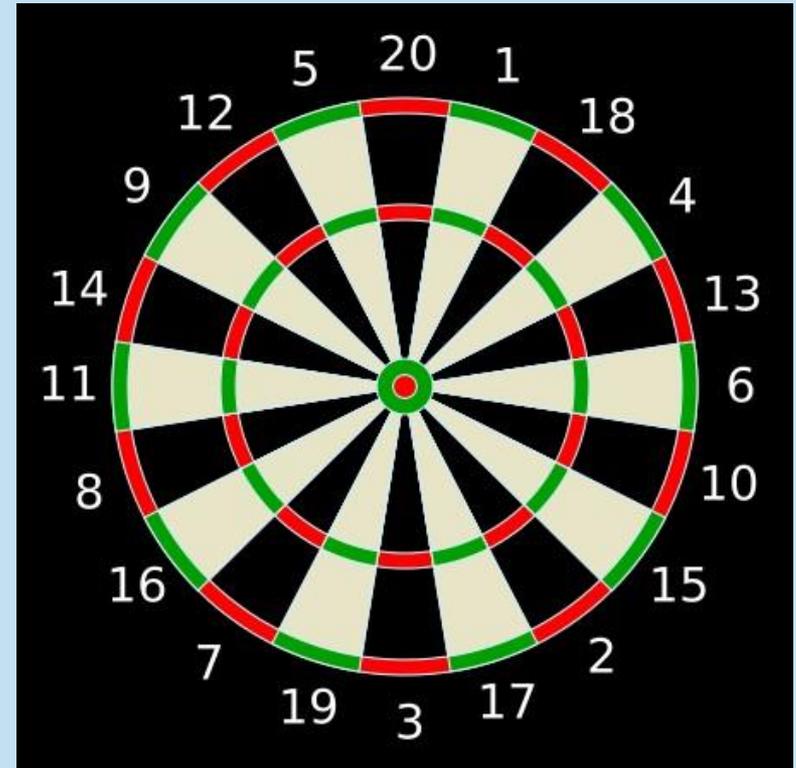


Эффективное сечение взаимодействия

Модель сталкивающихся шаров: ядра мишени рассматриваем как твердые шары с поперечным сечением σ , толщина мишени δ , концентрация n . Частицы потока рассматриваем как материальные точки. \Rightarrow вероятность попадания частицы в ядро:

$$P = n\sigma\delta, \quad \Delta N = NP,$$
$$\Rightarrow \sigma = \Delta N / Nn\delta$$

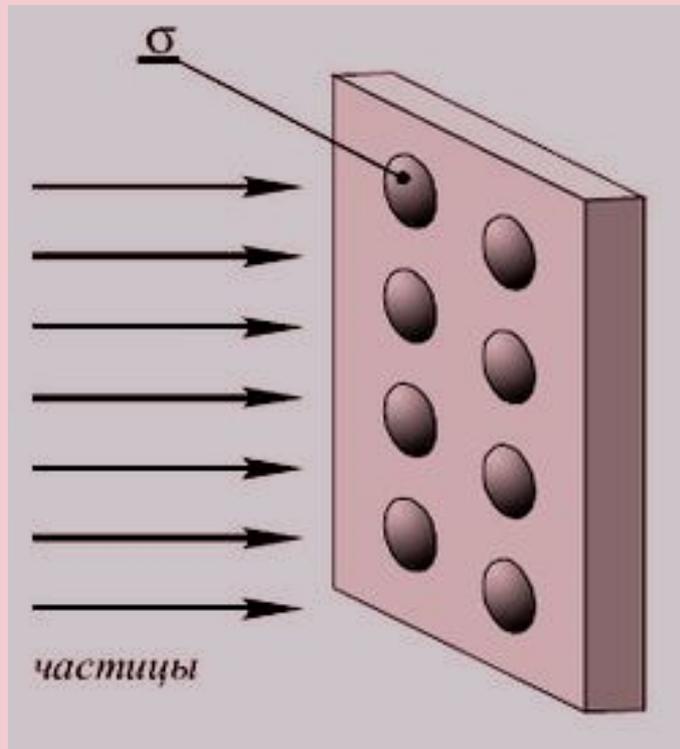
Для характеристики вероятности взаимодействия по аналогии с шарами используют величину σ , но ΔN теперь не число попаданий, а число реакций, \Rightarrow эффективное сечение данной реакции.



Эффективное сечение взаимодействия

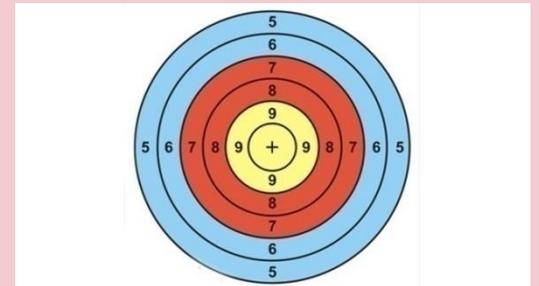
В случае толстой мишени: $dN = -N\sigma n dx$

$$N(x) = N_0 e^{-\sigma n x} \quad \text{и} \quad \sigma = \frac{1}{n\delta} \ln \frac{N_0}{N(\delta)}$$



Единица измерения

$$1 \text{ барн} \approx 10^{-24} \text{ см}^2 \\ \approx 10^{-28} \text{ м}^2.$$



Эффективное сечение взаимодействия

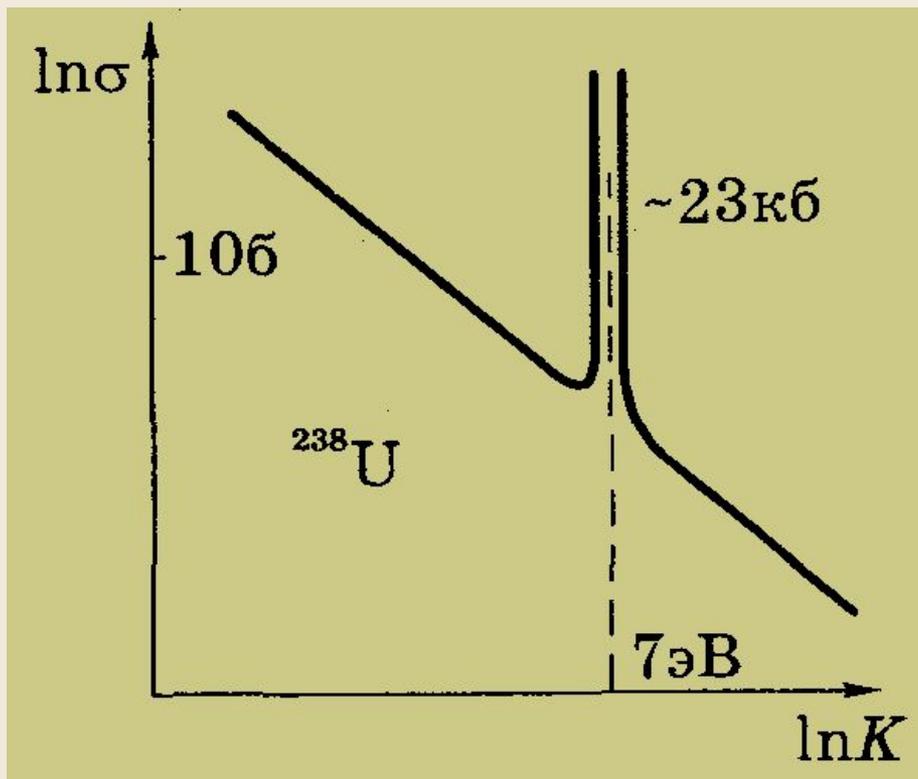
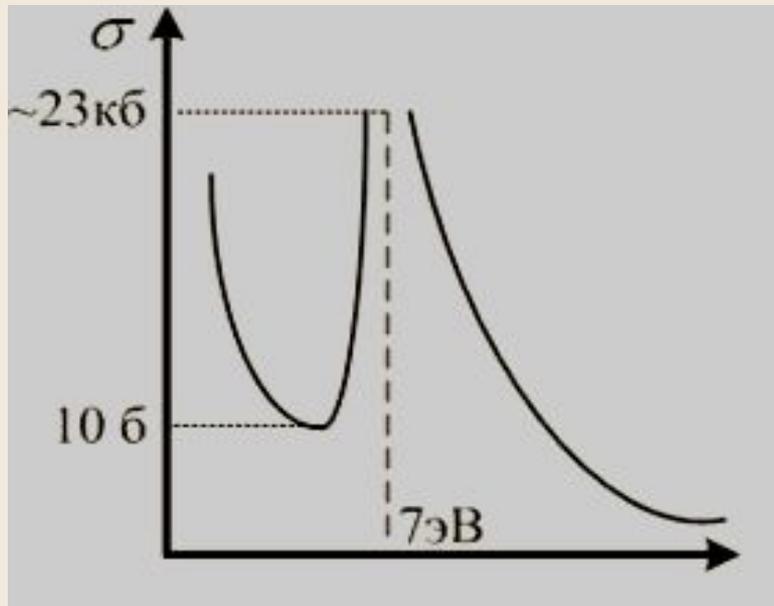
Эффективное сечение реакции на нейтронах возрастает при уменьшении энергии нейтронов, т.к. больше время нахождения в зоне действия ядерных сил,

⇒ больше вероятность захвата. $\sigma \sim E^{-0.5}$.

Однако часто наблюдается случай, когда сечение захвата имеет резко выраженный максимум для определенной энергии E_n , ⇒ Резонансное поглощение, т.е. энергии, приносимая в ядро нейтроном в точности равно той, которая необходима для перевода ядра на следующий энергетический уровень (аналогия для резонансного поглощения света).

Эффективное сечение взаимодействия

Резонансное поглощение нейтронов характерно для ${}_{92}\text{U}^{238}$ в области энергий $E_n = 7 \text{ эВ}$. Сечение захвата резко возрастает с нескольких барн до **23000 барн**. В этом случае происходит радиационный захват медленного нейтрона без деления.



Эффективное сечение взаимодействия

Сечение захвата тепловых нейтронов ${}_{92}\text{U}^{238} = 3 \text{ барна}$, а ${}_{92}\text{U}^{235} - 580 \text{ барн}$, \Rightarrow коэффициент размножения нейтронов немного больше единицы.

Замедление нейтронов за счет упругого рассеяния.

Максимальные потери энергии при столкновении с частицей одинаковой массы; \Rightarrow лучше всего подходит водород (вода), но протон вступает в реакцию с нейтроном

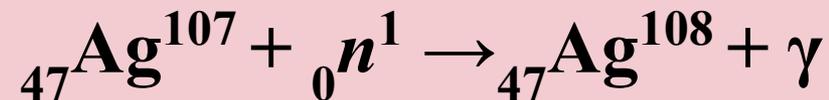


поэтому используют: ${}_1d^2$, ${}_6\text{C}^{14}$, ${}_4\text{Be}^9$. Обладают малым сечением захвата нейтрона. Для уменьшения нейтрона с 2 МэВ до тепловых энергий, надо 25 столкновений в тяжелой воде или 100 в графите или бериллии.

искусственная радиоактивность

Радиоактивные вещества, образующиеся в результате ядерных реакций, получили название искусственно радиоактивных, в отличие от естественно радиоактивных. Открытие в 1934 году Ирэн Кюри и Фредериком Жолио-Кюри.

Часто искусственно радиоактивные вещества получают при реакциях захвата нейтронов:



Избыточный нейтрон $\Rightarrow \beta$ – активность. В настоящее время получено по несколько искусственно радиоактивных изотопов для каждого элемента. Общее число искусственно радиоактивных изотопов ~ 1500 и около 40 естественно радиоактивных изотопов.

искусственная радиоактивность

При недостатке нейтронов возникает β^+ – активность, не наблюдаемая в природе,



${}_{15}\text{P}^{30}$ – β^+ активен,

${}_{15}\text{P}^{31}$ – единственный стабильный природный изотоп.

α – активность наблюдается только в конце периодической таблицы!

Элементарные частицы

Элементарные частицы: микрочастицы, внутреннюю структуру которых на данном этапе нельзя представить как объединение других частиц.

Во всех наблюдаемых явлениях такая частица ведет себя как единое целое.

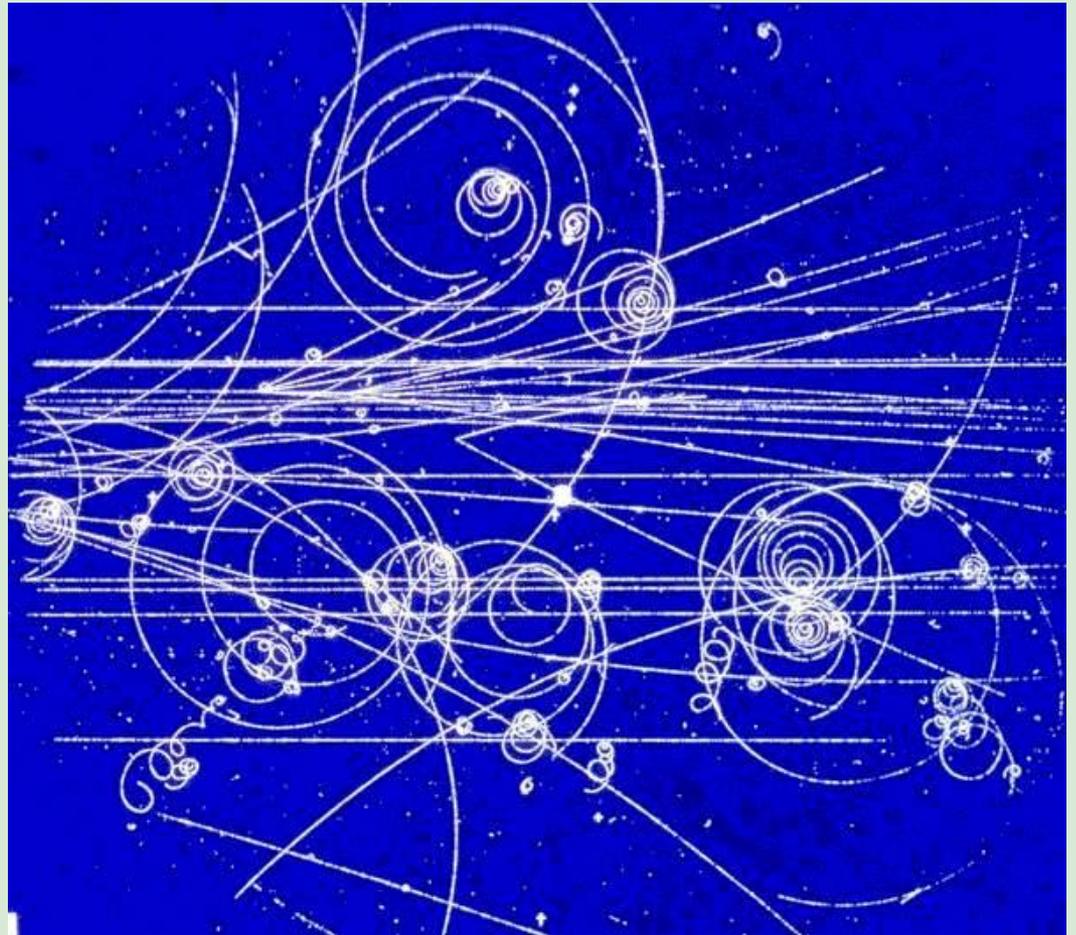
Элементарные частицы могут превращаться в другие элементарные частицы.

Элементарные частицы наделяются массой, электрическим зарядом, спином и рядом дополнительных характеристик. Наиболее известные: протон, нейтрон, электрон и фотон.

Элементарные частицы

Элементарные частицы удается наблюдать благодаря следам (трекам), которые они оставляют, проходя через вещество.

Треки позволяют судить о знаке заряда, энергии, импульсе. Заряженные частицы вызывают ионизацию молекул своим пути, нейтральные частицы обнаруживают себя в момент распада на заряженные частицы или в момент столкновения с ядром.



Элементарные частицы

Открытие нейтрона

1932 г. Дж. Чедвик

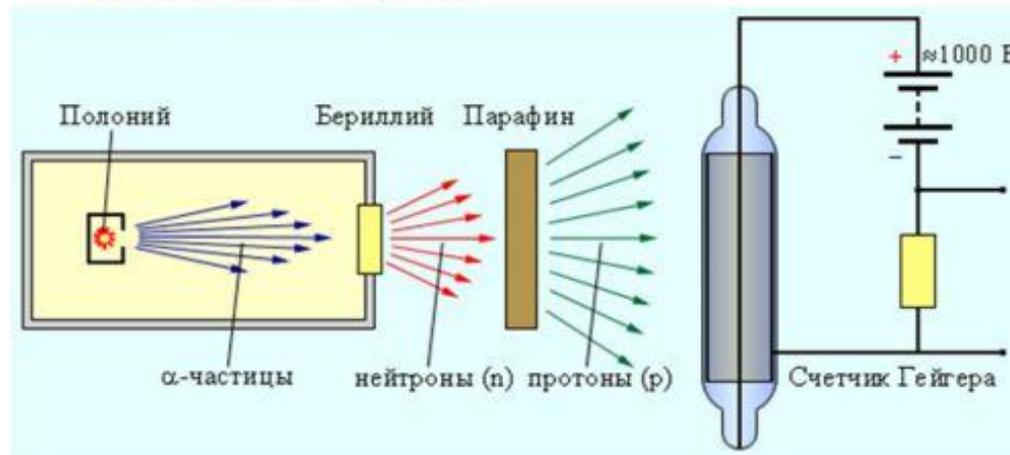
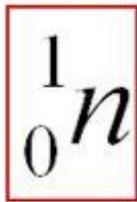
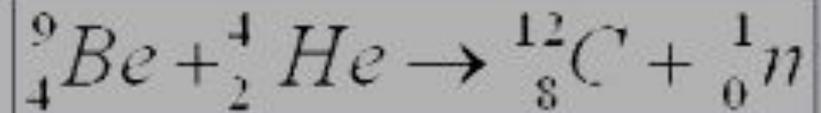


Схема установки для обнаружения нейтронов



масса нейтрона

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



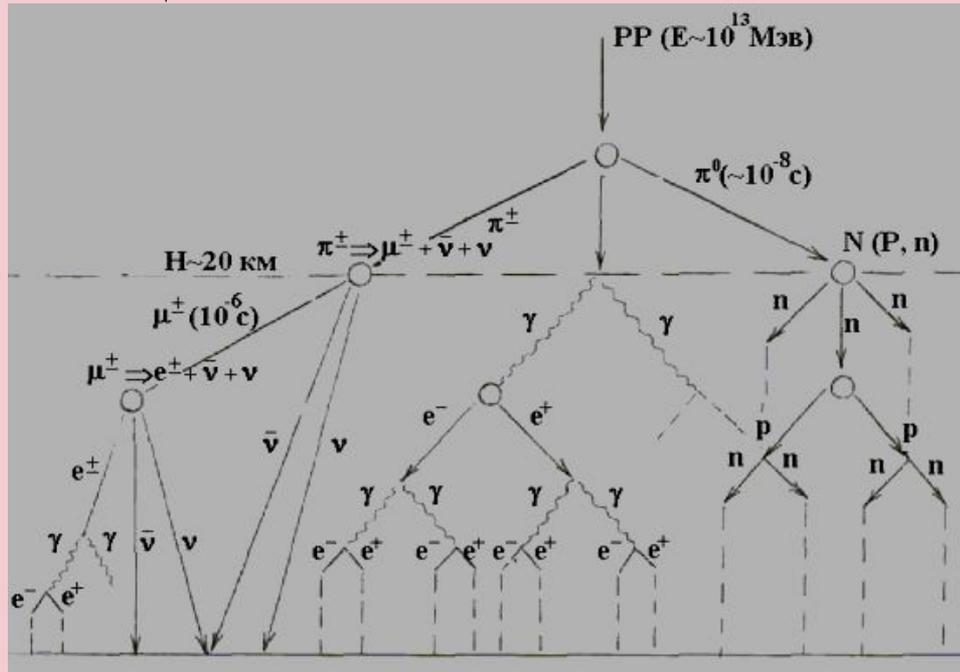
Элементарные частицы

Для регистрации частиц применяются две группы приборов. Регистрирующие: сцинтилляционные, полупроводниковые, газоразрядные и черенковские счетчики, ионизационные камеры. Трековые приборы, позволяющие наблюдать треки: камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, искровая камера, эмульсионная камера.

Первыми источниками частиц были радиоактивные элементы. Но уже в первых исследованиях было замечено, что в ионизационной камере есть ток и в отсутствие препарата. \Rightarrow остаточная ионизация? Проверка на радиоактивность почвы, \Rightarrow подъем на высоту, \Rightarrow усиление остаточной ионизации в **40** раз на высоте **9 км**. \Rightarrow космические лучи. Независимость от положения других планет Луны и Солнца.

Элементарные частицы

Первичное космическое излучение в основном состоит из быстрых протонов, обладающих огромной энергией (до 10^{21} эВ) Столкновения в атмосфере \Rightarrow образование новых частиц \Rightarrow вторичное излучение меньших энергий. Во вторичном излучении встречаются все известные элементарные частицы.



В атмосфере происходят процессы размножения и поглощения частиц. Максимальная интенсивность на высоте ~ 20 км. \Rightarrow естественная лаборатория.

Элементарные частицы

П. Дирак в 1928 году нашел релятивистское квантовомеханическое уравнение (аналог уравнения Шредингера), из которого уже естественным образом получается спин электрона и предсказание существования его античастицы – позитрона.

При заданном импульсе p , существуют решения, соответствующие энергиям:

$$E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m^2 c^4}$$

Между наибольшей отрицательной ($-mc^2$) и наименьшей положительной (mc^2) интервал шириной $2mc^2$, значений энергии, которые не могут реализоваться, \Rightarrow две области собственных (разрешенных) значений энергии.

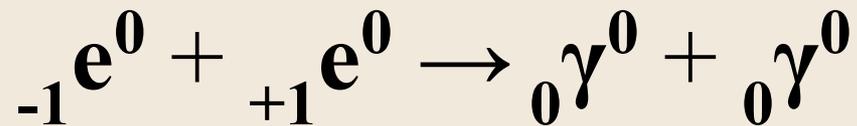
Элементарные частицы

Квантовый эффект: энергия может изменяться скачком, \Rightarrow возможны и отрицательные значения (аналогия с полупроводником). Странные свойства частицы с отрицательной энергией (может отдавать энергию до бесконечности). Вывод Дирака: все уровни отрицательной энергии заняты, \Rightarrow вакуум есть состояние, в котором уровни с отрицательной энергией заняты электронами, а уровни с положительной энергией свободны, Т.к. заняты все уровни с отрицательной энергией, то электроны там себя никак не проявляют.

Если одному электрону на отрицательном уровне сообщить энергию $E = 2mc^2$, то он перейдет на положительный уровень и будет себя проявлять, а вакансия (дырка) будет тоже проявлять себя как частица с положительным зарядом и массой (у электрона там отрицательная масса).

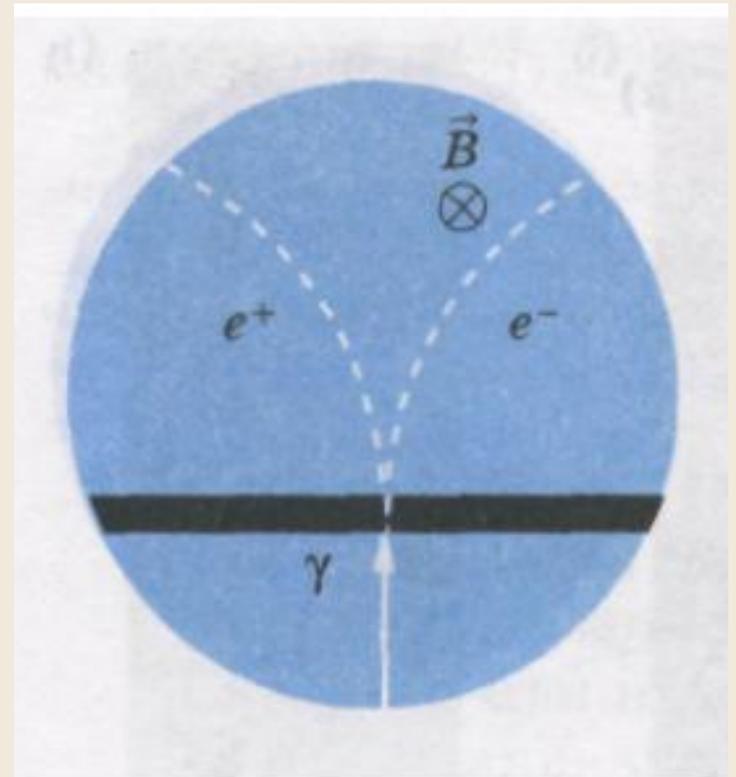
Элементарные частицы

При встрече электрон и позитрон аннигилируют (электрон переходит с положительного уровня на вакантный отрицательный), частицы превращаются в γ – кванты.



В 1932 году Карл Андерсон (Ам.) обнаружил позитрон в космических лучах, в камере Вильсона.

Электронно – позитронные пары – мягкая составляющая космических лучей.



Элементарные частицы

Рождение электронно – позитронных пар происходит при прохождении γ – фотонов через вещество и является одним из процессов, приводящих к поглощению γ – лучей веществом.

Минимальная энергия γ – фотона при этом

$$2m_e c^2 = 1.02 \text{ МэВ}.$$

Для соблюдения закона сохранения импульса, в процессе должна участвовать еще одна частица:

$$\text{электрон} - \gamma + \bar{e} = \bar{e} + \bar{e} + e^+$$

$$\text{или ядро} - \gamma + X = X + \bar{e} + e^+.$$

Рождение происходит в силовом поле. Порог второй реакции

$\approx 2m_e c^2$, а первой $4m_e c^2$. Может происходить еще одна

реакция: $-\bar{e} + \bar{e} = \bar{e} + \bar{e} + \bar{e} + e^+$; ее порог еще выше $\approx 7m_e c^2$.

Элементарные частицы

Позитроны образуются еще при β^+ – распаде (позитронный распад) искусственных радиоактивных изотопов.

Например: ${}_8\text{O}^{15}$, ${}_7\text{N}^{13}$.

Если в ядре избыток протонов $\rightarrow \beta^+$ – распад, если избыток нейтронов, то β^- – распад (${}_{19}\text{K}^{40}$, ${}_{90}\text{Th}^{234}$).

Возможны три варианта β – распада:

первый – ядро испускает электрон,

второй – ядро захватывает электрон из К – оболочки,

третий – ядро испускает позитрон.

Элементарные частицы

β – частицы, в отличие от α – частиц, обладают самой разнообразной кинетической энергией, от $E_{min} = 0$ до E_{max} , E_{max} соответствует разности энергий покоя ядра и продуктов. Чтобы объяснить исчезновение энергии, В Паули в 1932 году предположил, что вместе с электроном испускается еще одна частица, которая и уносит избыток энергии. Она мала и нейтральна \Rightarrow нейтрино.

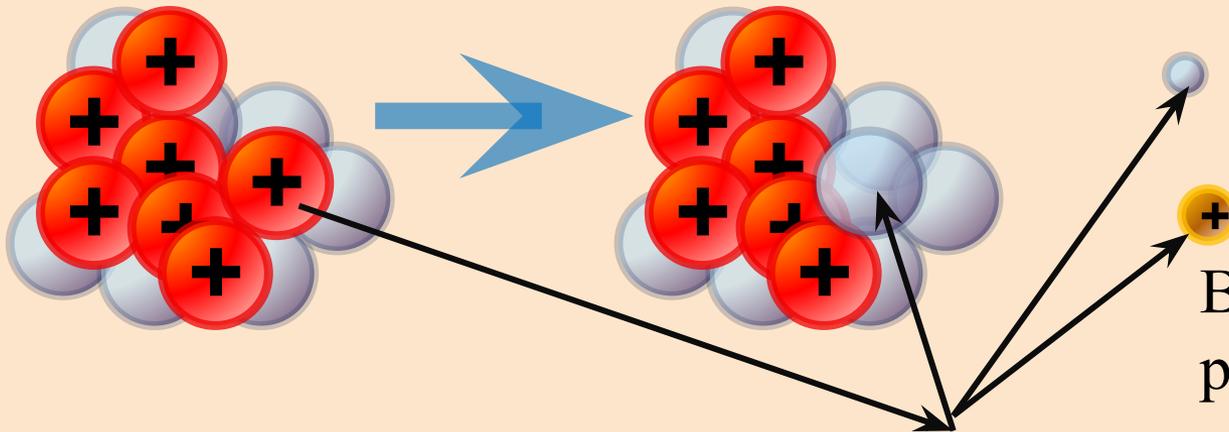
Кроме энергии должен сохраняться спин, у электрона он равен $\frac{1}{2}$, а у ядра не изменяется, т.к. число нуклонов остается тем же, \Rightarrow у нейтрино полуцелый спин, равный $\frac{1}{2}$.

Непосредственное экспериментальное доказательство нейтрино 1956 год, реакция

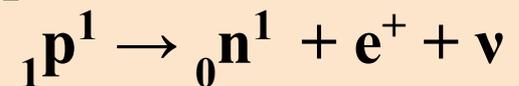


Элементарные частицы

Примеры β – распадов:

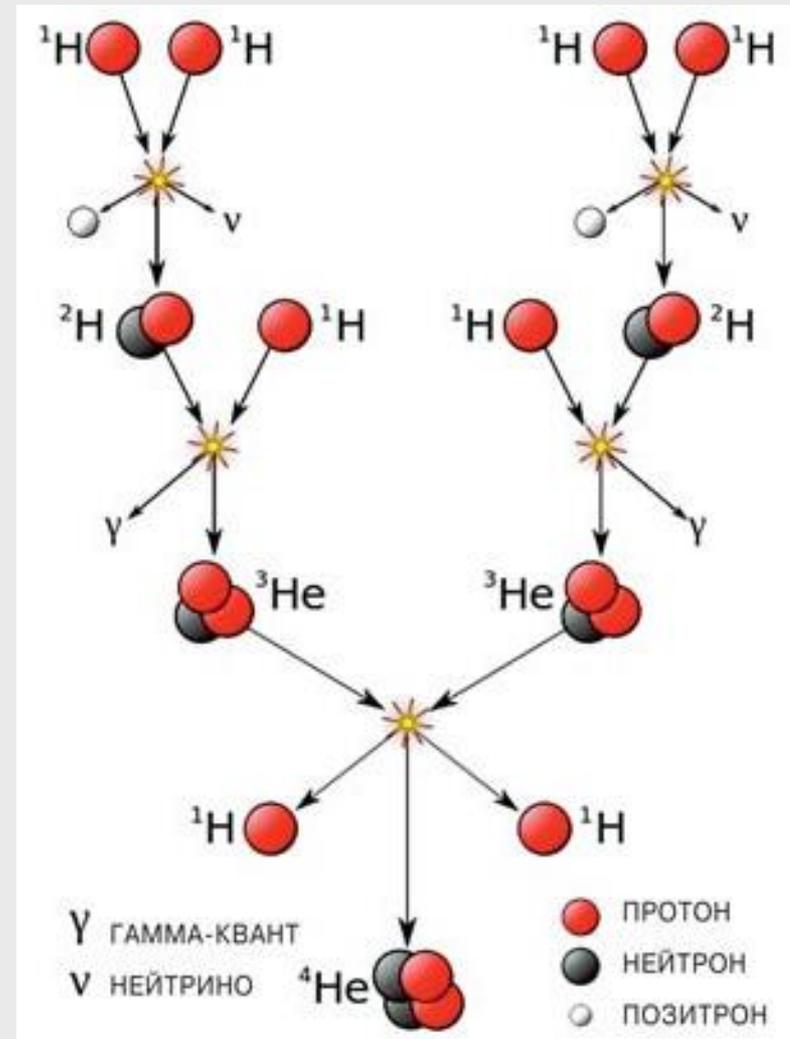
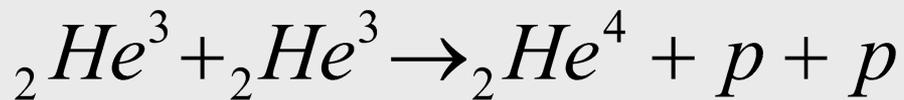
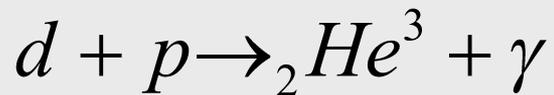


В основе распада
реакция:



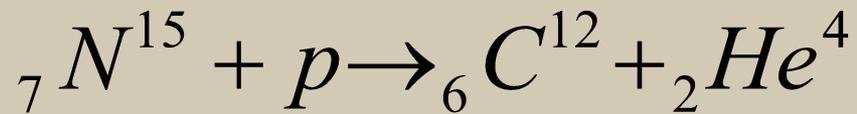
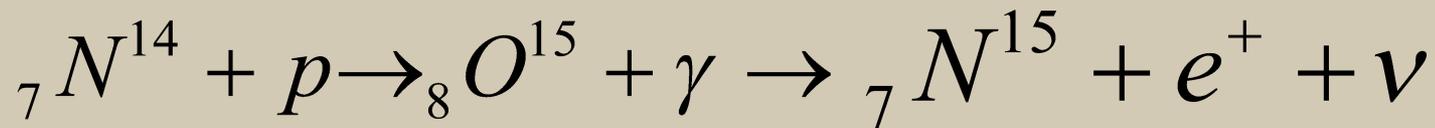
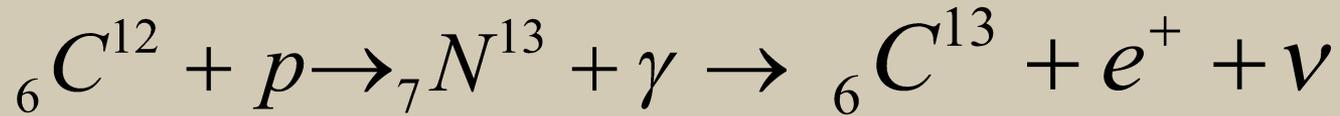
Элементарные частицы

В недрах Солнца и звезд протекает протонно – протонный цикл:



Элементарные частицы

И углеродно – азотный цикл:



Результат обоих циклов – превращение 4 протонов в ядро He с рождением 2 позитронов и γ -излучения. На ядро He выделяется **26.8 Мэв** энергии:



Элементарные частицы

Другие источники элементарных частиц: реакторы и ускорители. Продолжаются интенсивные исследования.

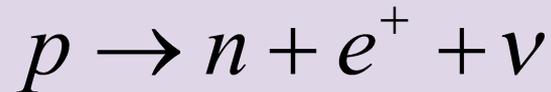
Начиная с 1932 года было открыто более 400 элементарных частиц.

Каждая элементарная частица имеет античастицу.

Все элементарные частицы превращаются друг в друга.

Элементарные частицы

Процесс β^+ – распада протекает так, как если бы один из протонов исходного ядра превратился в нейтрон



Для свободного протона такой процесс невозможен (нарушение закона сохранения энергии). В ядре протон может заимствовать энергию у других нуклонов.

Нейтрино возникает при позитронном распаде, а при электронном распаде возникает антинейтрино, т.к. рождаться частицы должны одновременно с античастицами. Электронов в ядре нет, \Rightarrow рождение при распаде.

Элементарные частицы

Уравнение Дирака применимо и к другим фермионам, \Rightarrow существуют антипротоны и антинейтроны. Пары частица – античастица нуклонов образуются при столкновениях с большими энергиями – $p + p = p + p + p + \tilde{p}$

$$\text{или} - p + n = p + n + p + \tilde{p}$$

Пороговая энергия **4.3 ГэВ** (т.к. один из нуклонов входит в состав ядра мишени).

Суммарная энергия покоя $p + \tilde{p}$ – составляет **2 ГэВ**

\tilde{p} отрицательно заряжен, имеет отрицательный магнитный момент и аннигилирует с протоном и нейтроном!!!

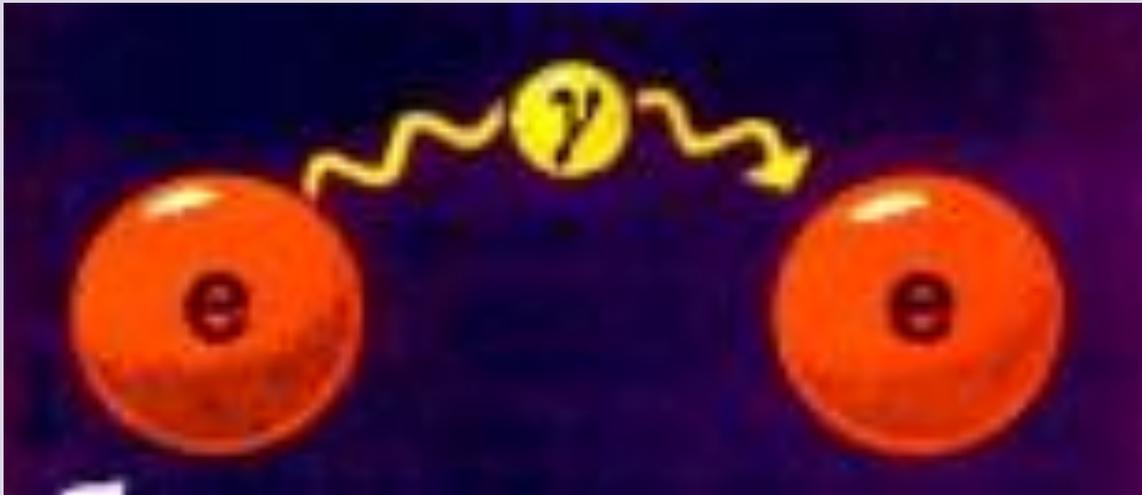
Элементарные частицы

Взаимодействия между частицами передаются с конечной скоростью, не превышающей скорости света. В случае заряженных частиц, взаимодействие передается посредством электромагнитного поля. Аналогично. Гравитационное поле создается вокруг массивных тел и передает взаимодействие между ними. Ядерному взаимодействию соответствует поле ядерных сил.

Кроме полей, созданных зарядами, существуют и свободные электромагнитные поля, распространяются электромагнитные волны = потоки фотонов. Согласно представлениям квантовой электродинамики, взаимодействие между заряженными частицами заключается в обмене фотонами. Частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Действие на другую частицу проявляется в результате поглощения ею фотонов, испущенных первой частицей.

Элементарные частицы

Фотоны в этом случае являются виртуальными, они не могут быть обнаружены за время их существования \Rightarrow не обнаруживается нарушение закона сохранения энергии ($\bar{e} \leftrightarrow \bar{e} = \hbar\omega$). Принцип неопределенности $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \Rightarrow$ отклонение ΔE длительностью Δt вполне допустимо.

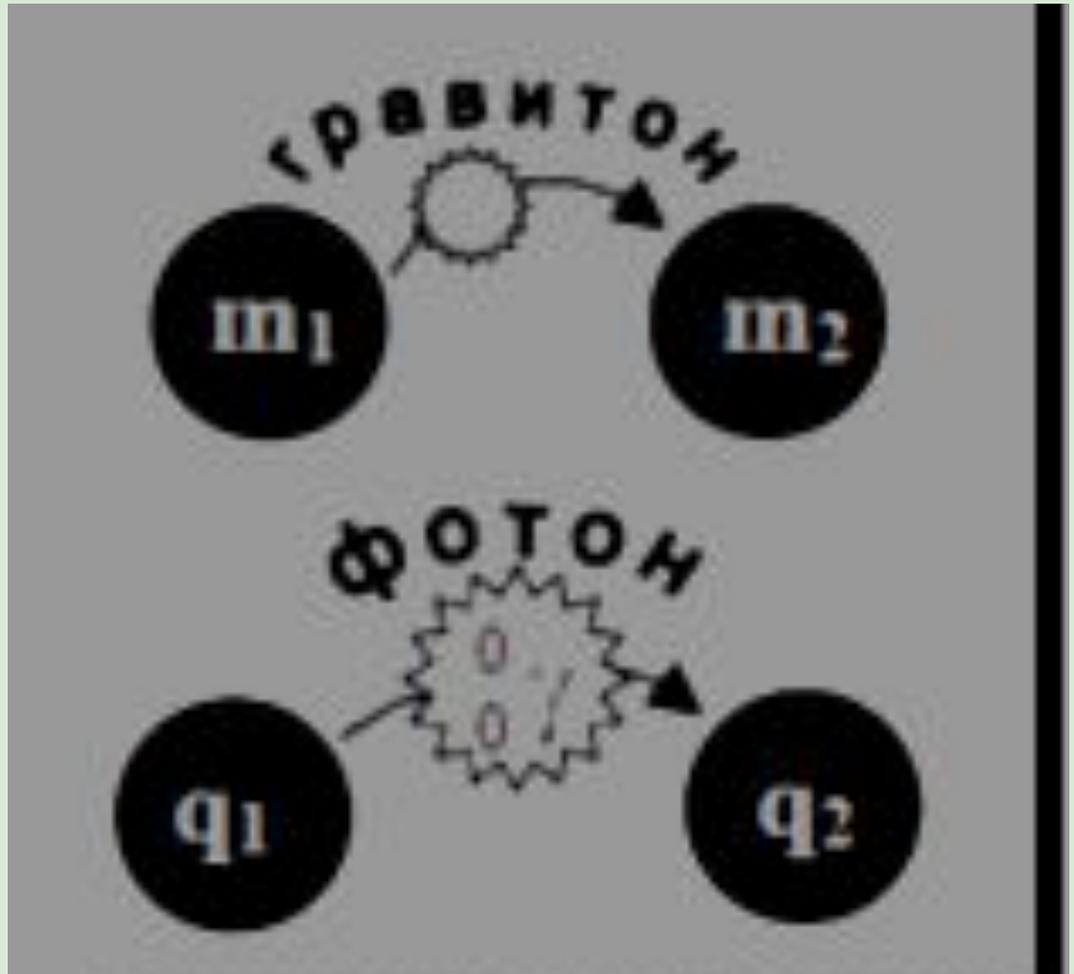


При сообщении электрону дополнительной энергии может быть испущен реальный фотон, который может существовать неограниченно долго.

Элементарные частицы

Виртуальный фотон за время своего существования может передать взаимодействие на расстояние

$r = c\Delta t = c/\omega = c\hbar/\varepsilon$,
 $0 < \omega < +\infty \Rightarrow$ радиус действия неограничен.



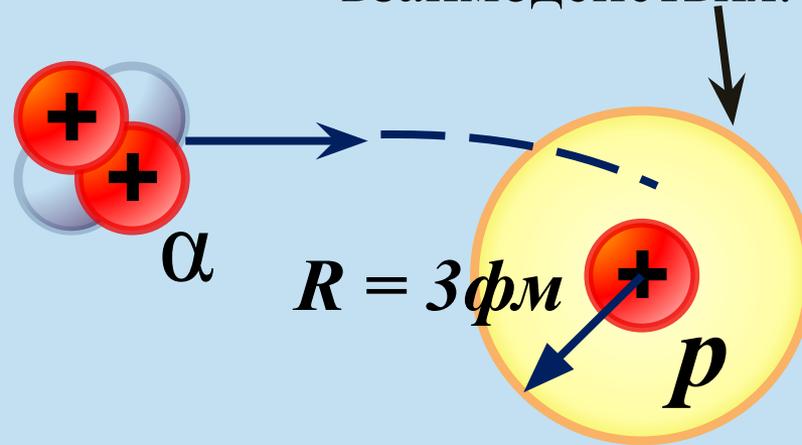
Элементарные частицы

Если бы передача взаимодействия осуществлялась частицами конечной массы, радиус действия был бы ограничен;

$$r = v\Delta t_{max} = \frac{c\hbar}{mc^2} = \lambda_C$$

– КОМПТОНОВСКАЯ
длина.
⇒ Сильное
взаимодействие.

Область сильного
взаимодействия.



Элементарные частицы

Предположение: И.Е. Тамм в 1934 году: Взаимодействие посредством каких-то виртуальных частиц. Электрон и нейтрино не подошли. $\lambda_c \approx 4 \cdot 10^{-14}$ м. и силы очень малы.

В 1935 году Юкава: пока не обнаруженные частицы с массой покоя $200 \div 300$ масс электрона (тяжелые фотоны). \Rightarrow мезоны.

1936 год, Андерсон обнаружил в космических лучах частицы с массой $207 m_e \Rightarrow \mu$ – мезоны, но слабо взаимодействуют с нуклонами и не могут отвечать за ядерные силы.

1947 год. Пауэл и Оккиалини, тоже в космических лучах, открыли π – мезоны, которые оказались носителями ядерного взаимодействия.

Элементарные частицы

Существуют π – мезоны положительно (π^+) и отрицательно (π^-) заряженные и нейтральные (π^0).

Заряд π^+ и π^- равен элементарному заряду \bar{e} ,

массы – $273 m_e$ (140 МэВ),

масса π^0 мезона – $264 m_e$ (135 МэВ).

Спин всех мезонов нулевой.

Все π – мезоны нестабильны.

Время жизни: π^+ и π^- – мезонов = $2.6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$,

π^0 мезона = $0.8 \cdot 10^{-16} \text{ с}$

μ – мезоны сильно отличаются от π – мезонов и более сходны с электронами (нейтрального не существует и спин $s = 1/2$) \Rightarrow относят к классу лептонов вместе с электронами и нейтрино.

Мюоны также нестабильны. Время жизни $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Элементарные частицы

Нуклон окружает себя облаком виртуальных π – мезонов в результате процессов:

$$p \Leftrightarrow n + \pi^+ \quad p \Leftrightarrow p + \pi^0 \quad n \Leftrightarrow p + \pi^- \quad n \Leftrightarrow n + \pi^0$$

Поглощение мезонов другим нуклоном приводит к сильному взаимодействию между нуклонами. (α – распад, ядерные реакции).

Виртуальный π – мезон может стать реальным, если нуклону сообщить энергию, эквивалентную массе π – мезона. При очень больших энергиях соударения частиц или γ – квантов может возникнуть несколько π – мезонов.

Виртуальные π – мезоны объясняют существование магнитного момента у нейтрона аномального магнитного момента у протона. (орбитальное движение π^+ или π^- – мезонов).

Элементарные частицы

Обменное взаимодействие протона и нейтрона

π^+ – мезон – виртуальный переносчик взаимодействия

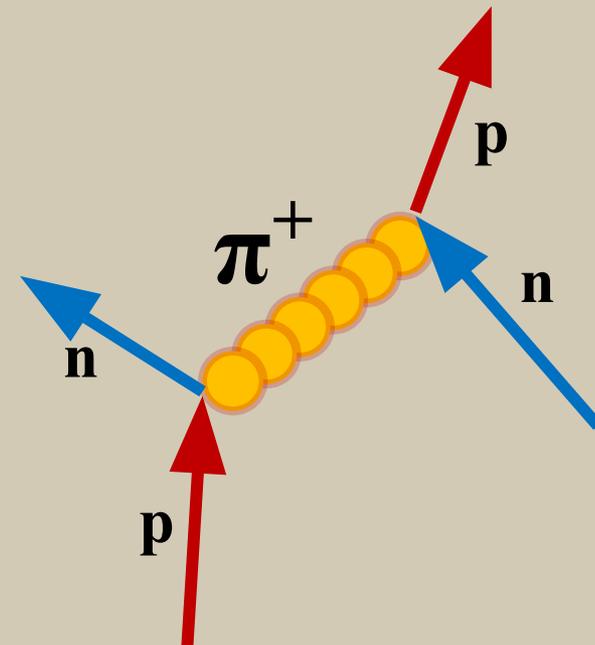


Диаграмма Фейнмана,
описывающая взаимодействие
протона и нейтрона

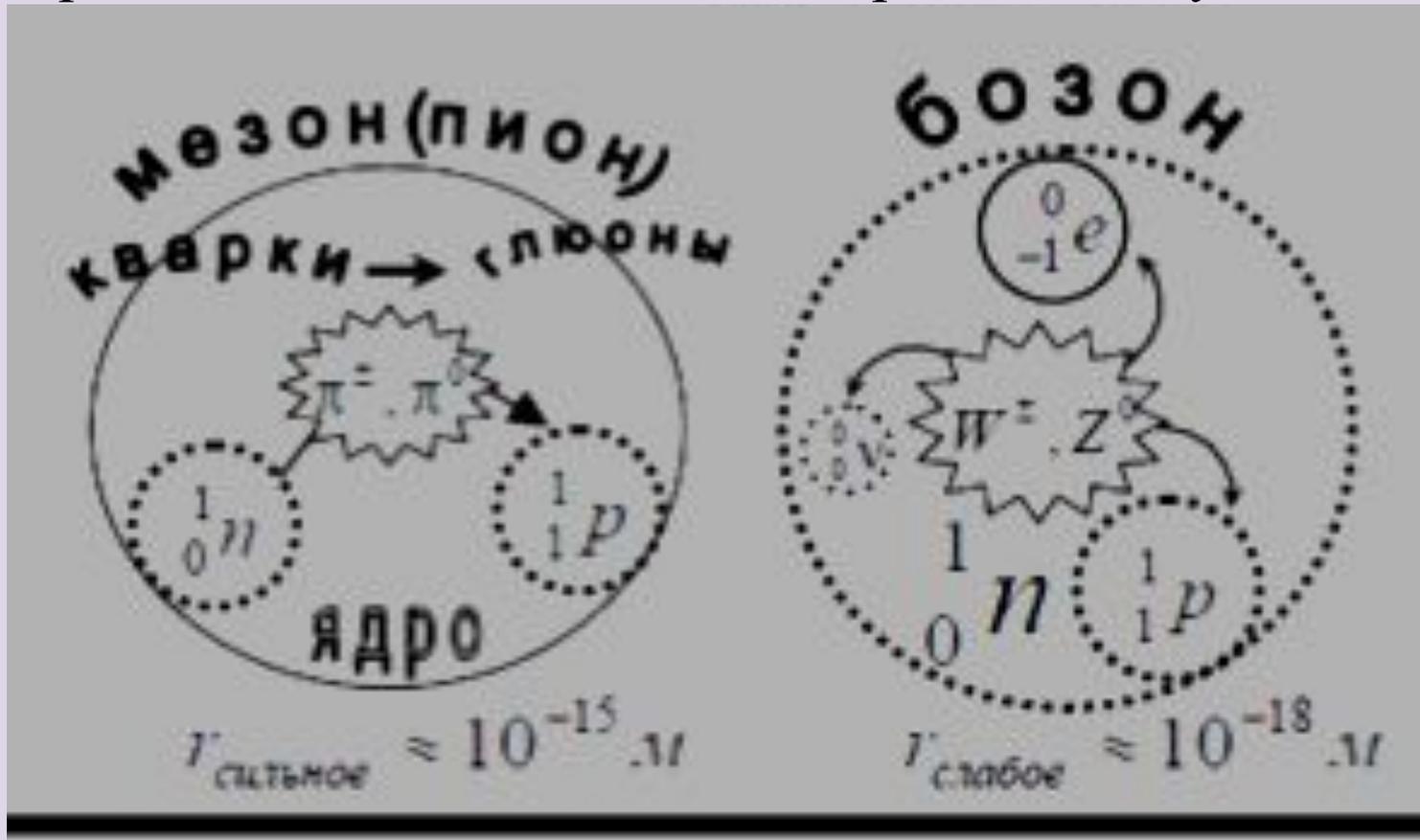
Элементарные частицы

Всего известно четыре вида взаимодействия между элементарными частицами: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Интенсивность взаимодействий характеризует константа взаимодействия. (безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия).

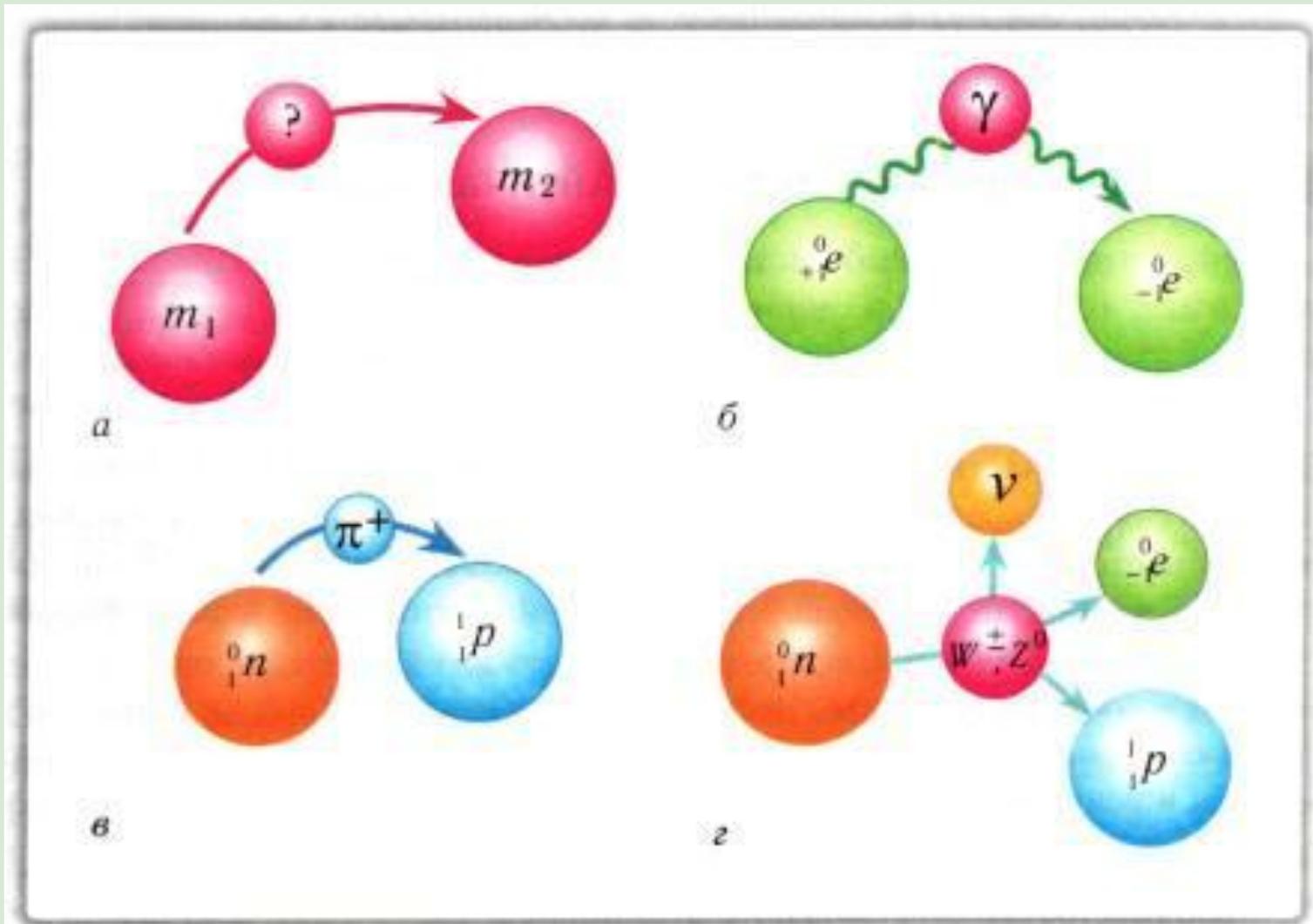
Взаимодействие	константа	Время жизни частиц, распадающихся за счет данного взаимодействия
Сильное	10	10^{-23} с
Электромагнитное	10^{-2}	10^{-16} с
Слабое	10^{-14}	10^{-8} с
Гравитационное	10^{-39}	—

Элементарные частицы

Слабое взаимодействие отвечает за все виды β – распада, за многие распады элементарных частиц и взаимодействие нейтрино с веществом. Является короткодействующим.



Элементарные частицы



Элементарные частицы



Элементарные частицы подразделяются на четыре класса: фотоны, лептоны, мезоны, и барионы. Мезоны и барионы – сильновзаимодействующие частицы – **адроны**.

Элементарные частицы

Фотоны не участвуют в сильных и слабых взаимодействиях.

Лептоны: электроны, мюоны, τ – лептоны (1975) и соответствующие им нейтрино – все являются фермионами со спином $\frac{1}{2}$, участвуют в слабых взаимодействиях.

Мезоны (π – мезоны, K – мезоны, η – мезоны). Масса K – мезона – $970 m_e$ (494 МэВ и 498 МэВ), масса η – мезона $1074 m_e$ (549 МэВ). Спин всех мезонов равен нулю \Rightarrow бозоны. Время жизни соответственно 10^{-8} с и 10^{-16} с .

Барионы: нуклоны и гипероны (Λ , $\Sigma^{\pm 0}$, Ξ^{0-} , Ω^-). Все являются фермионами со спином $\frac{1}{2}$. Сильно взаимодействуют с ядрами. Гипероны нестабильны.

При распаде бариона обязательно образуется барион, \Rightarrow закон сохранения барионного заряда, \Rightarrow стабильность протона.

Элементарные частицы

Лептонам присписывается лептонный заряд $+1$,
антилептонам -1 ,
остальным частицам 0 ,
 \Rightarrow закон сохранения лептонного заряда.



Элементарные частицы

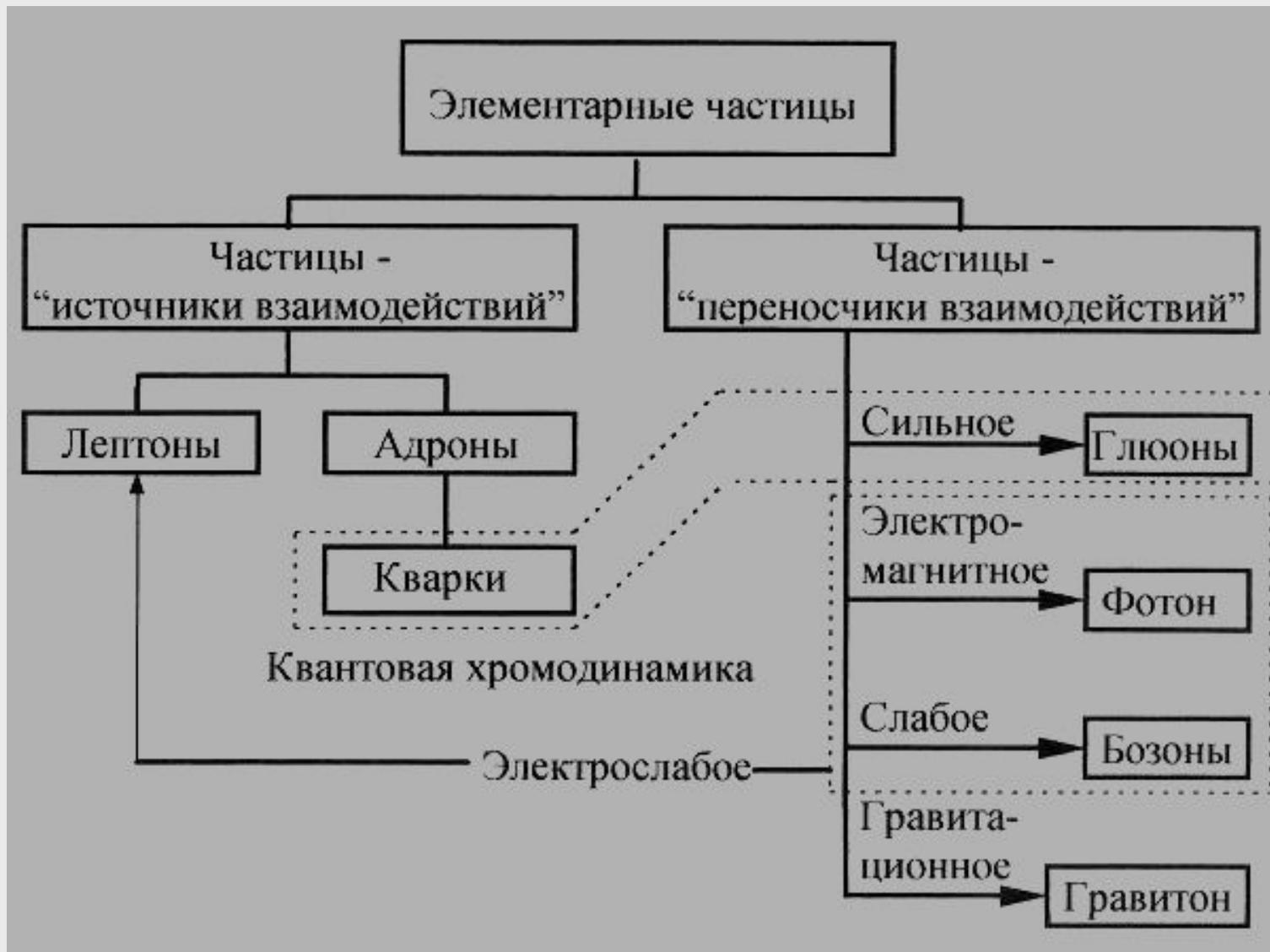


ТАБЛИЦА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

ЧАСТИЦА		СИМВОЛ*	МАССА		ВРЕМЯ ЖИЗНИ, τ , с	СПИН, \hbar	ЗАРЯДЫ			ИЗОТОП-СПИН		СТРАННОСТЬ, S	ПРЕОБЛАДАЮЩАЯ СХЕМА РАСПАДА
			МэВ	m_e			Q	L	B	T	T_z		
Фотон		γ	0	0	∞	1	0	0	0				
ЛЕПТОНЫ	Нейтрино	$\nu \quad \bar{\nu}$	0	0	∞	1/2	0	+1	0				
	Электрон	$e^- \quad e^+$	0,511	1	∞	1/2	-1	+1	0				
	Мюон	$\mu^- \quad \mu^+$	105,66	206,77	$2,2 \cdot 10^{-6}$	1/2	-1	+1	0				$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
	Таон	$\tau^- \quad \tau^+$	1782	3490	$3,5 \cdot 10^{-12}$	1/2	-1	+1	0				$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu$
МЕЗОНЫ	Пи-мезоны	$\pi^+ \quad \pi^-$	139,6	273,2	$2,55 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0	1	+1	0	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
		π^0	135,0	264,2	$2 \cdot 10^{-16}$	0	0	0	0	1	0	0	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
	Ка-мезоны	$K^+ \quad K^-$	493,8	966,3	$1,23 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0	1/2	+1/2	+1	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
		$K^0 \quad \bar{K}^0$	498,0	974,5	$10^{-10} - 10^{-8}$	0	0	0	0	1/2	-1/2	-1	$K^0 \rightarrow 2\pi, \pi e \nu$
	Эта-мезон	η	548,8	1074	$2,4 \cdot 10^{-19}$	0	0	0	0	0	0	0	$\eta \rightarrow 2\gamma, 3\pi$
Фи-мезон	ϕ	1019	1995	-10^{-19}	1	0	0	0	0	0	0	$\phi \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	
БАРИОНЫ	Протон	$p \quad \bar{p}$	938,26	1836,1	∞	1/2	+1	0	+1	1/2	+1/2	0	
	Нейтрон	$n \quad \bar{n}$	939,55	1838,6	$1 \cdot 10^3$	1/2	0	0	+1	1/2	-1/2	0	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
	Лямбда-гиперон	$\Lambda^0 \quad \bar{\Lambda}^0$	1115,4	2182,8	$2,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	0	+1	0	0	-1	$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$
		$\Sigma^+ \quad \bar{\Sigma}^-$	1189,4	2328	$0,8 \cdot 10^{-10}$	1/2	+1	0	+1	1	+1	-1	$\Sigma^+ \rightarrow N + \pi$
	Сигма-гипероны	$\Sigma^- \quad \bar{\Sigma}^+$	1197	2342	$1,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1	1	-1	-1	$\Sigma^- \rightarrow N + \pi^-$
		$\Sigma^0 \quad \bar{\Sigma}^0$	2292	2333	$< 10^{-14}$	1/2	0	0	+1	1	0	-1	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$
	Кси-гипероны	$\Xi^- \quad \bar{\Xi}^+$	1321	2585	$1,7 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1	1/2	-1/2	-2	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
		$\Xi^0 \quad \bar{\Xi}^0$	1314	2572	$3 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	0	+1	1/2	+1/2	-2	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$
Омега-гиперон	$\Omega^- \quad \bar{\Omega}^+$	1675	3278	-10^{-10}	3/2	-1	0	+1	0	0	-3	$\Omega \rightarrow \Xi + \pi, \Lambda^0 + K^-$	

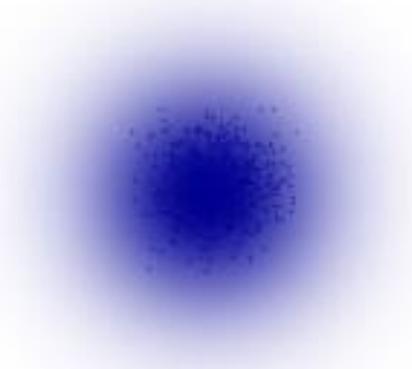
* Справа указаны символы соответствующих античастиц

ПРИМЕЧАНИЕ. Античастицы имеют тождественные с частицей значения массы, времени жизни, спина и изотопспина T и противоположные по знаку значения электрического Q, лептонного L и барионного B зарядов, проекции изотопспина T_z , и странности S.

Элементарные частицы

Протон с точки зрения

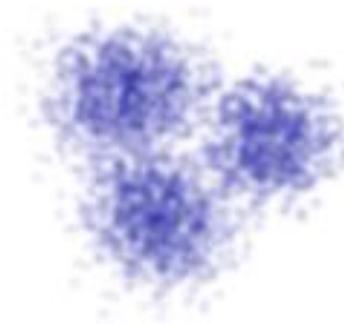
а) протона



=



б) фотона



=



в) нейтрино



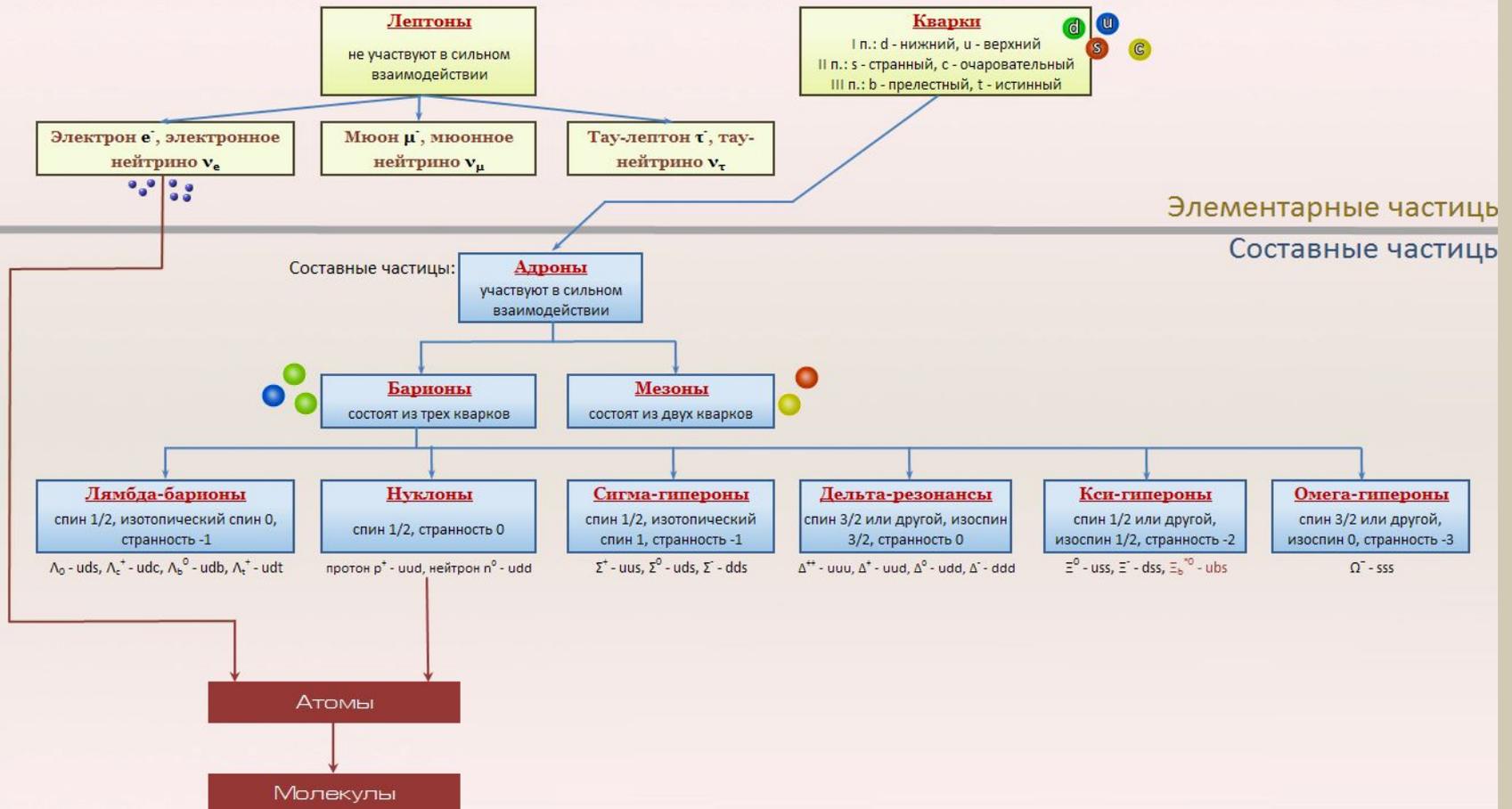
=



эффективное сечение

Элементарные частицы

Частицы, составляющие материю



Элементарные частицы



Элементарные частицы

THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon

Higgs boson*

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
название →	u верхний	c очаровательный	t истинный	γ фотон
Кварки	4,8 МэВ $-\frac{1}{3}$	104 МэВ $-\frac{1}{3}$	4,2 ГэВ $-\frac{1}{3}$	0
	d нижний	s странный	b прекрасный	0
Лептоны	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	g глюон
	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	W^0 слабое взаимодействие	Z^0 слабое взаимодействие	Z^0 слабое взаимодействие	Z^0 слабое взаимодействие
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e электрон	μ мюон	τ тау	W^\pm слабое взаимодействие

Бозоны (переносчики взаимодействия)

