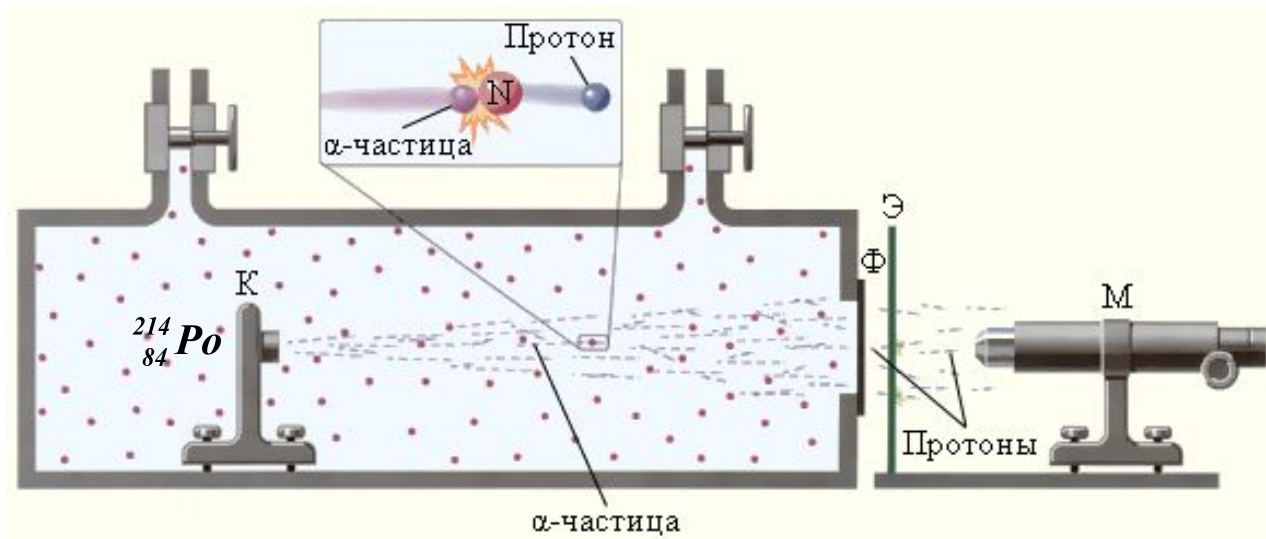
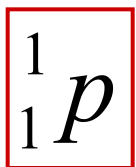


**Атомное ядро. Элементарные частицы**  
**Строение атомных ядер. Массовое и**  
**зарядовое числа. Нуклоны**

## Схема опыта Э. Резерфорда по обнаружению протонов в продуктах расщепления ядер (1919)



К – свинцовый контейнер с радиоактивным источником  $\alpha$ -частиц, Ф – металлическая фольга, Э – экран, покрытый сульфидом цинка, М – микроскоп

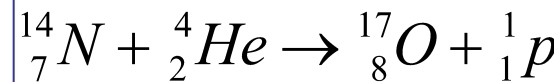


$$p = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \text{ а. е. м.}$$

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

**протоны входят в состав ядер атомов**



# Открытие нейтрона

1932 г. Дж. Чедвик

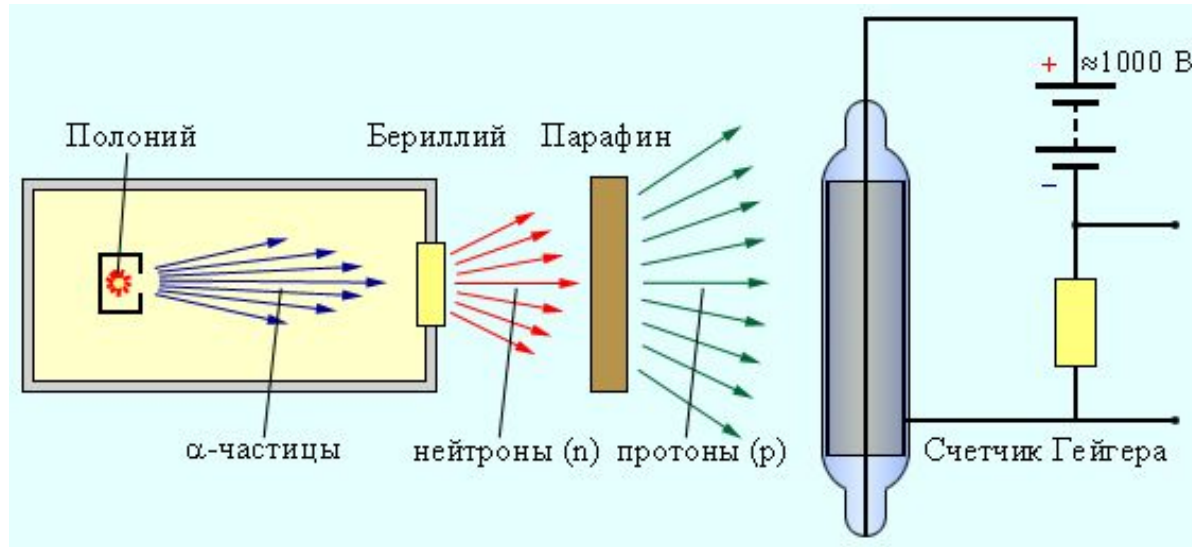
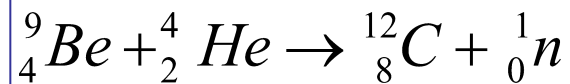
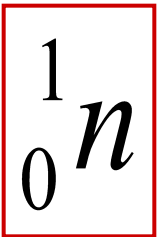


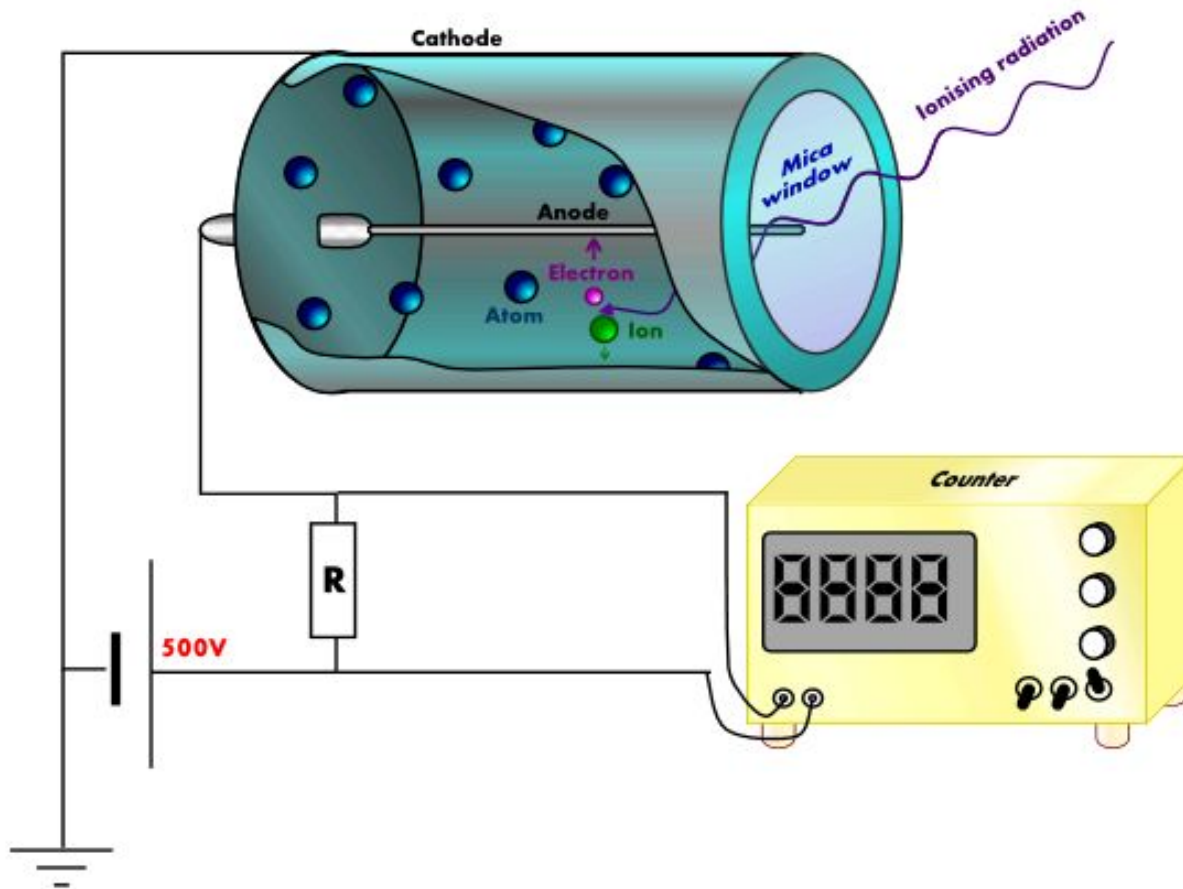
Схема установки для обнаружения нейтронов

**масса нейтрона**

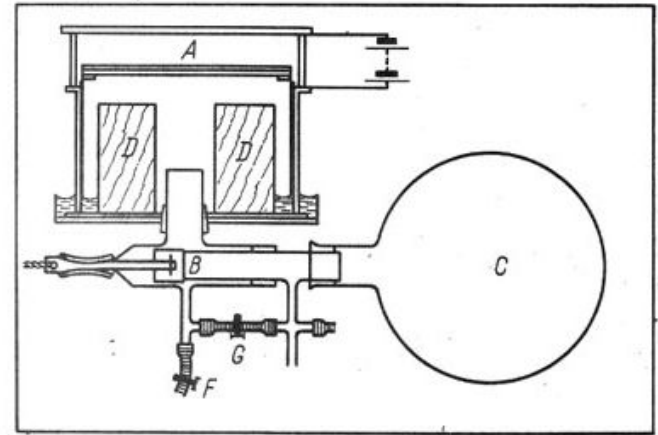
$$m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а. е. м.}$$



# Счетчик Гейгера - Мюллера

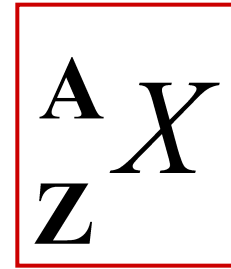


# Камера Вильсона



# Строение атомных ядер

Российский физик  
Д. Д. Иваненко Российский физик  
Д. Д. Иваненко и немецкий физик  
В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о  
*протонно-нейтронном* строении  
атомных ядер.



Протоны и нейтроны - *нуклонами*.

Число протонов

*Z - зарядовым числом*

Число нейтронов - *N*.

Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) называют *массовым числом*

*A:*

$$A = Z + N$$



Атомное ядро = «нуклид».

Ядро обозначают тем же символом, что нейтральный атом:

X- символ химического элемента



### Основные характеристики частиц, входящих в состав атома

Частица	Масса		Заряд (в единицах заряда электрона)	Спин, $\hbar$
	кг	МэВ		
Электрон	$9.31 \cdot 10^{-31}$	0,51	-1	$\frac{1}{2}$
Протон	$1.6726 \cdot 10^{-27}$	938,25	+1	$\frac{1}{2}$
Нейтрон	$1.6749 \cdot 10^{-27}$	939,55	0	$\frac{1}{2}$

1эВ =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж, масса в 1 МэВ рассчитана с использованием формулы на  $E = mc^2$

**В зависимости от значений Z, A, N различают :**

<b>Изотопы</b>	<b>Изобары</b>	<b>Изотоны</b>
<b>Ядра с одинаковым Z, но разными A</b>	<b>Ядра с одинаковыми A, но разными Z</b>	<b>Ядра с одинаковым числом нейтронов N</b>
${}^9_5\text{B}, {}^{10}_5\text{B}, {}^{11}_5\text{B}$ ${}^{16}_8\text{O}, {}^{17}_8\text{O}, {}^{18}_8\text{O}$	${}^{210}_{81}\text{Tl}, {}^{210}_{82}\text{Pb}, {}^{210}_{83}\text{Bi}$ ${}^{40}_{18}\text{Ar}, {}^{40}_{20}\text{Ca}$	${}^{13}_6\text{C}, {}^{17}_7\text{N}, {}^{15}_8\text{O}$

**«Изотоп» - «то же самое место» - все изотопы данного элемента в одном месте таблицы.**

**Всего в природе ~300 устойчивых изотопов, ~50 неустойчивых.**

**В ядерных реакциях получено > 1800 изотопов (~100 из них в трансурановой области, лежащей за  ${}_{92}\text{U}$ )**

**Существуют ядра, имеющие большое количество изотопов (Sn – 30 изотопов, 10 из них стабильны).**



## Водород имеет изотопы:

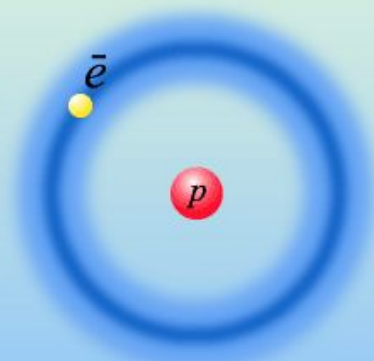
${}^1_1\text{H}$  - обычный водород или **протий** (ядро – протон) - стабилен;

${}^2_1\text{H}$  - тяжелый водород или дейтерий (ядро – дейтрон – 1p и 1n) – стабилен;

${}^3_1\text{H}$  - тритий (ядро – тритон – 1p и 2n) – радиоактивен.

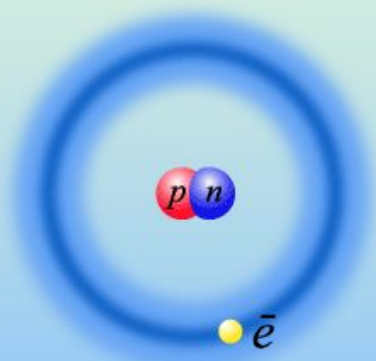
*протий*

${}^1_1\text{H}$



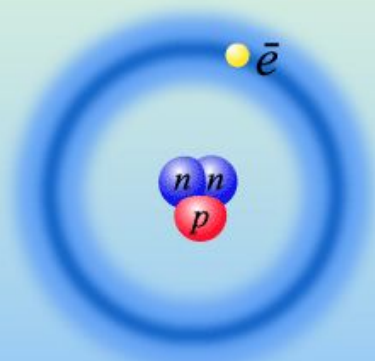
*дейтерий*

${}^2_1\text{H}$



*тритий*

${}^3_1\text{H}$



# Взаимодействие нуклонов в ядре, свойства и природа ядерных сил

## Особенности ядерных

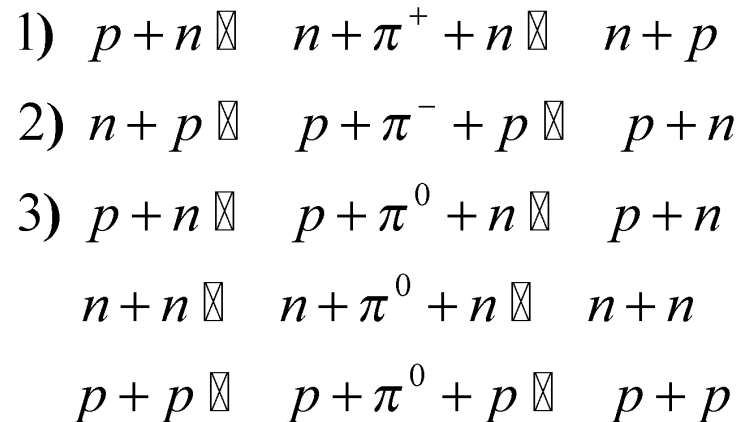
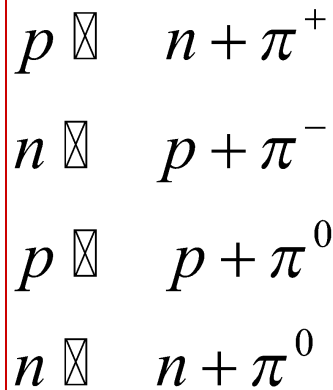
**сил:**

1. Являются специфическими силами притяжения.  $\sim$  в 100 раз  $>$  электростатических, на десятки порядков силы гравитационного взаимодействия нуклонов.
2. Короткодействующие. Проявляются на расстояниях порядка размеров ядра ( $\sim 2.2 \cdot 10^{-15}$  м – радиус действия ядерных сил).
3. Им присуща **зарядовая независимость**: ядерные силы между 2-мя p, 2-мя n, или между p и n имеют одинаковую величину.  $\rightarrow$  Имеют неэлектростатическую природу, не зависят от заряда нуклонов.
4. Зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов (протон и нейтрон, образуя дейтрон, удерживаются вместе, когда их спины параллельны друг другу).
6. Не являются центральными (в отличие от кулоновских).
7. Обладают свойством **насыщения** (каждый нуклон взаимодействует в ядре с ограниченным числом ближайших нуклонов). Удельная  $E_{\text{связи}}$  нуклонов в ядре при  $\uparrow$  числа нуклонов  $\sim$  постоянная.

По современным представлениям сильное взаимодействие обусловлено обменом  **$\pi$ -мезонов** или **пионов** между нуклонами (1947 - в космическом излучении (Пауэлл и Оккиалини), предсказал Юкава (1935)).

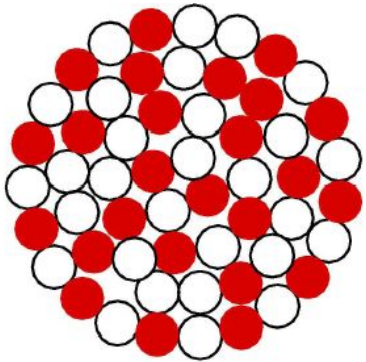
$\pi^+$ -мезоны,  $\pi^-$ - мезоны ( $|q|=|e|$ ,  $m=273m_e$ ),  
нейтральные  $\pi^0$ - мезоны ( $|q|=0$ ,  $m=264m_e$ )

Спин  $\pi$ -мезонов =0, нестабильны. Время жизни  $\pi^+$  и  $\pi^-$  -  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с,  $\pi^0$  -  $0,8 \cdot 10^{-16}$  с.



Размеры атомных ядер  $\sim 10^{-14} \div 10^{-15}$  м ( $\ll$  размера атома). Масса атома практически равна массе ядра.

В первом приближении ядро можно считать шаром.



$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

$$R_0 = (1.3 \div 1.7) \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$

объем ядра  $\sim$  числу нуклонов в ядре  $A$ ,  $A \sim m \rightarrow$  средняя  $\rho$  ядерного вещества практически одинакова, не зависит от  $Z$ .

## **Модели атомного ядра: капельная, оболочечная.**

Попытки создать теорию, достаточно точно описывающую многообразие свойств ядер, наталкиваются на :

- 1. Недостаточность знаний о ядерных силах, действующих между нуклонами.**
- 2. Трудность точного решения квантовых уравнений, описывающих движение большого числа нуклонов в ядре.**
- 3. Трудность учета движения нуклонов вследствие сильного взаимодействия между ними.**

→ В теории ядра используют модельный подход – используют различные приближения – ядерные модели, с помощью которых удастся объяснить многие свойства атомных ядер.

Ни одна модель не дает исчерпывающего описания ядра, каждая рассматривает свою совокупность свойств ядра и свой круг явлений.

**Капельная и оболочечная модели основаны на аналогии свойств атомных ядер со свойствами жидкой капли и электронной оболочки атома.**

**Капельная** – первая простейшая модель ядра (Я.И. Френкель - 1939, развита Н.Бором и др.)

Аналогия поведения нуклонов в ядре и молекул в капле жидкости. Ядро – как капля заряженной несжимаемой жидкости с плотностью, равной ядерной.

Силы между нуклонами короткодействующие (как и между молекулами в жидкости).

Капли жидкости – постоянная  $\rho$  вещества, не зависящая от числа молекул → малая сжимаемость. Ядра – практически одинаковая  $\rho$ , не зависящая от числа нуклонов → крайне малая сжимаемость ядерного вещества.

В капле и ядре – определенная подвижность частиц.  
Объем капли и ядра ~ числу составных частиц.

Модель используют при описании реакций, происходящих при столкновении с ядрами других ядер, нуклонов и других частиц.

Позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре, объяснила механизм ядерных реакций, реакций деления ядер.  
**Не смогла объяснить повышенную стабильность некоторых ядер.**

## Оболочечная – М. Гепперт-Майер и И. Иенсен 1940-1950.

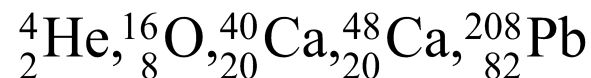
Отдельные нуклоны в ядрах движутся независимо в усредненном поле нуклонов. Это поле является сферическим потенциальным (**самосогласованным**). Введение этого одинакового для всех нуклонов поля позволяет рассматривать движение отдельного нуклона → сводить задачу многих тел к задаче 1-го тела.

Из решения уравнения Шредингера для движущегося в самосогласованном поле нуклона → нуклоны в ядре находятся в определенных энергетических состояниях, характеризующихся определенными  $\Psi$  и индивидуальными числами  $n$  и  $l$ .

При столкновении 2-х нуклонов – обмен их  $E_{\text{кин}}$ .

По модели, нуклоны распределены по дискретным энергетическим уровням, заполняемых согласно принципа Паули, устойчивость ядер связывают с заполнением уровней (**ядра с полностью заполненными оболочками наиболее устойчивы**)..

Наиболее устойчивы ядра с  $A=2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 152$ . Называют **магическими**, у которых магические числа  $p$  и  $n$ , - **дважды магические** – особенно устойчивы (5).



Модель позволила описать основные свойства ядер в невозбужденном состоянии, объяснить спины и магнитные моменты ядер, периодичность свойств ядер.

# Энергия связи ядер

Измерения массы ядер:  $m_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}}$

Разность между суммой масс нуклонов, составляющих ядро, и массой ядра – **дефект массы ядра ( $\Delta m$ )**

$$\Delta m = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}}] - m_{\text{я}}$$

В таблицах обычно не  $m_{\text{я}}$ , а массы  $m_{\text{а}}$  атомов  $\rightarrow$  для нахождения  $\Delta m$  пользуются

$$\Delta m = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}}] - m_{\text{а}}$$

( $m_{\text{H}}$  - масса атома водорода,  $m_{\text{а}}$  - масса атома исследуемого элемента).

$E = mc^2 \rightarrow$  изменению массы соответствует изменение энергии  $\rightarrow$  при образовании ядра должна выделяться

$$E = \Delta mc^2$$

**Из закона сохранения энергии: для разделения ядра на составляющие его нуклоны необходимо затратить такое количество энергии, которое выделяется при его образовании**

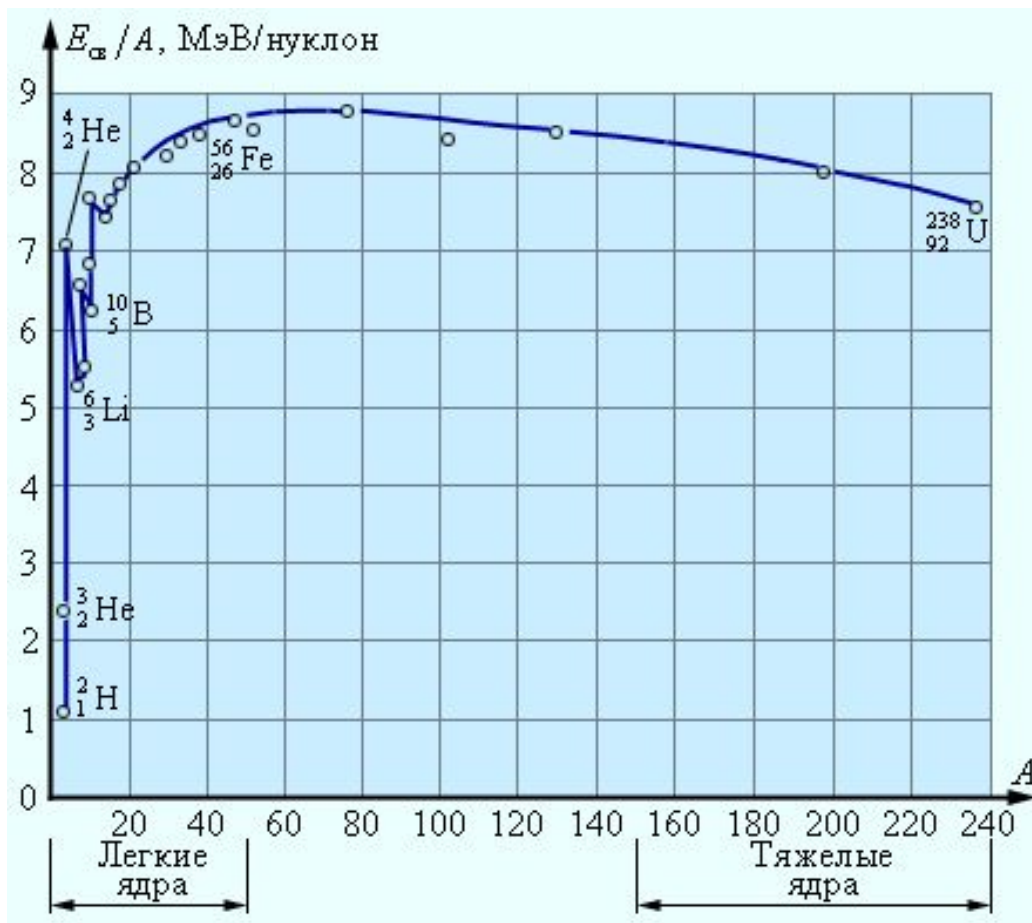


**Энергия связи ядра** – энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны.

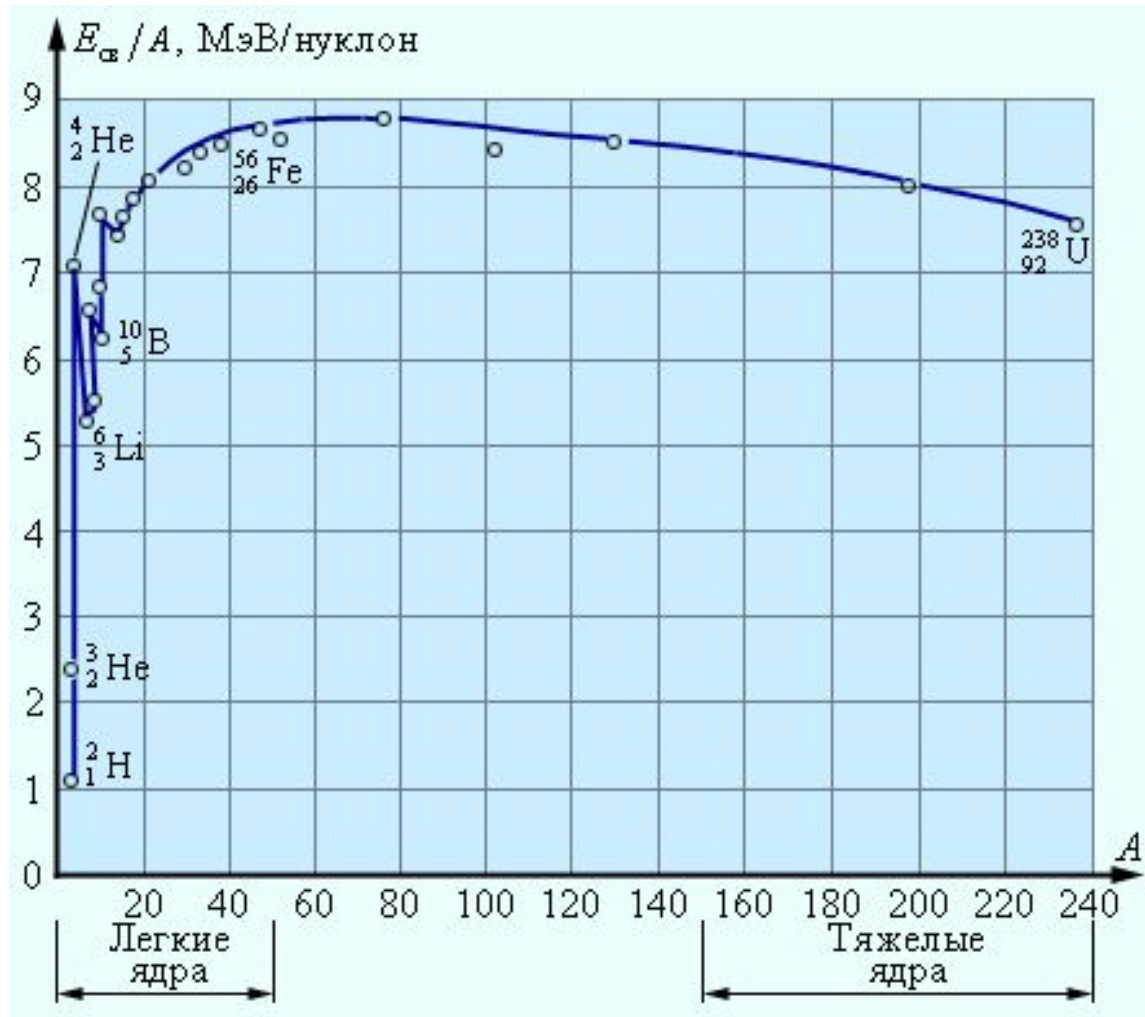
$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2 \quad \text{или} \quad E_{\text{св}} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m]c^2$$

**Удельная энергия связи** – энергия связи, приходящаяся на один нуклон.  
*Характеризует устойчивость атомных ядер – с  $\uparrow \epsilon_{\text{уд}}$  ядро устойчивее.*

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



## Удельная энергия связи ядер



Тяжелые и легкие ядра менее устойчивы, чем ядра средней части таблицы Менделеева.

**Зависимость  $\varepsilon_{уд}$  от  $A$  делает энергетически выгодными:**

1. Деление тяжелых ядер на более легкие (переходим из конца таблицы в ее середину, разность энергий связи выделяется в виде энергии реакции).
2. Слияние (синтез) легких ядер в более тяжелые - **термоядерная реакция** → переход из начала таблицы в середину, выделяется очень большая энергия → **реакции синтеза тяжелых ядер из легких энергетически более выгодны.**

*Деление ядер  $U$  или  $Pu$  под действием захватываемых ядрами нейтронов - в основе действия ядерных реакторов и обычной атомной бомбы.*

*Термоядерные реакции – в недрах Солнца и звезд, при взрывах водородных бомб.*

## Пример:

рассчитаем **энергию связи ядра гелия**  ${}^4_2\text{He}$ ,  
в состав которого входят два протона и два нейтрона.

Масса ядра гелия

$$M_{\text{я}} = 4,00260 \text{ а. е. м.}$$

Сумма масс двух протонов и двух нейтронов составляет

$$2m_{\text{p}} + 2m_{\text{n}} = 4,03298 \text{ а. е. м.}$$

дефект массы ядра гелия равен

$$\Delta M = 0,03038 \text{ а. е. м.}$$

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = 28,3 \text{ МэВ.}$$

Образование всего 1 г гелия сопровождается выделением энергии порядка  $10^{12}$  Дж.

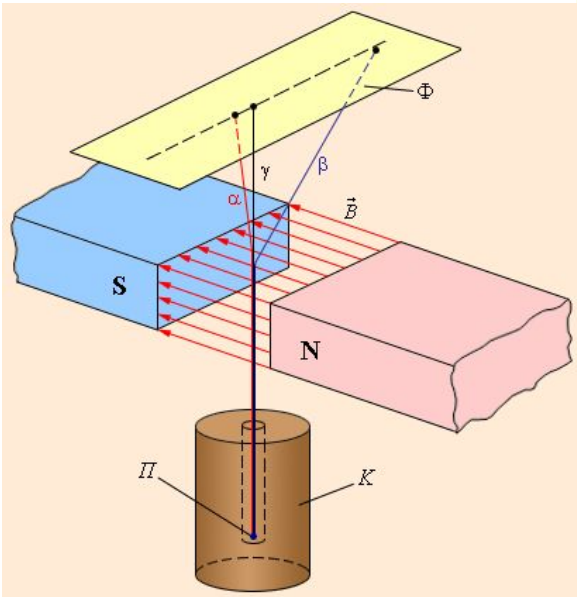
Примерно такая же энергия выделяется при сгорании почти целого вагона каменного угля.

## Естественная и искусственная радиоактивность.

**Радиоактивность** – превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц

**Естественная радиоактивность** – радиоактивность у существующих в природе неустойчивых изотопов.

**Искусственная радиоактивность** – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.



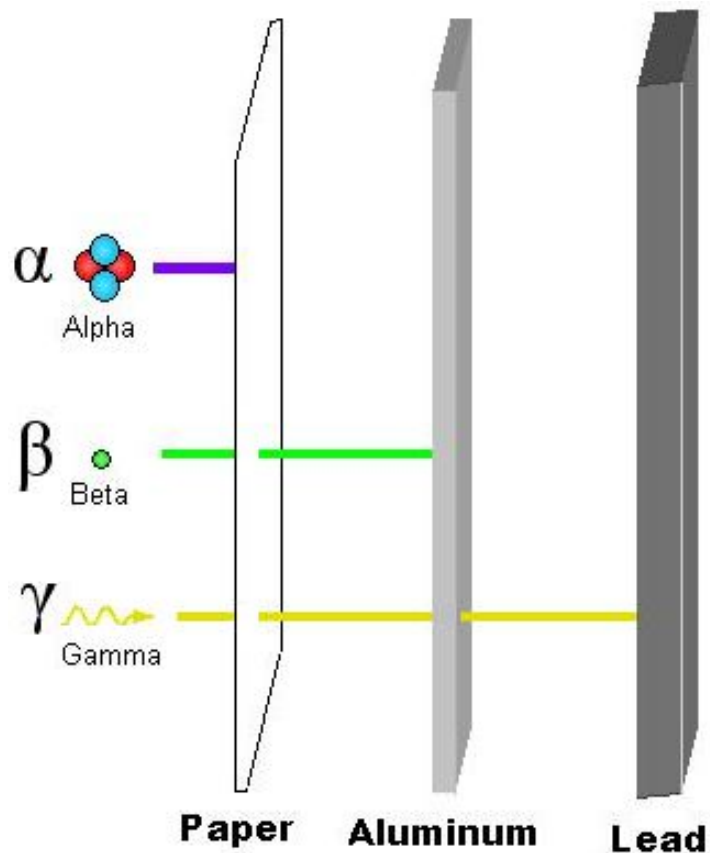
1896 – А.Беккерель – U-соль испускает лучи, проходящие через бумагу, дерево, тонкие металлические пластинки, ионизируют воздух становится проводником электричества.

Э.Резерфорд – Эти лучи содержат минимум 2 компоненты, различающиеся проникающей способностью.  
*Менее проникающее излучение –  $\alpha$ -лучи, более –  $\beta$ -лучи.*

1900 - П.Виллар – Третий компонент радиоактивного излучения -  $\gamma$ -лучи.

Схема опыта по обнаружению  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений.

К – свинцовый контейнер, П – радиоактивный препарат, Ф – фотопластинка.



В 1898г. французские физики М. и П. Кюри обнаружили радиоактивность тория и открыли два новых радиоактивных элемента – **полоний Po** и **радий Ra**

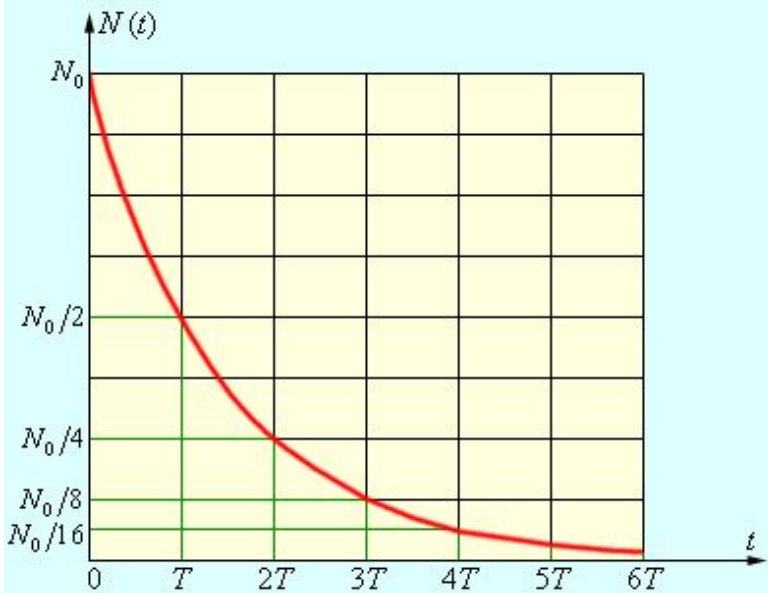


Радиоактивными являются все химические элементы с  $Z > 83$ , у элементов с  $Z < 83$  имеются отдельные радиоактивные изотопы.

**Установлено:** *все воздействия (механическое, давление, температура, электрическое и магнитное поля) не влияют на характер радиоактивного излучения.*

**Радиоактивное излучение является следствием внутриядерных процессов.**

# Закон радиоактивного распада



$N$  – число радиоактивных ядер в данный момент времени;

$dN$  – уменьшение их числа за промежуток  $dt$

$$dN = -\lambda N dt$$

$\lambda$  - постоянная для данного радиоактивного элемента, определяет вероятность распада каждого отдельного ядра атома за 1 с - **постоянная радиоактивного распада**;  
«-» показывает, что число **нераспавшихся радиоактивных ядер убывает**.

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

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

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

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

Для описания радиоактивного распада используют:

**1. Среднее время жизни ( $\tau$ )** – время, в течение которого число нераспавшихся ядер уменьшается в  $e$  раз.

$$\frac{N_0}{e} = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_0 e^{-1} = N_0 e^{-\lambda t}$$

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

**2. Период полураспада ( $T$ )** – промежуток времени, по истечении которого начальное число  $N_0$  ядер радиоактивного вещества уменьшается вдвое.

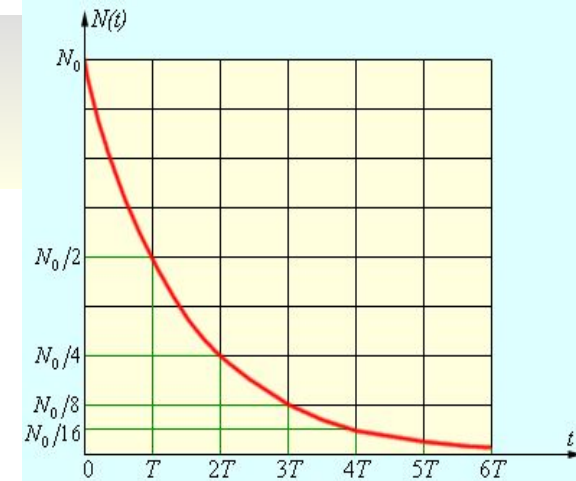
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

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

$$\ln 2 = \lambda T$$

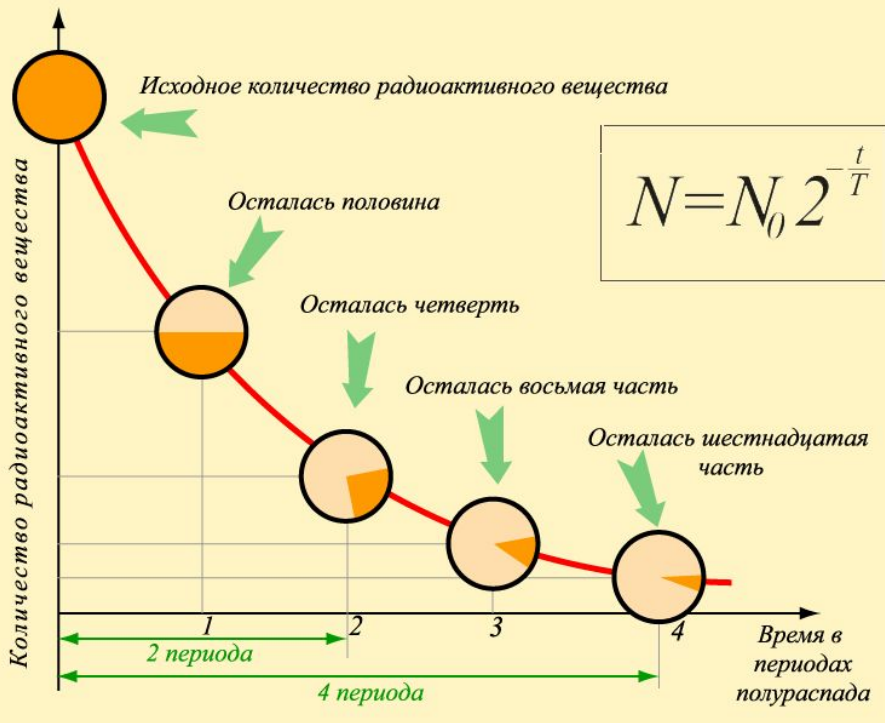
$$N = N_0 2^{\frac{-t}{T}}$$

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



$T$  ядер от  $10^{-7}$  до  $10^{16}$  лет ( $^{238}\text{U} \approx 4,5$  млрд лет,  $^{226}\text{Ra} - 1620$  лет,  $^{23}\text{Mg} - 11,6$  с)





**Активность радиоактивного вещества** – число ядер, распавшихся за единицу времени.

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \frac{d}{dt} (N_0 e^{-\lambda t}) = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = \lambda N$$

$$a_0 = N_0 \lambda$$

**- активность радиоактивного вещества в начальный момент времени.**

Единицей активности в системе СИ являются **беккерель (Бк)**:

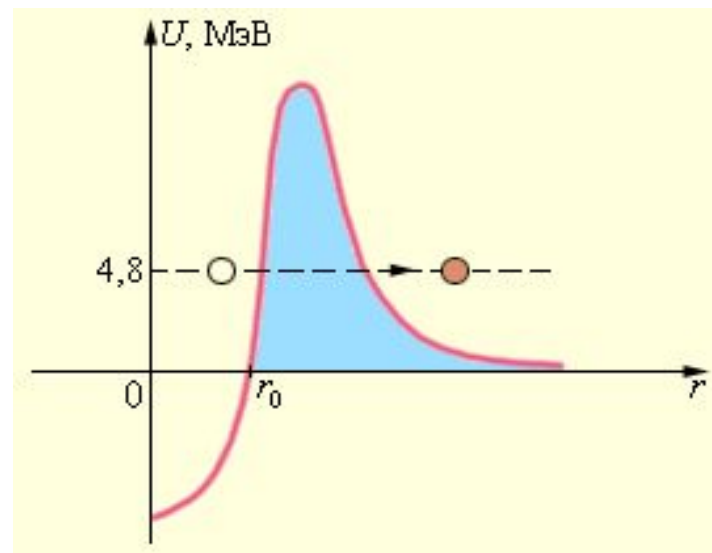
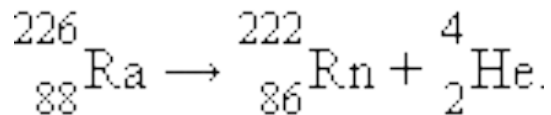
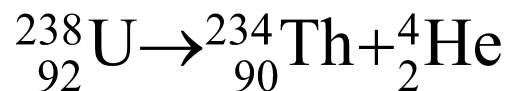
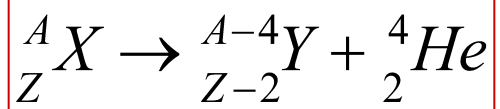
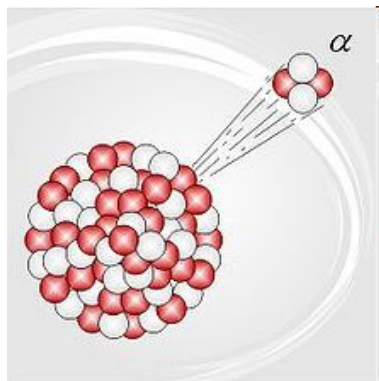
1 Бк = 1 распад/секунда - активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада.

**кюри (Ки)**:

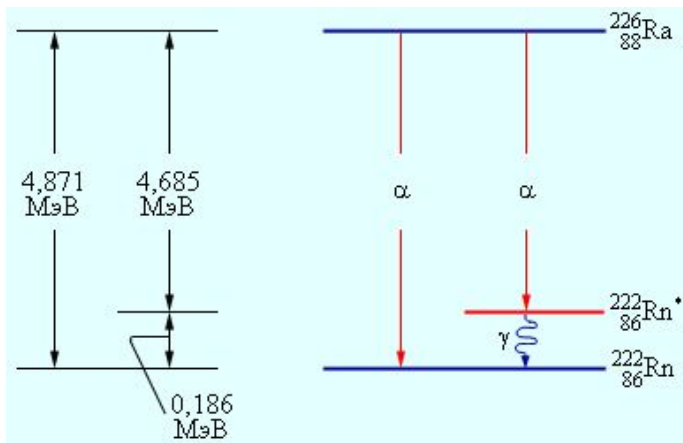
1 Ки =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Бк (это активность 1г. чистого урана).

# Альфа – распад

Все радиоактивные распады происходят в соответствии с правилами смещения, являющимися следствием законов сохранения электрического заряда и массового числа.



Туннелирование  $\alpha$ -частицы  
сквозь потенциальный барьер



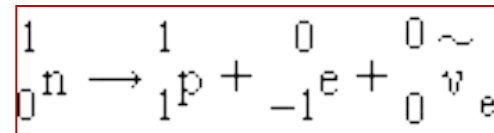
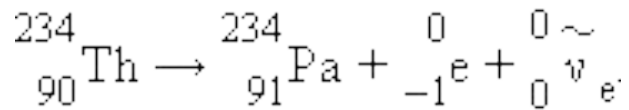
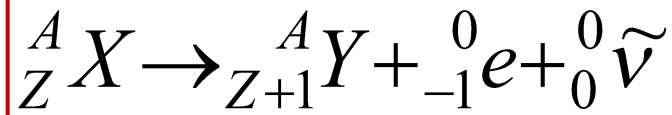
**Длина пробега (пробег)  $\alpha$ -частицы** – расстояние, на котором она производит ионизацию.

Н.у. в воздухе пробег  $\leq 4$  см, зависит от источника  $\alpha$ -частиц (для  ${}^{238}\text{U}$  – 2,7 см,  ${}^{226}\text{Ra}$  – 3,3 см,  ${}^{232}\text{Th}$  – 2,8 см).

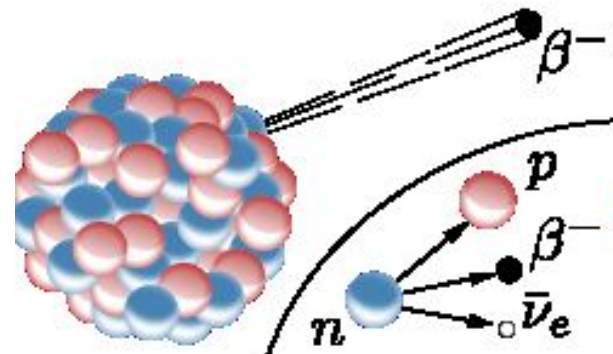
В жидкостях и твердых телах – миллионные доли метра.

# Бета- распад

1)  $\beta^-$ -распад (электронный):

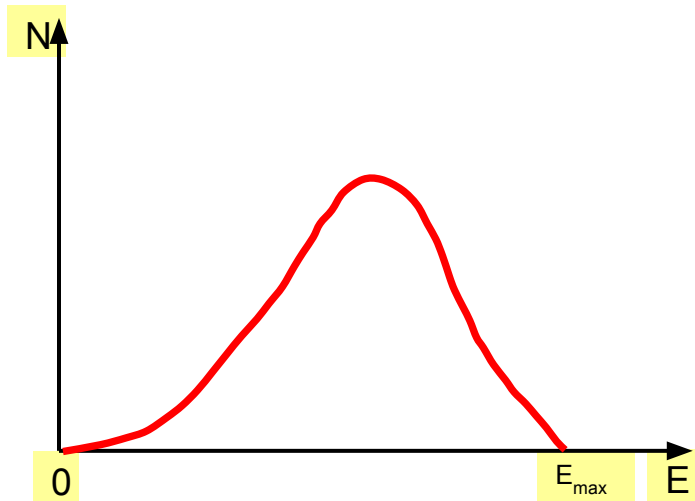


$\begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \tilde{\nu}_e$  - электронное антинейтрино.



## Гипотеза о существовании нейтрино (антинейтрино) была обусловлена:

1. Энергетический спектр электронов (позитронов) при  $\beta$ -распаде непрерывен (в отличие от  $\alpha$ -частиц), с резко обозначенным максимальным значением  $E_{\text{кин}}$ .



$N$  – число частиц с данной  $E$ . Иногда обозначают  $dN/dt$  ( $dN$  – число электронов, энергия которых заключена в интервале  $dE$ ).

=> Распады, при которых  $E$  электрона  $< E_{\text{max}}$ , протекают с кажущимся нарушением закона сохранения энергии.

Введение  $\nu(\bar{\nu})$ , обладающих энергией, решает проблему.

2. При  $\beta$ -распаде число нуклонов в ядре не изменяется (не изменяется массовое число  $A$ ). Не должен меняться спин ядра.

Вылет электрона должен изменить спин ядра на  $\frac{1}{2}\hbar$ . Противоречие закону сохранения импульса спина.

Введение  $\nu(\bar{\nu})$ , имеющего спин  $\frac{1}{2}\hbar$ , устраняет кажущееся нарушение закона сохранения спина.

1956 – Дэвис- экспериментальное доказательство существования  $\nu$ ; Ли, Янг, Ландау –  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  имеют нулевую массу покоя, отличаются направлением спинов ( у  $\nu$  - против движения, у  $\bar{\nu}$  - по движению).

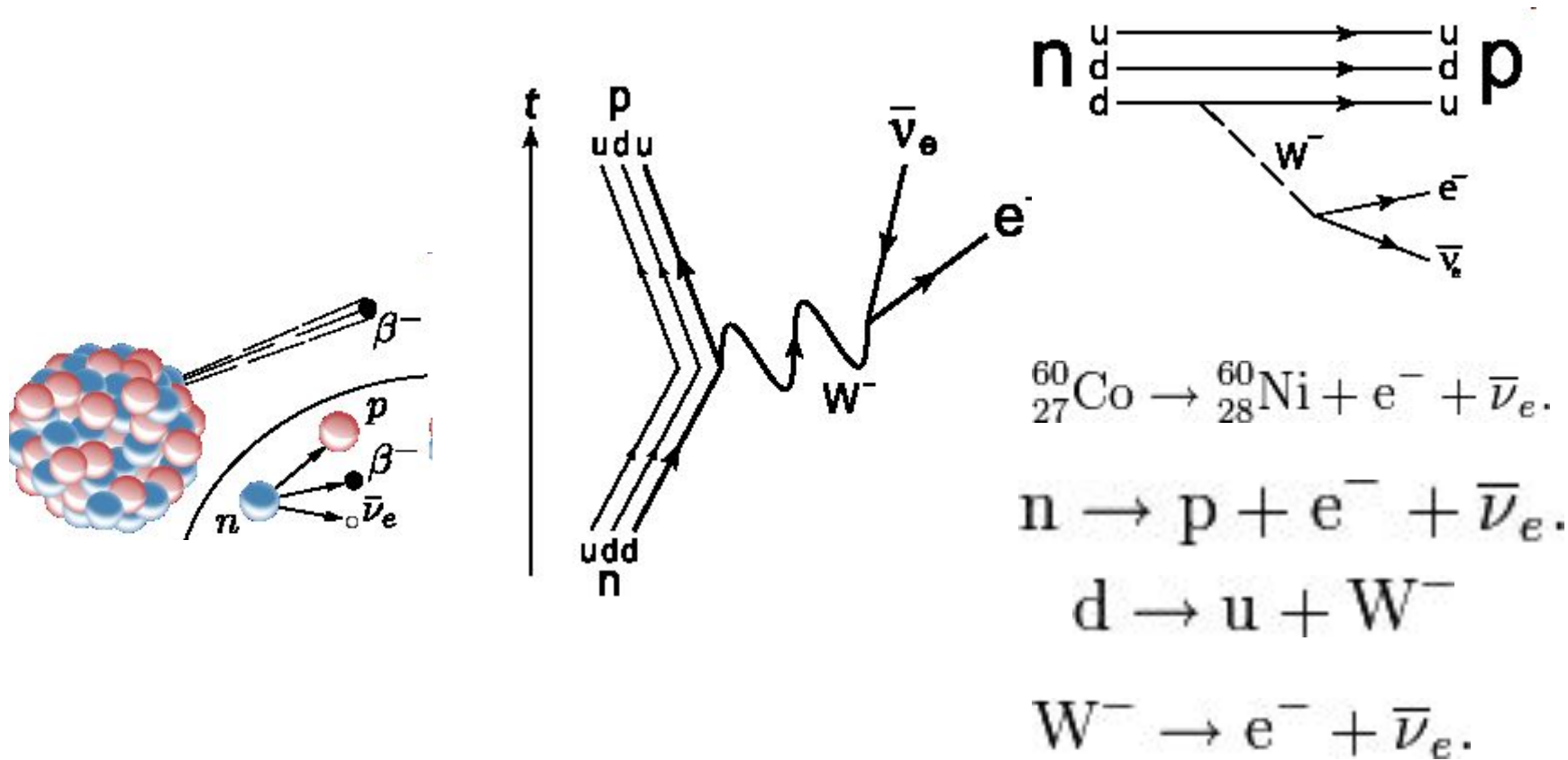
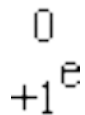
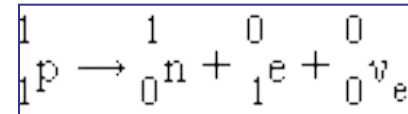
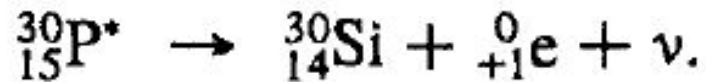
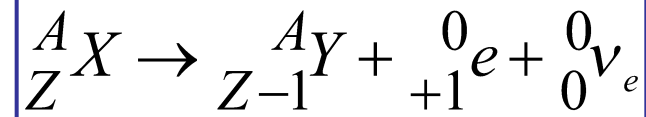
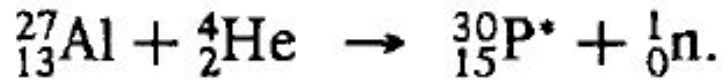


Диаграмма Фейнмана для бета-распада нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино при участии тяжёлого  $W$  бозона

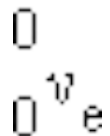
## Бета- распад

2)  $\beta^+$ -распад (или позитронный) :

**Искусственная радиоактивность** – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.



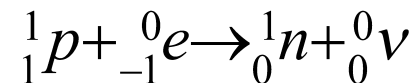
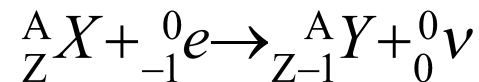
Позитрон. Существование позитрона было предсказано выдающимся физиком [П. Дираком](#) в 1928 г.



Нейтрино - это электрически нейтральная элементарная частица с о спином и нулевой (скорее  $< 10^{-4}m_e$ ) массой покоя. Проникающая способность нейтрино столь огромна, что затрудняет удержание этих частиц в приборах. Пробег нейтрино с энергией 1 МэВ в свинце составляет 1018м.

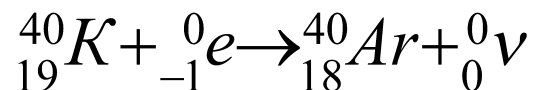
### 3. Электронный захват ( $e$ -захват или $K$ -захват)

1937 Луис Волтер Альварес



Ядро поглощает  $K$ -электрон (реже  $L$ - или  $M$ -электрон) атома, в результате один из протонов превращается в нейтрон, испуская нейтрино:

Если возникшее ядро в возбужденном состоянии  $\rightarrow$  испускание  $\gamma$ -фотона при переходе в более низкое энергетическое состояние.

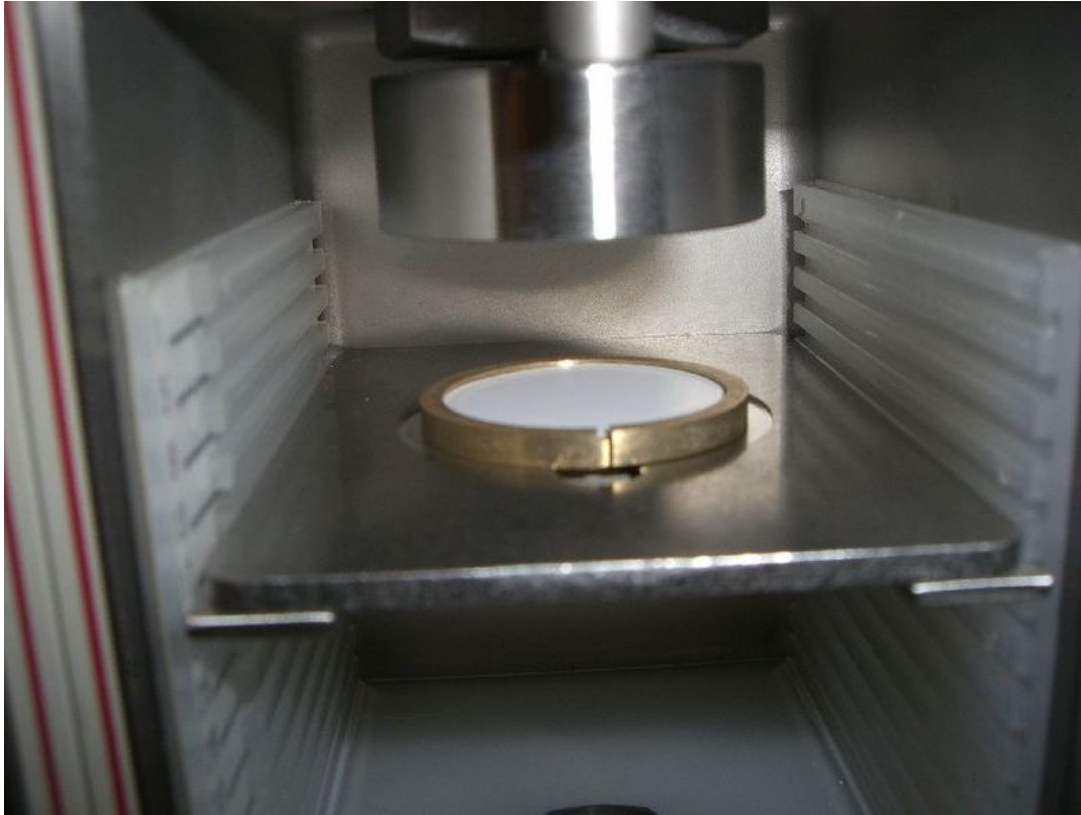


$\alpha$ -распад наблюдается только у самых тяжелых ядер,  $\beta$ -активные ядра более многочисленны.

Для ядер с  $Z < 100$  (без исключения) существуют нестабильные изотопы, обладающие  $\beta^+$ -активностью. Выделяемая в процессе распада энергия  $0.02 \div 16.6$  МэВ.



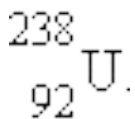
Период полураспада  $\beta$ -активных ядер от  $10^{-2}$  с до  $4 \cdot 10^{12}$  лет .



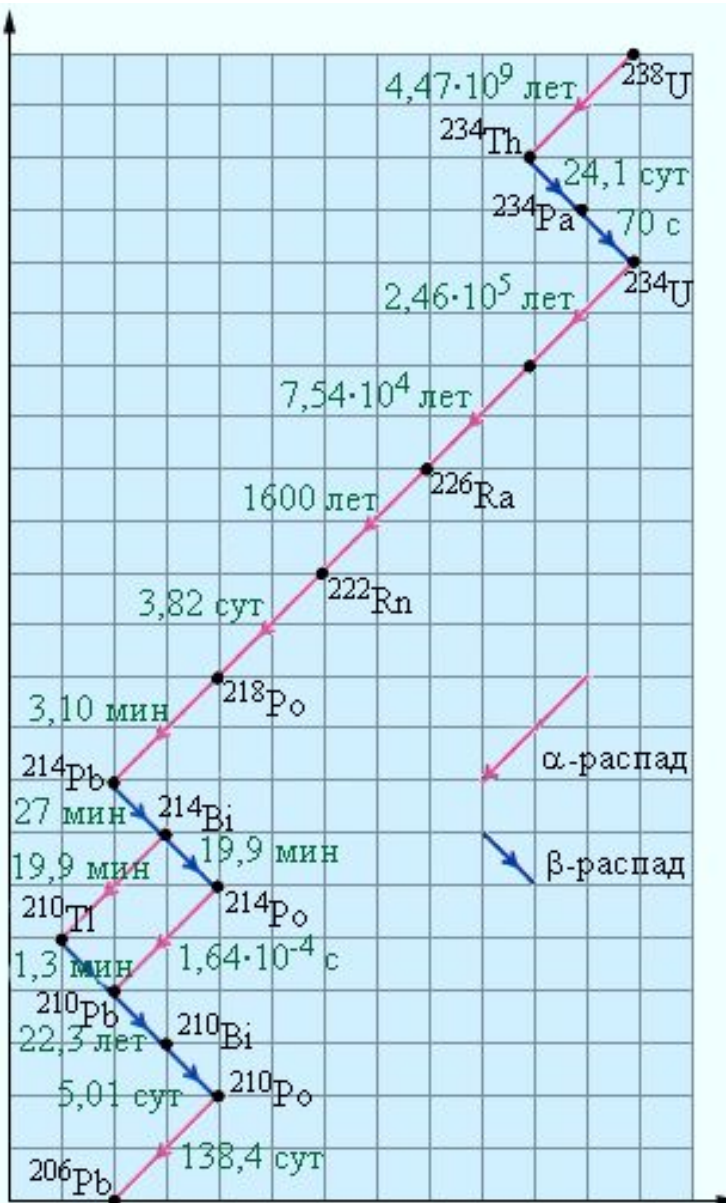
Alpha source beneath a radiation detector



Схема распада радиоактивной  
серии  $^{238}_{92}\text{U}$ .



Указаны периоды полураспада



**$\gamma$ -излучение** - коротковолновое э/м излучение с  $\lambda < 10^{-10}$  м, поток  $\gamma$ -квантов (фотонов).

Не отклоняется э/ м полем. Слабая ионизирующая способность, большая проникающая способность (проходит через слой Pb d=5 см).

**Падая на кристалл  $\gamma$ -излучение дает явление дифракции.**

*Излучение ядрами  $\gamma$ -квантов не самостоятельный процесс.  $\gamma$ -излучение сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады, не приводит к изменению структуры ядер. Может возникать при ядерных реакциях, торможении заряженных частиц.*

**Опасно для биологических объектов !**

$\gamma$ -излучение испускается дочерним ядром. Если в момент образования оно в возбужденном состоянии  $\rightarrow$  через  $10^{-13} \div 10^{-14}$  с переходит в основное состояние с испусканием  $\gamma$ -квантов.

$\gamma$ -излучение одного и того же радиоактивного изотопа может содержать несколько групп  $\gamma$ -квантов с отличающимися энергиями.

При радиоактивных распадах ядер  $\gamma$ -кванты имеют энергии от 0,01 до 5 МэВ.

$\gamma$ -спектр (распределение  $\gamma$ -квантов по энергиям) является линейчатым.

При  $\gamma$ -излучении A и Z числа не меняются  $\rightarrow$  оно не описывается правилами смещения.

$\gamma$ -кванты не несут кулоновского заряда  $\rightarrow$  не испытывают влияния кулоновских сил.

Прохождение  $\gamma$ -излучения через вещество сопровождается его поглощением.

При прохождении вещества толщиной  $dx$  интенсивность излучения меняется на  $dI$

$$dI = -\mu I dx$$

$\mu$  – линейный коэффициент поглощения, зависит от свойств вещества и энергии  $\gamma$ -квантов

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^x \mu dx \qquad \ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Зависимость интенсивности  $\gamma$ -излучения  $I$  на глубине  $x$  от  $I_0$  падающего узкого пучка на вещество и от  $\mu$ .

Ослабление интенсивности  $\gamma$ -излучения – результат взаимодействия  $\gamma$ -квантов с электронной оболочкой атомов вещества и с их ядрами.

## Процессы взаимодействия $\gamma$ -излучения с веществом:

**1. Фотоэффект (фотоэлектрическое поглощение  $\gamma$ -излучения) – процесс, при котором атом поглощает  $\gamma$ -квант и испускает электрон.**

*Электрон выбивается из внутренних оболочек атома, освободившееся место заполняется е из вышележащих оболочек → фотоэффект сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.*

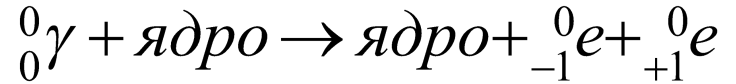
*Фотоэффект происходит при взаимодействии  $\gamma$ -квантов со связанными электронами.*

**Фотоэффект – преобладающий механизм поглощения  $\gamma$ -квантов при  $E_\gamma \leq 100$  кэВ, т.е. менее 0,1 МэВ. При  $E_\gamma \approx 0,5$  МэВ вероятность фотоэффекта мала. Основной механизм в этом случае →**

**2. Комptonовское рассеяние – упругое рассеяние коротковолнового э/м излучения (рентгеновского и  $\gamma$ ) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.**

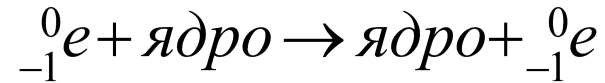
**При  $\uparrow E$   $\gamma$ -квантов до  $E > 1,02$  МэВ ( $=2m_e c^2$ ) становится возможно →**

### 3. Образование электронно-позитронных пар.



Вероятность этого процесса  $\sim Z^2$  и  $\uparrow$  с ростом  $E_\gamma$ . При очень больших энергия ( $E_\gamma \approx 10$  МэВ) основной процесс взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом – образование электронно-позитронных пар.

*При прохождении возникшего электрона через вещество, он может тормозиться :*



Возникает снова  $\gamma$ -квант, называемый **тормозным**.  
Взаимодействует с ядром  $\rightarrow$  рождение новой  $e^-e^+$  пары.  
 $\rightarrow$  Электронно-фотонная лавина.  
Процесс прекращается, когда  $E$  образовавшихся частиц станет меньше критической.

4. Если  $E_\gamma$  превышает энергию связи нуклонов (7-8 МэВ), может наблюдаться **ядерный фотоэффект** – выброс из ядра одного из нуклонов (чаще протона).

**$\alpha$ -**,  **$\beta$ -распады** (в том числе **электронный захват**),  **$\gamma$ -излучение**, **спонтанное деление тяжелых ядер**, **протонную радиоактивность** (ядро испускает 1 или 2 протона – 1969 – Флеров) относят к числу **радиоактивных процессов**.

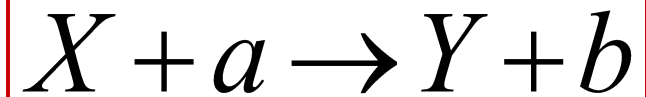
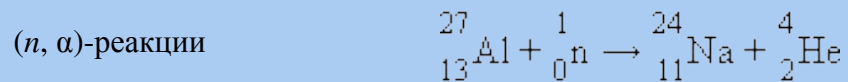
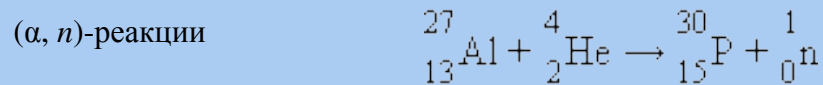
Фотография пары электрон-позитрон, образованной в камере Вильсона гамма-квантом на ядре криптона. Камера помещена в магнитное поле, которое отклоняет отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный позитрон в противоположные стороны.

# Ядерные реакции

**Ядерная реакция** – искусственное превращение атомных ядер, вызванное их взаимодействием друг с другом или с частицами

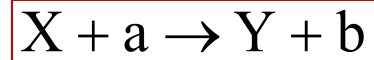
*Взаимодействие частиц – при сближении до расстояний  $\sim 10^{-13}$  см - благодаря действию ядерных сил.*

**Наиболее распространенный вид ядерной реакции – взаимодействие легкой частицы  $a$  с ядром  $X$**

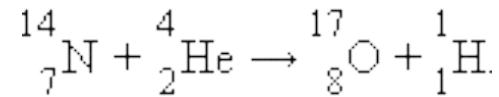


$a$  и  $b$  – нейтрон, протон, дейтрон,  $\alpha$ -частица,  $\gamma$ -фотон

# Ядерные реакции



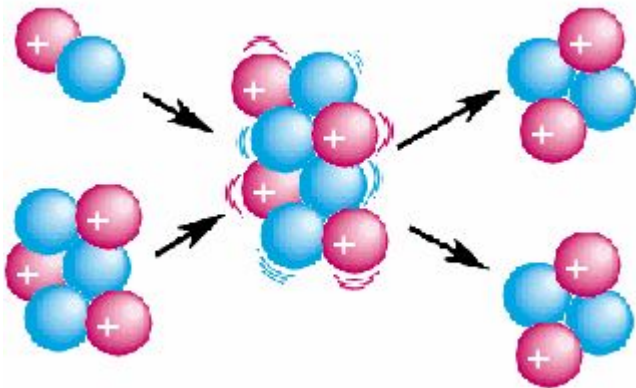
Первая ядерная реакция была осуществлена [Э. Резерфордом](#) в 1919 году



**Энергетический выход** ядерной реакции:

$$Q = (M_X + M_a - M_Y - M_b)c^2 = \Delta Mc^2$$

Сумма масс исходных ядер больше суммы масс конечных ядер  $\rightarrow$  реакция с выделением энергии (энергия реакции положительная) – **экзотермические реакции**. С поглощением энергии – **эндотермические реакции**



Ядерные реакции могут сопровождаться поглощением или выделением энергии.

**Тепловой эффект (энергия реакции)** – количество выделяющейся энергии ( $> 0$  или  $< 0$ ).

Сумма масс исходных ядер больше суммы масс конечных ядер  $\rightarrow$  реакция с выделением энергии (энергия реакции положительная) – **экзотермические реакции**.

С поглощением энергии – **эндотермические реакции**.

1936 – Н. Бор – вызываемые быстрыми частицами ядерные реакции протекают в 2 этапа:

1. Ядро  $X$  захватывает приближившуюся к нему частицу  $a$ , образуя промежуточное ядро  $\Pi$  («ядро-мишень»  $X$  сливается с бомбардирующей частицей  $a$ , образуя новое ядро  $\Pi$ ).

Промежуточное ядро называют **составным ядром** или **компаунд-ядром**. Оно в возбужденном состоянии.

Время жизни составного ядра  $10^{-14} \div 10^{-12}$  с.

2. Составное ядро испускает частицу  $b$ .



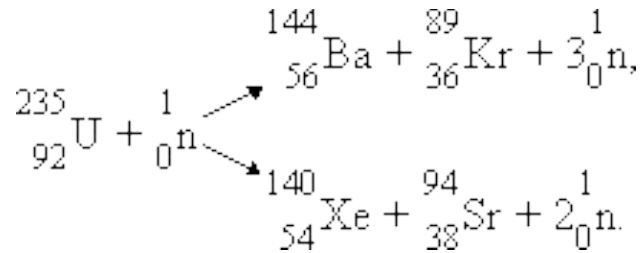
Реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами, протекают без образования промежуточного ядра. Называют **прямыми ядерными взаимодействиями**.

При ядерных реакция выполняются закон сохранения: электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса, момента импульса.

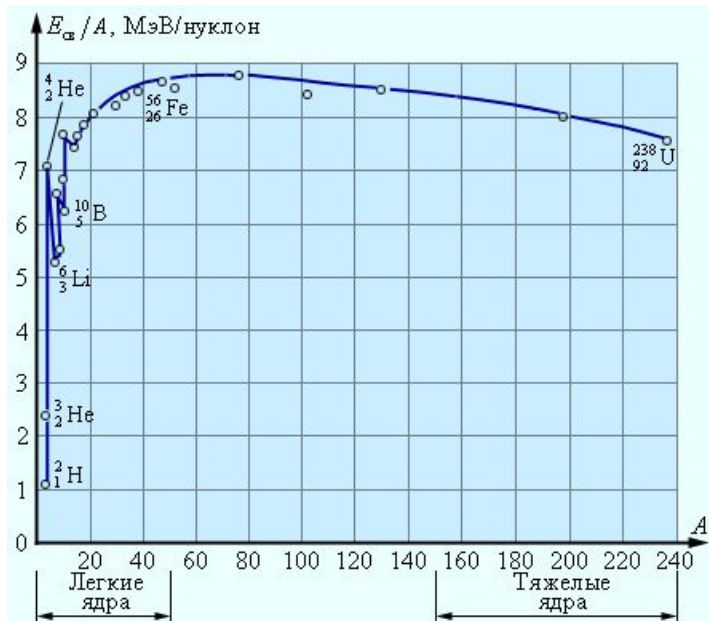


## Деление тяжелых ядер Цепная реакция деления

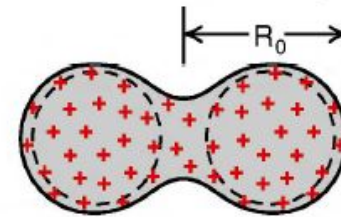
1939 г. О. Ган и Ф. Штрассман



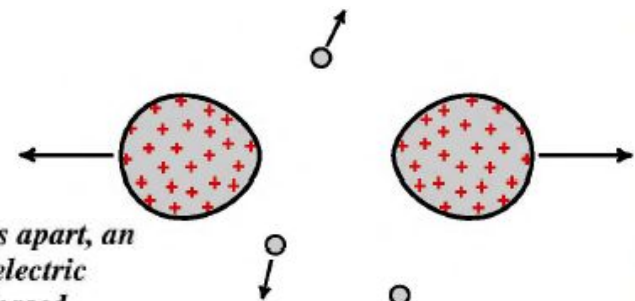
Для осуществления цепной реакции необходимо, чтобы так называемый **коэффициент размножения нейтронов** был больше единицы.



*Styrofoam model of a Uranium nucleus in a dumbbell shape.*

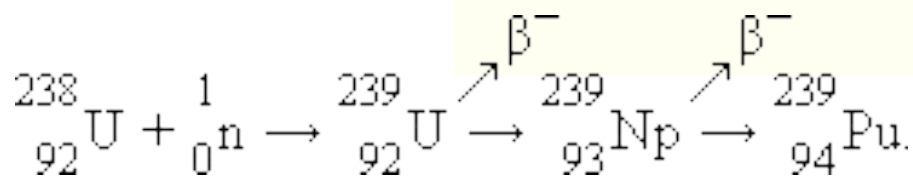
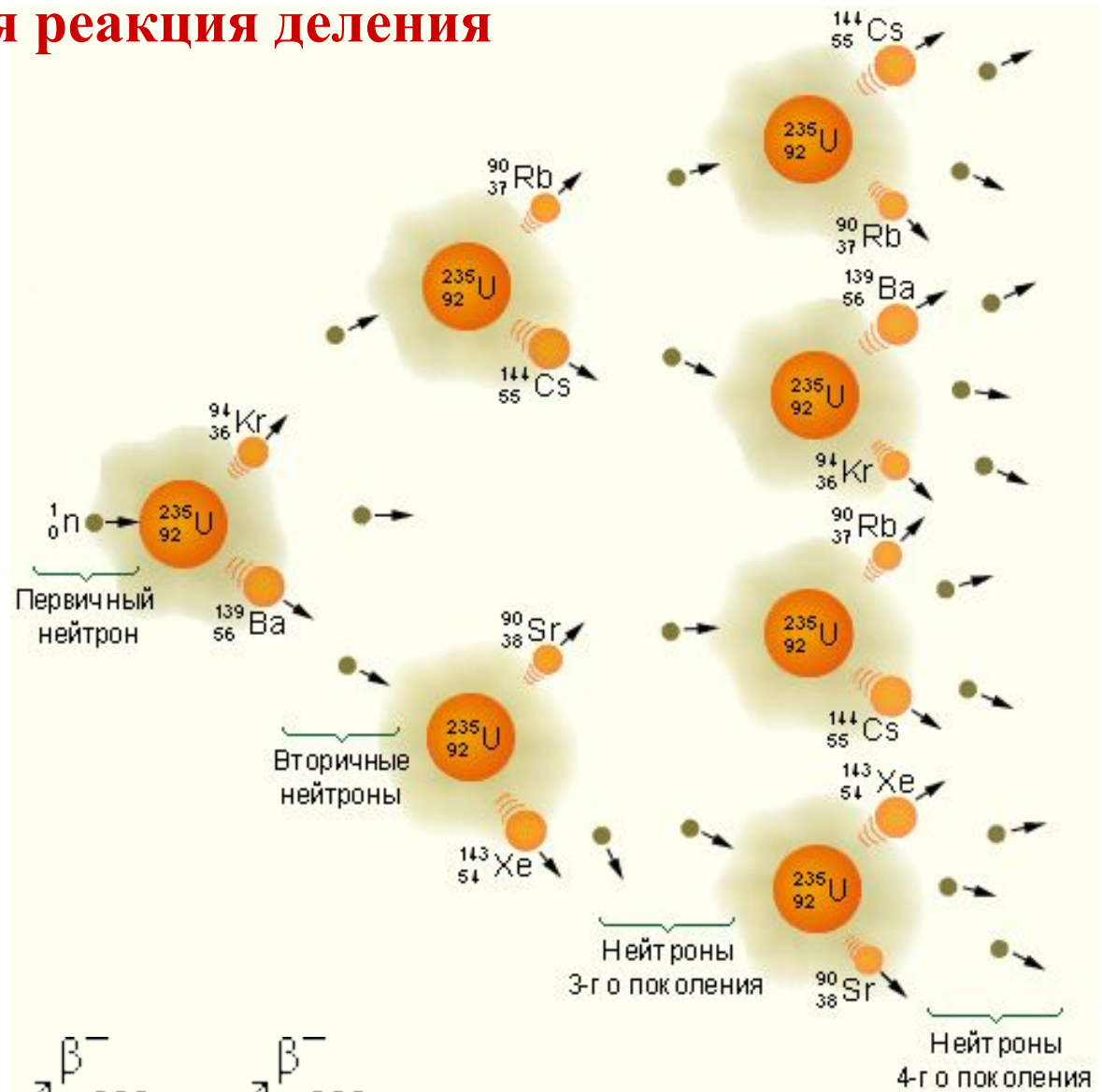


*Uranium nucleus in a dumbbell shape.*

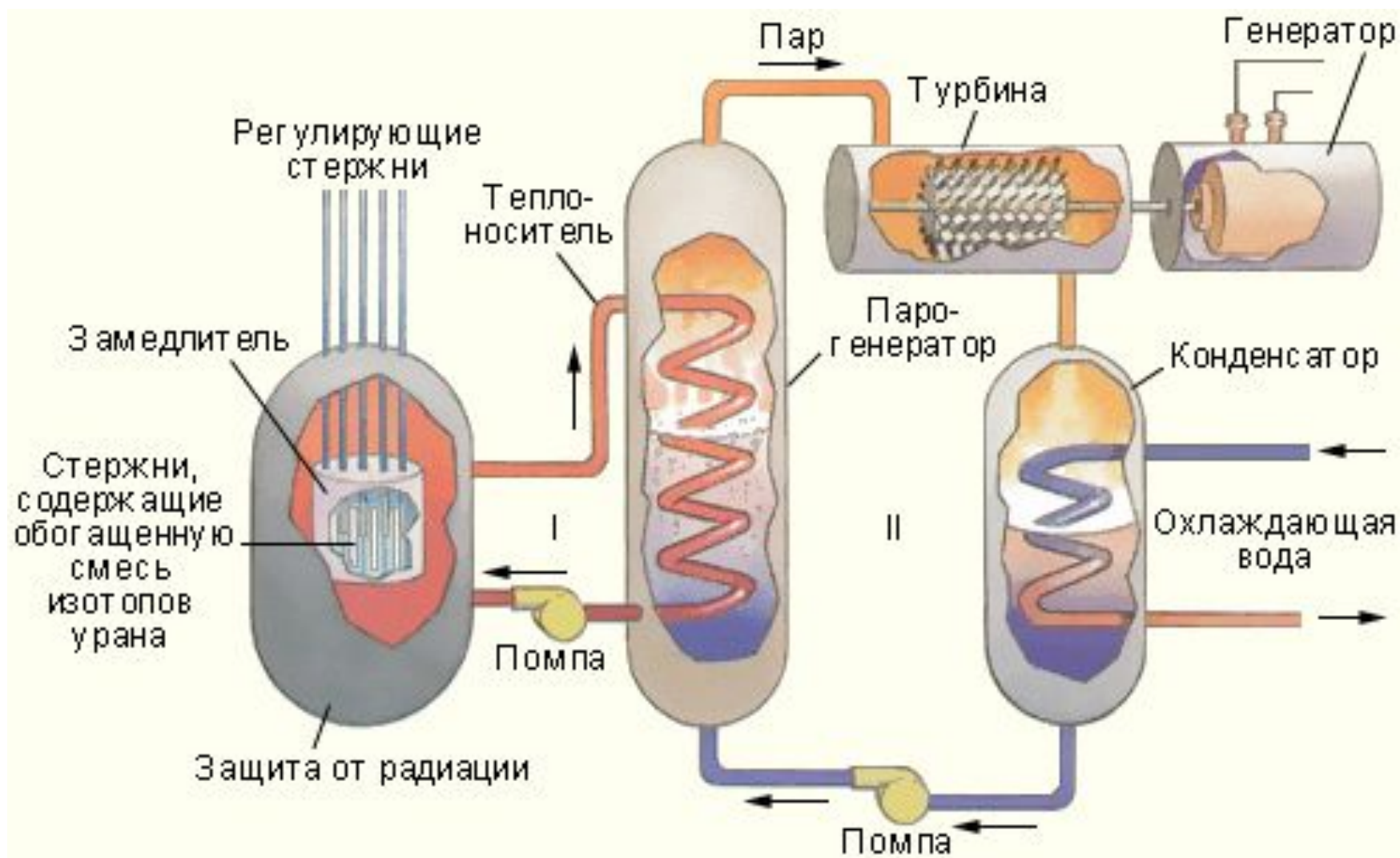


*When the nucleus flies apart, an enormous amount of electric potential energy is released.*

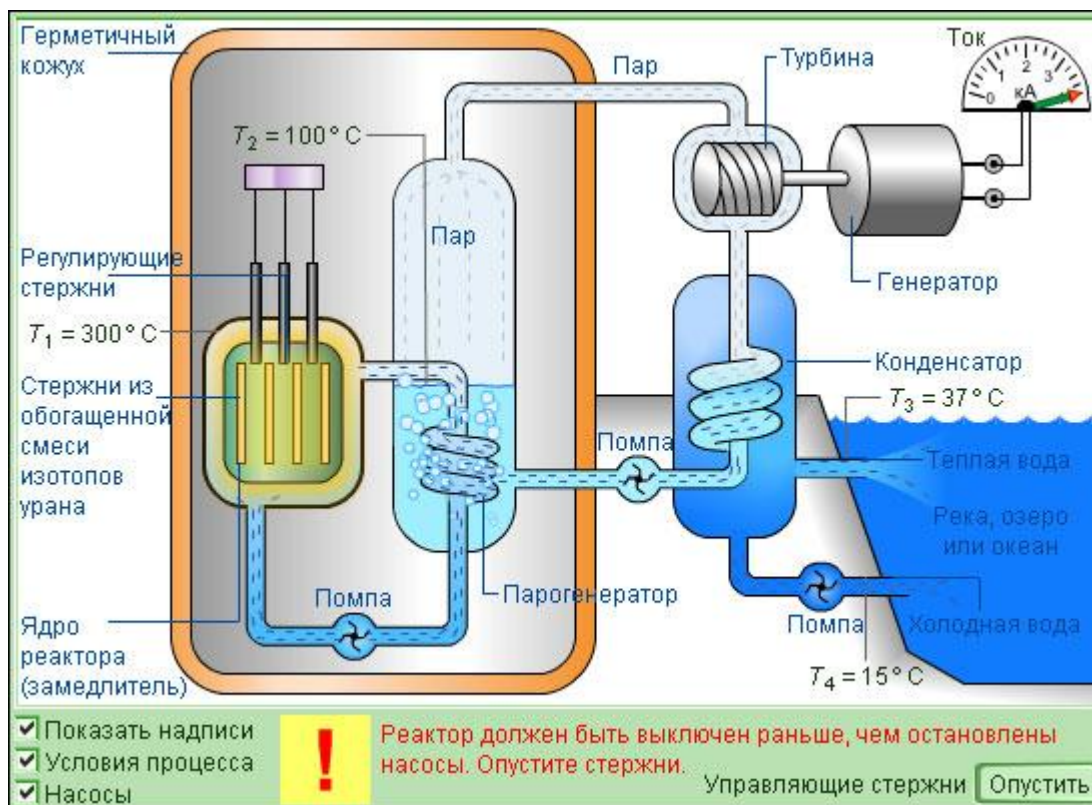
# Цепная реакция деления

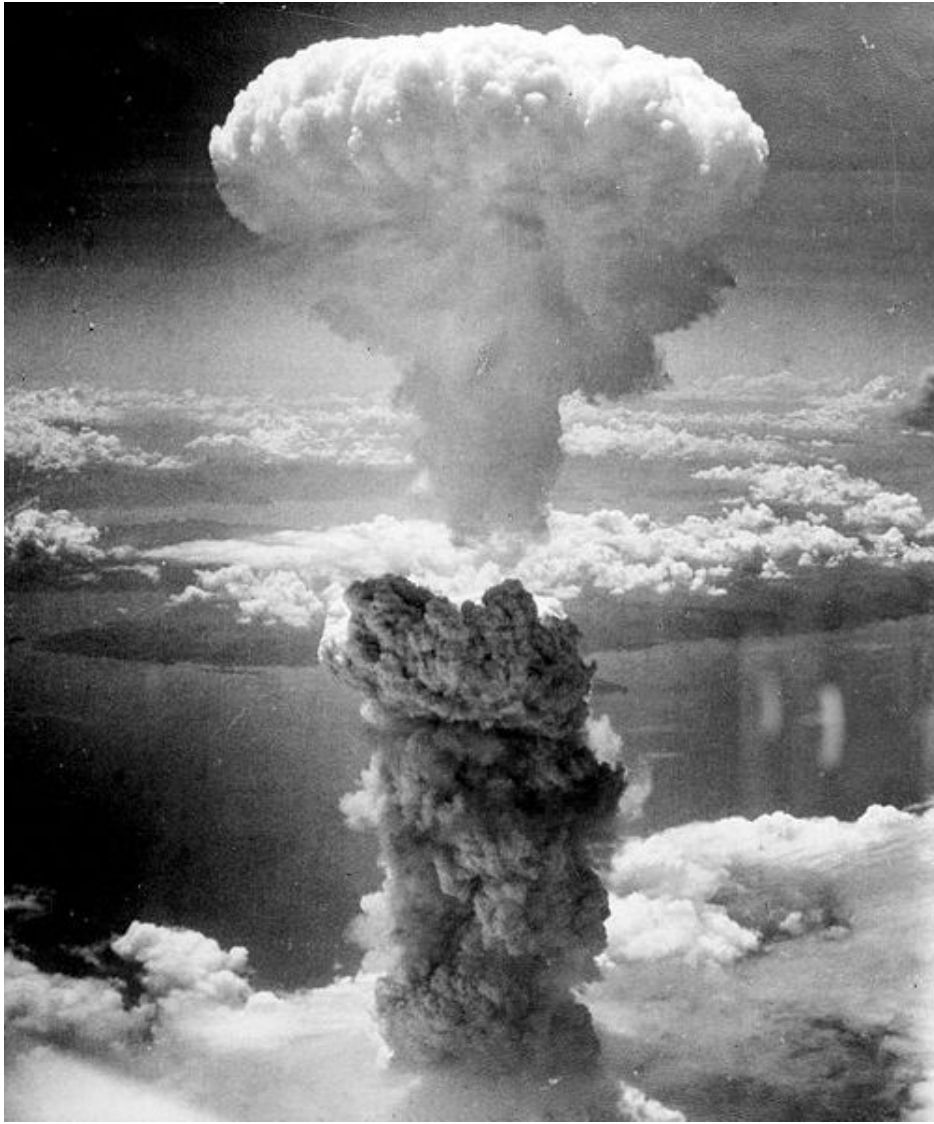


## Схема ядерного реактора



Первый ядерный реактор был построен в 1942 году в США под руководством Э. Ферми. В нашей стране первый реактор был построен в 1946 году под руководством [И. В. Курчатова](#).





**Взрыв атомной бомбы в Нагасаки (1945)**



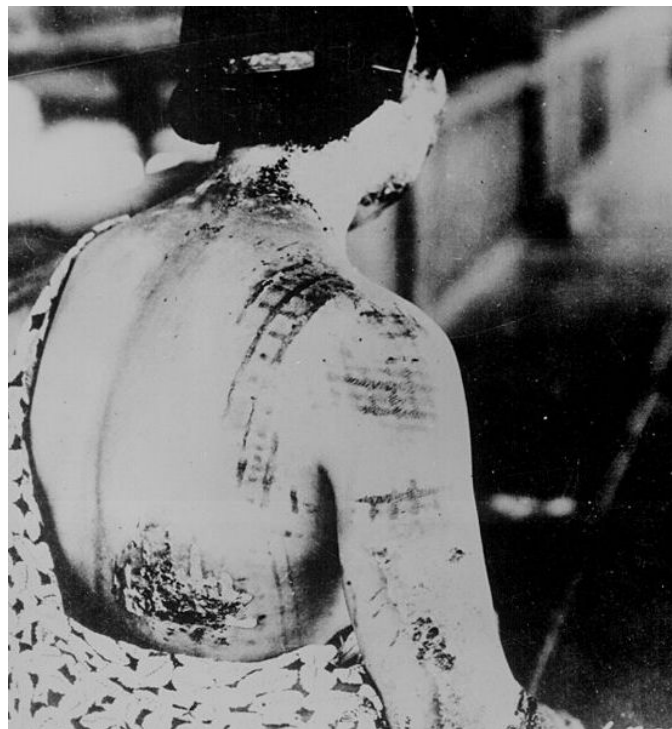
**Взрыв советского ядерного устройства на Семипалатинском полигоне 29 августа 1949 года. 10 часов 05 минут.**



При подрыве ядерного боеприпаса происходит ядерный взрыв, поражающими факторами которого являются:

**световое излучение**  
**ионизирующее излучение**  
**ударная волна**  
**радиоактивное заражение**  
**электромагнитный импульс**  
**психологическое воздействие**

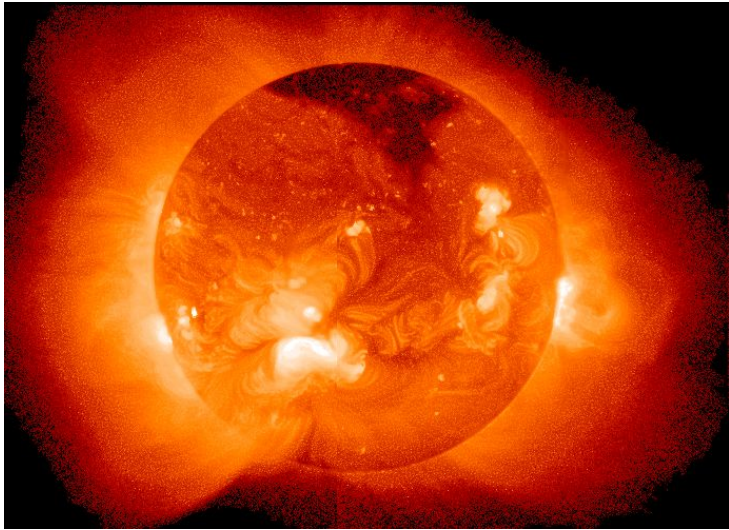
**изменения в половой системе**  
**склеротические процессы**  
**лучевую катаракту**  
**иммунные болезни**  
**радиоканцерогенез**  
**сокращение продолжительности**  
**жизни**  
**генетические и тератогенные**  
**эффекты**



Japanese woman suffering burns from thermal radiation after the United States dropped nuclear bombs on Japan in World War II.

Дата	Название	Мощность, кт	Государство	Значение
16 июля 1945	<b>Тринити</b>	19	США	<b>Первый атомный взрыв</b>
6 августа 1945	<b>Малыш</b>	11	США	<b>Бомбардировка Хиросимы</b>
9 августа 1945	<b>Толстяк</b>	21	США	<b>Бомбардировка Нагасаки</b>
29 августа 1949	<b>РДС-1</b>	22	СССР	<b>Первый атомный взрыв в СССР</b>
3 октября 1952	<b>Ураган</b>	25	Великобритания	<b>Первый атомный взрыв в Великобритании</b>
1 ноября 1952	<b>Иви Майк</b>	3100	США	<b>Первый экспер. взрыв термоядер. устройства</b>
12 августа 1953	<b>Джо-4</b>	400	СССР	<b>Первый взрыв боевого термоядерного устройства</b>
1 марта 1954	<b>Касл Браво</b>	15 000	США	<b>Самый мощный взрыв в США</b>
8 ноября 1957	<b>Схватка X</b>	1800	Великобритания	<b>Первый термояд. взрыв в Великобритании</b>
13 февраля 1960	<b>Голубой тушканчик</b>	60	Франция	<b>Первый атомный взрыв во Франции</b>
31 октября 1961	<b>Царь-бомба</b>	58 000	СССР	<b>Взрыв самой мощной термоядерной бомбы в истории</b>
16 октября 1964	<b>596</b>	22	КНР	<b>Первый атомный взрыв в Китае</b>
17 июня 1967	<b>Тест 6</b>	3300	КНР	<b>Первый термоядерный взрыв в Китае</b>
24 августа 1968	<b>Канопус</b>	2600	Франция	<b>Первый термоядерный взрыв во Франции</b>
18 мая 1974	<b>Улыбающийся Будда</b>	12	Индия	<b>Первый атомный взрыв в Индии</b>
28 мая 1998	<b>Чагаи-I</b>	~9	Пакистан	<b>Первый атомный взрыв в Пакистане</b>
9 октября 2006	<b>Квандай-ри</b>	15—20	КНДР	<b>Первый атомный взрыв в Северной Корее</b>

## Термоядерный синтез.



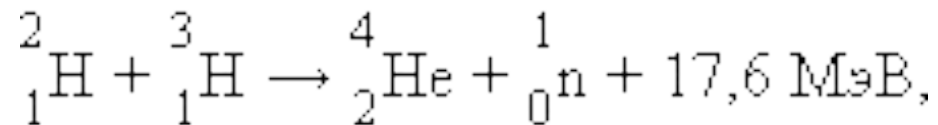
Слияние легких ядер в одно ядро (ядерный синтез) сопровождается выделением большой энергии.

Для осуществления реакции синтеза ядра надо сблизить на расстояние действия ядерных сил ( $\sim 10^{-14} \div 10^{-15}$  м). Для этого нужно преодолеть кулоновское отталкивание (p и др. легкие ядра заряжены «+»).

Для преодоления потенциального барьера, обусловленного отталкиванием, ядра должны обладать  $E_{\text{кин}}$  ( $\sim 0,35$  МэВ), соответствует  $T \sim 2 \cdot 10^9$  К. На поверхности Солнца 6000 К, центральных областей Солнца  $1,3 \cdot 10^7$  К.

Реакция дейтерий + тритий (Топливо D-T)

Самая легко осуществимая реакция — дейтерий + тритий:



Недостаток её- выход нежелательной нейтронной радиации.

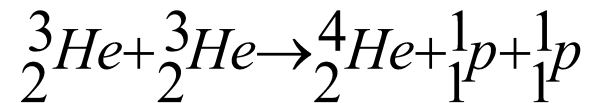
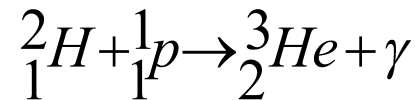
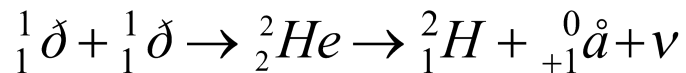


Термоядерные реакции – источник энергии Солнца и звезд ( $T \sim 10^7 \div 10^8$  К).

Два пути синтеза ядер водорода в ядра гелия:

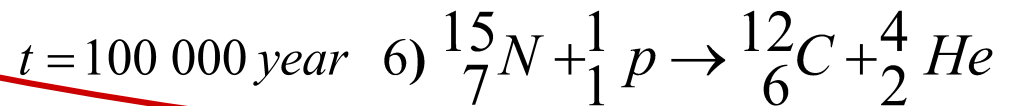
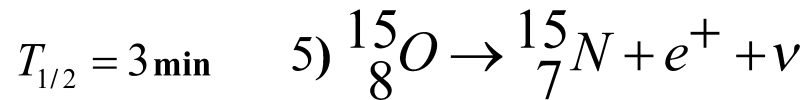
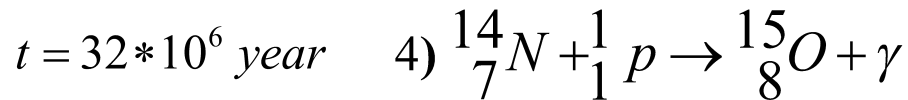
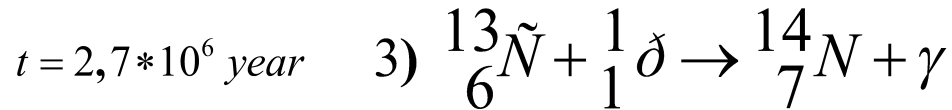
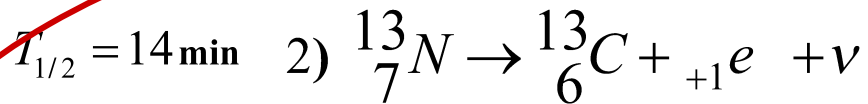
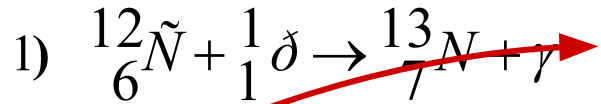
1. При относительно низких температурах ( $\sim 10^7$  К).

**Протонно-протонный цикл**



*Идея о термоядерном происхождении звезд - 1929 – Фридрих Хоутерманс.*

2. При высоких температурах ( $> 2 \cdot 10^7$  К) углеродный или углеродно-азотный цикл (Ханс Бете)



$t = 13 \cdot 10^6 \text{ year}$

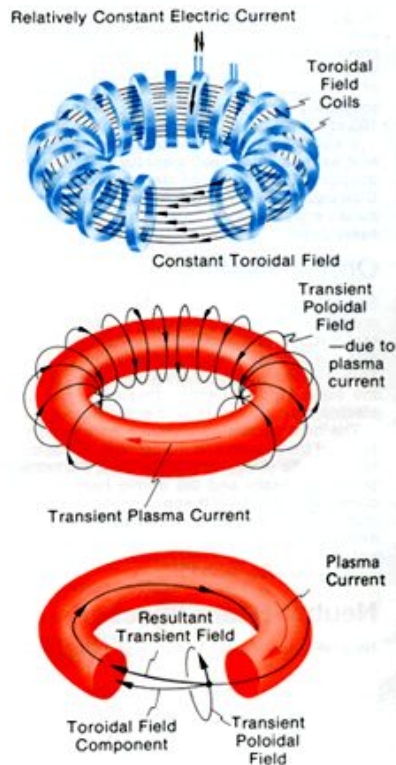
Энергия, выделяющаяся на одно ядро гелия – 26.8 Мэв.

В пересчете на грамм гелия – 700кВт\*час

## Управляемый термоядерный синтез - практически неисчерпаемый источник энергии.

Дейтерий для (1) содержится в морской воде ( $\text{HDO}$  и  $\text{D}_2\text{O}$ ) – хватит на сотни миллионов лет. Тритий → путем облучения жидкого лития (запасы велики) нейтронами от ядерного реактора (реакция 2).

*Использование термоядерных реакций → не будет загрязнения окружающей среды (не образуются радиоактивные изотопы, в отличие от реакций деления ядер).*

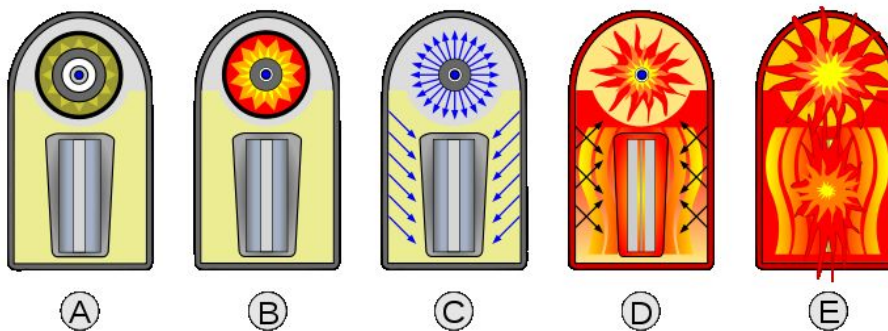
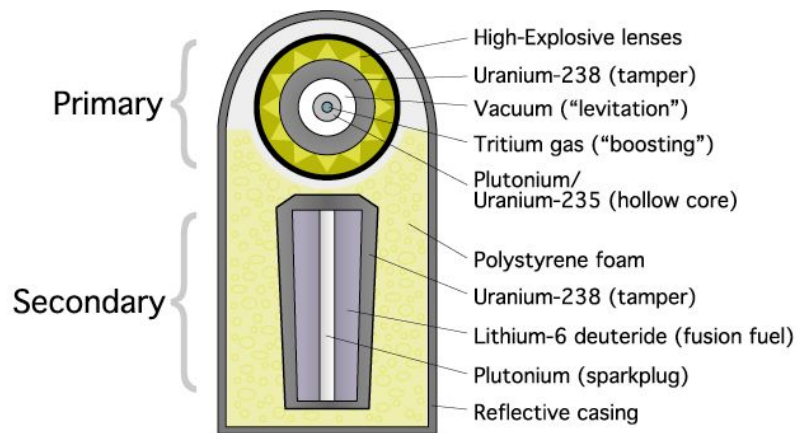
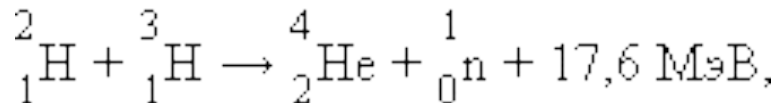
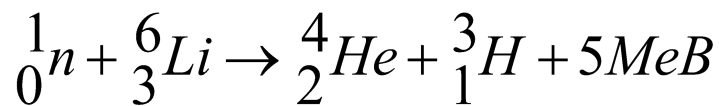


*Международный экспериментальный термоядерный реактор*

- Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) — тороидальная установка для магнитного удержания плазмы. Плазма удерживается не стенками камеры, которые не способны выдержать её температуру, а специально создаваемым магнитным полем. Особенностью токамака является использование электрического тока, протекающего через плазму для создания полоидального поля, необходимого для равновесия плазмы.

**Н-бомба была создана под руководством И.В.Курчатова и А.Д.Сахарова. Взрыв 12 августа 1953 на Семипалатинском полигоне.**

**В настоящее время накоплено более 50 тысяч Н-бомб**



**Mushroom cloud from the Soviet 50-megaton Tsar Bomba, the largest weapon ever detonated (1961)**

**Взрыв термоядерного заряда мощностью 20 Мт (большинство Н-бомб имеют мощность  $10^5 \div 10^6$  т) уничтожит все живое на 140 км от эпицентра**

# Элементарные частицы. Систематика элементарных частиц.

**Элементарные частицы** – микрочастицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне развития физики нельзя представить как объединение других частиц.

**«Элементарная частица»** – общее название частиц, не являющихся атомами или ядрами (*исключение – атом водорода – протон*).

Ранее атомы считали «кирпичиками», из которых построен мир. Атомы оказались «делимы» → поиск основных элементов Вселенной.

1932 – весь мир можно построить из **4** элементов – света (фотонов), протонов, нейтронов, электронов.

Для объяснения ядерных сил потребовались  $\pi$ -мезоны, для объяснения  $\beta$ -распада – нейтрино.

Далее открыли позитроны и мюоны. → Число элементарных частиц возросло с 4 до **10**.

В 50-х годах было открыто примерно столько же частиц → новые частицы «посыпались как из рога изобилия».

## Свойства элементарных частиц:

1. Общее число элементарных частиц (вместе с античастицами) более 400.

2. Стабильные элементарные частицы – электрон  $e^-$ , позитрон  $e^+$ , протон  $p$ , нейтрон  $n$ , фотон, электронное нейтрино  $\nu_e$  и антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ .

Остальные нестабильны, образуются во вторичном космическом излучении или с помощью ускорителей.

## Космическое излучение

### Первичное

непрерывно падающий на Землю поток атомных ядер (в основном протонов) высокой энергии  $\sim 10$  ГэВ, отдельных частиц  $10^{10}$  ГэВ.

### Вторичное

при неупругом соударении частиц первичных лучей с ядрами атомов в верхних слоях атмосферы.

*На высоте  $\leq 20$  км космическое излучение практически носит вторичный характер. В этом излучении есть все известные в настоящее время элементарные частицы.*

(1947 - в космическом излучении (Пауэлл и Оккиалини), предсказал Юкава (1935).

$\pi^+$ -мезоны,  $\pi^-$ - мезоны ( $|q|=|e|$ ,  $m=273m_e$ ),  
нейтральные  $\pi^0$ - мезоны ( $|q|=0$ ,  $m=264m_e$ )

Спин  $\pi$ -мезонов =0, нестабильны.

Время жизни  $\pi^+$  и  $\pi^-$  -  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с,  $\pi^0$  -  $0,8 \cdot 10^{-16}$  с.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

$\mu^-$ ,  $\mu^+$ -мезоны, ( $|q|=|e|$ ,  $m=207m_e=106$  МэВ),

Спин мюона =1/2, нестабильны.

Время жизни -  $2,22 \cdot 10^{-6}$  с

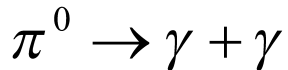
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

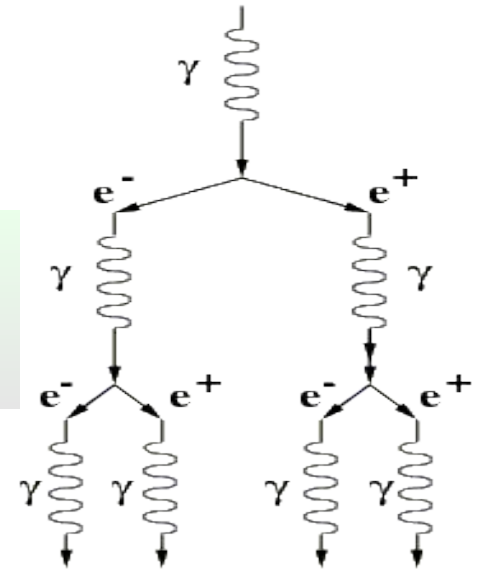
**В составе вторичных космических лучей выделяют:**

**1. Мягкая компонента – сильно поглощается Pb.**

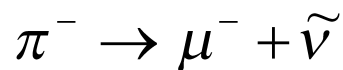
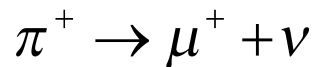
Состоит из каскадов (или ливней) электронно-позитронных пар. Возникший в результате распада  $\pi^0$  - мезона или резкого торможения быстрого электрона  $\gamma$ -фотон, пролетая вблизи ядра, создает  $e^- e^+$  - пару. Торможение  $e^-$  и  $e^+$  приводит к образованию  $\gamma$ -фотонов.



Рождение пар и возникновение  $\gamma$ -фотонов идет, пока энергии фотонов достаточно для образования пар.

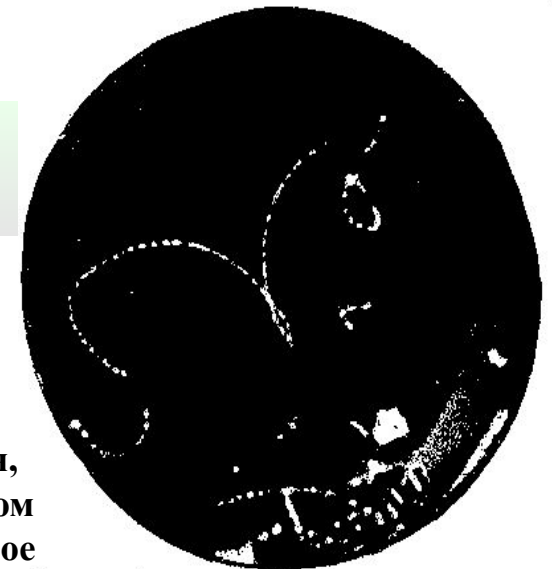


**2. Жесткая компонента – не проникает через большие толщи Pb.**



Состоит в основном из мюонов. Образуется преимущественно в верхних и средних слоях атмосферы за счет распада заряженных  $\pi$  - мезонов.

Фотография пары электрон-позитрон, образованной в камере Вильсона гамма-квантом на ядре криптона. Камера помещена в магнитное поле.





**Для описания свойств частиц вводят:**

**Массу частицы ( $m$ ).** Выражают в МэВ или ГэВ в соответствии с  $E=mc^2$ .

**Среднее время жизни ( $\tau$ ).** Мера стабильности частицы. Для  $e^-$ ,  $p$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$   $\tau=\infty$ .  
( $\tau_e > 2 \cdot 10^{22}$  лет,  $\tau_p \sim 2 \cdot 10^{32}$  лет,  $\tau_n \sim 898$  с).

Наиболее короткоживущие частицы - **резонансы** – имеют  $\tau < 10^{-22}$  с.

**Спин  $J$**  – собственный момент импульса частицы, в единицах  $\hbar$ .

**Электрический заряд ( $q$ )** – характеризует способность частиц участвовать в э/м взаимодействии.

**Вектор собственного магнитного момента  $\vec{\mu}_m$**  характеризует взаимодействие покоящейся частицы с внешним магнитным полем.

Магнитные моменты выражают в единицах магнетона Бора

$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2m}$$

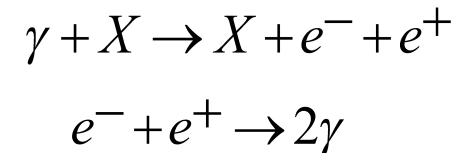
У частиц есть античастицы. П. Дирак – 1930.

Одинаковая масса  $m$ , время жизни  $\tau$  и спин  $J$ . Остальные характеристики равны по модулю, противоположны по знаку ( $q, p_m$ ).

Частицы, не имеющие античастиц, называют **абсолютно нейтральными** (фотон,  $\pi^0$ -мезон,  $\eta$ -мезон). Не способны к аннигиляции.

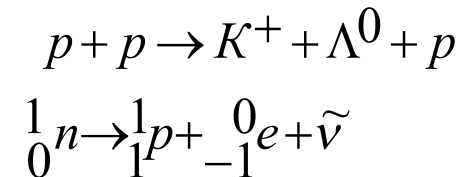
Первая античастица - позитрон  $e^+$  - 1932 – с помощью камеры Вильсона в космическом излучении.

Позитроны образуются при соударении фотонов большой энергии с атомными ядрами. Встречаясь друг с другом аннигилируют.



**Взаимопревращение элементарных частиц** – одно из их фундаментальных свойств.

Образующиеся частицы не содержатся в исходных, рождаются в процессах их соударения или распада.



Элементарные частицы принято классифицировать по типам взаимодействий, в которых они участвуют.

<b>Свойства</b>	<b>Сильное</b>	<b>Электро-магнитное</b>	<b>Слабое</b>	<b>Гравитационное</b>
<b>Интенсивность (в отн. ед.)</b>	<b>1</b>	<b><math>10^{-2}</math></b>	<b><math>10^{-14}</math></b>	<b><math>10^{-40}</math></b>
<b>Радиус действия (м)</b>	<b><math>10^{-15}</math></b>	<b>(неограничен)</b>	<b><math>10^{-19}</math></b>	<b>(неограничен)</b>
<b>Время взаимодействия (с)</b>	<b><math>10^{-24}</math> (быстрое)</b>	<b><math>10^{-16}</math></b>	<b><math>10^{-9}</math> (медленное)</b>	<b><math>10^{16}</math></b>
<b>Квант -переносчик взаимодействия</b>	<b>пионы, глюоны</b>	<b><math>\gamma</math>-кванты</b>	<b>W-бозон</b>	<b>G-гравитон</b>
<b>Область действия</b>	<b>Связь протонов и нейтронов в атомных ядрах Связь кварков в адронах</b>	<b>Характерно для всех элементарных частиц, обладает электр. зарядом</b>	<b>Распады: <math>\beta</math>-распад, <math>\mu</math>-распад с участием нейтрино</b>	<b>Присуще всем частицам, имеющим массу.</b>

## Примеры некоторых элементарные частиц

Группа	Название частицы	Символ	Анти частицы	Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)		
<b>ФОТОНЫ</b>	Фотон	$\gamma$		0	0	1	Стабилен		
	Нейтрино электронное	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	Стабильно		
<b>Лептоны</b>	Нейтрино мюонное	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	Стабильно		
	Электрон	$e^-$	$e^+$	1	-1	1/2	Стабилен		
	Мю-мезон	$\mu^-$	$\mu^+$	206,8	-1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$		
		$\pi^0$		264,1	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$		
<b>Мезоны</b>	Пи-мезоны	$\pi^+$	$\pi^-$	273,1	1 -1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$		
		$K^+$	$K^-$	966,4	1 -1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$		
	К-мезоны	$K^0$	$\bar{K}^0$	974,1	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$		
	Эта-нуль-мезон	$\eta^0$		1074	0	0	$\approx 10^{-18}$		
	<b>Адроны</b>	<b>Барионы</b>	Протон	$p$	1836,1	1 -1	1/2	Стабилен	
			Нейтрон	$n$	1838,6	0	1/2	898	
		<b>Гипероны</b>	Лямбда-гиперон	$\Lambda^0$	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
				$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1 -1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
				$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			Сигма-гипероны	$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1 1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
			$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$	
Кси-гипероны			$\Xi^-$	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1 1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$	
Омега-минус-гиперон			$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1 1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$	

По современным представлениям, 6 лептонов и 6 антилептонов считаются **истинно элементарными** частицами, адроны – составными частицами, построенными из **кварков**.

Кваркам приписывают дополнительные характеристики – «цвет» (новое квантовое число) – **красный (R), зеленый (G), голубой (B)**.  
Существует 3 сорта кварков каждого из 6 типов.

**Доказательство составного характера адронов:**

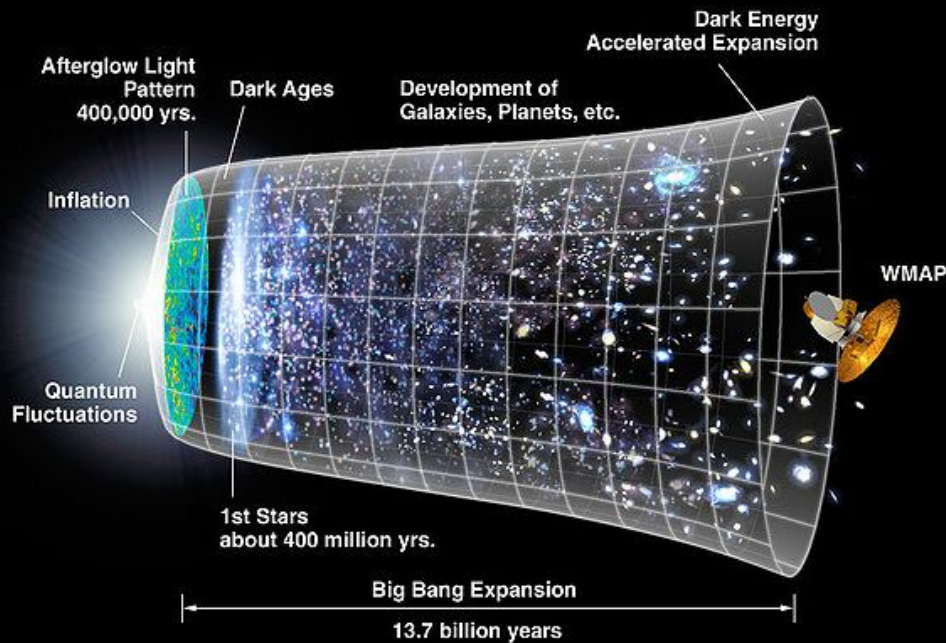
Кварк (антикварк)	Электрический заряд, в единицах $e$	Спин, в единицах $\hbar$
Верхний $u, u^{\bar{}}$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$\frac{\hbar}{2}$
Нижний $d, d^{\bar{}}$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$\frac{\hbar}{2}$
Очарованный $c, c^{\bar{}}$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$\frac{\hbar}{2}$
Странный $s, s^{\bar{}}$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$\frac{\hbar}{2}$
Истинный $t, t^{\bar{}}$	$+\frac{2}{3}(-\frac{2}{3})$	$\frac{\hbar}{2}$
Преестный $b, b^{\bar{}}$	$-\frac{1}{3}(+\frac{1}{3})$	$\frac{\hbar}{2}$

1) очень много адронов

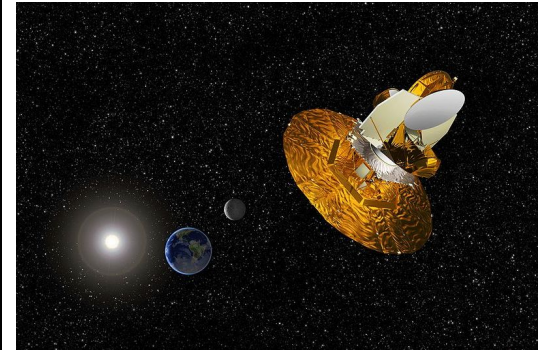
2) большинство адронов нестабильны

3) обнаружена внутренняя структура адронов

Существуют 6 типов кварков, их называют **ароматами**. Образуют 3 дублета ( $u, d$ ), ( $c, s$ ), ( $t, b$ ).



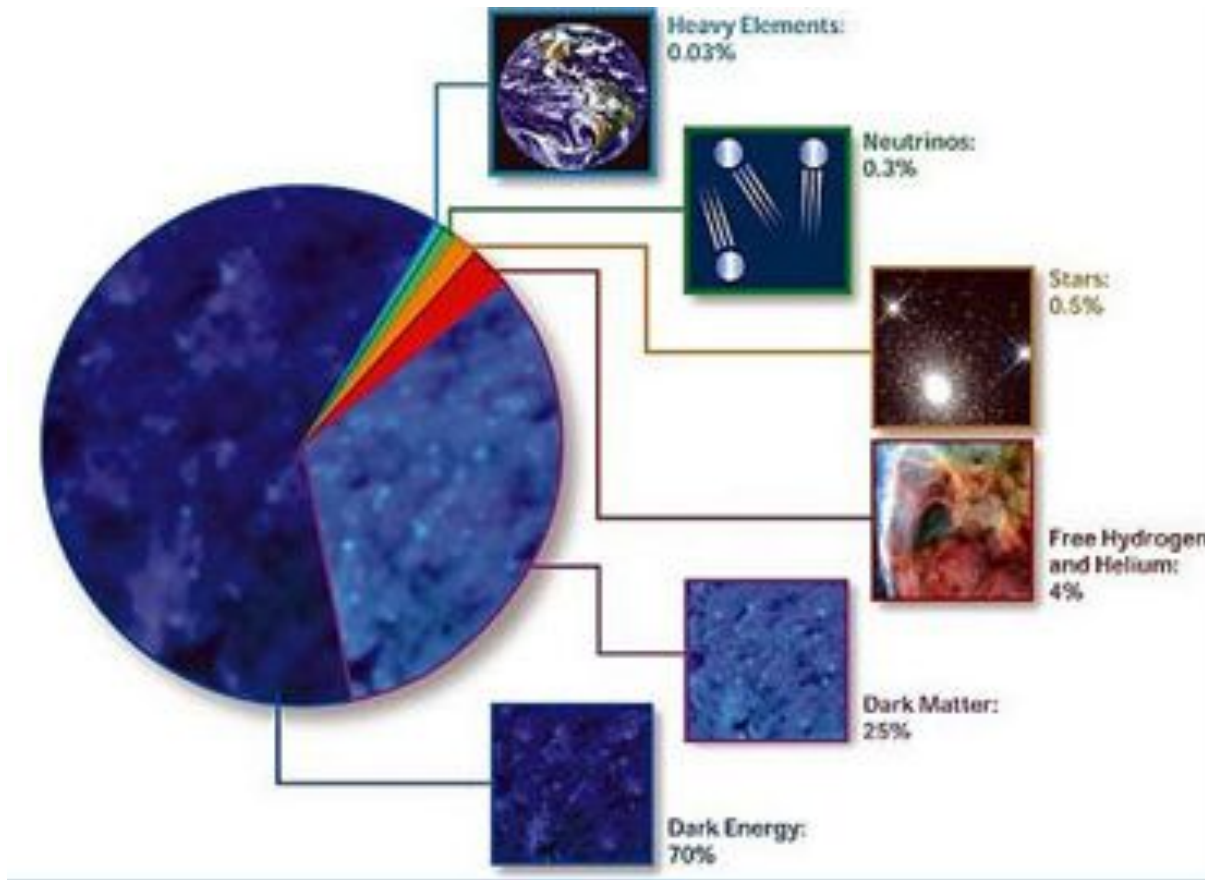
NASA/WMAP Science Team



Artist's depiction of the WMAP satellite gathering data to help scientists understand the Big Bang

This is an artist's concept of the Universe expansion, where space (including hypothetical non-observable portions of the Universe) is represented at each time by the circular sections. Note on the left the dramatic expansion (not to scale) occurring in the inflationary epoch, and at the center the expansion acceleration. The scheme is decorated with WMAP images on the left and with the representation of stars at the appropriate level of development.

Image from WMAP press release, 2006



A pie chart indicating the proportional composition of different energy-density components of the Universe, according to the best  $\Lambda$ CDM model fits – roughly 95% is in the exotic forms of dark matter and dark energy