

Лекция 23. Структура атомного ядра.

Характеристики ядра: заряд, масса, энергия связи, спин и магнитный момент. Свойства и обменный характер ядерных сил. Деление тяжелых ядер и цепные реакции. Термоядерный синтез.

Атомное ядро.

В 1911 году Резерфорд на основании результатов своих опытов по рассеянию заряженных α -частиц установил, что атом состоит из тяжёлого положительного заряженного ядра, окружённого отрицательно заряженными электронами. Размер ядра много меньше размера атома. Именно с этого момента и ведёт начало ядерная физика, изучающая строение и свойства атомных ядер.

Атомное ядро - центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса (~99,9%). Средние размеры ядер различных атомов имеют порядок фемтометра ($1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$), что в более чем в 100 тысяч раз меньше средних размеров самого атома ($\sim 10^{-10} \text{ м} = 1 \text{ \AA}$ (ангстрем)).

По современной модели, предложенной в 1932 году Д.Д.Иваненко и В.Гейзенбергом, атомное ядро состоит двух видов элементарных частиц - положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, которые принято называть *нуклонами*. Нуклоны в ядре связаны между собой при помощи *сильного взаимодействия*.

Количество протонов в ядре называется его *зарядовым числом Z* - это число равно порядковому номеру соответствующего химического элемента в таблице Менделеева. Количество электронов в неионизированном атоме равно зарядовому числу, в этом смысле количество протонов в ядре полностью определяет структуру электронной оболочки нейтрального атома и химические свойства соответствующего элемента.

Количество нейтронов в ядре называется его *изотопическим числом N*. Ядра с одинаковым числом протонов и разным числом нейтронов называются *изотопами*. Ядра с одинаковым числом нейтронов, но разным числом протонов называются *изотонами*. Термины изотоп и изотон используются также применительно к атомам, содержащим указанные ядра, а также для характеристики нехимических разновидностей одного химического элемента. Полное количество нуклонов в ядре называется его *массовым числом A* ($A=N+Z$), приблизительно равным средней массе атома, указанной в таблице Менделеева. Ядро химического элемента *X* условно обозначается ${}_Z^A X$ или ${}_Z X^A$.

Некоторые ядра имеют собственные названия. Например, ядро атома гелия ${}_2\text{He}^4$ называется α - частицей, ядро дейтерия ${}_1\text{H}^2$ (или D) - *дейтроном*, а ядро трития ${}_1\text{H}^3$ (или T) - *тритоном*. Последние два ядра являются изотопами водорода и поэтому могут входить в состав молекул воды, давая в итоге так называемую *тяжёлую воду*.

Атомное ядро можно приближённо считать шаром радиуса $R \approx 1,23 \cdot A^{\frac{1}{3}}$ фм (для $A > 20$). Масса ядер в тысячи раз больше массы входящих в атом электронов и зависит от количества входящих в него частиц и энергии их связи. Плотность ядерного вещества $\sim 10^{17} \text{ кг/м}^3$ и примерно одинаково для всех атомов.

В настоящее время обнаружено примерно 3500 атомных ядер, представляющих собой различные сочетания протонов и нейтронов. Примерно 20% из них стабильны, остальные нестабильные и подвержены радиоактивному распаду.

В природе на данный момент не встречаются естественные ядра с $Z > 92$, т.к. они из-за своей радиоактивности полностью распались к настоящему времени. Некоторые ядра, в частности, трансурановых элементов, были получены искусственным путём.

Атомное ядро, рассматриваемое как класс частиц с определённым числом протонов и нейтронов, принято называть *нуклидом*. Нуклиды с одинаковым массовым числом, но разным протонно-нейтронным составом принято называть *изобарами*.

Протон (др. греч. πρῶτος - первый, основной) - элементарная частица – ядро атома водорода. Относится к барионам, имеет спин 1/2 (фермион), электрический заряд $+e$. Стабилен -

нижнее ограничение на время жизни $\sim 2,9 \cdot 10^{29}$ лет независимо от канала распада, $\sim 1,6 \cdot 10^{33}$ лет для распада в позитрон и нейтральный пион.

Масса протона, выраженная в разных единицах, составляет $m_p \approx 938,272$ МэВ; $m_p \approx 1,007$ а.е.м. (атомной единицы массы); $m_p \approx 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг; $m_p \approx 1836,153$ массы электрона.

Протон является ядром атома водорода (точнее, его лёгкого изотопа - протия). В физике протон обозначается буквой p (или p^+). Химическое обозначение протона (рассматриваемого в качестве положительного иона водорода) - H^+ , астрофизическое — H^+ .

Измерения среднего радиуса протона с помощью атомов обычного водорода, проводимые разными методами с 1960-х годов, привели к результату $R \approx 0,87$ фм.

Нейтрон - элементарная частица, не имеющая электрического заряда. Нейтрон является фермионом ($s = \frac{1}{2}$) и принадлежит к классу барионов.

Открытие нейтрона принадлежит Дж. Чедвику (1932), за которое он получил Нобелевскую премию по физике в 1935 году.

Масса протона $m_n \approx 939,565$ МэВ, $m_n \approx 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг, $m_n \approx 1,009$ а. е. м., что примерно на 0,14 % больше, чем масса протона.

Нейтрон распадается в свободном состоянии. Единственным каналом распада, разрешённым законом сохранения энергии и законами сохранения электрического заряда, барионного и лептонного квантовых чисел, является бета-распад нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино (а также, возможно, гамма-квант). Время жизни в свободном состоянии $885,7 \pm 0,8$ секунды, период полураспада — 614 секунд.

Разница масс между протоном и нейтроном около 1,3 МэВ - невелика по меркам ядерной физики. В результате, в ядрах нейтрон может находиться в более глубокой потенциальной яме, чем протон, и потому бета-распад нейтрона оказывается энергетически невыгодным. Это приводит к тому, что в ядрах нейтрон может быть стабильным. Более того, в нейтронно-дефицитных ядрах происходит распад протона в нейтрон (с захватом орбитального электрона или вылетом позитрона).

Несмотря на нулевой электрический заряд, нейтрон не является истинно нейтральной частицей. Магнитный момент нейтрона $\mu \approx 1,913$ ядерного магнетона.

Спин ядра.

Поскольку нуклоны обладают собственным механическим моментом, или спином, равным $\frac{\hbar}{2}$, то и ядра имеют механические моменты. Кроме того, нуклоны участвуют в ядре в орбитальном движении, которое также характеризуется определённым моментом количества движения каждого нуклона. Орбитальные моменты принимают только целочисленные значения \hbar . Все механические моменты нуклонов, как спиновые, так и орбитальные, суммируются алгебраически и составляют спин ядра.

Несмотря на то, что число нуклонов в ядре может быть очень велико, спины ядер обычно невелики и составляют не более нескольких \hbar , что объясняется особенностью взаимодействия нуклонов. Все парные протоны и нейтроны взаимодействуют только так, что их спины взаимно компенсируются, то есть пары всегда взаимодействуют с антипараллельными спинами. Суммарный орбитальный момент пары также всегда равен нулю. В результате ядра, состоящие из чётного числа протонов и чётного числа нейтронов, *не имеют механического момента*. Отличные от нуля спины существуют только у ядер, имеющих в своём составе непарные нуклоны, спин такого нуклона суммируется с его же орбитальным моментом и имеет какое-либо полуцелое значение: $1/2, 3/2, 5/2$. Ядра нечётно-нечётного состава имеют целочисленные спины: 1, 2, 3 и т.д.

Магнитный момент

Измерения спинов стали возможными благодаря наличию непосредственно связанных с ними магнитных моментов. Они измеряются в ядерных магнетонах $\mu_p = \frac{e\hbar}{2m_p} \approx 5.051 \cdot 10^{-27}$

Дж/Тл и для различных ядер равны от -2 до $+5$ ядерных магнетонов. Из-за относительно большой массы нуклонов магнитные моменты ядер очень малы по сравнению с магнитными моментами электронов.

Магнитный момент чётно-чётных пар, как и спин, равен нулю. Магнитные моменты ядер с непарными нуклонами образуются собственными моментами этих нуклонов и моментом, связанным с орбитальным движением непарного протона.

Взаимодействие магнитных моментов электронов и ядра приводит к расщеплению спектральных линий излучения атома $\Delta\lambda \sim 10^{-12}$ м, что называется *сверхтонкой структурой излучения атома*.

Как и любая квантовая система, ядра могут находиться в метастабильном возбуждённом состоянии, причём в отдельных случаях время жизни такого состояния исчисляется годами. Такие возбуждённые состояния ядер называются *ядерными изомерами*.

Энергия связи.

Экспериментально было обнаружено, что для всех стабильных ядер масса ядра меньше суммы масс составляющих его нуклонов, взятых по отдельности. Эта разница называется *дефектом массы* или избытком массы и определяется соотношением:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}$$

где m_p и m_n - массы свободного протона и нейтрона, $m_{\text{я}}$ - масса ядра.

Согласно принципу эквивалентности массы и энергии дефект массы представляет собой массу, эквивалентную работе, затраченной ядерными силами, чтобы собрать все нуклоны вместе при образовании ядра. Эта величина равна изменению потенциальной энергии нуклонов в результате их объединения в ядро. Энергия, эквивалентная дефекту массы, называется *энергией связи* ядра и равна:

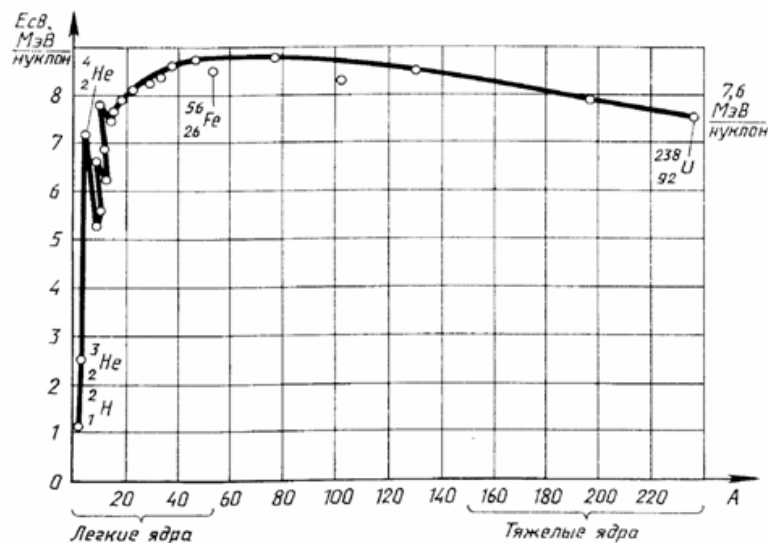
$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}] \cdot c^2$$

где c - скорость света в вакууме.

Другим важным параметром ядра является *удельная энергия связи* - энергия, приходящаяся на один нуклон ядра, равная отношению энергии связи ядра и числа содержащихся в нём нуклонов:

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

Эта величина равна среднему значению энергии, которую нужно затратить, чтобы удалить один нуклон из ядра, или среднему изменению энергии связи ядра при поглощении свободного протона или нейтрона.



Как видно из рисунка, при малых значениях массовых чисел удельная энергия связи ядер резко возрастает и достигает максимума при $A \approx 50 \div 60$ (примерно 8,8 МэВ). Нуклиды с такими

массовыми числами наиболее устойчивы. С дальнейшим ростом A средняя энергия связи немного уменьшается. Так для ядра урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ удельная энергия связи примерно равна 7,5 МэВ/нуклон.

Такой характер поведения средней энергии связи указывает на свойство ядерных сил достигать *насыщения*, то есть на возможность взаимодействия нуклона только с малым числом «партнёров». Если бы ядерные силы не обладали свойством насыщения, то в пределах радиуса действия ядерных сил каждый нуклон взаимодействовал бы с каждым из остальных нуклонов. Тогда энергия взаимодействия была бы пропорциональна $A \cdot (A-1)$, а средняя энергия связи одного нуклона не была бы постоянной у разных ядер, а возрастала бы с ростом A .

Энергия связи нуклонов в ядре в миллионы раз больше энергии связи электронов в атомах. Таким образом, в ядре запасена огромная ядерная энергия, в миллионы раз превышающая энергию, выделяющуюся в химических реакциях.

Из факта убывания средней энергии связи для нуклидов с массовыми числами больше или меньше 50-60 следует, что для ядер с малыми A энергетически выгоден процесс слияния - *термоядерный синтез*, приводящий к увеличению массового числа, а для ядер с большими A - *процесс деления*. Так деление одного ядра с массовым числом $A=240$ на два одинаковых осколка привело бы к выделению энергии 240 МэВ, а слияние двух ядер дейтерия в одно ядро гелия высвободило бы энергию в 24 МэВ. Для примера – сгорание углерода – химическая реакция $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ сопровождается выделением энергии 5 эВ.

Ядерные силы.

Большая энергия связи нуклонов, входящих в ядро, говорит о существовании *ядерных сил*, поскольку гравитационные силы между нуклонами слишком малы, чтобы преодолеть взаимное электростатическое отталкивание протонов в ядре. Ядерное взаимодействие является самым интенсивным, значительно превосходящим интенсивность электромагнитных сил.

Ядерные силы являются *короткодействующими*. Характерный масштаб действия этих сил составляет $\sim 1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$. На больших расстояниях ядерные силы практически не действуют, а на очень малых притяжение сменяется на отталкивание.

Т.к. в ядре удерживаются вместе заряженные протоны и нейтральные нейтроны, то ядерные силы не зависят от заряда нуклонов - как говорят, обладают *зарядовой независимостью*.

Ядерные силы не являются центральными силами. Они, например, зависят не только от расстояния между нуклонами, но и от ориентации их спинов.

Ядерные силы обладают свойством насыщения – т.е. взаимодействие осуществляется только между соседними нуклонами.

По современным представлениям связь нуклонов осуществляется силами, которые возникают вследствие непрерывного обмена частицами, называемыми *пи-мезонами*, между нуклонами в ядре. (Как говорят, ядерные силы имеют *обменный характер*). Такой обмен приводит к появлению сил взаимодействия между нуклонами, постоянно испускающими и поглощающими пи-мезоны. С классической точки зрения такой процесс невозможен, т.к. он вступает в противоречие с законом сохранения энергии. Однако в квантовой механике, как показывает соотношение неопределённости для энергии и времени, энергия системы частиц в течение некоторого промежутка времени τ может иметь неопределённость $\Delta E \cdot \tau = \hbar$. Предположим, что эта неопределённость энергии равна энергии покоя появившейся частицы $\Delta E = mc^2$. Тогда, если время существования частицы меньше времени $\tau = \frac{\hbar}{mc^2}$, то эту частицу обнаружить нельзя. Такие частицы принято называть *виртуальными*.

Замечание. Виртуальную частицу можно обнаружить, если сообщить системе энергию, превосходящую энергию покоя этой частицы.

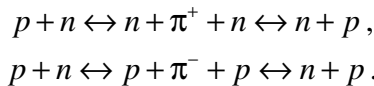
За время своего существования виртуальная частица должна быть испущена одним нуклоном и поглощена другим. Т.е. она должна преодолеть среднее расстояние между нуклонами.

Зная характерный масштаб L действия сил можно оценить массу покоя виртуальной частицы.

Если принять, что $L \sim c\tau = \frac{\hbar}{mc}$, то $m \sim \frac{\hbar}{Lc}$.

Оказалось, что массы пи-мезонов (или, по-другому, пионов) вполне согласуются с проведёнными выкладками. На сегодняшний день известны три вида пи-мезонов (или, как говоря, три зарядовых состояния): положительно и отрицательно заряженные π^+ и π^- с массами покоя 273 масс электронов и электрически нейтральный π^0 с массой покоя 264 массы электрона.

В свободном состоянии пи-мезоны нестабильны и распадаются. Обменный характер ядерных сил осуществляется по следующей схеме



Если нуклону сообщить дополнительную энергию, не меньшую энергии покоя пи-мезона, то виртуальный пи-мезон может превратиться в реальный, который можно обнаружить экспериментально.

Замечание. Существование магнитного момента у нейтрона можно объяснить тем, что нейтрон часть времени проводит в виртуальном состоянии $n \leftrightarrow p + \pi^-$. Орбитальное движение отрицательного пи-мезона и обуславливает наличие магнитного момента.

Модели атомного ядра

При построении моделей атомного ядра возникает ряд проблем, связанных с недостаточностью знаний о силах между нуклонами и сложностью решения квантовой задачи многих тел. Поэтому при построении конкретных моделей выделяется интересующий круг явлений и свойств.

Капельная модель ядра - одна из самых ранних моделей строения атомного ядра. Предложена Нильсом Бором в 1936 году в рамках теории составного ядра, затем развита Яковом Френкелем и, в дальнейшем, Джоном Уиллером. На основании этой модели Карл Вайцзеккер впервые получил полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра атома, названную в его честь *формулой Вайцзеккера*.

Согласно этой теории, атомное ядро можно представить в виде сферической равномерно заряженной капли из особой ядерной материи, которая обладает некоторыми свойствами, например несжимаемостью, насыщением ядерных сил, «испарением» нуклонов, чем напоминает жидкость. Поэтому на такое ядро-каплю можно распространить некоторые другие свойства капли жидкости, например поверхностное натяжение, дробление капли на более мелкие или слияние мелких капель в одну большую, что позволило смоделировать процессы деления и синтеза ядер.

Оболочечная модель ядра - модель, объясняющая структуру атомного ядра по аналогии с теорией оболочечного строения атома.

Согласно этой модели, каждый нуклон находится в ядре в определённом индивидуальном квантовом состоянии, характеризуемом энергией, моментом вращения и орбитальным моментом вращения. Всякий раз, когда количество нуклонов достигает числа, отвечающего за заполнению очередной оболочки (такие числа называются *магическими*), возникает возможность скачкообразного изменения некоторых характеризующих ядро величин (в частности, энергии связи). Это создаёт подобие периодичности в свойствах ядер в зависимости от A и Z , аналогичной периодическому закону для атомов. В обоих случаях физической причиной периодичности является принцип Паули, запрещающий двум тождественным фермионам находиться в одном и том же состоянии. Однако оболочечная структура у ядер проявляется значительно слабее, чем в атомах. Происходит это главным образом потому, что в ядрах индивидуальные квантовые состояния частиц («орбиты») возмущаются взаимодействием («столкновениями») их друг с другом гораздо сильнее, чем в атомах.

При увеличении количества нуклонов в ядре существуют определённые числа, при которых энергия связи следующего нуклона намного меньше, чем последнего. Особой устойчиво-

стью отличаются атомные ядра, содержащие протоны в количествах, равных *магическим числам* 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, 164 и нейтроны в количествах 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184, 196, 228, 272, 318.

Т.к. оболочки существуют отдельно для протонов и нейтронов, то можно говорить о «магическом ядре», в котором количество нуклонов одного типа является магическим числом, или о «дважды магическом ядре», в котором магическими числами являются количества нуклонов обоих типов.

Магические ядра являются наиболее устойчивыми. Это объясняется в рамках оболочечной модели тем, что протонные и нейтронные оболочки в таких ядрах полностью заполнены (по аналогии с электронными оболочками у атомов благородных газов).

Числа, которые являются магическими и для протонов и для нейтронов называют *дважды магическими*: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. «Дважды магические» ядра — наиболее устойчивые изотопы. Таких ядер на сегодняшний день известно пять.

Ядро	${}^4_2\text{He}$	${}^{16}_8\text{O}$	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	${}^{48}_{20}\text{Ca}$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
Z	2	8	20	20	82
N	2	8	20	28	126

Примером особой устойчивости дважды магического ядра является тот факт, что например, ядро атома гелия (α -частица) – единственная составная частица, испускаемая тяжёлыми ядрами при α -распаде.

Наличие магических чисел позволяет прогнозировать существование так называемых «островов стабильности» - значений массовых и зарядовых чисел, при которых ядра трансурановых элементов, получаемые искусственно, будут относительно стабильными.

Ядерные реакции.

Ядерная реакция – это процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарными частицами или другими ядрами, приводящий к преобразованию ядра. Взаимодействия частиц с ядром возможно при их сближении на расстояния порядка 10^{-15} м.

Реакции, вызываемые не очень быстрыми частицами (с энергией не более 10 МэВ), протекают в два этапа. На первом этапе ядро X захватывает приблизившуюся частицу a и образует новое составное ядро Π . На втором этапе составное ядро испускает частицу b и превращается в ядро Y



Распад составного ядра Π не зависит от этапа захвата.

Если начальная и конечная частицы одинаковые $a \equiv b$, то данная реакция называется (потенциальным) *рассеянием* частицы на ядре.

Реакции, вызванные быстрыми частицами протекают без образования промежуточного ядра и называются *прямым ядерным взаимодействием*.

Характерное время ядерной реакции – отношение диаметра ядра к скорости света

$$\tau_{\text{я}} = \frac{d_{\text{я}}}{c} \sim 10^{-22} \div 10^{-23} \text{ с.}$$

При ядерных реакциях выполняются все законы сохранения классической физики. Эти законы накладывают ограничения на возможность осуществления ядерной реакции. Даже энергетически выгодный процесс всегда оказывается невозможным, если сопровождается нарушением какого-либо закона сохранения.

Переход в невозбуждённое состояние может осуществляться различными путями, называемыми *каналами реакции*. Типы и квантовое состояние налетающих частиц и ядер до начала реакции определяют *входной канал* реакции. После завершения реакции совокупность образовавшихся продуктов реакции и их квантовых состояний определяет *выходной канал* реакции. Реакция полностью характеризуется входным и выходным каналами.

Вероятность реакции определяется так называемым *ядерным сечением реакции*. В лабораторной системе отсчёта (где ядро-мишень покоится) вероятность взаимодействия в единицу времени равна произведению сечения (выраженного в единицах площади) на поток падающих

частиц (выраженный в количестве частиц, пересекающих за единицу времени единичную площадку). Если для одного входного канала могут осуществляться несколько выходных каналов, то отношения вероятностей выходных каналов реакции равно отношению их сечений. В ядерной физике сечения реакций обычно выражаются в специальных единицах – *барнах*.

$$1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2.$$

Деление ядер

Деление ядра - процесс расщепления атомного ядра на два (реже три) ядра, 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 - экзотермический 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.

Деление атомных ядер было открыто при бомбардировке нейтронами ядер урана. Процесс деления ядер был открыт в 1939 году Отто Ханом и Фрицем Штрассманом.

Процесс деления может протекать только в том случае, когда потенциальная энергия начального состояния делящегося ядра превышает сумму масс осколков деления. Поскольку удельная энергии связи тяжёлых ядер уменьшается с увеличением их массы, это условие выполняется почти для всех ядер с массовым числом $A > 90$.

Однако, как показывает опыт, даже самые тяжёлые ядра делятся самопроизвольно с очень малой вероятностью. Это означает, что существует энергетический барьер (барьер деления), препятствующий делению.

Для реализации процесса деления с большой вероятностью ядро должно получить извне энергию, превышающую значение барьера деления. Такую энергию можно передать ядру различными способами (облучение гамма-квантами, бомбардировка частицами и др.). Из всех возможных способов практическое применение нашёл лишь один - образование возбуждённого составного ядра путём присоединения к исходному ядру нейтрона, вклад других способов деления в ядерных реакторах (в том числе фотоделение гамма-квантами) составляет меньше 1%.

Деление нейтронами имеет огромное преимущество по сравнению с другими по двум причинам:

- пороговое значение кинетической энергии для нейтрона меньше, чем для гамма-кванта, приблизительно на величину энергии связи нейтрона в составном ядре;
- деление ядер нейтронами сопровождается испусканием нейтронов, что создаёт основу для протекания цепной реакции деления.

Если минимальное значение энергии составного ядра больше энергии связи нейтрона в этом ядре, то деление ядер возможно нейтронами с любой сколь угодно малой кинетической энергией. К этой группе относятся ядра с нечётным числом нейтронов (присоединяемый нейтрон - чётный): ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , которые принято называть *делящимися*.

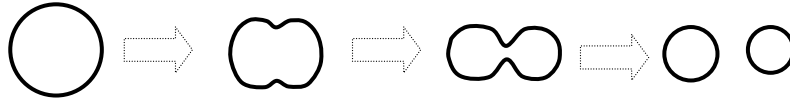
Если минимальное значение энергии составного ядра меньше энергии связи нейтрона в этом ядре, то деление ядер возможно лишь нейтронами с кинетической энергией, превышающей некое пороговое значение. К этой группе относятся ядра с чётным числом нейтронов (присоединяемый нейтрон - нечётный): Th^{232} , U^{238} . Значение пороговых энергий примерно равны 1,2 МэВ для ^{232}Th и 1 МэВ для ^{238}U .

Для описания процесса деления ядер, включая вычисление барьера деления, используется несколько моделей, но ни одна из них не позволяет объяснить процесс полностью.

Традиционно механизм деления рассматривается в рамках капельной модели ядра. Для деления с большой вероятностью тяжёлое ядро должно получить энергию извне, превышающую значение барьера деления. Так, после присоединения нейтрона ядро обладает энергией возбуждения, равной сумме энергии отделения нейтрона и кинетической энергии захваченного

нейтрона. Этой дополнительной энергии может быть достаточно, чтобы ядро перешло в возбуждённое состояние с интенсивными колебаниями.

При делении ядра процесс происходит аналогично делению капли жидкости, только при делении ядра существует электростатическое отталкивание протонов, действующее как дополнительный фактор против ядерных сил, удерживающих нуклоны в ядре. Если ядро находится в



возбуждённом состоянии, то оно совершает колебательные движения, связанные с отклонениями его формы от сферической. Максимальная деформация увеличивается с ростом энергии возбуждения и при некотором её значении может превысить критическое значение, что приведёт к разрыву исходной капли и образованию двух новых. Колебательные движения возможны под действием сил поверхностного натяжения (аналог ядерных сил в капельной модели ядра) и кулоновских. Ядра, образовавшиеся после деления исходного ядра, разлетаются в противоположные стороны под действием кулоновских сил отталкивания, и потенциальная энергия кулоновского взаимодействия превращается в кинетическую.

Часть энергии деления переходит в энергию возбуждения осколков деления, которые ведут себя как любые возбуждённые ядра - либо переходят в основные состояния, излучая γ -кванты, либо испускают нуклоны и превращаются в новые ядра.

Чаще всего испускаемым нуклоном является нейтрон, так как ему не нужно преодолевать кулоновский барьер при вылете из ядра, а для осколков деления это ещё вероятнее, так как они перегружены нейтронами, что приводит к понижению энергии связи последних. В результате практически мгновенно после деления составного ядра осколки деления испускают два или три нейтрона, которые принято называть *мгновенными*.

Образовавшиеся ядра по-прежнему находятся в возбуждённых состояниях, однако в каждом из них энергия возбуждения меньше энергии связи нейтрона, поэтому остатки энергии возбуждения излучаются в виде γ -квантов спустя 10^{-14} – 10^{-9} секунды с момента испускания нейтронов, такие γ -кванты также называются *мгновенными*.

В дальнейшем движение осколков деления не связано с их превращениями. Так как они увлекают за собой не все электроны исходного атома, то из них образуются многозарядные ионы, кинетическая энергия которых тратится на ионизацию и возбуждение атомов среды, что вызывает их торможение. В результате ионы превращаются в нейтральные атомы с ядрами в основных энергетических состояниях. Такие атомы называются *продуктами деления*.

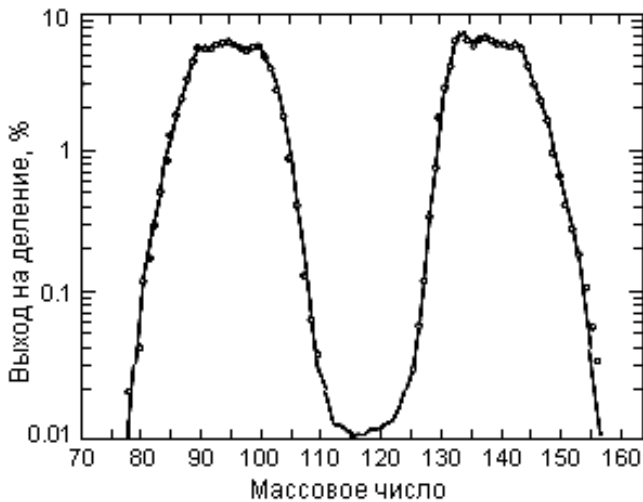
В результате β^- -распадов могут образовываться ядра в возбуждённых состояниях, которые переходят в основные состояния путём излучения γ -квантов либо, крайне редко, превращаются в другие ядра путём испускания нейтронов. Такие нейтроны называются *запаздывающими*.

При делении тяжёлого ядра выделяется примерно 200 МэВ и более 80% этой энергии составляет кинетическая энергия осколков деления. Остальная часть распределяется между нейтронами, γ -квантами, электронами и антинейтрино. При этом соотношение между отдельными составляющими энергии деления слабо зависит от делящегося ядра и от энергии нейтрона, вызывающего процесс деления. Около 5% всей энергии деления уносится с антинейтрино и не может быть использовано.

Энергия осколков деления, мгновенных γ -квантов и нейтронов превращается в тепло практически мгновенно. Энергия β^- -распада, составляющая примерно 7% всей энергии деления, выделяется постепенно в течение длительного времени, так как β^- -распады происходят значительно позже момента деления ядра. Это запаздывание приводит к так называемому остаточному энерговыделению в остановленном ядерном реакторе, которое (в случае его работы на большой мощности) после остановки настолько велико, что необходимо принимать меры для охлаждения реактора. Отработавшее в реакторе ядерное топливо обладает настолько большой

радиоактивностью и, соответственно, остаточным энерговыделением, что требует длительной (по нескольку лет) выдержки в специальных бассейнах с охлаждением.

При делении ^{235}U тепловыми нейтронами образуется около 30 различных пар осколков, преимущественно неравной массы. Самый лёгкий из них имеет массовое число 72, самый тяжёлый - 161. Наиболее вероятно деление на осколки с отношением масс 3/2. Кривые выхода осколков деления слабо различаются для разных делящихся ядер, это говорит о том, что асимметрия в распределении осколков присуща самому механизму деления ядер.



Деление на неравные части объясняется в рамках оболочечной модели ядра как результат преимущественного образования ядер с заполненными оболочками, содержащими 50 и 82 нейтронов (магические числа). Однако асимметрия деления уменьшается при увеличении энергии возбуждения делящегося ядра и при больших её значениях исчезает.

Испускание нейтронов осколками деления - одна из важнейших особенностей процесса деления тяжёлых ядер. Именно она позволяет создать при определённых условиях цепную реакцию деления.

Цепная ядерная реакция - последовательность единичных ядерных реакций, каждая из которых вызывается частицей, появившейся как продукт реакции на предыдущем шаге последовательности. Механизм цепной реакции при ядерных превращениях могут обеспечить нейтроны, не имеющие кулоновского барьера и возбуждающие ядра при поглощении. Появление в среде необходимой частицы вызывает цепь следующих, одна за другой реакций, которая продолжается до обрыва цепи вследствие потери частицы-носителя реакции. Основных причин потерь две: поглощение частицы без испускания вторичной и уход частицы за пределы объёма вещества, поддерживающего цепной процесс. Если в каждом акте реакции появляется только одна частица-носитель, то цепная реакция называется *неразветвлённой*. Неразветвлённая цепная реакция не может привести к энерговыделению в больших масштабах.

Если в каждом акте реакции или в некоторых звеньях цепи появляется более одной частицы, то возникает *разветвленная* цепная реакция, ибо одна из вторичных частиц продолжает начатую цепь, а другие дают новые цепи, которые снова ветвятся. Правда, с процессом ветвления конкурируют процессы, приводящие к обрывам цепей, и складывающаяся ситуация порождает специфические для разветвленных цепных реакций предельные или критические явления. Если число обрывов цепей больше, чем число появляющихся новых цепей, то цепная самоподдерживающаяся реакция оказывается невозможной. Даже если её возбудить искусственно, введя в среду какое-то количество необходимых частиц, то, поскольку число цепей в этом случае может только убывать, начавшийся процесс быстро затухает. Если же число образующихся новых цепей превосходит число обрывов, цепная реакция быстро распространяется по всему объёму вещества при появлении хотя бы одной начальной частицы.

Область состояний вещества с развитием цепной самоподдерживающейся реакции отделена от области, где цепная реакция вообще невозможна, *критическим состоянием*. Критическое состояние характеризуется равенством между числом новых цепей и числом обрывов.

Достижение критического состояния определяется рядом факторов. Деление тяжелого ядра возбуждается одним нейтроном, а в результате акта деления появляется более одного нейтрона (например, для ^{235}U число нейтронов, родившихся в одном акте деления, в среднем равно 2,5). Следовательно, процесс деления может породить разветвленную цепную реакцию, носителями которой будут служить нейтроны. Если скорость потерь нейтронов (захватов без деления,

вылетов из реакционного объёма и т.д.) компенсирует скорость размножения нейтронов таким образом, что эффективный коэффициент размножения нейтронов в точности равен единице, то цепная реакция идёт в стационарном режиме. Введение отрицательных обратных связей между эффективным коэффициентом размножения и скоростью энерговыделения позволяет осуществить управляемую цепную реакцию, которая используется, например, в ядерной энергетике.

Если коэффициент размножения нейтронов больше единицы, цепная реакция развивается лавинообразно и становится неуправляемой. Неуправляемая цепная реакция деления используется в ядерном оружии.

Критическая масса - количество делящегося вещества, необходимое для начала самоподдерживающейся цепной реакции деления. Коэффициент размножения нейтронов в таком количестве вещества больше единицы или равен единице. Размеры, соответствующие критической массе, также называют *критическими*. Если масса вещества ниже критической, то слишком много нейтронов, необходимых для реакции деления, теряется, и цепная реакция не идёт. При массе больше критической цепная реакция может лавинообразно ускоряться, что приводит к ядерному взрыву.

Величина критической массы зависит от свойств вещества (таких, как сечения деления и радиационного захвата), от плотности, количества примесей, формы изделия, а также от окружения. Например, наличие отражателей и замедлителей нейтронов может сильно уменьшить критическую массу. Минимальную критическую массу имеет образец сферической формы, так как площадь его поверхности наименьшая. Критическая масса чистого металлического плутония-239 сферической формы 11 кг (диаметр такой сферы 10 см), урана-235 – 50 кг (диаметр сферы 17 см). Критическая масса также зависит от химического состава образца.

При расчётах и производстве ядерного и термоядерного оружия параметр критической массы существенным образом влияет как на конструкцию взрывного устройства, так и на его стоимость и сроки хранения. В случае проектирования и строительства атомного реактора, параметры критической массы также ограничивают как минимальные, так и максимальные размеры будущего реактора.

Ядерная реакция синтеза

Термоядерная реакция (синоним: ядерная реакция синтеза) - разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые ядра.

Для того чтобы произошла реакция синтеза, исходные ядра должны преодолеть силу электростатического отталкивания, для этого они должны иметь большую кинетическую энергию. Если предположить, что кинетическая энергия ядер определяется их тепловым движением, то можно сказать, что для реакции синтеза нужна большая температура. Поэтому реакция названа «термоядерной».

Атомные ядра имеют положительный электрический заряд. На больших расстояниях их заряды могут быть экранированы электронами. Однако для того, чтобы произошло слияние ядер, они должны сблизиться на расстояние, на котором действует сильное взаимодействие. Это расстояние — порядка размера самих ядер и во много раз меньше размера атома. На таких расстояниях электронные оболочки атомов (даже если бы они сохранились) уже не могут экранировать заряды ядер, поэтому они испытывают сильное электростатическое отталкивание. Сила этого отталкивания, в соответствии с законом Кулона, обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами. На расстояниях порядка размера ядер величина сильного взаимодействия, которое стремится их связать, начинает быстро возрастать и становится больше величины кулоновского отталкивания.

Таким образом, чтобы вступить в реакцию, ядра должны преодолеть потенциальный барьер. Например, для реакции дейтерий-тритий величина этого барьера составляет примерно 0,1 МэВ. Для сравнения, энергия ионизации водорода - 13 эВ. Поэтому вещество, участвующее в термоядерной реакции, будет представлять собой практически полностью ионизированную плазму.

Кинетической энергии теплового движения 0,1 МэВ соответствует температура примерно 10^9 К. Однако есть два эффекта, которые снижают температуру, необходимую для термоядерной реакции. Во-первых, температура характеризует лишь среднюю кинетическую энергию, поэтому есть частицы как с меньшей энергией, так и с большей. На самом деле в термоядерной реакции участвует небольшое количество ядер, имеющих энергию намного больше средней (т. н. «хвост максвелловского распределения»). Во-вторых, благодаря квантовым эффектам, ядра не обязательно должны иметь энергию, превышающую кулоновский барьер. Если их энергия немного меньше барьера, они могут с большой вероятностью туннелировать сквозь него. Этот же факт туннелирования используется в мюонном катализе реакций ядерного синтеза.

Естественными термоядерными реакторами являются звёзды. Нуклеосинтез в астрофизике - процесс синтеза ядер химических элементов тяжелее водорода. Различают *первичный нуклеосинтез*, проходивший на начальных стадиях существования Вселенной в процессе Большого Взрыва и *звёздный нуклеосинтез*.

В процессе первичного нуклеосинтеза образуются элементы не тяжелее лития. Синтез более тяжёлых ядер происходит в звёздах. Лёгкие ядра (до углерода ^{12}C включительно) могут синтезироваться в недрах относительно немассивных звёзд. Ядра до железа ^{56}Fe синтезируются путём слияния более лёгких ядер в недрах массивных звёзд, синтез тяжёлых и сверхтяжёлых ядер идёт путём нейтронного захвата в предсверхновых звёздах и при взрывах *сверхновых*.

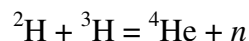
Применение реакции ядерного синтеза как практически неисчерпаемого источника энергии связано в первую очередь с перспективой освоения технологии *управляемого синтеза*. В настоящее время научная и технологическая база не позволяет использовать УТС в промышленных масштабах.

Вместе с тем, неуправляемая термоядерная реакция нашла своё применение в военном деле. Впервые термоядерное взрывное устройство было испытано в ноябре 1952 года в США, а уже в августе 1953 года в Советском Союзе испытали термоядерное взрывное устройство в виде авиабомбы. Мощность термоядерного взрывного устройства (в отличие от атомного) ограничена лишь количеством используемого для его создания материала, что позволяет создавать взрывные устройства практически любой мощности.

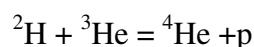
Управляемый термоядерный синтез (УТС) - синтез более тяжёлых атомных ядер из более лёгких с целью получения энергии, который, в отличие от взрывного термоядерного синтеза (используемого в термоядерных взрывных устройствах), носит управляемый характер.

Управляемый термоядерный синтез отличается от традиционной ядерной энергетики тем, что в последней используется реакция распада, в ходе которой из тяжёлых ядер получают более лёгкие ядра. В основных ядерных реакциях, которые планируется использовать в целях осуществления управляемого термоядерного синтеза, будут применяться дейтерий (^2H) и тритий (^3H), а в более отдалённой перспективе гелий-3 (^3He) и бор-11 (^{11}B).

Управляемый термоядерный синтез может использовать различные виды термоядерных реакций в зависимости от вида применяемого топлива. Самая легко осуществимая реакция - дейтерий + тритий:



при энергетическом выходе 17,6 МэВ. Такая реакция наиболее легко осуществима с точки зрения современных технологий, даёт значительный выход энергии, топливные компоненты дешевы. Недостаток - выход нежелательной нейтронной радиации. Существенно сложнее осуществить реакцию дейтерий + гелий-3



при энергетическом выходе 18,4 МэВ. Условия её достижения значительно сложнее. Гелий-3, кроме того, является редким и чрезвычайно дорогим изотопом. В промышленных масштабах в настоящее время не производится. Однако может быть получен из трития, получаемого в свою очередь на атомных электростанциях; или добыт на Луне. Запасы гелия-3 на Земле составляют в атмосфере около 50 000 т и гораздо больше в литосфере, на Луне он находится в значитель-

ном количестве: до 10 млн тонн. В то же время его можно легко получать и на Земле из широко распространённого в природе лития-6 на существующих ядерных реакторах деления.

В настоящее время управляемый термоядерный синтез ещё не осуществлён в промышленных масштабах. Строительство международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) находится в начальной стадии.

Термоядерный ракетный двигатель (ТЯРД) - перспективный ракетный двигатель для космических полётов, в котором для создания тяги предполагается использовать истечение продуктов управляемой термоядерной реакции или рабочего тела, нагретого за счёт энергии термоядерной реакции.

В настоящее время предложены 2 варианта конструкции ТЯРД:

- *ТЯРД на основе термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы;*
- *ТЯРД на основе систем инерционного синтеза (импульсный термоядерный реактор).*

Есть мнение, что ТЯРД на инерциально-импульсном принципе слишком громоздок из-за очень больших циркулирующих в нем мощностей, при худшем, чем у ТЯРД с магнитным удержанием, удельном импульсе и тяге, что вызвано импульсно-периодическим типом его действия.