



Лекция по теме:

Атомное ядро

Строение атомных ядер

В 1909–1910 гг. Х. Гейгер и Э. Марсден, работая под руководством Э. Резерфорда в Манчестерском университете, провели ряд экспериментов по рассеянию альфа-частиц в тонких металлических пленках. В ходе этих экспериментов было установлено, что некоторые из частиц рассеиваются на углы, превышающие 90° . Это обстоятельство сыграло решающую роль в открытии Резерфордом атомного ядра – заряженного положительно плотного образования в центре атома. Диаметр ядра оказался примерно в 10^4 раз меньше, чем размеры самого атома. Ядро самого легкого химического элемента – атома водорода – получило название протона.



Эрнест Резерфорд (1871-1937)
Нобелевская премия 1908 г.



Ганс Вильгельм Гейгер
(1882-1945)



Эрнест Марсден
(1889-1970)

В 1906-09 гг. для проверки модели атома Томсона провели эксперимент

Строение атомных ядер

Поскольку к тому времени уже было известно, что при β^- -распадах из атомных ядер вылетают электроны, была высказана гипотеза, что ядра более тяжелых, чем водород, элементов состоят из протонов и электронов. Однако протонно-электронная модель ядра встретила непреодолимые трудности после установления в 1927 г. соотношения неопределенностей Гейзенберга. Дело в том, что электрон, заключенный в атомном ядре размером порядка 10-14 м, должен был бы иметь наименьшую кинетическую энергию около 100 МэВ. В то же время самые быстрые электроны, испускаемые атомными ядрами при β^- -распадах, имеют энергию всего лишь около 4 МэВ.

Проблема получила разрешение после открытия в 1932 г. Дж. Чедвиком нейтрона, предсказанного еще в 1920 г. независимо Э. Резерфордом и У. Харкинсом. Вскоре Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра, которая остается общепринятой и по настоящее время.

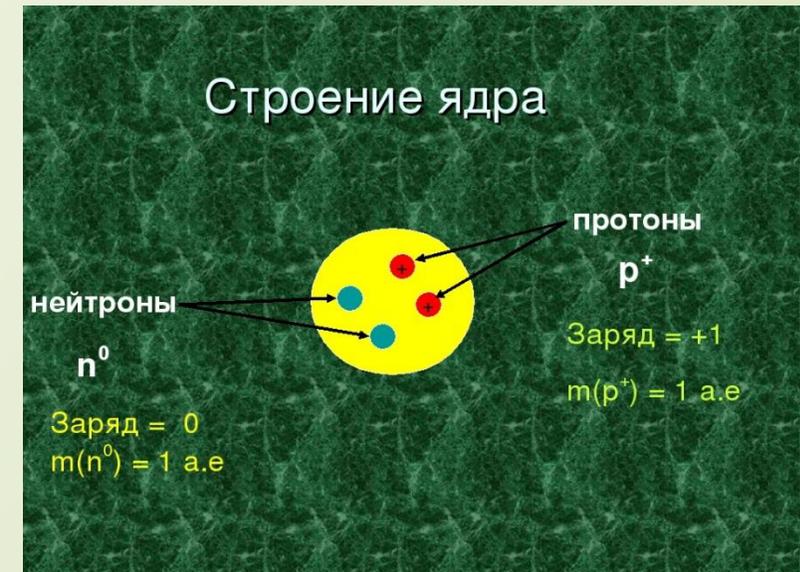


*Открытие нейтрона (1932)
принадлежит физика Дж. Чедвику*

Строение атомных ядер

□ Протон представляет собой ядро самого легкого изотопа водорода – протия. Оно имеет заряд $+e$, равный по величине, но противоположный по знаку заряду электрона. Масса протона $m_p = 1836m_e$. Его спиновое квантовое число равно $1/2$. Нейтрон не имеет электрического заряда, но во всем остальном он очень похож на протон. Его масса $m_n = 1839 m_e$, а спин также равен $1/2$. Общее название для протонов и нейтронов – нуклоны (от лат. *nucleus* – ядро).

Атомные ядра принято обозначать символом A_ZX , где X – обозначение химического элемента; Z – число протонов в ядре (оно определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева); A – **массовое число**, равное сумме числа протонов и числа нейтронов, содержащихся в ядре: $A=Z+N$.



Строение атомных ядер

По представительству в ядре протонов и нейтронов их подразделяют на следующие семейства:

- изотопы – ядра с одинаковым числом протонов. Это ядра одного и того же химического элемента. Примерами изотопов могут служить изотопы водорода ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$. Здесь ${}^1_1\text{H}$ – это ядро обычного водорода – протия (протон), ${}^2_1\text{H}$ – ядро тяжелого водорода – дейтерия (дейтрон), ${}^3_1\text{H}$ – ядро сверхтяжелого водорода – трития (тритон);
- изотоны – ядра с одинаковым числом нейтронов. Примерами изотонов являются ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$;
- изобары – ядра с одинаковым значением массового числа. Например, ${}^3_1\text{H}$ и ${}^3_2\text{He}$ – это изобары.

Строение атомных ядер

□ Понятно, что объем атомного ядра тем больше, чем больше в нем содержится нуклонов: $V \sim A$. Отсюда следует, что радиус ядра пропорционален кубическому корню из его массового числа:

$$R_{\text{я}} = r_0 \sqrt[3]{A}. \quad (18.1)$$

Коэффициент $r_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 1,3$ ферми соответствует значению $A = 1$, т. е. r_0 – это примерный радиус ядра атома обычного водорода – протона.

Плотность ядерного вещества

$$\rho_{\text{я}} = \frac{m_{\text{я}}}{V} \approx \frac{m_{\text{n}} A}{(4/3)\pi r_0^3 A} \approx 2 \cdot 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Для сравнения отметим, что средняя плотность вещества в атомах около $2 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$, а наибольшая плотность вещества в условиях Земли порядка 10^4 кг/м^3 . Отсюда следует, что основная масса нашей Вселенной сосредоточена именно в атомных ядрах образующего ее вещества.

Строение атомных ядер

Какие силы удерживают атомное ядро от распада вследствие взаимного отталкивания протонов? Ясно, что это каким-то образом связано с нейтронами. Но нейтроны не имеют электрического заряда. Следовательно, внутриядерное взаимодействие не является электромагнитным. Не может оно быть и гравитационным взаимодействием, так как оно во много раз слабее, чем электромагнитное. Стало быть, кулоновское отталкивание протонов друг от друга не скомпенсировать гравитационным притяжением.



Строение атомных ядер

□ Советские физики И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко высказали идею, что ядерные силы имеют **обменный характер**: протоны и нейтроны обмениваются некоторой третьей (промежуточной) частицей и тем самым оказываются связанными друг с другом. Развивая эту идею, японский физик-теоретик Х. Юкава в 1935 г. рассчитал характеристики этой частицы (она получила название π -мезона). Оказалось, что ее масса должна составлять около 200 масс электрона. Предсказанные Юкавой частицы были обнаружены в 1947 г. экспериментально. Выяснилось, что существуют положительный (π^+), отрицательный (π^-) и нейтральный (π^0) мезоны. Заряд π^+ - и π^- - мезонов равен по величине элементарному заряду. Масса заряженных мезонов одинакова и равна $273 m_e$. Масса π^0 - мезона равна $264 m_e$. Обменное взаимодействие между нуклонами описывается следующей схемой:

$$p \leftrightarrow n + \pi^+; \quad n \leftrightarrow p + \pi^-; \quad p \leftrightarrow p + \pi^0; \quad n \leftrightarrow n + \pi^0.$$



Хидэки Юкава

Строение атомных ядер

- ▣ Ядерные силы являются короткодействующими: радиус их действия ограничивается размерами атомного ядра ($\sim 10^{-15}$ м). Вследствие этого они обладают свойством **насыщения**: эффективно взаимодействуют только близкие друг к другу нуклоны. По этой причине в тяжелых атомных ядрах количество нейтронов значительно превосходит число протонов, ибо внутренние нейтроны слабо удерживают периферийные протоны от взаимного отталкивания. Кроме того, ядерные силы обладают **зарядовой независимостью**: интенсивность взаимодействия протонов с протонами, нейтронов с нейтронами и протонов с нейтронами совершенно одинакова. Наконец, ядерные силы являются **нецентральными** силами, так как они зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов.

Критерий устойчивости ядра

□ Параметром, определяющим устойчивость атомных ядер, является *энергия связи*, равная работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом. В соответствии с формулой Эйнштейна, связывающей массу и энергию, энергия связи ядра выражается через его *дефект масс*:

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2. \quad (18.2)$$

Дефект масс показывает, насколько масса ядра $m_{\text{я}}$ меньше суммы масс входящих в него нуклонов:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}. \quad (18.3)$$

Добавим в (18.3) Zm_e и одновременно вычтем эту величину, принимая во внимание, что сумма масс протона и электрона равна массе атома водорода m_{H} , а сумма массы ядра и Z масс электронов равна массе атома m_{a} :

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{a}}. \quad (18.4)$$

Критерий устойчивости ядра

□ В ядерной физике энергию частиц обычно измеряют не в джоулях, а в мегаэлектронвольтах (МэВ), а их массу – в атомных единицах массы (а.е.м.). При этом, согласно формуле (18.2), 1 а.е.м. соответствует энергии в 931,5 МэВ. Следовательно, для расчета энергии связи ядра удобно пользоваться простым соотношением:

$$E_{\text{св}} (\text{МэВ}) = \Delta m (\text{а.е.м.}) \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} \quad (18.5)$$

Для сравнения устойчивости различных атомных ядер важно знать не абсолютное значение энергии связи, а *удельную энергию связи*, равную энергии связи, приходящейся на один нуклон: $E_{\text{св}} / A$. На рис. 18.1 показана кривая, усреднено изображающая зависимость удельной энергии связи стабильных атомных ядер от их массового числа.

Критерий устойчивости ядра

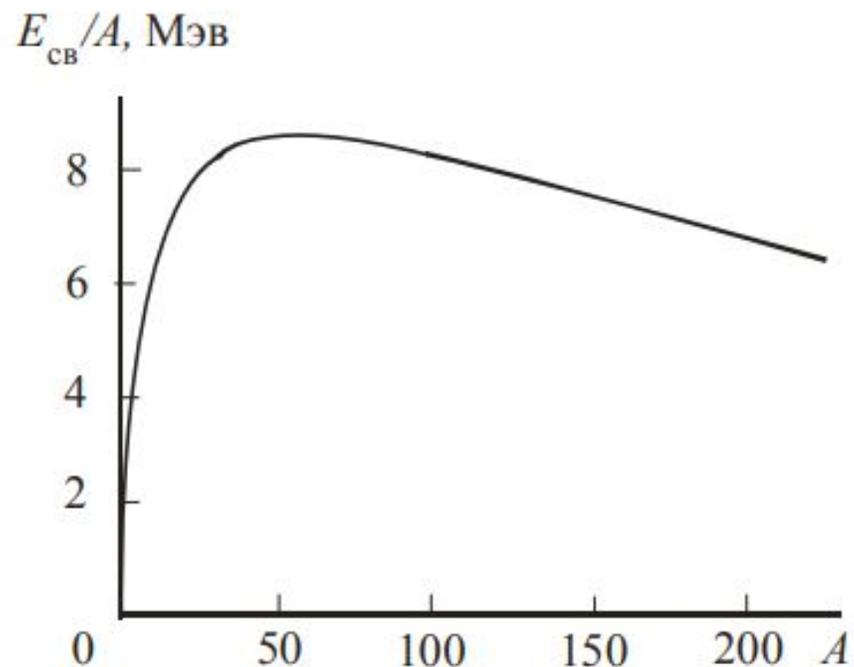


Рис. 18.1. Зависимость удельной энергии связи атомных ядер от массового числа

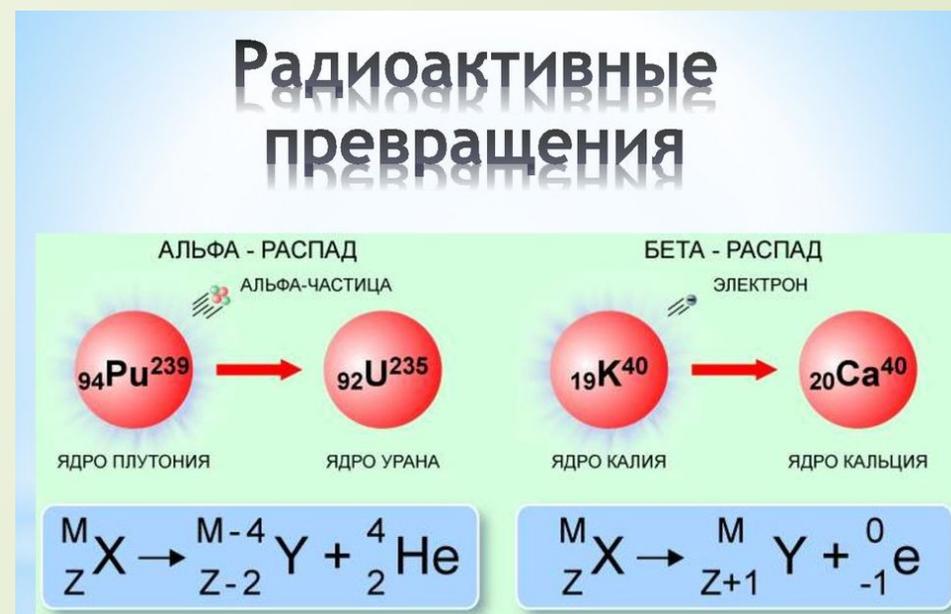
Из графика видно, что сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами около 60 (для элементов от Cr до Zn). Удельная энергия связи в этой области достигает 8,7 МэВ, оставаясь практически постоянной величиной. Это постоянство имеет отношение к насыщению ядерных сил, о котором говорилось в предыдущем параграфе.

Медленное убывание $E_{св} / A$ при больших значениях массового числа объясняется возрастанием кулоновского отталкивания протонов. Быстрое убывание $E_{св} / A$ при малых значениях A обусловлено невысокой интенсивностью ядерных сил в случае малого числа нуклонов. Отсюда следует возможность выделения энергии при реализации двух прямо противоположных типов ядерных реакций: деления тяжелых ядер на более легкие и синтеза более тяжелых ядер из легких.

Радиоактивность

- **Радиоактивностью** (от лат. *radio* – испускаю лучи и *activus* – действенный) называется спонтанное превращение неустойчивых атомных ядер в более устойчивые, сопровождаемое испусканием ядерных излучений.

Известны четыре типа радиоактивности: альфа-распад, бета-распад (в том числе электронный захват), гамма-излучение и протонная радиоактивность. Естественная радиоактивность впервые наблюдалась в 1896 г. А. Беккерелем в солях урана. Искусственная радиоактивность, наблюдаемая у изотопов, полученных в результате ядерных реакций, была открыта Ирен и Фредериком Жолио-Кюри в 1934 г.



Радиоактивность

- **Альфа-распад.** Под альфа-распадом понимают такое ядерное превращение, при котором нестабильное атомное ядро переходит в более устойчивое ядро другого химического элемента, испуская ядро гелия (альфа-частицу):



где ${}^A_Z\text{X}$ обозначает исходное (*материнское*) ядро, ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ – получающееся (*дочернее*) ядро, ${}^4_2\text{He}$ – альфа-частицу.

Радиоактивность

□ **Бета-распад.** Бета-распадом называют такое ядерное превращение, при котором нестабильное атомное ядро переходит в более устойчивое ядро другого химического элемента путем испускания (поглощения) электрона или испускания позитрона. Соответственно различают

• электронный распад (β^- -распад): ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + e^- + \tilde{\nu}_e$, (18.7)

• позитронный распад (β^+ -распад): ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + e^+ + \nu_e$, (18.8)

• электронный захват (e^- -захват) – захват электрона из К-оболочки (реже L- или M-оболочки) собственного атома:



где e^- – электрон (β^- -частица), e^+ – позитрон (β^+ -частица),

ν_e – электронное нейтрино, $\tilde{\nu}_e$ – электронное антинейтрино.

Радиоактивность

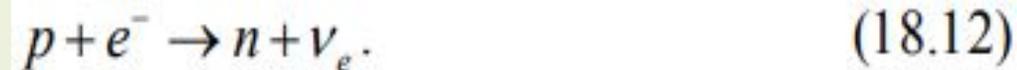
При β^- -распаде один из нейтронов материнского ядра превращается в протон, испуская при этом электрон и электронное антинейтрино:



При β^+ -распаде имеет место обратный процесс – превращение одного из протонов материнского ядра в нейтрон, сопровождаемое испусканием позитрона и электронного нейтрино:



Процесс, описываемый уравнением (18.11), невозможен для свободного протона, так как его масса меньше, чем масса нейтрона. Однако, находясь в ядре, он может заимствовать недостающую энергию у окружающих нуклонов. При e^- -захвате имеет место следующее превращение нуклонов:



Радиоактивность

- **Гамма-излучение.** Гамма-излучение представляет собой процесс перехода возбужденного атомного ядра в более устойчивое состояние путем испускания γ -кванта:



Радиоактивность

- ▣ **Протонная радиоактивность.** Под протонной радиоактивностью (открыта в 1963 г. Г. Н. Флеровым с сотрудниками) понимают ядерное превращение, при котором нестабильное атомное ядро переходит в более устойчивое состояние путем испускания протона:



Протонному распаду подвержены ядра с дефицитом нейтронов. Теоретически возможно испускание как одного, так и двух протонов. Однако экспериментально пока удавалось наблюдать только одно-протонный распад.

Радиоактивность

Независимо от вида радиоактивного превращения, его количественное описание подчиняется общим закономерностям. Естественно, что количество ядер dN , распадающихся за время dt , пропорционально как числу имеющихся ядер N , так и времени распада:

$$dN = -\lambda N dt,$$

где λ – константа, зависящая от вида радиоактивного изотопа, называемая *постоянной распада*. Интегрируя данное выражение, получаем **закон радиоактивного распада**:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (18.15)$$

где N_0 – начальное количество ядер, N – количество ядер, оставшихся нераспавшимися к моменту времени t .

Радиоактивность

Важной характеристикой радиоактивного распада является *период полураспада*. **Периодом полураспада называется время, за которое распадается половина имевшихся в начальный момент времени ядер.**

Чтобы найти период полураспада T , положим в (18.15)
 $N = N_0 / 2, t = T$:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T}.$$

Отсюда

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (18.16)$$

Деление тяжелых ядер

- Тяжелые атомные ядра склонны делиться на более легкие. Такое деление может быть спонтанным и вынужденным. Спонтанное деление ядер урана на два примерно равных по массе осколка было обнаружено в 1940 г. Г. Н. Флеровым и К. А. Петряком. Затем это явление было обнаружено для многих других тяжелых ядер. Вынужденное деление ядер урана при его облучении нейтронами было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ханом и Ф. Штрассманом и объяснено О. Фришем и Л. Мейтнер. Мейтнер также предсказала возможность осуществления цепной ядерной реакции деления.

Истолкование было дано в начале 1939 году.



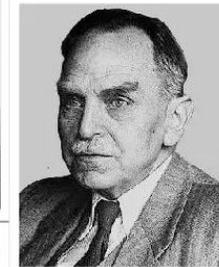
Лиза Мейтнер
17. 11. 1878 — 27. 10. 1968



Отто Роберт Фриш
01. 10. 1904 — 22. 09. 1979



Фриц Штрассман
22. 02. 1902 — 22. 04. 1980

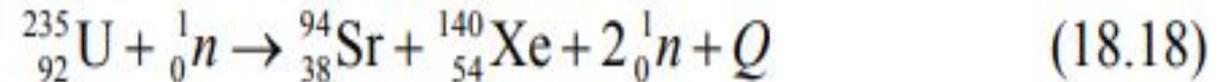
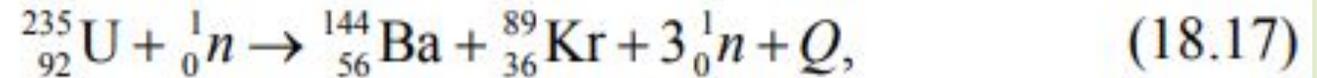


Отто Хан
08. 03. 1879 — 28. 07. 1968

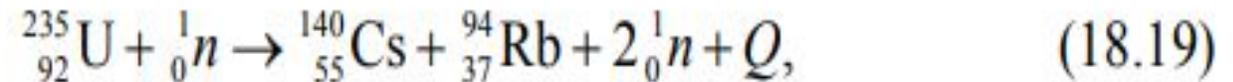
Деление ядер урана было открыто в 1939 году.

Деление тяжелых ядер

Для ядер ${}_{92}^{235}\text{U}$ при их облучении медленными (тепловыми) нейтронами такая реакция может идти по нескольким схемам:



или



где $Q \approx 200 \text{ МэВ}$ – энергетический выход реакции.



Деление тяжелых ядер

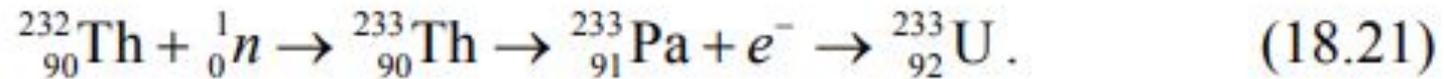
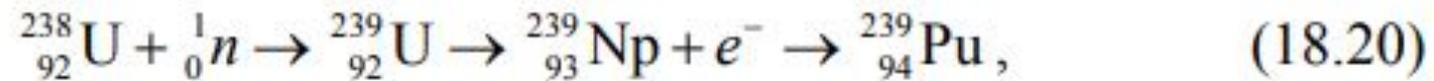


Каждому акту деления сопутствует испускание двух или трех нейтронов. Если хотя бы часть из них замедлить, то они могут поглощаться другими ядрами урана и вызывать новые акты деления. Таким образом, процесс деления можно сделать самоподдерживающимся и регулируемым. Такая цепная ядерная реакция была впервые осуществлена в 1942 г. под руководством Э. Ферми. Осколки деления оказываются радиоактивными и претерпевают цепочку β - и γ -распадов, пока не превратятся в стабильные ядра.

Деление тяжелых ядер

Кроме ядер ${}_{92}^{235}\text{U}$ медленными нейтронами делятся также ядра ${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{90}^{230}\text{Th}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, но эти изотопы в природе не встречаются и могут быть получены лишь искусственным путем.

Ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ и ${}_{90}^{232}\text{Th}$ делятся быстрыми нейтронами:

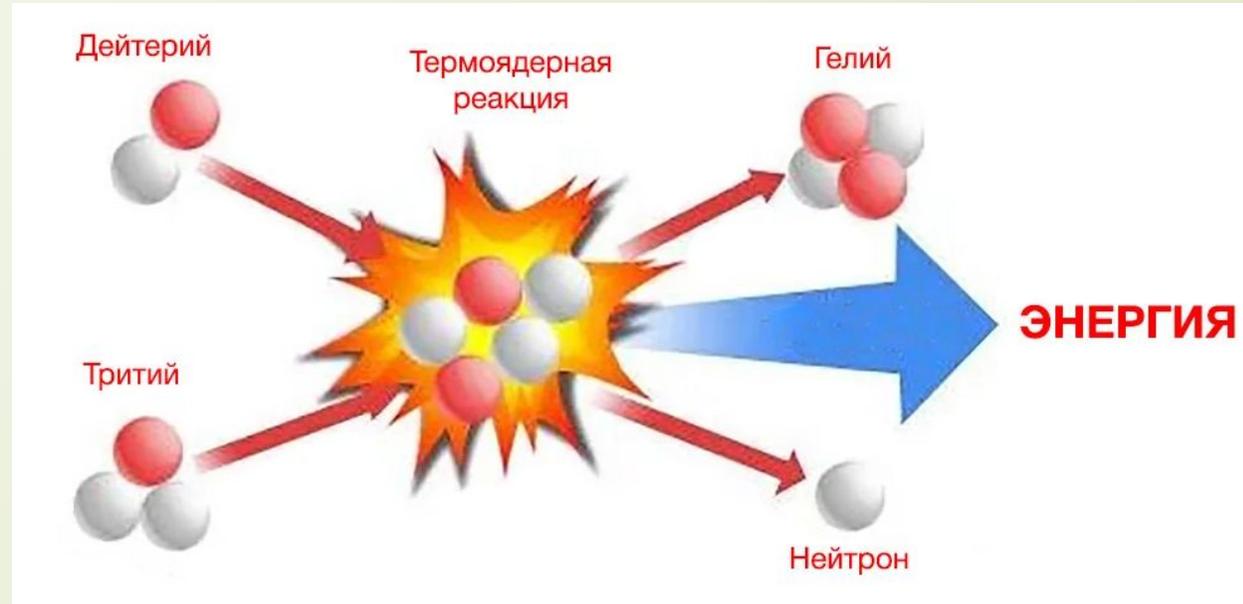


Деление тяжелых ядер

- ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ и ${}_{92}^{233}\text{U}$ альфа-радиоактивны, однако их период полураспада так велик (24 400 лет у плутония и 162 000 лет у тория), так что эти ядра можно считать практически стабильными. Зато они делятся медленными нейтронами и их можно использовать в качестве ядерного топлива. При этом количество образующихся ядер, способных делиться медленными нейтронами, может превышать количество делящихся ядер. Поэтому атомные реакторы на быстрых нейтронах называют реакторами-размножителями или бридерами (от англ. *breeder* – племенной производитель).

Ядерный синтез

Для синтеза атомных ядер их нужно сблизить на расстояние порядка 10-15 м, при котором начинают действовать ядерные силы. Для этого необходимы температуры не ниже 10⁷ К. В связи с тем, что для ядерного синтеза требуются очень высокие температуры, этот процесс называют *термоядерной реакцией*.



Ядерный синтез

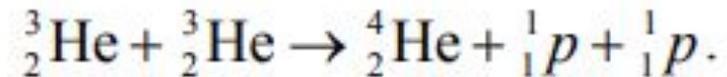
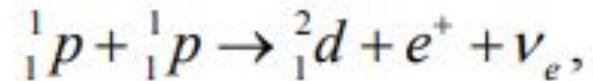
- Наиболее просто выглядит термоядерная реакция синтеза дейтерия и трития, реализуемая в водородной бомбе:



- Для достижения необходимых температур запалом в такой бомбе служит обычная атомная (урановая или плутониевая) бомба. Реакция синтеза (18.22) сопровождается выделением энергии, равной 17,6 МэВ или около 3,5 МэВ на один нуклон. Это значительно больше, чем в ядерных реакциях деления (около 0,85 МэВ на нуклон при делении ядра урана).

Ядерный синтез

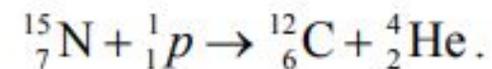
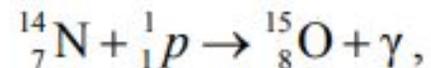
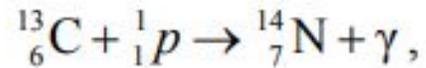
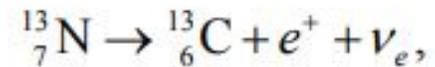
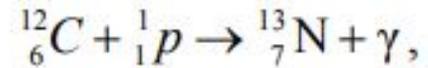
В естественных условиях термоядерные реакции протекают на звездах. Для звезд типа нашего Солнца, где температура в недрах достигает $10^7 - 10^8$ К, предположительно имеет место *протонно-протонный цикл*, протекающий следующим образом:



Результатом реакции является превращение водорода в гелий.

Ядерный синтез

На звездах с более высокой температурой более вероятен углеродно-азотный цикл:



- Итогом этой реакции также является превращение водорода в гелий. Количество ядер углерода остается неизменным. Они играют роль катализатора.



Ядерный синтез

- Проблема управляемого термоядерного синтеза до сих пор не решена. Основная трудность в решении этой задачи – удержание высокотемпературной водородной плазмы и управление числом актов синтеза. Тем не менее, ученые надеются справиться со всеми технологическими трудностями, ведь освоение управляемого термоядерного синтеза даст человечеству практически неисчерпаемый источник энергии.



Спасибо за внимание!

