

Ядерная физика

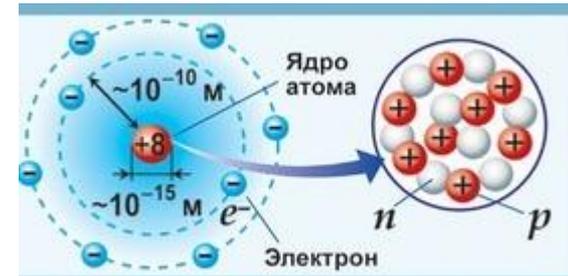
Атомное ядро – центральная и очень компактная часть атома, в которой сосредоточена практически вся его масса и весь положительный электрический заряд.

В 1932г. Д.Д. Иваненко (СССР) и В. Гейзенберг (Германия) предложили **протонно-нейтронную модель атомного ядра**:

ядро состоит из **протонов** и **нейтронов**



нуклонов (от лат. *nucleus* — ядро)



Протон – стабильная частица (*время жизни свободного протона* $> 10^{32}$ лет)

заряд $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл

масса $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e \approx 1$ а.е.м.

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} {}_6^{12}\text{C} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Нейтрон – нестабильная частица (*время жизни свободного нейтрона* 12 мин),
схема распада $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

заряд $q_n = 0$

antineutrino

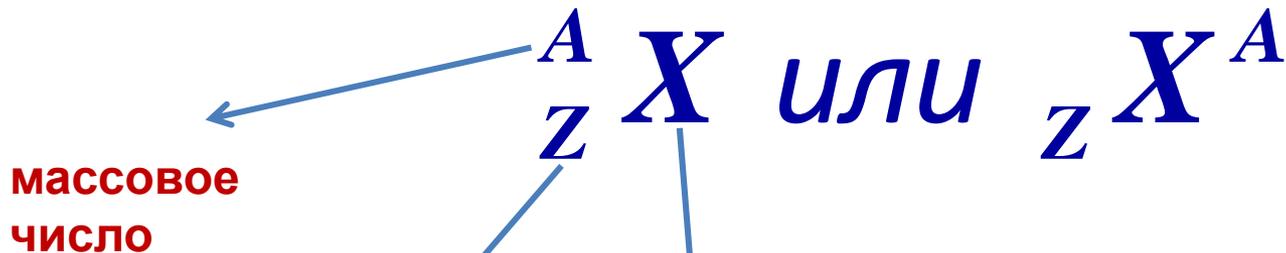
масса $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e \approx 1$ а.е.м.

Каждое ядро содержит Z протонов и N нейтронов.

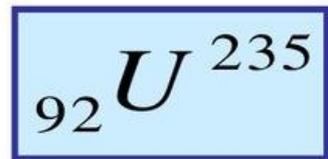
Суммарное число протонов и нейтронов в ядре - массовое число A :

$$A = Z + N$$

Обозначение ядра



Например:



зарядовое число

- число протонов в ядре
- заряд ядра
- порядковый номер в таблице Менделеева

символ химического
элемента

$$N = A - Z$$

- число нейтронов в ядре

Изотопы – это ядра с одинаковым числом протонов Z , но различным количеством нейтронов N .

Например, водород имеет три изотопа:

${}_1\text{H}^1$ – обычный водород, протий ($Z=1, N=0$)

${}_1\text{H}^2$ – тяжелый водород: дейтерий ${}_1\text{D}^2$ ($Z=1, N=1$).

${}_1\text{H}^3$ – сверхтяжелый водород: тритий ${}_1\text{T}^3$ ($Z=1, N=2$).

${}_1\text{H}^1$ и ${}_1\text{H}^2$ – стабильны, ${}_1\text{H}^3$ – радиоактивен.



В большинстве случаев изотопы одного химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами.

Изобары – атомные ядра различных элементов, имеющие одинаковые массовые числа.

Например, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ${}^{40}_{19}\text{K}$ ${}^{40}_{20}\text{Ca}$

Объем ядра пропорционален числу нуклонов, т.е. плотность ядерного вещества примерно одинакова ($\approx 10^{17} \text{ кг/м}^3$).

Очень высокая плотность говорит об исключительно высокой интенсивности

ядерного взаимодействия.

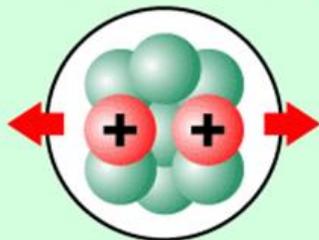


Ядерные силы и их свойства

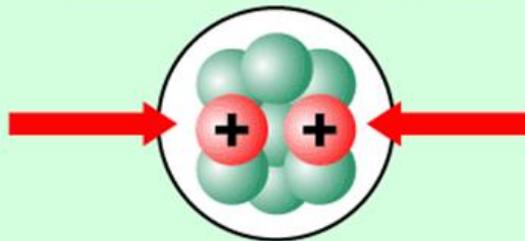
Протоны в ядре отталкиваются кулоновскими силами. Это не приводит к разрушению ядер, так как между нуклонами в ядре действуют ядерные силы неэлектрической природы, обеспечивающие устойчивость атомных ядер. Взаимодействие нуклонов в ядре названо сильным взаимодействием.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЯДРЕ

МЕЖДУ ПРОТОНАМИ ЯДРА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ОДНОИМЕННО ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ, ДЕЙСТВУЮТ СИЛЫ ВЗАИМНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ



МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ, ВХОДЯЩИМИ В ЯДРО, ДЕЙСТВУЮТ ОСОБЫЕ СИЛЫ ВЗАИМНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ - ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ



Ядерные силы обладают следующими свойствами:

1. **Короткодействующие**—действуют на расстоянии $<10^{-15}\text{м}$ и являются силами притяжения.
2. **Зарядовая независимость** (не зависят от заряда нуклонов: $F_{n-p} = F_{n-n} = F_{p-p}$).
3. **Не являются центральными** (их нельзя представить направленными вдоль одной прямой).
4. Свойство **насыщения** (каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов).
5. **Зависят от ориентации спинов** взаимодействующих нуклонов.

Энергия связи ядра и дефект массы ядра

Масса ядра меньше суммы масс покоя составляющих нуклонов ($m_{\text{я}}$ - масса ядра)

$$m_{\text{я}} < Zm_p + (A - Z)m_n$$

m_p и m_n - массы покоя протона и нейтрона

Дефект массы ядра - это разность между суммарной массой частиц, составляющих ядро, и массой целого ядра $m_{\text{я}}$

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

- дефект массы ядра

Для вычисления используют формулу:

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_{\text{ат}}$$

- дефект массы ядра



масса атома водорода

масса нейтрона

масса атома

Из закона взаимосвязи массы и энергии следует:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

При образовании ядра в момент слияния нуклонов энергия выделяется в виде излучения.

Энергия, которую надо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется **энергией связи** атомного ядра.

$$E_{св} = \Delta mc^2$$

-энергия связи ядра

$$E_{св} = (Zm_H + (A - Z)m_n - m_{ат})c^2$$

Если массы выразить в а.е.м., то энергия связи вычисляется по формуле:

$$E_{св} = 931,5\Delta m \text{ (МэВ)}$$

Так как $1 \text{ а. е. э.} = c^2 \cdot 1 \text{ а. е. м.} = 9 \cdot 10^{16} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 1,491 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,5 \text{ МэВ}$.

$$E_{уд} = \frac{E_{св}}{A} = \frac{\Delta m}{A} c^2$$

-удельная энергия связи ядра
(энергия связи, приходящаяся на один нуклон)

Удельная энергия связи ядер химических элементов

Из графика видно, что:

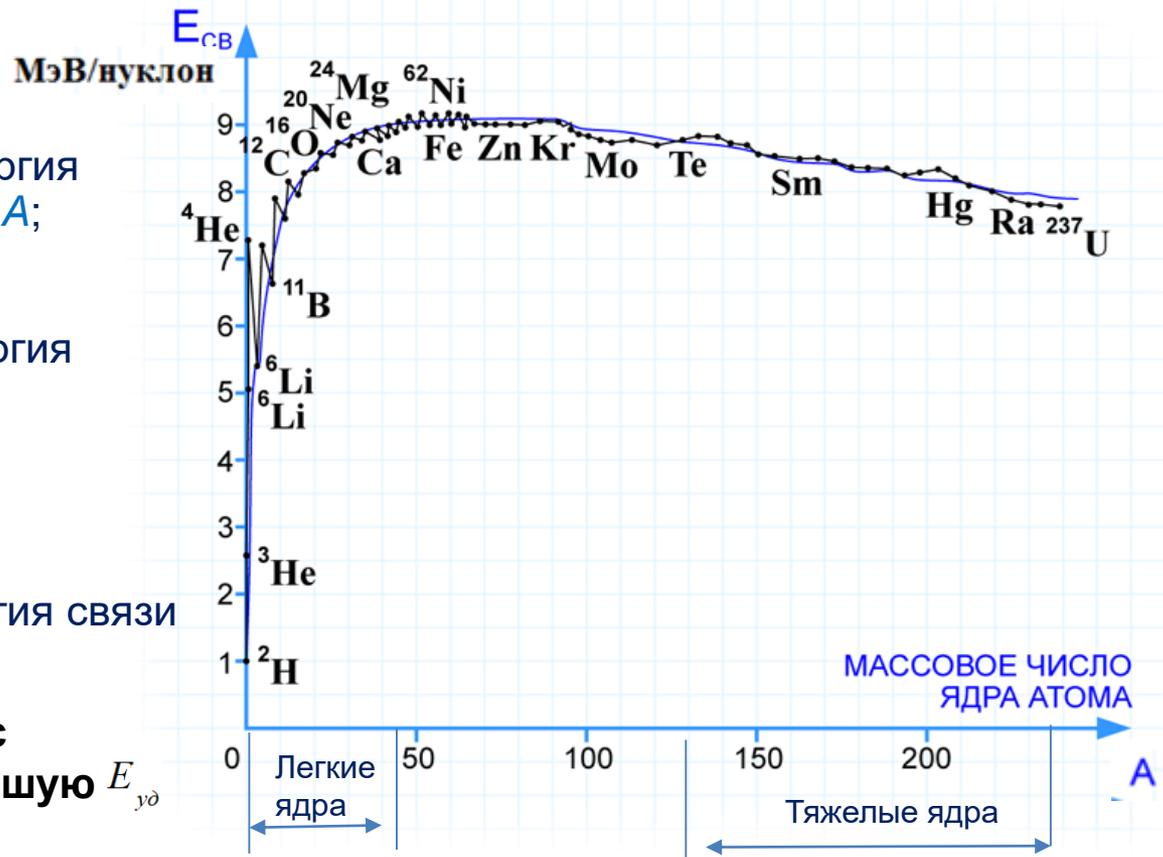
1) у ядер с $0 < A < 40$ удельная энергия связи резко возрастает с ростом A ;

2) у ядер с массовым числом $40 < A < 100$ удельная энергия связи максимальна;

Удельная энергия связи не превышает $\approx 8,7$ МэВ

3) у ядер с $A > 100$ удельная энергия связи плавно убывает с ростом A

Самые устойчивые изотопы с $A = 50 - 60$, т.к. имеют наибольшую $E_{уд}$



Энергетически возможны (выгодны) два процесса:

1. Деление тяжелых ядер (цепная реакция)
2. Синтез легких ядер (термоядерная реакция).

Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии !

Радиоактивность

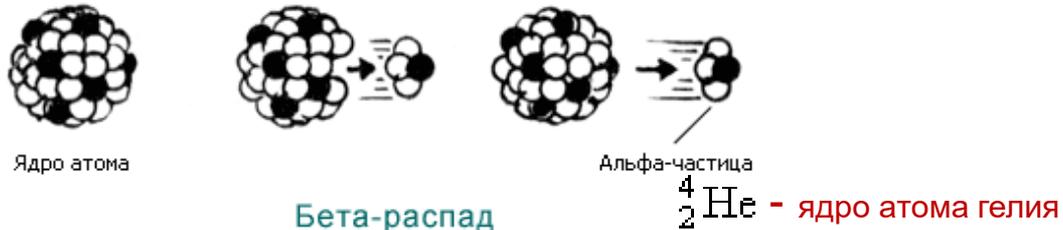
Все изотопы можно разделить на стабильные и нестабильные (или **радиоактивные**).

Радиоактивность - самопроизвольное превращение ядра в другое ядро с испусканием частиц. (Почти 90 % из 2500 известных атомных ядер нестабильны).

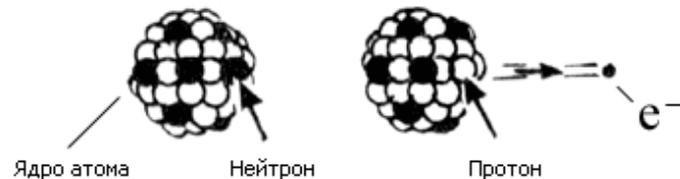
Явление открыто : 1896г.- А. Беккерель (соли урана); 1898г. – Мария и Пьер Кюри (полоний и радий).

Основные виды радиоактивности

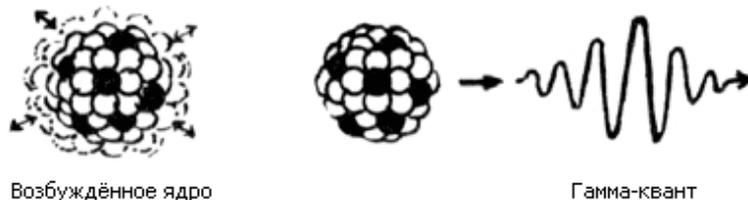
Альфа-распад



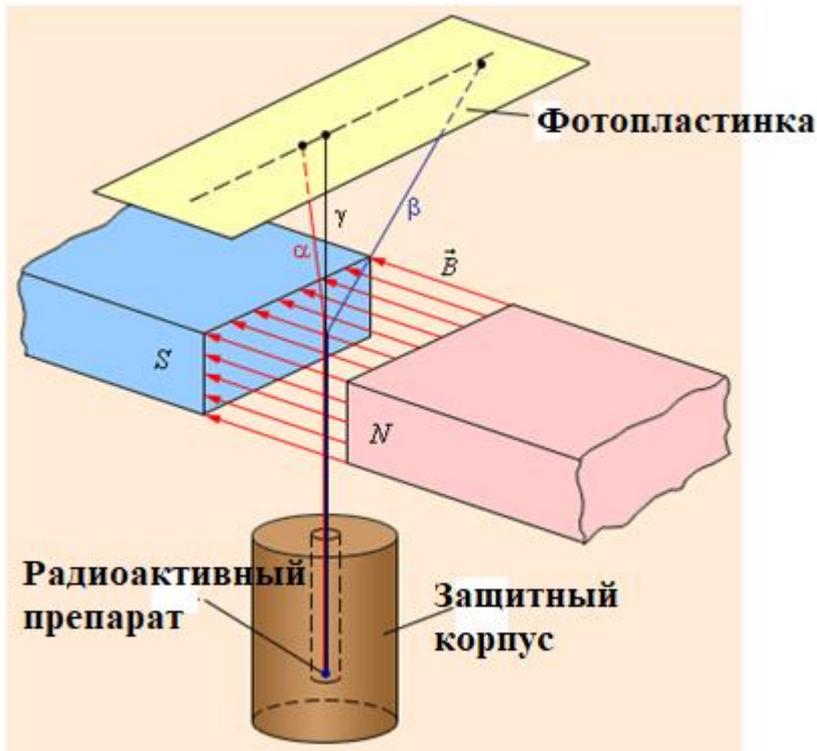
Бета-распад



Гамма-излучение



Радиоактивное излучение — это поток частиц высокой энергии, вылетающих из нестабильного ядра.



1. α -излучение – поток α -частиц (${}^4_2\text{He}$)

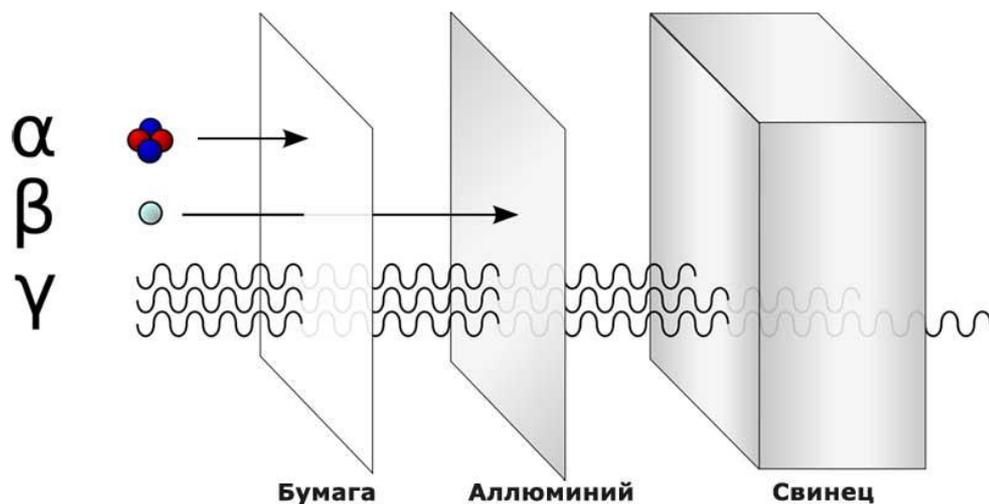
- отклоняется магнитным и электрическим полем
- обладает большой ионизирующей способностью
- обладает малой проникающей способностью

2. β -излучение – поток электронов

- отклоняется магнитным и электрическим полем
- обладает меньшей ионизирующей способностью, чем α -излучение
- обладает большей проникающей способностью, чем α -излучение

3. γ -излучение – жесткое электромагнитное излучение с $\lambda_\gamma < \lambda_{\text{рент}}$

- не отклоняется магнитным и электрическим полем
- обладает малой ионизирующей способностью
- обладает большой проникающей способностью
- наблюдается дифракция γ -излучения на кристаллах



листом бумаги.

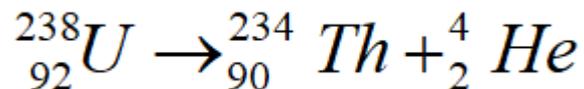
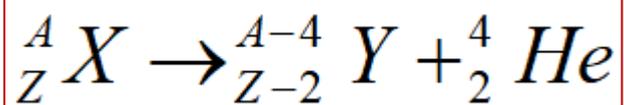
β -излучение до 1 МэВ -
Al - пластиной толщиной в
несколько мм.

γ - излучение - эффективны
тяжёлые элементы (свинец и
т. д.), поглощают МэВ-ные
фотоны при толщине
несколько сантиметров

**Проникающая способность всех видов излучения
зависит от энергии частиц или квантов.**

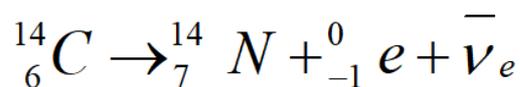
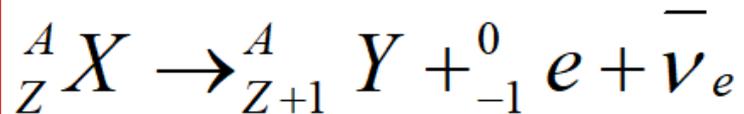
Правила смещения при радиоактивном распаде

α-распад



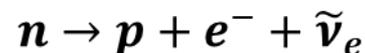
образуется ядро нового элемента с массовым числом равным $(A - 4)$ и зарядовым числом $(Z - 2)$, т.е. ядро элемента, находящегося в периодической таблице на 2 клетки влево от исходного

β⁻-распад

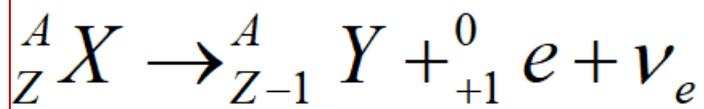


образуется ядро нового элемента с Z на 1 больше, т.е. ядро элемента из следующей клетки таблицы Менделеева

В основе электронного β⁻-распада - превращение в ядре нейтрона в протон:

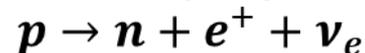


β⁺-распад



образуется ядро нового элемента с Z на 1 меньше, т.е. ядро химического элемента находящегося в таблице Менделеева на 1 клетку влево

В основе позитронного β⁺-распада лежит превращение в ядре протона в нейтрон :



Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону. Предсказать, когда произойдет распад ядра данного атома, невозможно. Смысл имеют только утверждения о поведении в среднем большой совокупности атомов.

Пусть ядра распадаются независимо друг от друга.

λ - **постоянная распада** - вероятность распада ядра в единицу времени.

Смысл λ : из N нестабильных ядер в единицу времени распадается в среднем λN ядер.

К моменту времени $t + dt$ число радиоактивных ядер уменьшится на

$$dN = -\lambda N dt$$

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

- **закон радиоактивного распада**

$N(t)$ - число нераспавшихся ядер в момент времени t

N_0 - число радиоактивных ядер в начальный момент времени $t=0$

Закон радиоактивного распада: число нераспавшихся ядер убывает с течением времени по экспоненциальному закону.

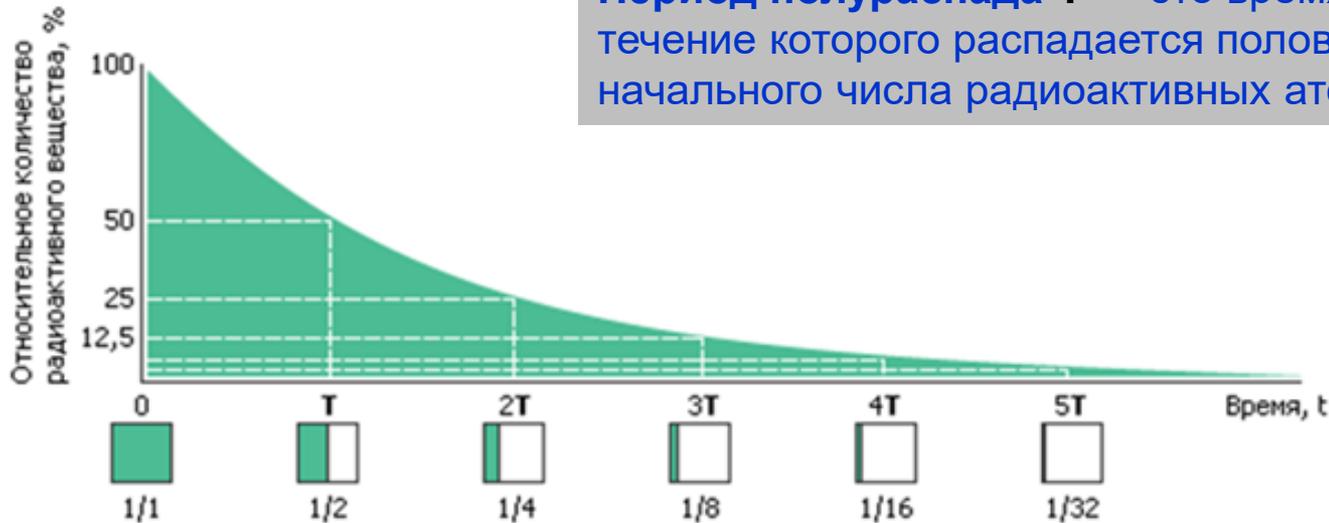
$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- среднее время жизни радиоактивного изотопа

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

- период полураспада

Период полураспада T — это время, в течение которого распадается половина начального числа радиоактивных атомов



$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

- число распавшихся ядер

$$N = \frac{m}{M} N_A$$

- число атомов, содержащихся в радиоактивном препарате массой m

M - молярная масса; N_A - число Авогадро

Активность

Число атомных распадов, совершающихся в радиоактивном препарате за 1 с, называется **активностью** этого элемента

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$A_0 = \lambda N_0$$

Удельная активность- активность единицы массы радиоактивного препарата: $a = \frac{A}{m}$

В системе **СИ**: $[A] = \text{Бк}$ (беккерель)

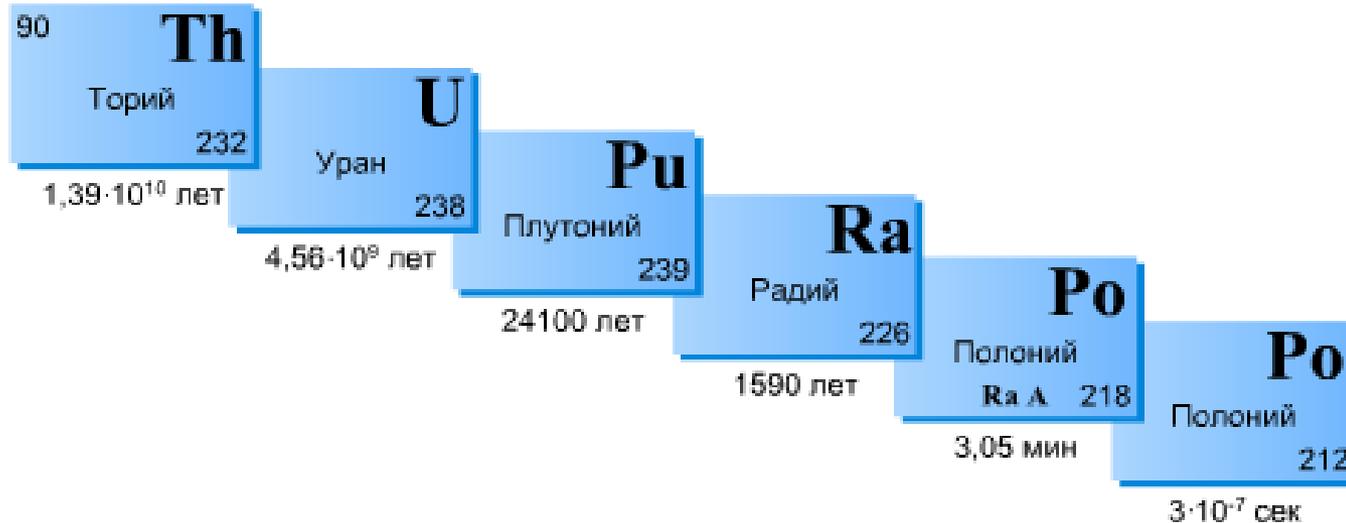
$$1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{распад}}{\text{с}}$$

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

$$A = 1 \text{ Ки} \approx \text{активность 1г радия}$$

↓
кюри

Периоды полураспада некоторых ядер



Ядерные превращения

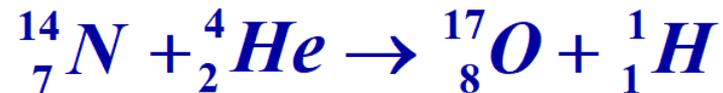
Выделяют два типа ядерных превращений:

- ядерные реакции;
- радиоактивность.

Ядерные реакции

Ядерные реакции – это превращения атомных ядер, обусловленные их взаимодействием с элементарными частицами или другими ядрами.

Первая ядерная реакция была осуществлена [Э. Резерфордом](#) в 1919 году.



Схематически ядерная реакция записывается в виде



Или кратко



энергетический выход

$Q > 0$ – экзотермическая реакция

$Q < 0$ – эндотермическая реакция

X и Y – исходное и конечное ядра;

a и b – бомбардирующая и испускаемая в ядерной реакции частица

Ядерные реакции подчиняются законам сохранения энергии, импульса, момента импульса, заряда.

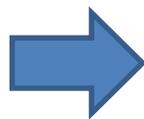
Сумма зарядов ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов продуктов реакции (ядер и частиц).

Сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме массовых чисел продуктов реакции (ядер и частиц).

ПРИМЕР

Найти неизвестный элемент ядерной реакции ${}_{16}^{32}\text{S} + \frac{A}{Z}\text{X} \rightarrow {}_{15}^{32}\text{P} + {}_1^1\text{H}$.

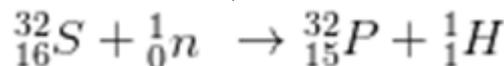
$$\left. \begin{array}{l} 32 + A = 32 + 1 \\ 16 + Z = 15 + 1 \end{array} \right\}$$



$$A = 1 \quad Z = 0$$



$${}_0^1\text{X} \rightarrow {}_0^1n \text{ (нейтрон)}$$



Энергетический выход ядерной реакции Q — это разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции.

$$Q = \left[\underbrace{(m_X + m_a)}_{\substack{\text{сумма масс} \\ \text{частиц до реакции}}} - \underbrace{(m_Y + m_b)}_{\substack{\text{сумма масс частиц} \\ \text{после реакции}}} \right] c^2$$

$$Q = \left[\underbrace{(m_X + m_a)}_{\substack{\text{а.е.м.}}} - \underbrace{(m_Y + m_b)}_{\substack{\text{а.е.м.}}} \right] 931 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$$

Мэв

Энергетический выход ядерной реакции равен изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Ядерные реакции происходят под действием:

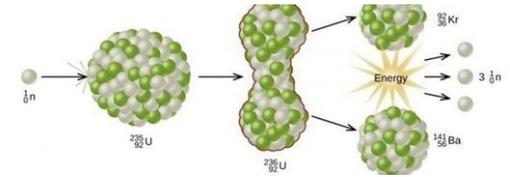
- нейтронов
- протонов
- дейтронов
- α -частиц
- γ -фотонов

→ нейтральная частица

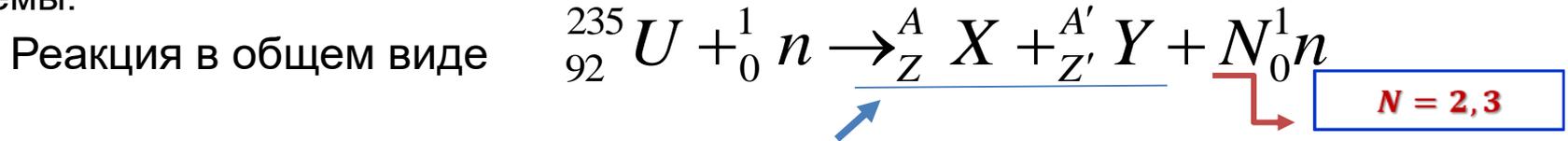
→ не испытывает кулоновское отталкивание, легко проникает в ядро и вызывает различные превращения

Деление тяжелых ядер

Реакция деления тяжелых ядер - нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс.



О. Ган и Ф. Штрассман в 1939 году открыли деление ядер урана: бомбардирование урана нейтронами провоцирует появление элементов средней части периодической системы.



На данный момент существует около 100 различных изотопов с массовыми числами от 90 до 145, (изотопы бария, ксенона, стронция, рубидия и др.), которые возникают при делении урана и других тяжелых ядер.

Энергия, выделяемая при делении одного ядра урана, достигает 200 МэВ.

Природный уран содержит изотопы :

${}_{92}\text{U}^{238}$ – 99,3% (вступают в реакцию только с быстрыми нейтронами, при наличии энергии, равной 1 МэВ)

${}_{92}\text{U}^{235}$ – 0,72% реакция деления происходит интенсивней на медленных (тепловых) нейтронах

На практике большой интерес представляет реакция деления ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$.

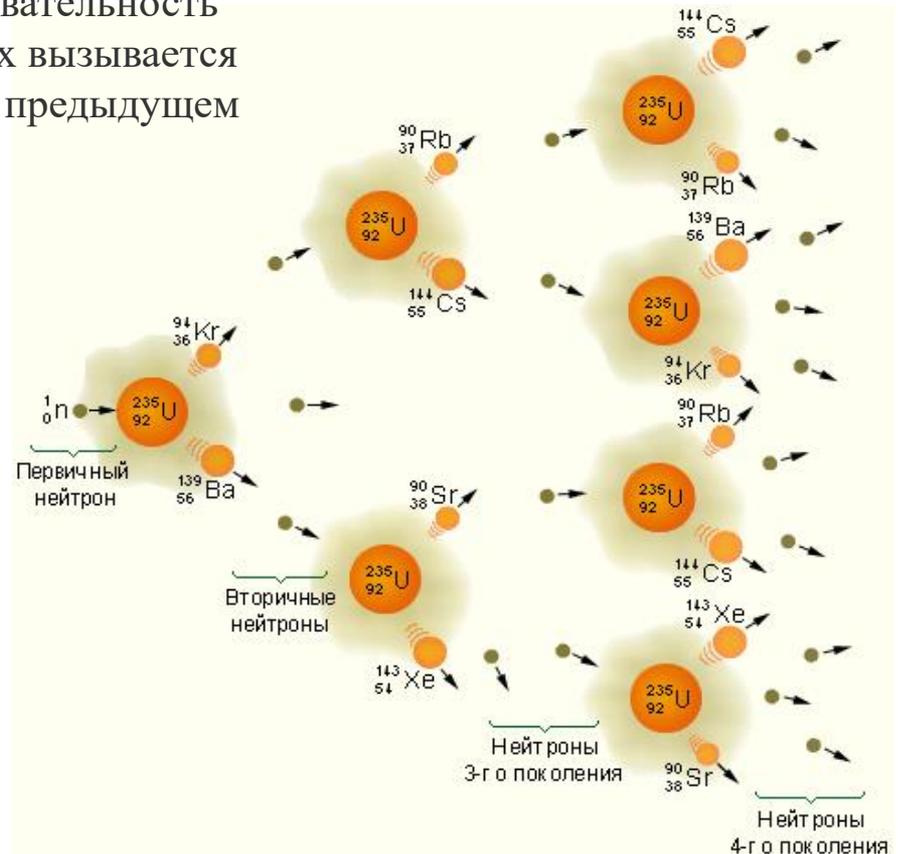
Необходим процесс обогащения урана изотопом ${}_{92}\text{U}^{235}$.

При делении тяжелых ядер происходит последовательность единичных ядерных реакций, каждая из которых вызывается частицей, появившейся как продукт реакции на предыдущем шаге последовательности.

Лавинообразный процесс деления получил название **цепной реакции**.

Режим цепной реакции определяется коэффициентом размножения нейтронов.

K - коэффициент размножения нейтронов – это отношение числа нейтронов в каком-либо звене цепной реакции к числу нейтронов в предшествующем звене.



$K=1$ - режим управляемой цепной реакции (осуществляется в атомных реакторах)

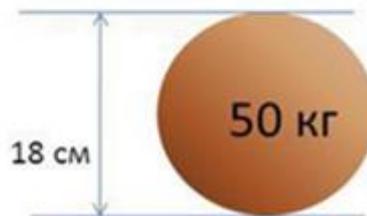
$K>1$ - ядерный взрыв (в атомной бомбе)

$K<1$ - цепная реакция прекращается (в природе)

Цепная реакция в уране с повышенным содержанием ${}_{92}\text{U}^{235}$ развивается, когда масса урана превосходит **критическую массу**.

- **Критической массой** называют наименьшую массу делящегося вещества, **при которой еще может протекать цепная ядерная реакция**.
- Для чистого U-235, имеющего форму шара, критическая масса примерно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см

- Для ядерных реакторов применяя замедлители нейтронов и отражающую оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г



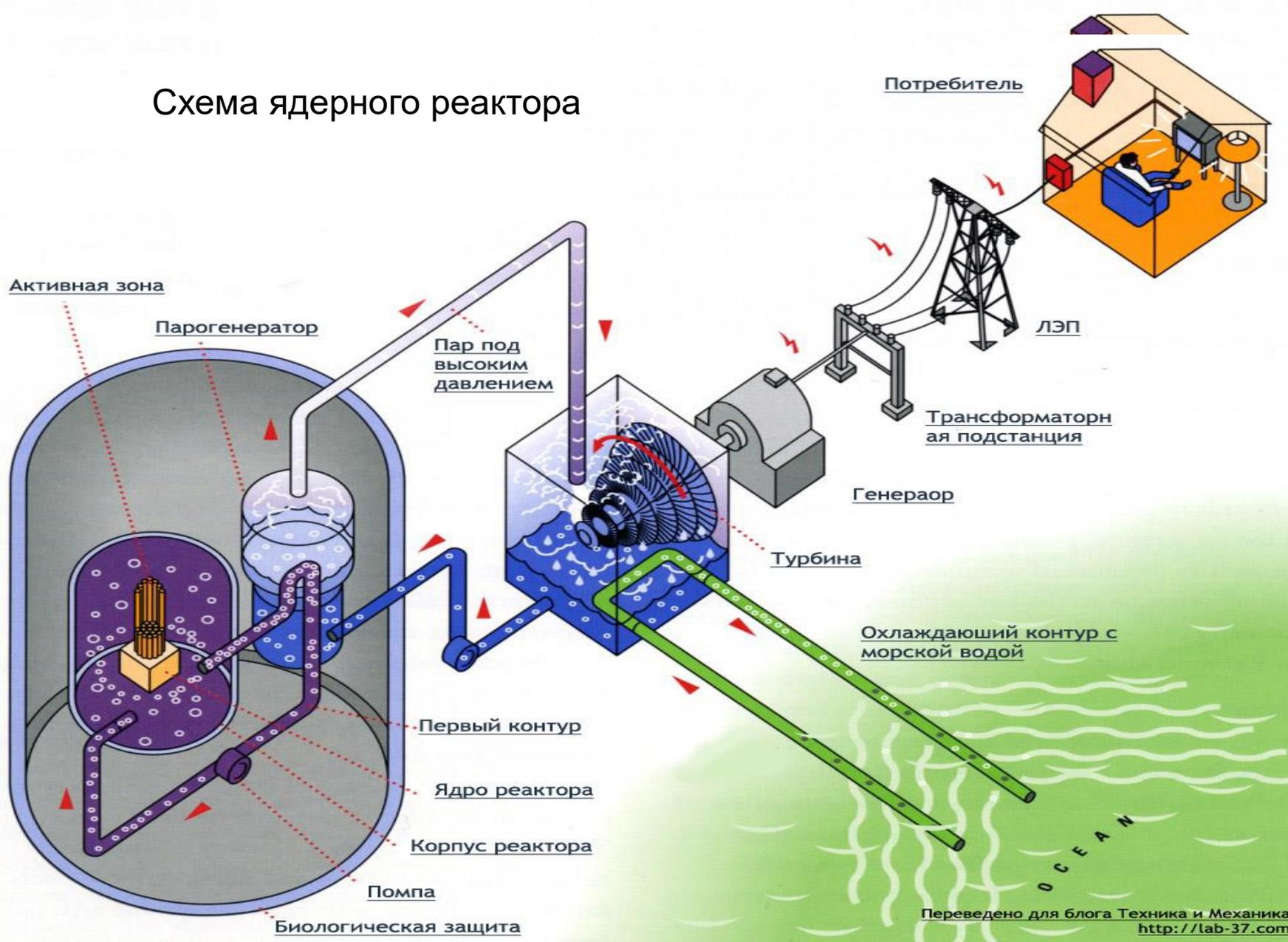
Ядерный реактор

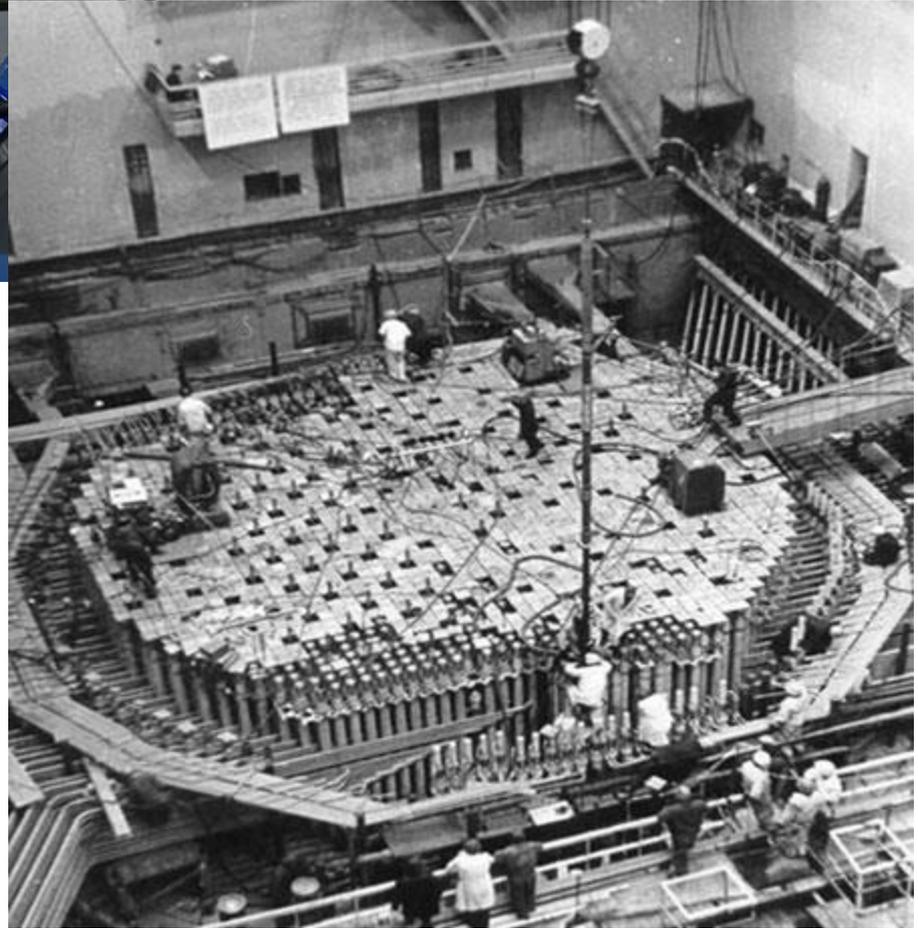
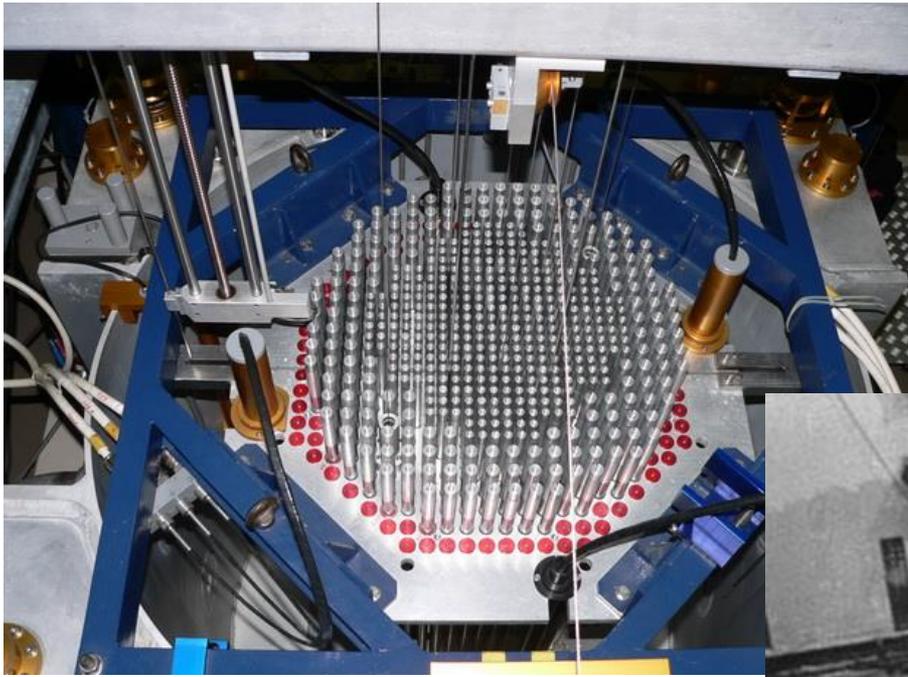
Ядерный реактор - устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

Основные элементы ядерного реактора:

- 1) ядерное горючее ${}_{92}^{235}\text{U}$ ${}_{94}^{239}\text{Pu}$
- 2) замедлитель нейтронов (**тяжелая или обычная вода, графит и др.**);
- 3) теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (**вода, жидкий натрий и др.**);
- 4) устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие **кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны**);
- 5) защитная оболочка, задерживающая γ -излучение и нейтроны (**бетон с железным заполнителем**).

Схема ядерного реактора







«Сердце» атомной станции - центральный зал. Под этими кубиками находится атомный реактор РБМК-1000 (точно такой же, как на ЧАЭС).

Реактор большой мощности (канальный) размещается в железобетонной шахте и представляет собой систему каналов с установленными в них топливными сборками. Каналы проходят через графитовую кладку, служащую замедлителем нейтронов. Подводящие и отводящие коммуникации, циркуляционные насосы и трубопроводы большого диаметра образуют контур отвода тепла от каналов. В качестве теплоносителя используется химически обессоленная вода.



На каждом углу - стойка радиационного контроля. Каждый проходящий мимо обязан приложить к ней свои руки и узнать свою радиационную "чистоту"

Проблемы ядерной энергетики:

- тяжелые последствия аварий;
 - радиоактивные отходы;
 - тепловое загрязнение;
- содействие распространению ядерного оружия



Разрушенный энергоблок Чернобыльской АЭС



Добыча урана



Урановая руда



Топливные таблетки



Термоядерная реакция синтеза

Термоядерная реакция - реакция слияния легких ядер в более тяжелые, которая сопровождается выделением огромного количества энергии.

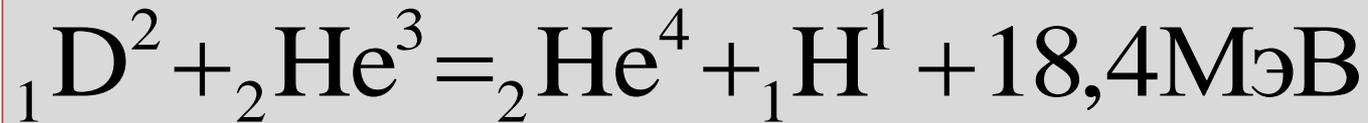
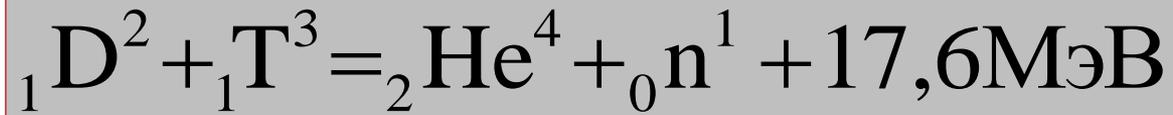
Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях, в расчете на один нуклон, в несколько раз превышает удельную энергию, выделяющуюся в цепных реакциях деления тяжёлых ядер.

Например, превращение 1г водорода в гелий приводит к освобождению в 8 раз большей энергии, чем деление 1г урана.

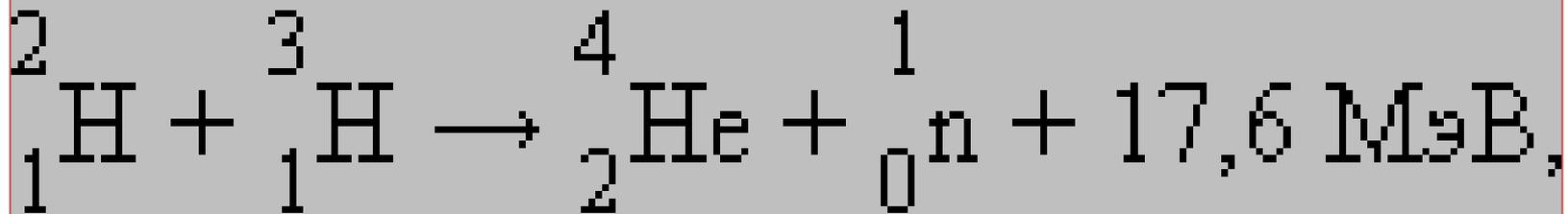
Синтез легких ядер может стать возможным при условии очень большой скорости столкновения ядер.

Синтез легких ядер осуществляется только при очень **высоких температурах (10^8 K)**, поэтому реакции ядерного синтеза получили название **термоядерных реакций**.

Примеры некоторых термоядерных реакций



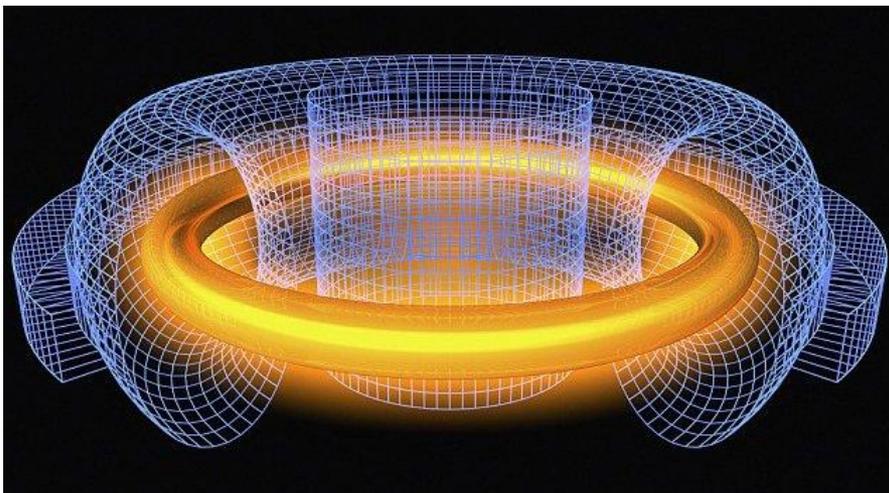
Реакция слияния ядер дейтерия и трития является одной из наиболее перспективных термоядерных реакций.



При осуществлении термоядерной реакции особенно большие трудности возникают при получении и поддержании высоких температур.

При температурах 10^8 К ядерная смесь представляет собой плазму.

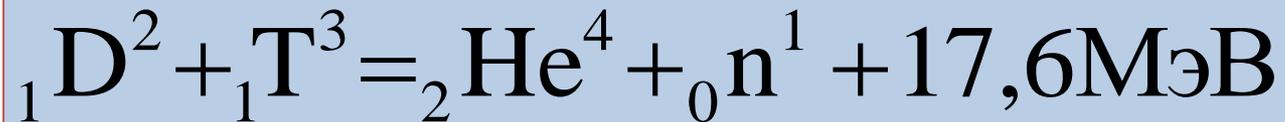
Главной проблемой физиков-ядерщиков по-прежнему остается удержание раскаленной до миллионов градусов плазмы внутри реактора на достаточно длительное время с помощью магнитного поля.



Термоядерный реактор токамак

Применение термоядерных реакций с целью получения взрывов **водородной бомбы (неуправляемые термоядерные реакции)** представляет значительно меньшие трудности.

Заряд водородной бомбы образуют вещества дейтерий и тритий, реакция которых происходит по схеме:

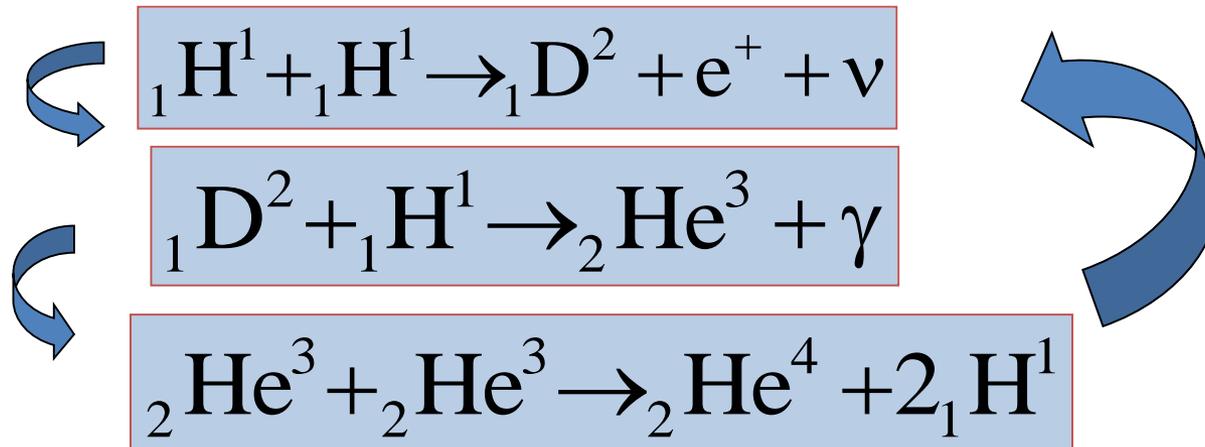


Запалом в такой бомбе служит обычная атомная бомба, при взрыве которой в течение очень малой доли секунды температура достигает $10^7 - 10^8 \text{ K}$.

За это время смесь, пригодная для термоядерной реакции, нагревается до такой температуры, что ядерный синтез сопровождается взрывом.

Термоядерные реакции протекают в грандиозных масштабах во Вселенной.

На Солнце предположительно осуществляется протонно – протонный цикл, протекающий в 3 стадии:



Действие ионизирующих излучений

Ионизация атомов
и молекул
вещества

Переход атомов и
молекул в возбужденное
состояние

Ионизация является причиной физических и химических изменений в веществе, которые могут быть обнаружены и измерены.



Дозиметры

Элементы дозиметрии

Дозиметрией называют раздел ядерной физики и измерительной техники, в котором изучают величины, характеризующие действие ионизирующего излучения на вещества, а также методы и приборы для их измерения.

Независимо от природы ионизирующего излучения его взаимодействие количественно может быть оценено **отношением энергии, переданной элементу облученного вещества, к массе этого элемента. Эту характеристику называют дозой излучения (поглощенной дозой излучения) D .**

Различные эффекты ионизирующего излучения прежде всего определяются поглощенной дозой. Она сложным образом зависит от вида ионизирующего излучения, энергии его частиц, состава облучаемого вещества и пропорциональна времени облучения. **Дозу, отнесенную ко времени, называют мощностью дозы.**

Единицей поглощенной дозы излучения является *грей* (Гр), который соответствует дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж; *мощность дозы излучения* выражается в *греях в секунду* (Гр/с). Внесистемная единица дозы излучения - рад¹ (1 рад = 10^{-2} Гр = 100 эрг/г), ее мощности - *рад в секунду* (рад/с).

Вводят еще одно понятие дозы для рентгеновского и γ -излучения - **экспозиционную дозу излучения X** , которая является мерой ионизации воздуха рентгеновскими и γ -лучами. За единицу экспозиционной дозы принят *кулон на килограмм* (Кл/кг). На практике используют единицу, называемую *рентгеном* (Р),

Для данного вида излучения биологическое действие обычно тем больше, чем больше доза излучения. Однако различные излучения даже при одной и той же поглощенной дозе оказывают разные воздействия.

В дозиметрии принято сравнивать биологические эффекты различных излучений с соответствующими эффектами, вызванными рентгеновским и γ -излучениями.

Коэффициент K , показывающий, во сколько раз эффективность биологического действия данного вида излучения больше, чем рентгеновского или γ -излучения, при одинаковой дозе излучения в тканях, является *коэффициентом качества*. В радиобиологии его называют также *относительной биологической эффективностью* (ОБЭ).

Коэффициент качества устанавливают на основе опытных данных. Он зависит не только от вида частицы, но и от ее энергии.

	K
Рентгеновское, γ - и β -излучения	1
Тепловые нейтроны ($\sim 0,01$ эВ)	3
Нейтроны (5 МэВ)	7
\gg (0,5 МэВ)	10
α -излучение	20

Защита от ионизирующего излучения

Различают три вида защиты: защита временем, расстоянием и материалом. Чем больше время и меньше расстояние, тем больше экспозиционная доза. Следовательно, необходимо минимальное время находиться под воздействием ионизирующего излучения и на максимально возможном расстоянии от источника этого излучения.

Защита материалом основывается на различной способности веществ поглощать разные виды ионизирующего излучения.

Защита от α -излучения проста: достаточно листа бумаги или слоя воздуха толщиной в несколько сантиметров, чтобы полностью поглотить α -частицы. Однако, работая с радиоактивными источниками, следует остерегаться попадания α -частиц внутрь организма при дыхании или приеме пищи.

Для защиты от β -излучения достаточно пластин из алюминия, плексигласа или стекла толщиной в несколько сантиметров. При взаимодействии β -частиц с веществом может появиться тормозное рентгеновское излучение, а от β^+ -частиц - γ -излучение, возникающее при аннигиляции этих частиц с электронами. Более сложна защита от нейтрального излучения: рентгеновское и γ -излучения, нейтроны. Эти излучения с меньшей вероятностью взаимодействуют с частицами вещества и поэтому глубже проникают в вещество. Защита от нейтронов наиболее сложна. Быстрые нейтроны сначала замедляют, уменьшая их скорость в водородсодержащих веществах. Затем другими веществами, например кадмием, поглощают медленные нейтроны.