2\text{He}$ энергия связи равна:

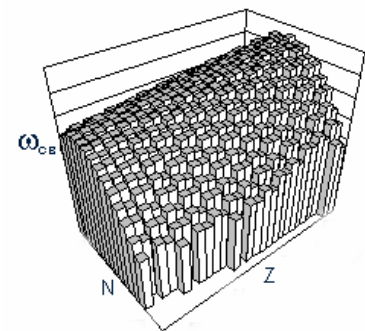
$$E_{\text{св}} = [2 \cdot 1,007276 + 0,008665 - 3,014931] \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 7,718 \text{ МэВ}^*$$

Удельной энергией связи ядра $\tilde{\omega}_{\text{св}}$ называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон: $\tilde{\omega}_{\text{св}} = E_{\text{св}}/A$. На рисунке приведена кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа A , характеризующая различную прочность связей нуклонов в ядрах стабильных нуклидов.



Ядра средней части периодической системы элементов от ${}^{28}\text{Si}$ до ${}^{138}\text{Ba}$ наиболее прочны. В этих ядрах энергия связи $\tilde{\omega}_{\text{св}}$ близка к 8,7 МэВ/нуклон. По мере увеличения числа нуклонов в ядре удельная энергия связи убывает. В области малых массовых чисел имеются острые пики удельной энергии связи. Максимумы характерны для ядер с четным числом протонов и нейтронов (${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$). Минимумы характерны для ядер с нечетным количеством протонов и нейтронов (${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$). Подобная закономерность объясняется насыщенностью ядерных сил, которая проявляется в том, что нуклон в ядре взаимодействует лишь с ограниченным числом ближайших к нему соседних нуклонов. Именно по этому зависимость удельной энергии связи от количества нуклонов линейна. Практически полное насыщение ядерных сил достигается у α -частицы (${}^4\text{He}$), которая является очень устойчивым образованием.

Устойчивость ядер определяется именно энергией связи его нуклонов. Чем больше насыщенность связи и чем больше значение $\tilde{\omega}_{\text{св}}$, тем стабильнее нуклон. Рассмотрим зависимость $\tilde{\omega}_{\text{св}}$ от N и Z для ядер середины периодической системы элементов:



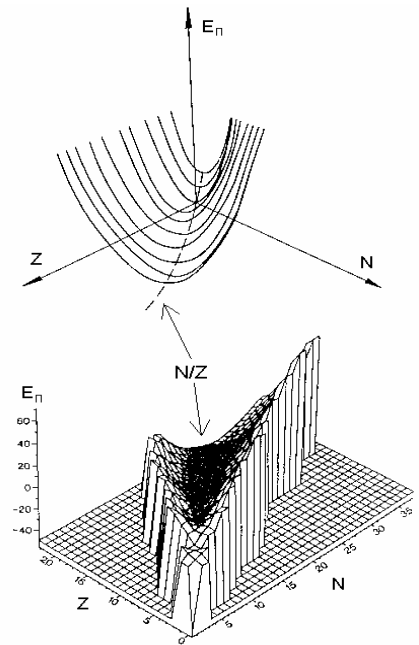
На диаграмме отображены значения удельной энергии связи для изотопов цезия (Cs), бария (Ba) и т.д. до ртути (Hg). Нуклиды, отвечающие наибольшим значениям $\tilde{\omega}_{\text{св}}$, стабильны, для них характерны определенные числа нейтронов и протонов $N_{\text{уст}}$ и $Z_{\text{уст}}$. Чем больше отличаются значения N и Z нуклида от $N_{\text{уст}}$ и $Z_{\text{уст}}$, тем меньше его удельная энергия связи.

* В микрофизике энергия измеряется в [МэВ]. Если использовать значения масс в килограммах, умножая на значения скорости света в квадрате, получим значение энергии в [Дж]. $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ и $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$

Максимальное значение энергии связи отвечает минимальной потенциальной энергии ядра (E_n). Полная энергия ядра обусловлена взаимодействиями между нуклонами, наиболее значительными из которых являются ядерное и электромагнитное. Суммарное взаимодействие этих двух сил устанавливает условия устойчивости ядер. Так критерием устойчивости атомных ядер является соотношение между числом протонов и нейтронов. Условие минимума потенциальной энергии ядра приводит к соотношению между $Z_{уст}$ и A :

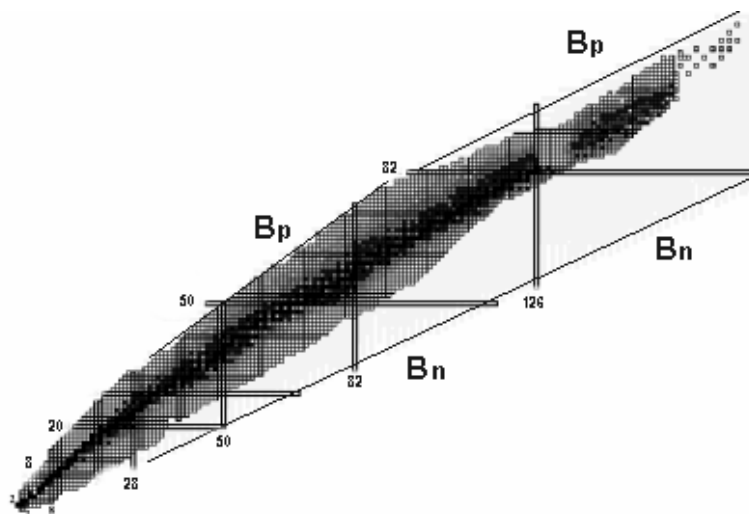
$$Z_{уст} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}$$

Из которого следует, что для всех стабильных нуклидов $N_{уст} \geq Z_{уст}$. Значение $N_{уст} / Z_{уст}$ для легких ядер приблизительно равно 1, а для тяжелых 1,6. Нуклиды, обладающие меньшей энергией связи, могут превращаться в устойчивые нуклиды, обладающие большей удельной энергией связи. Такое превращение ядер называется распадом. Оно характерно для ядер, содержащих избыток или недостаток нейтронов относительно фактора $N_{уст}/Z_{уст}$. Так как в процессе распада высвобождается энергия, то он протекает самопроизвольно. На диаграмме видно как резко уменьшается энергия связи при поступательном движении от устойчивого соотношения $N_{уст}/Z_{уст}$ для данного изобара.



Нуклиды в ядре

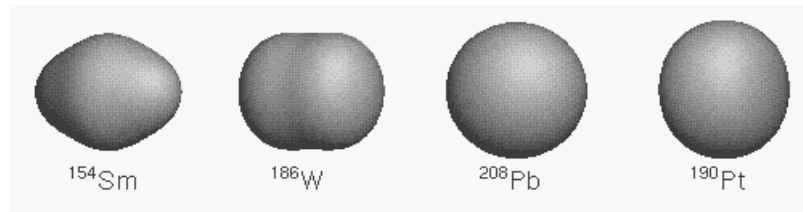
В мире нуклидов существует еще одна закономерность – наиболее устойчивы ядра с четным числом протонов и нейтронов. Действительно, единственным стабильным нуклидом, содержащим нечетное количество протонов и нейтронов является дейтерий (^2H). Поэтому нуклиды принято изображать на диаграмме Z/N :



Черными точками показаны стабильные ядра. Область расположения стабильных ядер обычно называют долиной стабильности. С левой стороны от стабильных ядер находятся ядра, перегруженные протонами (протоноизбыточные ядра), справа – ядра, перегруженные нейтронами (нейтроноизбыточные ядра). Более темным цветом выделены атомные ядра, обнаруженные в настоящее время. Протоноизбыточные ядра являются

радиоактивными и превращаются в стабильные в основном в результате β^+ -распадов; протон, входящий в состав ядра при этом превращается в нейтрон. Нейтроноизбыточные ядра также являются радиоактивными и превращаются в стабильные в результате β^- -распадов, с превращением нейтрона ядра в протон. Все изотопы, изображенные на диаграмме, в той или иной степени устойчивы – суммарное взаимодействие в ядре удерживает нуклоны с связанным состоянием. Сплошная линия очерчивает область возможного существования атомных ядер. Линия $B_p = 0$ (B_p - энергия отделения протона) ограничивает область существования атомных ядер слева (proton drip-line). Линия $B_n = 0$ (B_n - энергия отделения нейтрона) - справа (neutron drip-line). Вне этих границ атомные ядра существовать не могут, так как силы взаимодействия не могут удерживать нуклоны в ядре, и ядро распадается за характерное ядерное время 10^{-23} с на протоны и нейтроны.

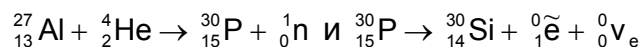
Цифрами на диаграмме отмечены значения чисел нейтронов и протонов, характеризующие наиболее устойчивые ядра. Такие числа называются магическими. Существование определенных «магических» участков повышенной устойчивости ядер свидетельствует о том, что ядро имеет сложную внутреннюю структуру. Подобно электронам в атоме, нуклоны в ядре заполняют в определенной последовательности оболочки. Числа 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126 являются магическими и определяют замкнутые оболочки в ядрах. Нуклиды, содержащие магические числа протонов и нейтронов, наиболее стабильны относительно радиоактивного распада. Для них характерна симметричная форма ядра ($^{208}_{82}\text{Pb}$):



Самыми тяжелыми стабильными нуклидами из известных в природе являются $^{208}_{82}\text{Pb}$ и $^{209}_{83}\text{Bi}$, содержащие магическое число нейтронов 126. Свинец-208 является ко всему прочему еще и дважды магическим, так как содержит 82 протона. Все изотопы элементов, расположенных в периодической системе за висмутом, нестабильны и распадаются с образованием стабильных ядер.

Ядерные реакции и типы ядерных распадов

Реакции превращений с участием атомных ядер записываются аналогично с химическими реакциями. Вместо символов элементов пишутся символы нуклидов и элементарных частиц, участвующих в реакции, с указанными зарядами ядер и массовыми числами, например:

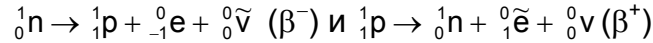


Реакции с участием атомных ядер подчиняются закону сохранения электрического заряда и правилу сохранения массовых чисел, т.е. сумма зарядов и массовых чисел исходных частиц и нуклонов равна сумме зарядов и массовых чисел продуктов реакции.

Среди частиц, участвующих во взаимодействии с ядрами, следует выделить пару фундаментальных частиц – электрон (${}_{-1}^0\text{e}$) и нейтрино (${}^0_0\nu$), а также антиэлектрон – позитрон (${}^0_1\tilde{\text{e}}$) и антинейтрино (${}^0_0\tilde{\nu}$). Эти частицы рождаются в результате β -распада атомных ядер.

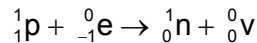
Бета-распад (β)

Термином «бета-распад» обозначают три типа ядерных превращений: электронный (β^-) и позитронный (β^+) распады, а также электронный захват (К-захват). Первые два типа превращений состоят в том, что ядро испускает электрон (позитрон) и электронное антинейтрино (электронное нейтрино). Эти процессы происходят при превращении одного вида нуклона в ядре в другой: нейтрона в протон или протона в нейтрон – по схеме:



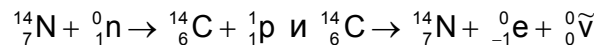
Свободный нейтрон распадается по той же схеме с периодом полураспада 898 с. Для распада протона требуется дополнительная энергия, которая имеется в ядре атома.

В случае К-захвата превращение протона в нейтрон идет по схеме:



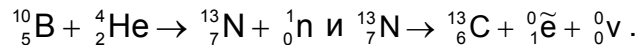
и заключается в том, что в реакции принимает участие один из электронов на ближайшем к ядру К-слое атома. Особенностью этого типа бета-захвата является то, что из ядра вылетает только одна частица (нейтрино, нейтрон остается в ядре!).

Бета-распад испытывают ядра, находящиеся за пределами области стабильности, т.е. обладающие избытком протонов (β^+) или нейтронов (β^-). Например, β^- -радиоактивным является изотоп углерода ${}_{6}^{14}\text{C}$, который образуется в атмосфере под действием нейтронов (космическое излучение):



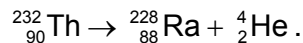
Стабильными изотопами углерода являются ${}_{6}^{13}\text{C}$ и ${}_{6}^{12}\text{C}$.

β^+ -радиоактивным является изотоп ${}_{7}^{13}\text{N}$, образующийся в одной из ядерных реакций, протекающих на солнце:



Альфа-распад (α)

Альфа-распад состоит в испускании ядрами атомов некоторых химических элементов α -частиц – ядер ${}_{2}^4\text{He}$. Альфа-распад является свойством тяжелых ядер с массовыми числами больше 200 и зарядовыми больше 82. Внутри этих ядер происходит образование обособленных α -частиц, состоящих каждая из двух протонов и двух нейтронов. Этому способствует насыщение ядерных сил. Образовавшаяся α -частица подвержена большому действию кулоновских сил отталкивания от протонов ядра, и одновременно испытывает меньшее ядерное притяжение к нуклонам в ядре.



Спонтанное деление (SF)

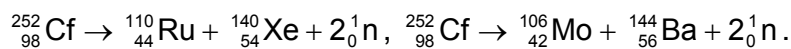
В 1939 году Отто Ган и Фриц Штрассман сделали эпохальное открытие деления урана под действием нейтронов. Как известно, практическое его использование привело ко всему хорошему и плохому, из-за чего наш век называется атомным.

Гипотеза о делении урана нейтронами была предложена О. Фришом и Л. Майтнер. Согласно предположению ученых, реакция деления должна обладать следующими свойствами:

- 1) Очень большое энерговыделение. Это следует из различия энергии связи нуклона в ядрах урана и осколков деления.
- 2) Осколки деления должны быть β -радиоактивными и могут испускать нейтроны. Это следует из различия в отношении числа нейтронов и протонов для урана и осколков: $(N/Z)_U = 1,6$ и $(N/Z)_{оск} = 1,45$.
- 3) Кроме вынужденного деления (в.д.) под действием нейтронов, которые вносят в ядро энергию возбуждения, уран и некоторые другие ядра могут испытывать самопроизвольное (с.д.) деление.

Очень скоро все эти особенности реакции деления были доказаны экспериментально в работах О. Гана, Ф. Штрассмана, Х. Халбана, Р. Робертса и др., а сама гипотеза обоснована теоретически в работах Я.И. Френкеля, Н. Бора и Дж. Уиллера.

Спонтанное деление было открыто в 1940 году К. Петржеракон и Г. Флеровом. Оно присуще тяжелым нуклидам, например, $^{252}_{98}\text{Cf}$, в результате спонтанного деления которого образуются атомы середины периодической системы элементов:



В результате спонтанного деления любого атома образуются атомы с меньшими массовыми числами.

Распад нестабильных ядер

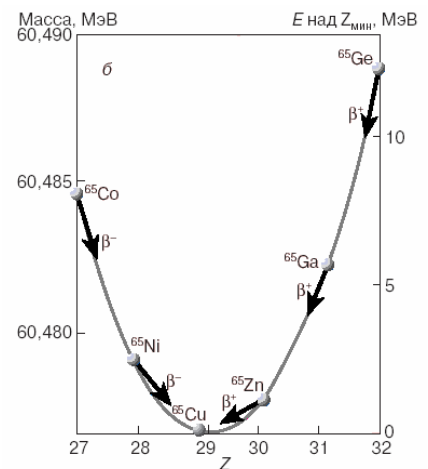
При рассмотрении вопроса об энергиях связей в ядрах было установлено, что устойчивость ядра по отношению к радиоактивному распаду зависит от энергии связи нуклонов в ядре: ядро оказывается энергетически устойчивым по отношению к определенному виду распада, если его масса меньше суммы масс продуктов, образующихся при ядерном превращении. При этом учитывается тот факт, что ядро – это сложная система, состоящая из нуклонов, которые расположены в определенном порядке, образуя замкнутые оболочки.

Разность массы радиоактивного атома и суммы масс продуктов распада, эквивалентна энергетическому эффекту реакции Q:

$$Q = [\sum M_{исх} - \sum M_{прод}]c^2, *$$

Если $Q < 0$, то реакция идет с поглощением энергии и называется эндотермической; если $Q > 0$, то реакция идет с выделением энергии и называется экзотермической. Все реакции распада ядер являются экзотермическими.

При рассмотрении любой энергетической неустойчивой системы необходимо учитывать также скорости протекания различных процессов, так как термодинамически неустойчивая система во многих случаях может рассматриваться как вполне стабильная. Значения энергетического эффекта реакции указывает лишь на возможные ее продукты. Скорость реакции характеризуется константой распада λ , она зависит от кванто-механических характеристик ядра, например, проницаемости потенциального барьера ядра.



* следует помнить, что 1 а.е.м = 931,5 МэВ

Кинетика радиоактивного распада

Реакции распада атомных ядер являются реакциями первого порядка, т.е. количество радиоактивных ядер N изменяется со временем по закону радиоактивного распада (экспоненциально):

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_t и N_0 – число ядер в моменты времени $T = t$ и $T = 0$ соответственно, а λ – константа распада, имеющая смысл вероятности распада в единицу времени:

$$-\frac{dN}{N} \cdot \frac{1}{dt} = \lambda,$$

где знак минус указывает на то, что количество радиоактивных ядер N уменьшается во времени. Произведение константы распада на количество радиоактивных ядер в данный момент времени равно скорости распада (a):

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N,$$

Скорость распада называется активностью. Активность радиоактивного вещества изменяется со временем так же как и количество радиоактивного вещества:

$$a_t = a_0 e^{-\lambda t}.$$

На графике изображено изменения массы радиоактивного ${}^{242}_{95}\text{Am}$. Видно, что за некоторое время ($T_{1/2} = 16,02$ ч) масса ${}^{242}_{95}\text{Am}$ уменьшается ровно на половину. Это время называется периодом полураспада. На основе закона радиоактивного распада, найдем соотношение периода полураспада с константой распада:

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

период полураспада – это время, за которое количество (масса, активность) уменьшается ровно на половину, тогда:

$$\ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \approx \frac{0,693}{T_{1/2}},$$

Помимо периода полураспада, существует еще одна величина – τ , характеризующая среднее время жизни радиоактивного нуклида:

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx 1,44 T_{1/2}.$$

Зная значения периода полураспада, среднего времени жизни или константы распада можно судить об устойчивости ядра относительно распада. Устойчивыми можно назвать те радионуклиды, которые распространены в природе. Такие нуклиды сохранились со времени образования нашей планеты и их периоды полураспада больше $1,5 \cdot 10^{16}$ с. Нуклиды, отвечающие этому требованию, являются естественно радиоактивными, к ним относятся ${}^{40}\text{K}$, ${}^{87}\text{Rb}$, ${}^{115}\text{In}$, ${}^{138}\text{La}$, ${}^{147}\text{Sm}$, ${}^{175}\text{Lu}$, ${}^{187}\text{Re}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$ и некоторые др. Прочие нуклиды, полученные в ядерных реакциях, являются искусственно радиоактивными.

