

# ЛЕКЦИЯ № 15 ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

**Атомное ядро** – центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный заряд.

Существование атомного ядра было установлено в экспериментах Э. Резерфорда в 1911 г.

**Состав ядра.** Атомное ядро состоит из частиц, которые называют нуклонами – протонов и нейтронов.

Атомное ядро обозначается символом  ${}^A_Z X$  ,

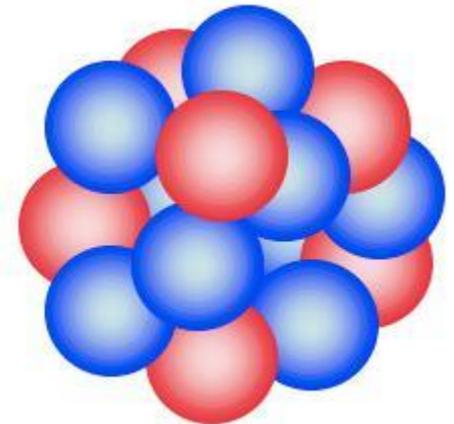
где  $Z$ - зарядовое число (количество протонов в ядре);  $A=N+Z$  – массовое число (количество нуклонов в ядре);  $N$  – число нейтронов в ядре;  $X$  – символ химического элемента.

**Изотопы** – ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными  $A$ .

Пример:  ${}^{28}_{14}\text{Si}$ ,  ${}^{29}_{14}\text{Si}$ ,  ${}^{30}_{14}\text{Si}$ ,  ${}^{32}_{14}\text{Si}$  - изотопы кремния.

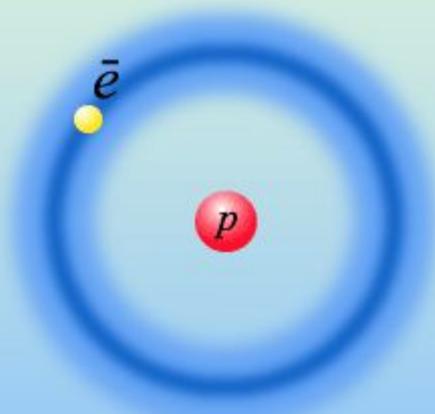
**Изобары** – ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$ .

Пример:  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{16}_7\text{N}$  .

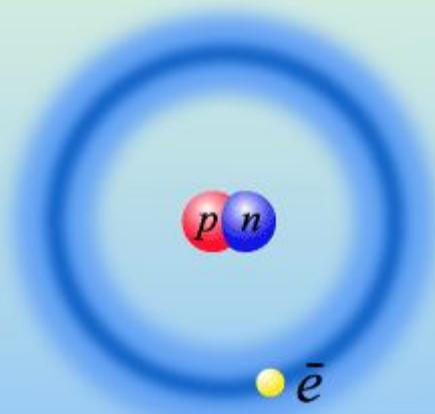


# Изотопы водорода

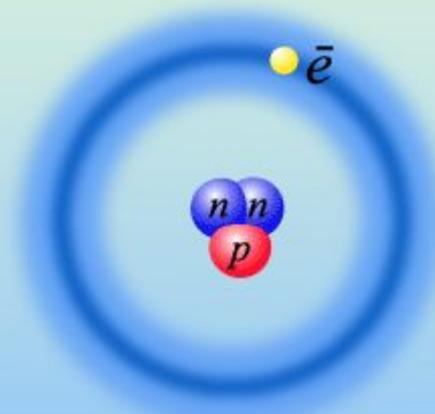
*протий*



*дейтерий*



*тритий*



## Размеры и формы ядер

Большинство ядер имеют форму, близкую к **сферической**.

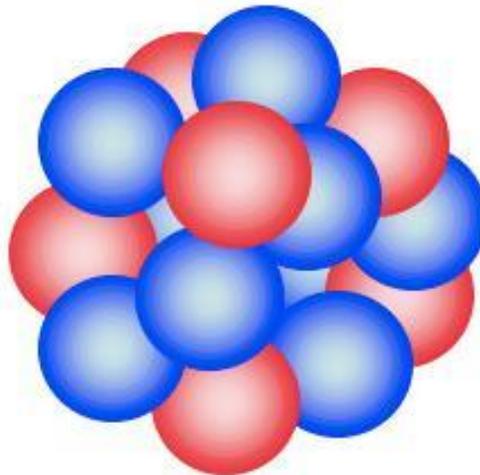
Для ядер с достаточно большим числом нуклонов ( $A > 12$ ) выделяют внутреннюю область, в которой концентрация нуклонов постоянна, и небольшой переходной слой, в котором концентрация падает до нуля.

**Радиус ядра** – расстояние от его центра, на котором концентрация нуклонов уменьшается в два раза:

$$R \approx R_0 \sqrt[3]{A} \quad , \quad (15.1)$$

где  $R_0 = (1,2 \dots 1,4) \cdot 10^{-15}$  м.

Нуклоны в ядре удерживаются ядерными силами.



## Характерные особенности ядерных сил

1. **Короткодействующий характер.** При расстояниях  $r > 4,2 \cdot 10^{-15}$  м ядерные силы пренебрежимо малы.
2. **Нуклоны притягиваются друг к другу при  $r > 0,7 \cdot 10^{-15}$  м и отталкиваются друг от друга при  $r < 0,7 \cdot 10^{-15}$  м.**
3. **Зарядовая независимость.** Сила взаимодействия между нуклонами не зависит от их электрических зарядов.
4. **Ядерные силы не являются центральными.** Ядерные силы зависят не только от расстояния между частицами, как это имеет место в случае гравитационной и кулоновой сил. Ядерные силы зависят также от ориентации спинов взаимодействующих нуклонов: параллельны они или антипараллельны.
5. **Эффект насыщения.** Каждый нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами ядра, а лишь с некоторыми ближайшими соседями, находящимися в сфере действия ядерных сил.

## Дефект масс и энергия связи ядра

Масса ядра **всегда меньше** суммы масс нуклонов, входящих в его состав.

**Дефект масс** – разность масс между суммой масс нуклонов и массой ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{nucl}} \quad . \quad (15.2)$$

В справочниках обычно приводят не массы ядер, а массы атомов поэтому для вычисления дефекта масс обычно используют формулу

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_{\text{atom}} \quad . \quad (15.3)$$

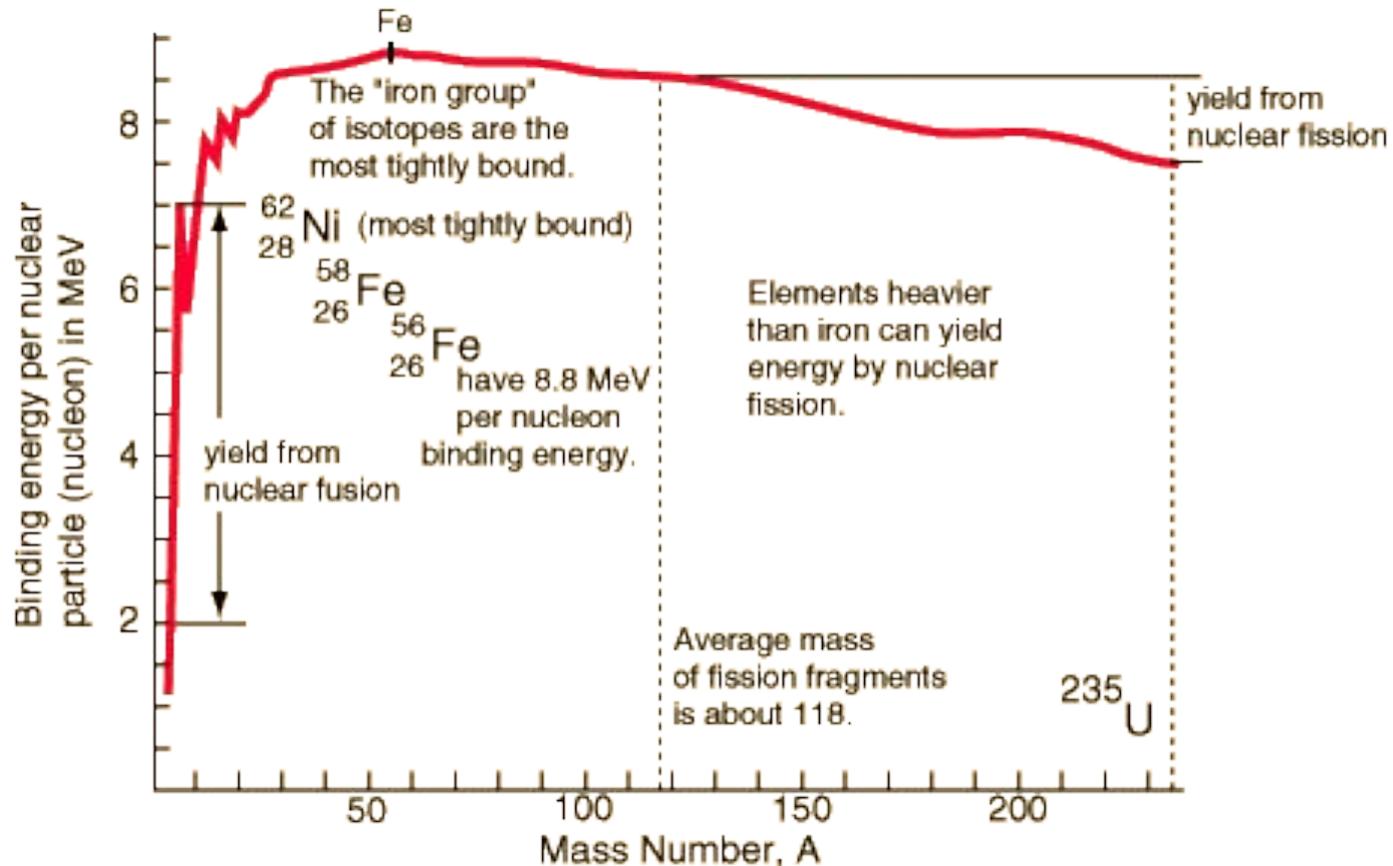
**Энергия связи ядра** – физическая величина, численно равная работе которую необходимо совершить для расщепления ядра на невзаимодействующие между собой нуклоны:

$$E_b = c^2 \Delta m \quad . \quad (15.4)$$

## Зависимость энергии связи от состава ядра

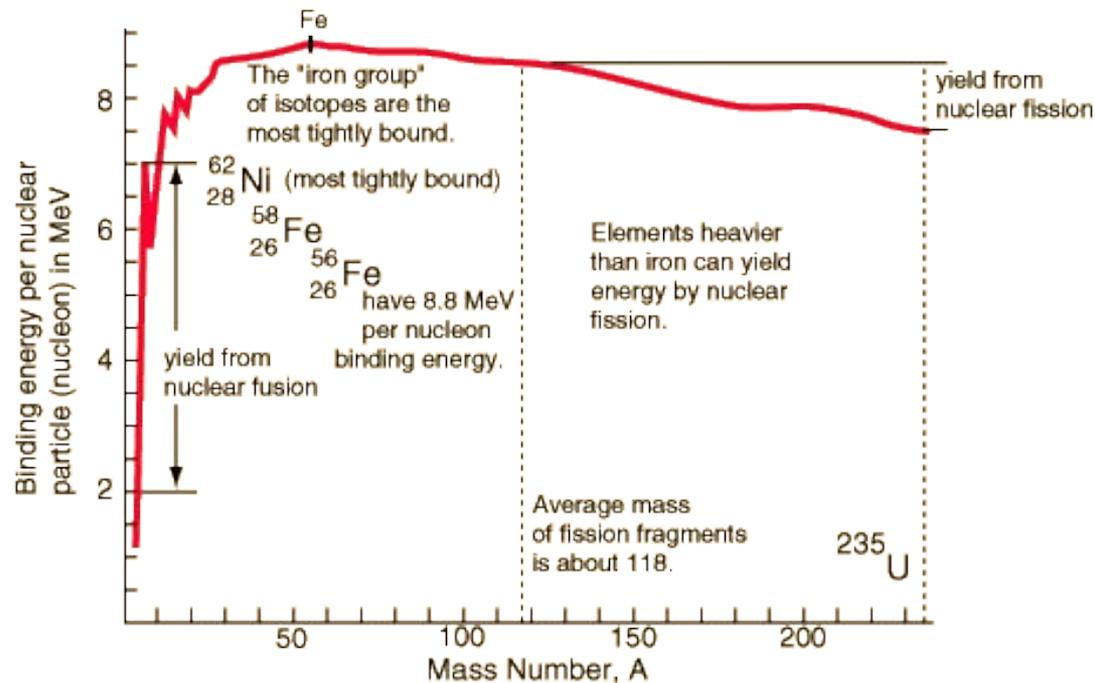
Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра:  $\varepsilon_b = E_b/A$ .

Удельная энергия связи сначала (при  $A < 16$ ), быстро возрастает, потом скорость нарастания уменьшается и при  $A \sim 60$  проходит через максимум, после чего плавно убывает.



## Зависимость энергии связи от состава ядра

Благодаря возрастанию удельной энергии связи при малых массовых числах оказывается энергетически выгодным слияние легких ядер, а благодаря убыванию удельной энергии связи при больших массовых числах оказывается энергетически выгодным деление тяжелых ядер.



Атомная энергия - энергия, выделяющаяся при делении тяжелых ядер.

Термоядерная энергия - энергия, выделяющаяся при слиянии легких ядер.

Термоядерная энергия, приходящаяся на один нуклон, в несколько раз превышает атомную энергию.

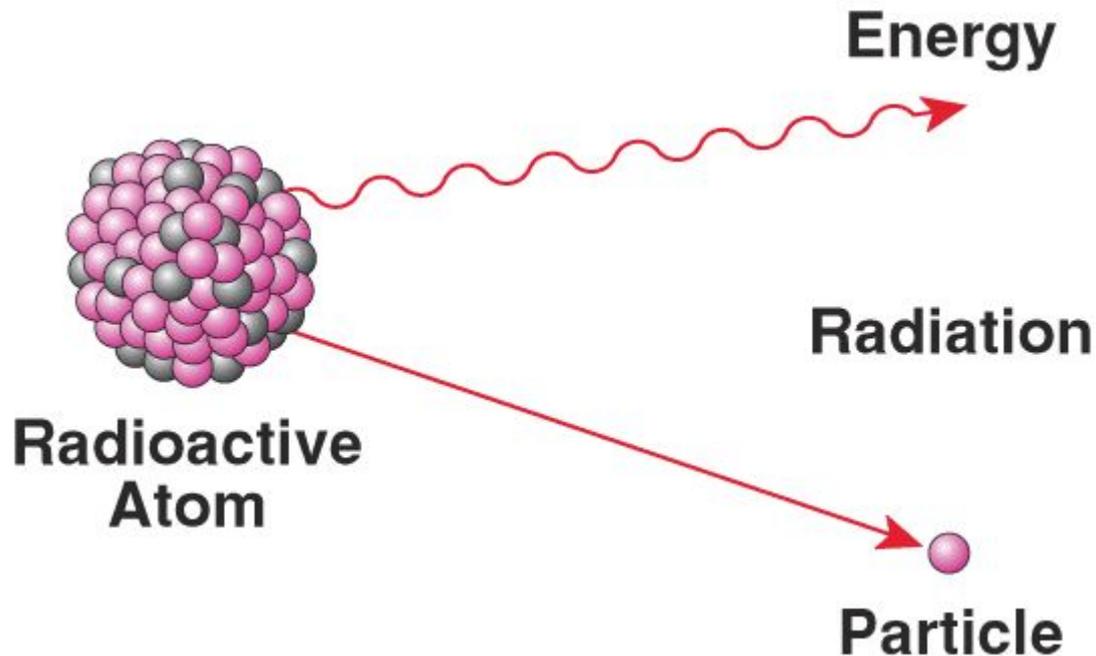
## Радиоактивность

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

Чтобы ядро было радиоактивным, его масса должна быть больше суммы масс продуктов его распада.

**Открыто:** французский физик Анри Беккерель, 1896 г.: минерал, содержащий уран, засветил фотопластинку, завернутую в светонепроницаемую бумагу.

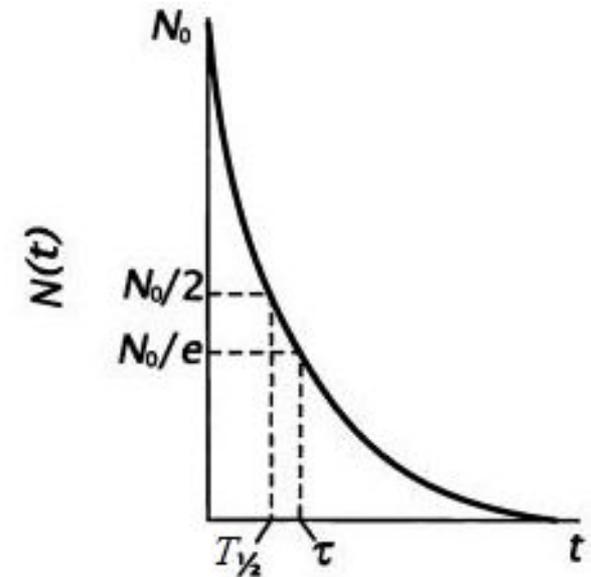
Нобелевская премия по физике, 1903 г.



## Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \quad (15.5)$$

где  $N_0$  – начальное число радиоактивных ядер;  $N$  – оставшееся число радиоактивных ядер к моменту времени  $t$ ,  $\lambda$  – постоянная распада: определяет скорость распада и активность изотопа.



**Период полураспада** – промежуток времени, в течение которого распадается половина первоначального количества радиоактивных ядер:

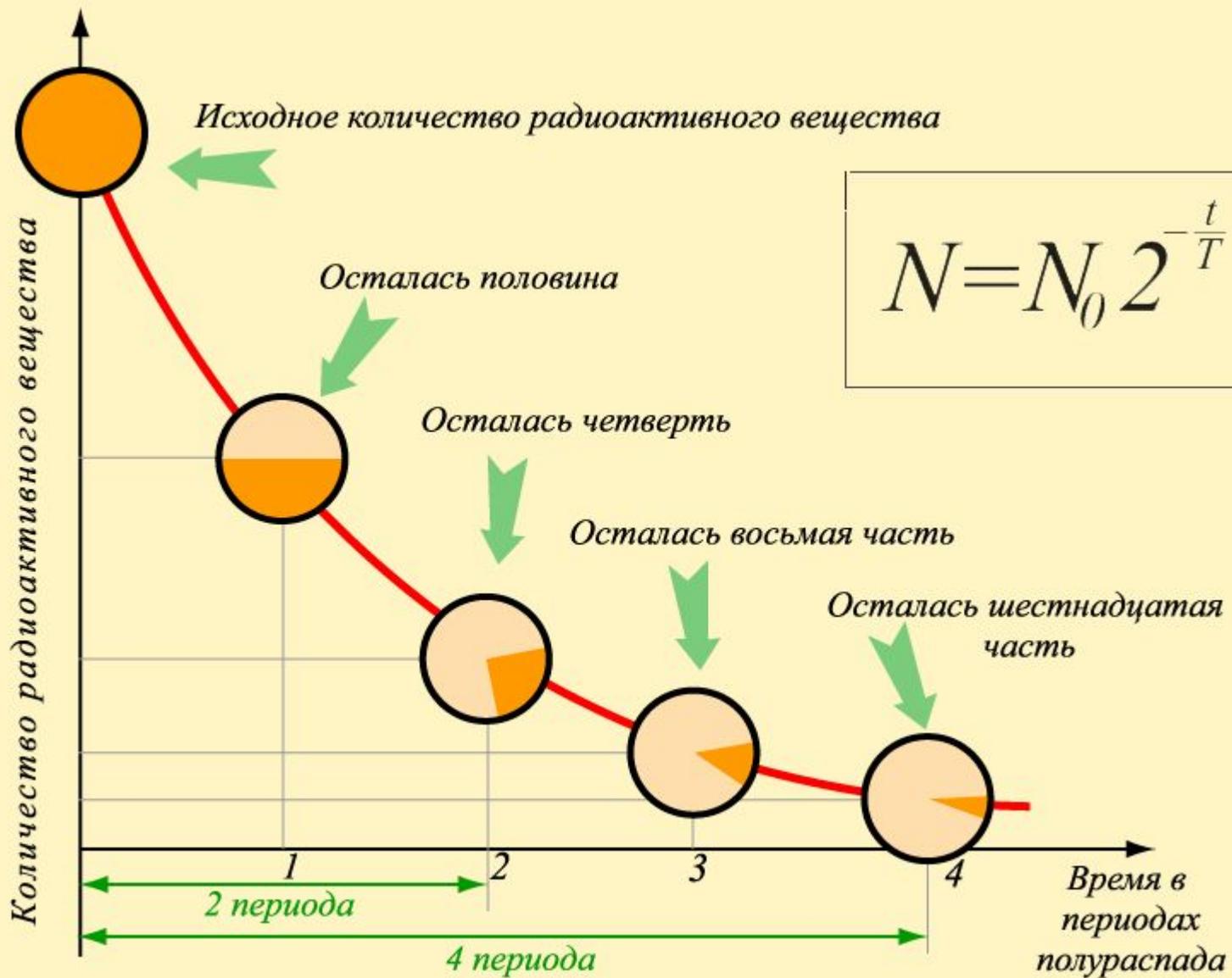
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2, \quad (15.6)$$

где  $\tau$  – среднее время жизни радиоактивного ядра.

**Активность радиоактивного образца** – величина, равная отношению числа ядер, распавшихся в образце, к промежутку времени, за который произошел распад:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (15.7)$$

# Закон радиоактивного распада



## Виды ядерных распадов

В настоящее время различают по крайней мере 9 различных видов распада. Наиболее частые виды:  $\alpha$ -,  $\beta$ -, и  $\gamma$ -распады.

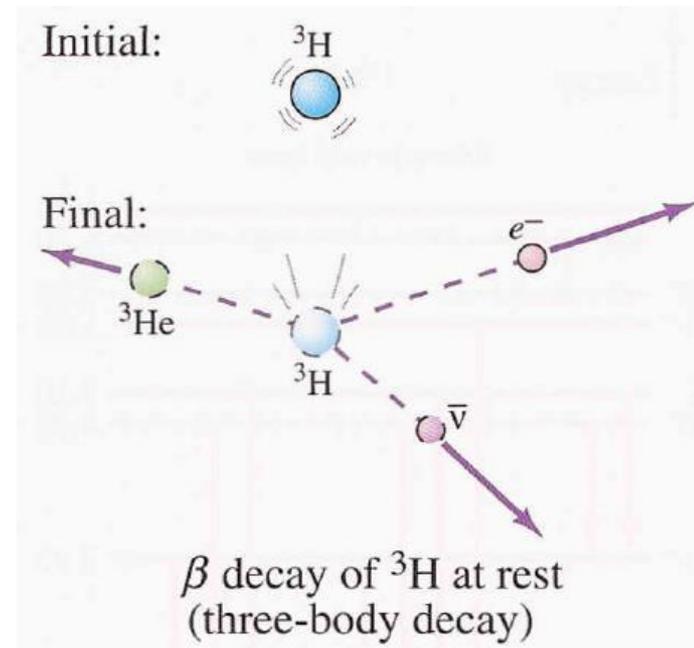
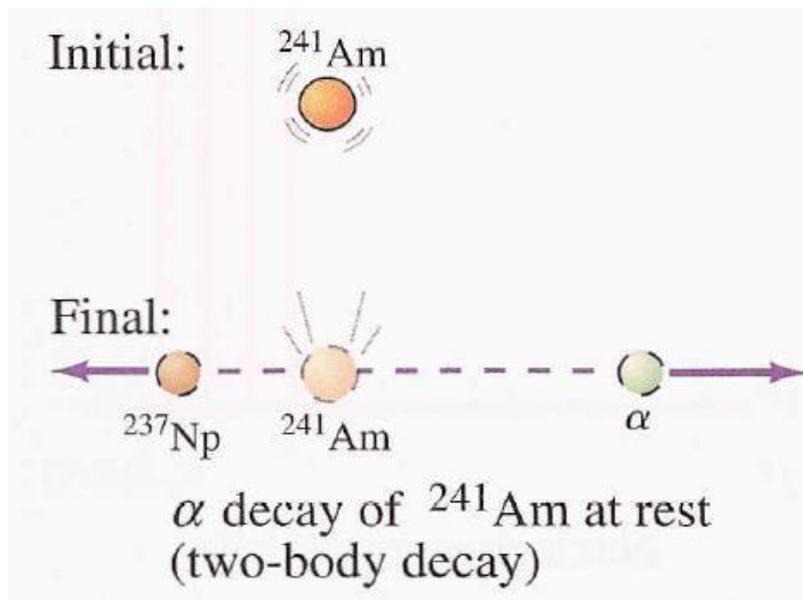
**Альфа-распад** – это испускание ядер гелия.

**Бета-распад** – ядерные процессы с участие электронов или позитронов.

(позитронный)  $\beta^+$ -распад:  ${}_{49}^{107}\text{In} \rightarrow {}_{48}^{107}\text{Cd} + {}_{+1}^0\bar{e} + {}_0^0\nu$  ,

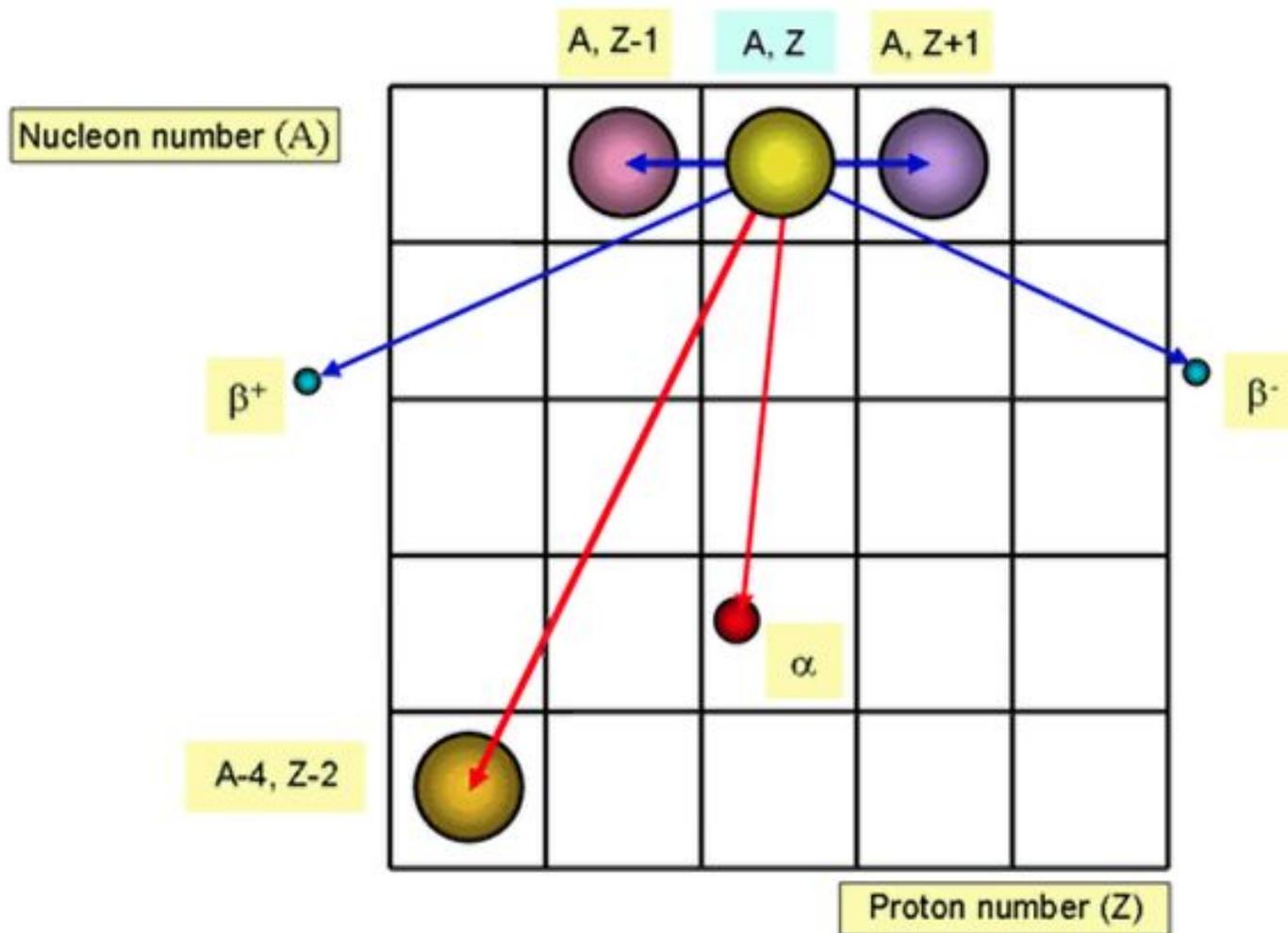
(электронный)  $\beta^-$ -распад:  ${}_{19}^{40}\text{K} \rightarrow {}_{20}^{40}\text{Ca} + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}$  .

**Гамма-распад** – процесс, при котором ядро, находящееся в возбужденном состоянии, возвращается в основное состояние с испусканием  $\gamma$ -кванта.

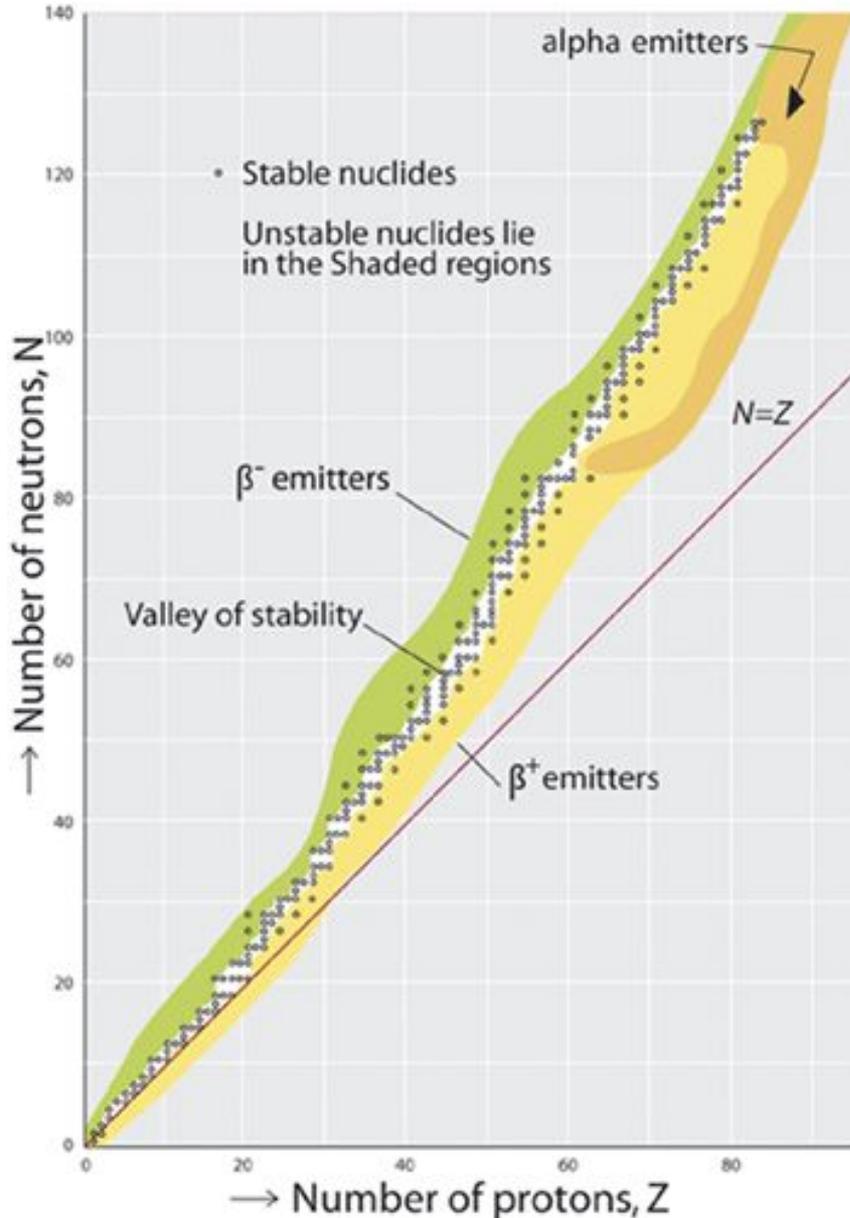


Составление реакций ядерных распадов производят на основе законов сохранения зарядового числа ( $Z$ ), массового числа ( $A$ ) и числа лептонов.

**Правила смещения** (Казимеж Фаянс и Фредерик Содди, 1913 г.).



## Соотношение числа протонов и нейтронов в ядрах



## Особенности систематики ядер:

1) Устойчивые ядра с порядковыми номерами  $Z \leq 20$  имеют приблизительно одинаковое число протонов и нейтронов ( $Z \approx N$ ).

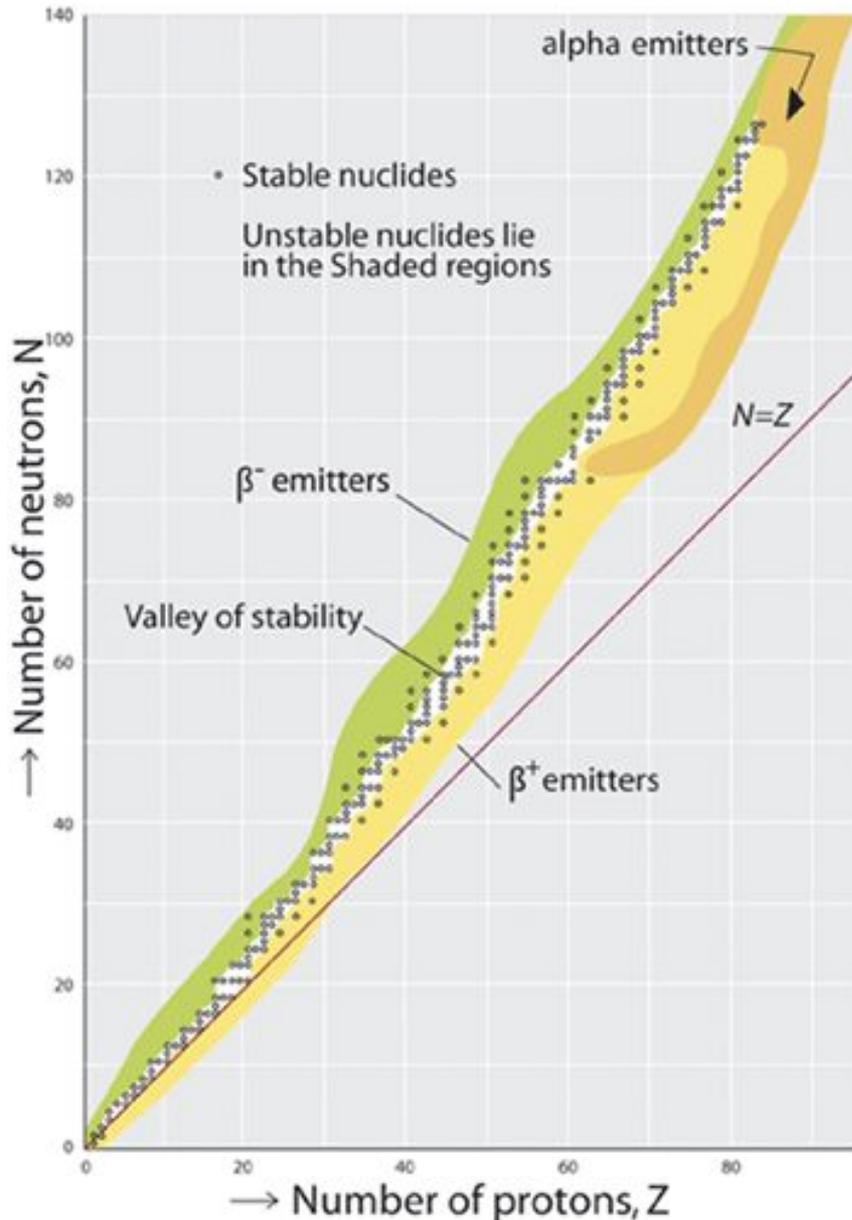
2) При  $Z > 20$  в устойчивых ядрах начинает возрастать отношение  $N/Z$ . Линия, соответствующая  $\beta$ -стабильным ядрам (долина устойчивости):

$$Z_{\beta} \approx 0,7N,$$

т.е. сравнительно тяжелые стабильные ядра содержат больше нейтронов, чем протонов.

3) Ядра, расположенные ниже долины устойчивости  $Z < Z_{\beta}$  имеют избыток нейтронов. Для них возможен (электронный)  $\beta^-$ -распад.

## Соотношение числа протонов и нейтронов в ядрах



Особенности систематики ядер  
(продолжение):

4) Ядра, расположенные выше долины устойчивости  $Z > Z_{\beta}$  содержат избыток протонов. Для них возможен (позитронный)  $\beta^+$ -распад.

5) Для массивных ядер возможен  $\alpha$ -распад. При этом для  $\alpha$ -активных ядер отношение  $N/Z$  оказывается меньшим, чем для  $\beta$ -активных ядер (зона  $\alpha$ -распада лежит на диаграмме правее зоны  $\beta$ -распада).

**Ядерные реакции** – превращение атомных ядер при взаимодействии с другими ядрами или частицами.

**Энергетический выход ядерной реакции:** величина энергии, выделенная или поглощенная в результате ядерной реакции. Для определения энергетического выхода устанавливаются: а) масса ядер и частиц  $m_1$  до реакции; б) масса ядер и частиц  $m_2$  после реакции; в) изменение массы

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (15.8)$$

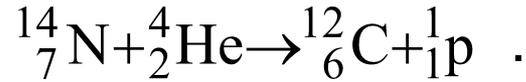
и энергии

$$Q = c^2 \Delta m \quad . \quad (15.9)$$

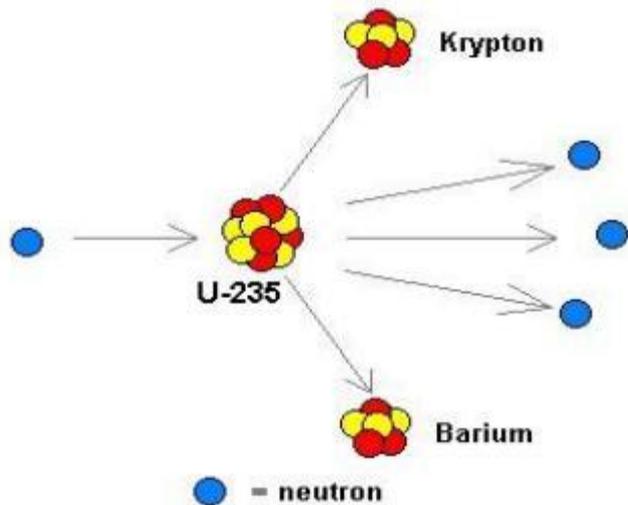
Обычно энергетический выход ядерной реакции рассчитывается в мегаэлектрон-вольтах по формуле

$$Q(\text{МэВ}) = \Delta m(\text{а.е.м.}) \cdot 931 \text{МэВ/а.е.м.} \quad . \quad (15.10)$$

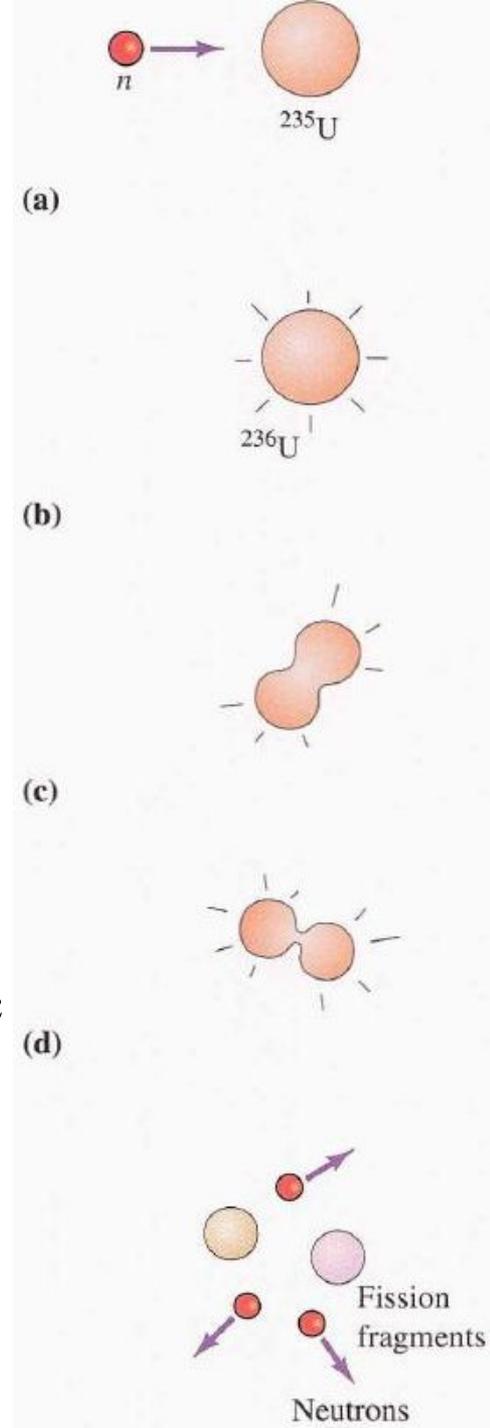
Исторически первая ядерная реакция, реализованная в лабораторных условиях (Э. Резерфорд, 1919 г.):



**Деление ядра** (Отто Хан, 1938 г., Нобелевская премия по химии, 1944 г.): при бомбардировке урана нейтронами возникают ядра, примерно вдвое более легкие, чем исходное ядро урана:



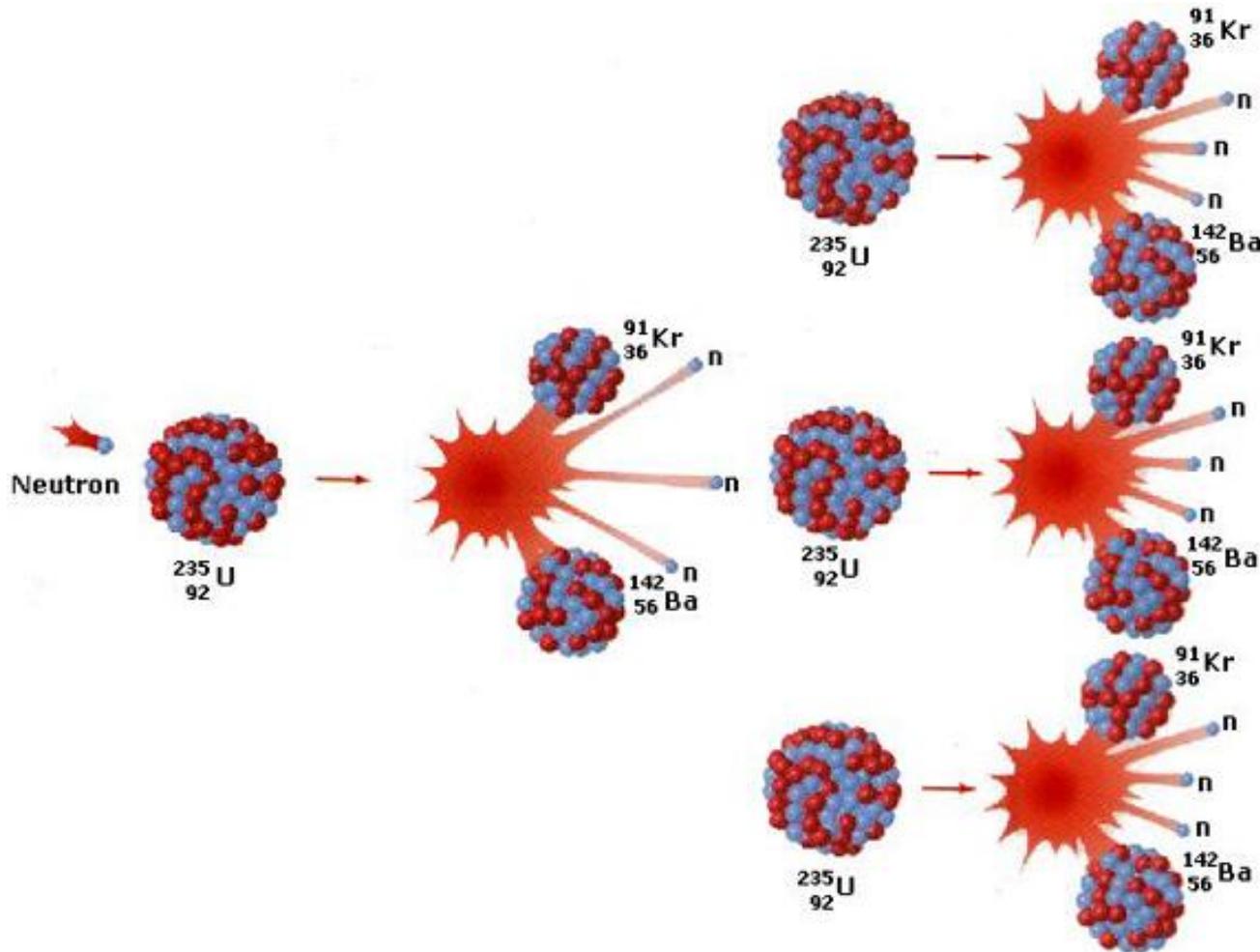
Время жизни  ${}^{236}_{92}\text{U} < 10^{-12} \text{ с}$   
 Поглощаются ядром  ${}^{235}_{92}\text{U}$   
 только медленные  
 нейтроны ( $E < 100 \text{ кэВ}$ ).



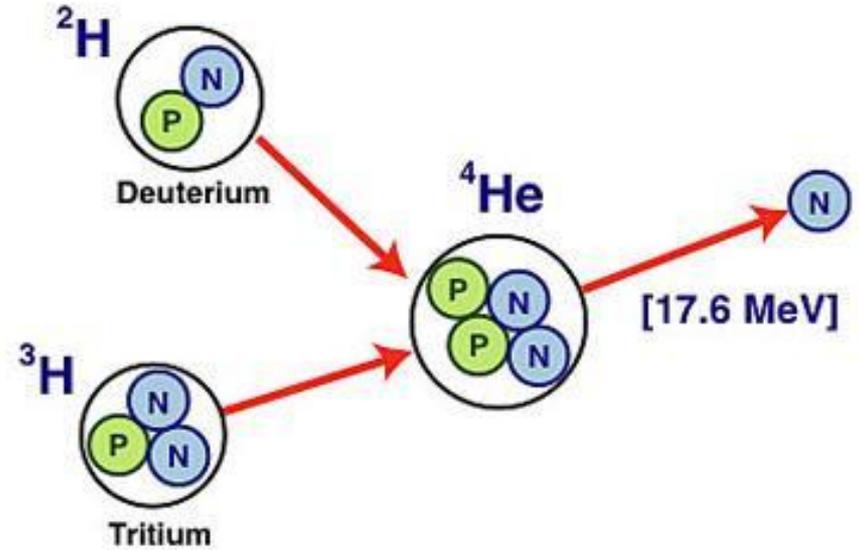
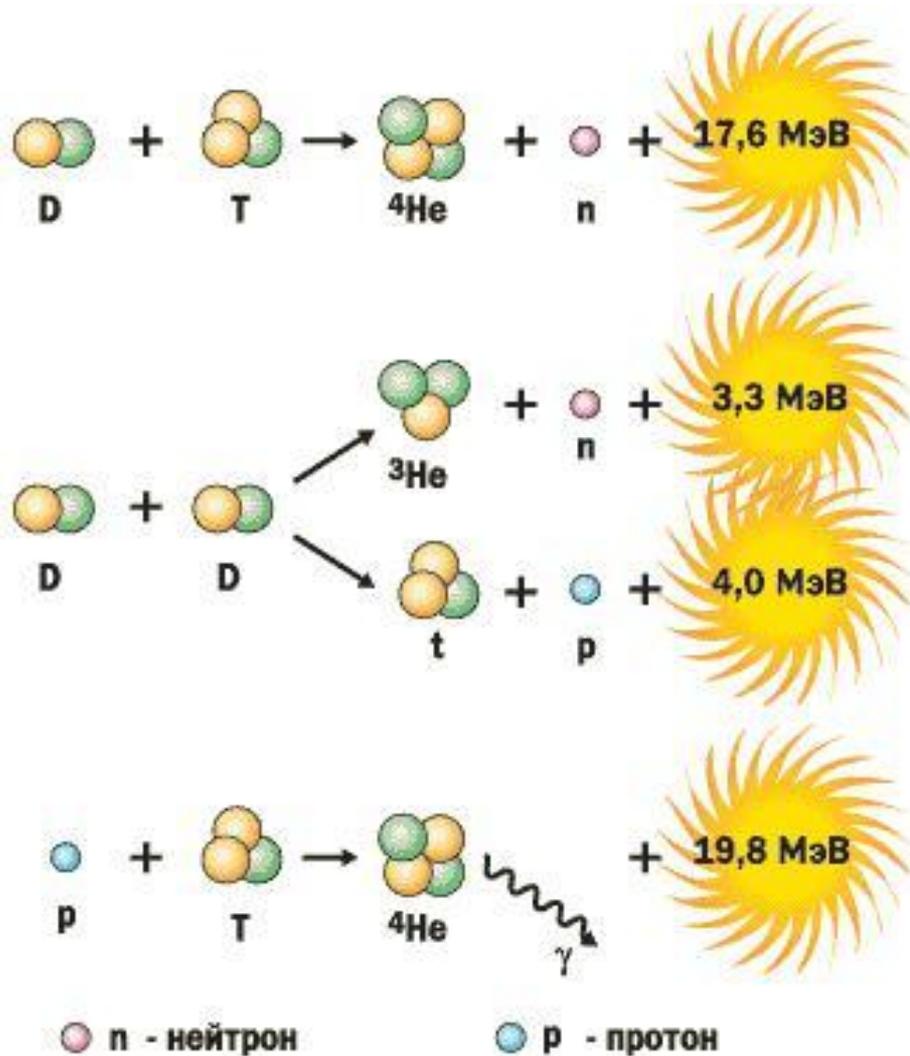
## Цепная реакция

При делении некоторых ядер количество нейтронов на выходе реакции больше, чем на входе.

В этом случае реакция деления носит цепной характер: деление ядра одним нейтроном порождает несколько (три) нейтронов, которые могут в свою очередь вызвать деление других ядер.



**Ядерный синтез** – образование ядер в процессе слияния отдельных протонов и нейтронов или легких ядер.



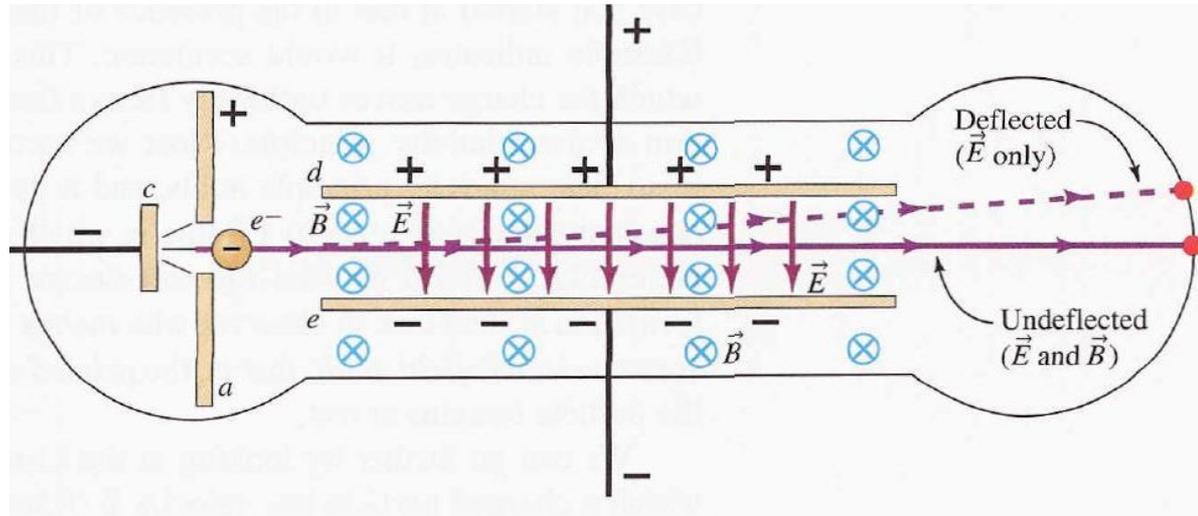
# Элементарные частицы

**Точное определение:** элементарными частицами называются первичные далее неразложимые частицы, из которых, по предположению, состоит вся материя.

**В современной физике:** элементарными называют большую группу мельчайших частиц материи, подчиненных условию, что они не являются атомами или атомными ядрами (исключение составляет протон).

## Первые открытые элементарные частицы

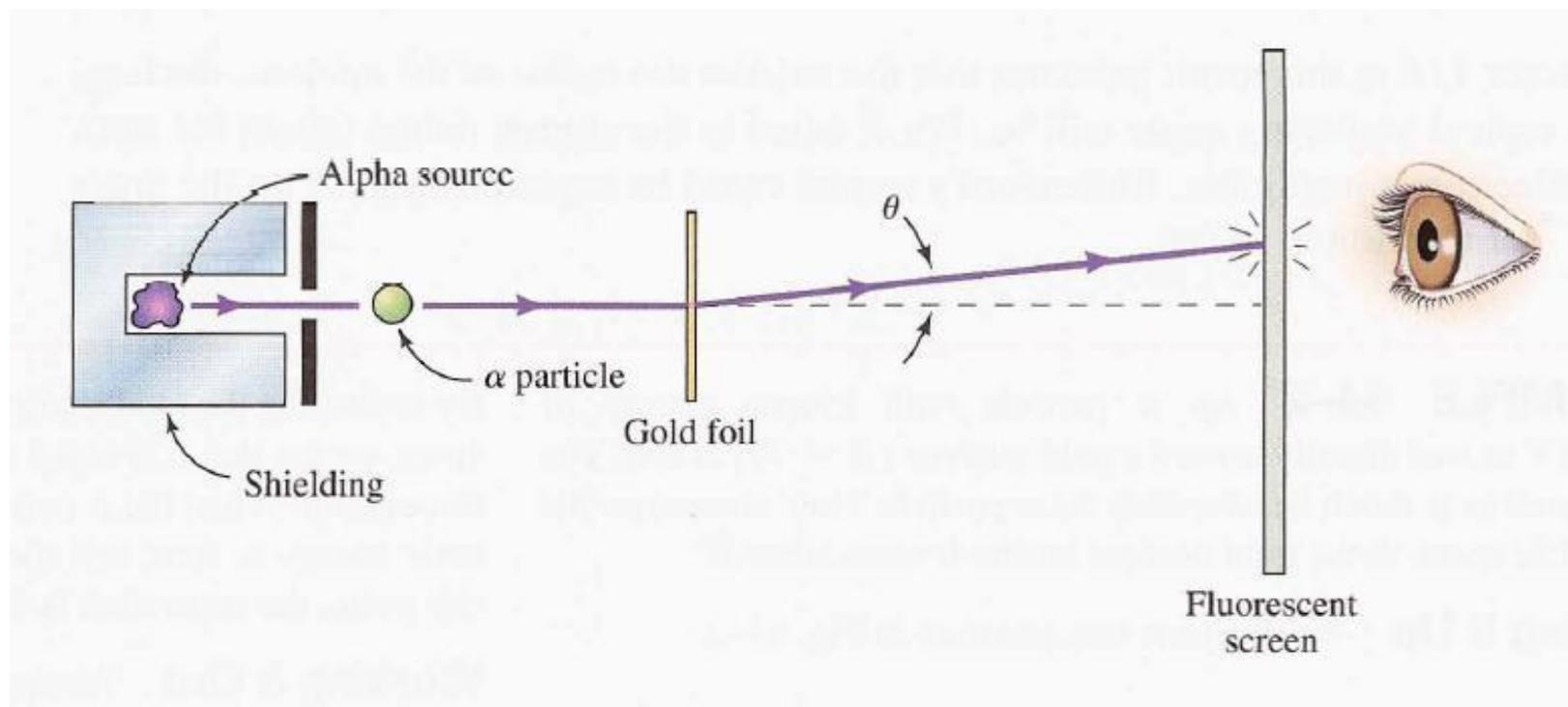
1) **Электрон** (английский физик Джозеф Томсон, 1897 г.)



2) **Фотон** (предположил существование М.Планк, 1900 г. Прямое доказательство существования: американские физики Р. Милликен, 1912-1915 гг. и А. Комптон, 1922 г.).

## Первые открытые элементарные частицы

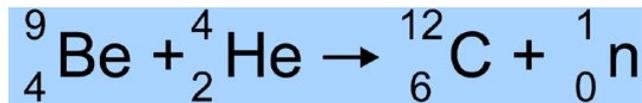
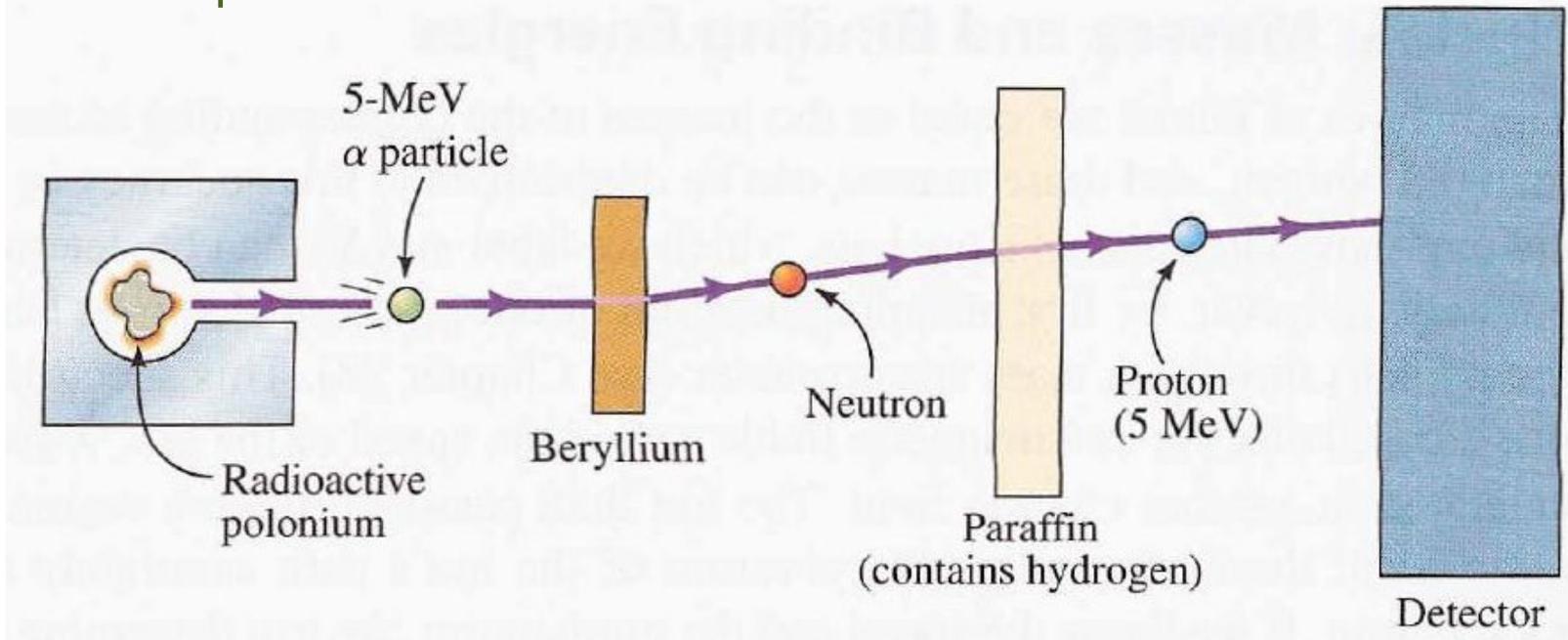
### 3) Протон (Э.Резерфорд, 1911 г.).



## Первые открытые элементарные частицы

### 3) Нейтрон (английский физик Джеймс Чадвик, 1932 г.).

Высокоэнергетические альфа-частицы, испускаемые полонием-210, попадая на бериллий, вызывают излучение с необычайно большой проникающей способностью. Если это излучение попадает на парафин, то образуются протоны высоких энергий. Дж. Чадвик предположил, что неизвестное излучение, исходящее из бериллия, представляет собой поток нейтронов.



## Классификация элементарных частиц

Классификация элементарных частиц основана на иерархии фундаментальных взаимодействий.

Виды фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

**ФОТОНЫ** – частицы, участвующие только в электромагнитном взаимодействии.

**Лептоны** (с греч. легкий) – частицы, участвующие в слабом взаимодействии, но не участвующие в сильном взаимодействии. Существуют три пары лептонов: электрон ( $e^-$ ) и электронное нейтрино ( $\nu_e$ ), мюон ( $\mu^-$ ) и мюонное нейтрино ( $\nu_\mu$ ), тау-лептон (таон) ( $\tau^-$ ) и тау-нейтрино ( $\nu_\tau$ ).

Лептоны считаются фундаментальными (или истинно элементарными) частицами:

- 1) лептоны не распадаются на составные части;
- 2) лептоны не обнаруживают никакой внутренней структуры и не имеют поддающихся измерению размеров ( $<10^{-18}$  м).

**Адроны** (с греч. большой, сильный) – частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

Адроны делятся на два больших класса:

1) **барионы** – адроны с полуцелым спином, т.е. фермионы (протоны, нейтроны, ...);

2) **мезоны** – адроны с целым спином, т.е. бозоны (пионы, каоны, ...).

Адроны – весьма многочисленный класс (открыто более 400 адронов).

Адроны, по сравнению с лептонами, - более крупные частицы, распадающиеся на составные части.

**Примеры:**  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$  ;  $n \rightarrow n + \pi^0$  ;  $n \rightarrow p + \pi^-$  ;

$p \rightarrow n + \pi^+$  ;  $p \rightarrow p + \pi^0$  .

**Гипотеза Гелл-Манна и Цвейга** (американские физики Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг, 1964 г. Нобелевская премия по физике, 1969 г.): адроны не элементарны, а состоят из более фундаментальных объектов.

**Кварки** – фундаментальные частицы, из которых состоят адроны.

Различают 6 типов (ароматов) кварков: *u*, *d*, *s*, *c*, *b* и *t*.

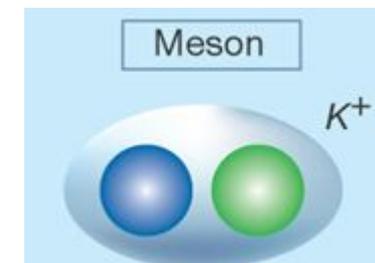
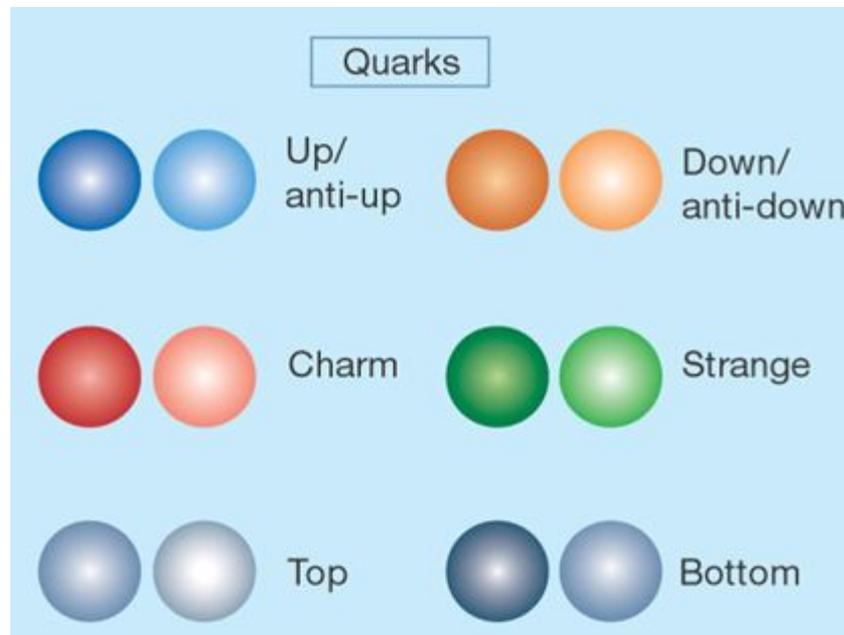
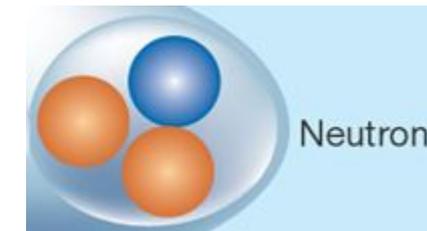
Кварки имеют дробный электрический заряд ( $+2/3$  или  $-1/3$  от элементарного электрического заряда) и не существуют отдельно друг от друга.

Все барионы состоят из трех кварков.

Например, протон:  $p = uud$ , нейтрон:  $n = ddu$ .

Все мезоны состоят из кварка и антикварка.

Например, пионы:  $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $\pi^- = d\bar{u}$ .



## Фундаментальные взаимодействия

**Сильное взаимодействие** имеет характер притяжения между большинством элементарных частиц; в частности оно обеспечивает связь нуклонов (протонов и нейтронов) в атомных ядрах.

Сильное взаимодействие проявляется только на очень малых расстояниях ( $\sim 10^{-15}$  м) и на этих расстояниях существенно (более чем в 100 раз) превосходит электромагнитное взаимодействие.

Количественно сильное взаимодействие характеризуется параметром

$$\alpha_s = \frac{g_{N\pi}^2}{4\pi\hbar c} \approx 14,8 . \quad (15.11)$$

Сильное взаимодействие между адронами происходит путем обмена  **$\pi$ -мезоном** (диаграмма Феймана на рисунке).



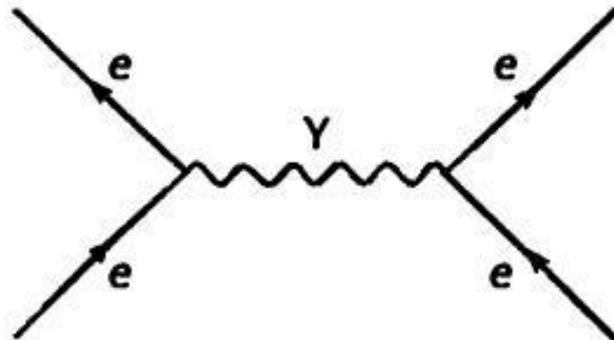
**Электромагнитное взаимодействие** обуславливает связь электрически заряженных частиц в атомах и молекулах; распространяется на значительные расстояния и описывается известными законами электричества и магнетизма.

Электромагнитное взаимодействие на два порядка слабее сильного взаимодействия и количественно характеризуется параметром

$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad . \quad (15.12)$$

Электромагнитное взаимодействие происходит путем обмена виртуальным (т.е. ненаблюдаемым) фотоном.

Диаграмма Феймана на рисунке: два электрона сближаются, обмениваются фотоном и удаляются друг от друга.



**Слабое взаимодействие** проявляется при взаимодействии некоторых элементарных частиц: адронов и лептонов.

В отличие от трех других видов взаимодействий слабое взаимодействие не приводит к образованию связанных состояний.

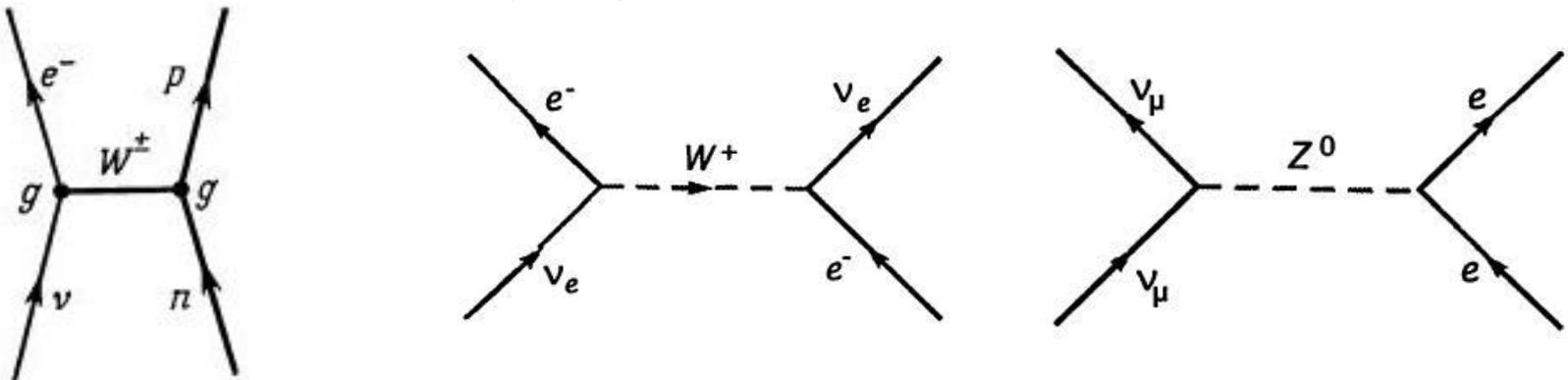
Слабое взаимодействие, в частности, ответственно за взаимодействие между электронами (или позитронами) и нуклонами, которое приводит к  $\beta$ -распаду.

Слабое взаимодействие осуществляется на очень малых расстояниях ( $\sim 10^{-18}$  м).

Параметр, характеризующий слабое взаимодействие

$$\alpha_W = \frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} \approx 10^{-5} \quad . \quad (15.13)$$

Слабое взаимодействие происходит путем обмена бозонами:  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$  (диаграмма Феймана на рисунке).



**Гравитационное взаимодействие** является самым универсальным взаимодействием; оно имеет характер притяжения между любыми материальными объектами, масса покоя которых отлична от нуля.

Гравитационное взаимодействие распространяется на очень большие расстояния (как и электромагнитное взаимодействие), однако в силу своей малости играет несущественную роль в микромире.

Параметр, характеризующий «интенсивность» гравитационного взаимодействия

$$\alpha_g = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 7 \cdot 10^{-39}. \quad (15.14)$$

Переносчиком гравитационного взаимодействия служит **гравитон**; ожидается, что он не заряжен, не имеет массы и его спин равен  $2\hbar$ . Гравитон экспериментально не обнаружен, хотя эксперименты по его обнаружению проводятся в настоящее время.