

ЛЕКЦИЯ № 10

11. Ядерная физика

Ядро атома: размер $\sim 10^{-15}$ м, положительный заряд.

${}_Z^MX$ Z – порядковый номер атома = зарядовое число ядра,
 M – массовое число ядра = масса ядра в а.е.м.

$$(1 \text{ а.е.м.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг})$$

Изотопы: ${}_Z^{M_1}X$, ${}_Z^{M_2}X$, ${}_Z^{M_3}X$ и т. д.

(водород: ${}_1^1H$ – протий, ${}_1^2H$ – дейтерий (дейтон), ${}_1^3H$ – тритий).

Водород ${}_1^1H \rightarrow$ гелий ${}_2^4He \rightarrow$ в ядре есть положительно заряженные частицы и нейтральные частицы.

Российский физик Д. Д. Иваненко \rightarrow модель ядра:

В любом ядре атома находятся **нуклоны**: положительно заряженные протоны p и нейтральные нейтроны n .

Протон: $q_p = +e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл = $1e$, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Нейтрон: $q_n = 0$, $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

За счет каких сил?

1. Гравитационное притяжение нуклонов (радиус действия – неограничен)

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \sim 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(10^{-15})^2} \sim 10^{-34} \text{ Н.}$$

2. Электромагнитное отталкивание протонов (радиус действия – неограничен)

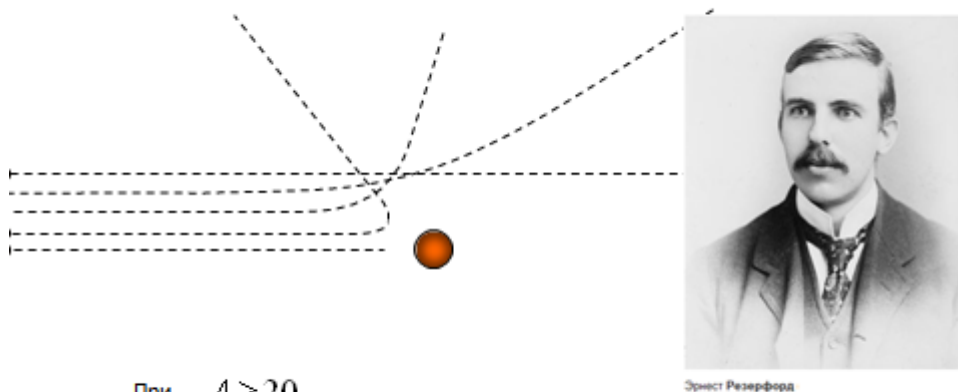
$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \sim 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} \sim 10^2 \text{ Н.}$$

Отношение $F_e / F_G \sim 10^{36}$.

3. Особое внутриядерное (сильное) взаимодействие между нуклонами – носит характер притяжения,

- оно короткодействующее (радиус действия $\sim 10^{-15}$ м),
- не зависит от заряда нуклонов,
- обладает свойством насыщения (каждый нуклон взаимодействует с ограниченным числом нуклонов в ядре),
- ядерные силы не являются центральными (не направлены по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов).

Размеры ядер



При $A \geq 20$

Эрнест Резерфорд

$$R = 1.2 \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

Типы фундаментальных взаимодействий

№ п/п	Взаимодействие	Радиус действия, м	Интенсивность	Характерное время взаимодействия
1	Гравитационное	$0 \div \infty$	10^{-38}	—
2	Электромагнитное	$0 \div \infty$	10^{-2}	10^{-20}
3	Сильное	$\sim 10^{-15}$	1	10^{-23}

Обменный характер: гравитационное \rightarrow гравитоны

электромагнитное \rightarrow фотоны

сильное \rightarrow японский физик Юкава выдвинул гипотезу о существовании частиц с массой, в 200-300 раз превышающей массу электрона. Эти частицы выполняют роль носителей ядерного взаимодействия.

Эксперимент подтвердил модель Д. Д. Иваненко и предположение Юкавы! \rightarrow это π -мезоны .

$\frac{M}{Z} X$

Z – количество протонов в ядре,

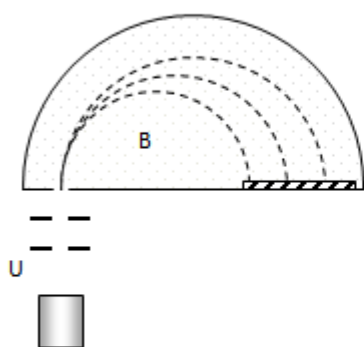
$N = M - Z$ – количество нейтронов в ядре.

Масса ядра $M < \sum (m_p + m_n)$ в ядре

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}} \quad (10-1)$$

– дефект массы ядра.

Измерение масс



$$F_L = qvB$$

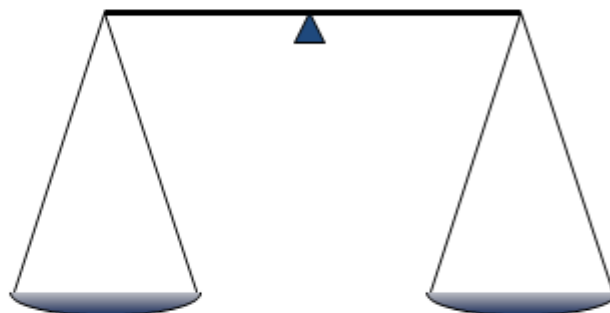
$$F_L = F_{\text{цс}} = \frac{mv^2}{R}$$

$$\frac{mv^2}{2} = qU$$

$$m = \frac{qB^2 R^2}{2U}$$

Дефект массы

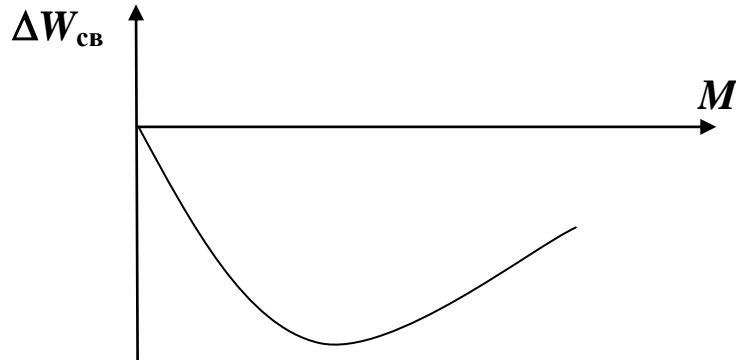
$$= \Delta M \quad \text{– дефект массы}$$



$$Zm_p + (A - Z)m_n > M_{\text{я}}$$

$$\Delta W_{\text{св}} = c^2 \Delta m = c^2 (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) \quad (10-2)$$

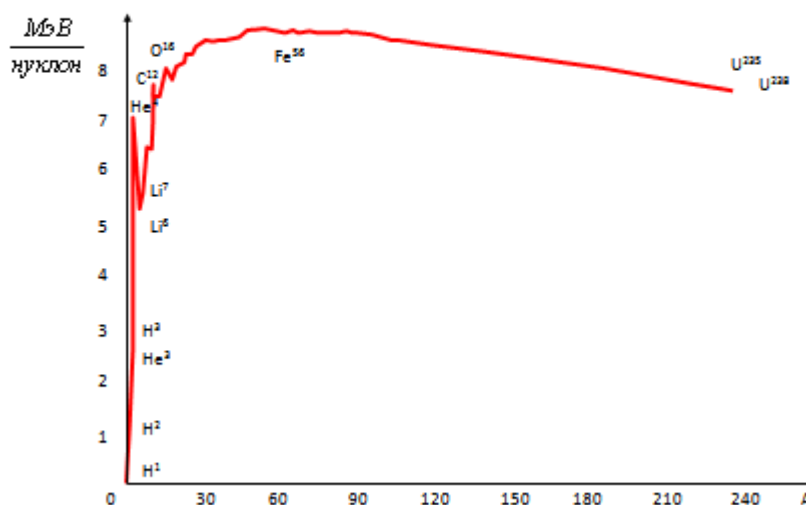
– энергия связи нуклонов в ядре = энергия, которую нужно сообщить ядру, чтобы развалить его на составные части – нуклоны.



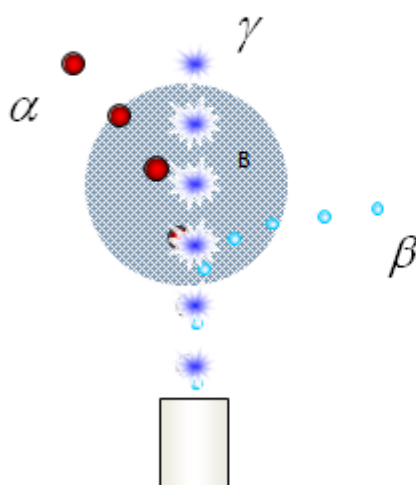
Легкие ядра → к синтезу

Тяжелые ядра → радиоактивный (р/а) распад.

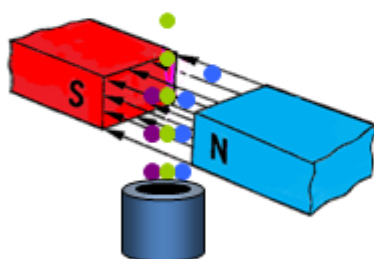
Энергия связи ядер



Радиоактивные лучи



Радиоактивные излучения



- α – лучи, положительные тяжелые частицы (впоследствии установлено, что это ядра гелия)
- β – поток отрицательно заряженных легких частиц, опознаны впоследствии как электроны
- γ – лучи, поток частиц высокой проникающей способности, поток высокоэнергетического электромагнитного поля



Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 2^{-t/T_{1/2}} \quad (10-3)$$

где N_0 – первоначальное количество р/а ядер,

N – количество ядер к моменту времени t ,

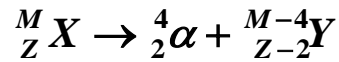
λ – постоянная р/а распада,

$T_{1/2}$ – период полураспада р/а ядер – время, за которое распадается половина (50%) р/а ядер.

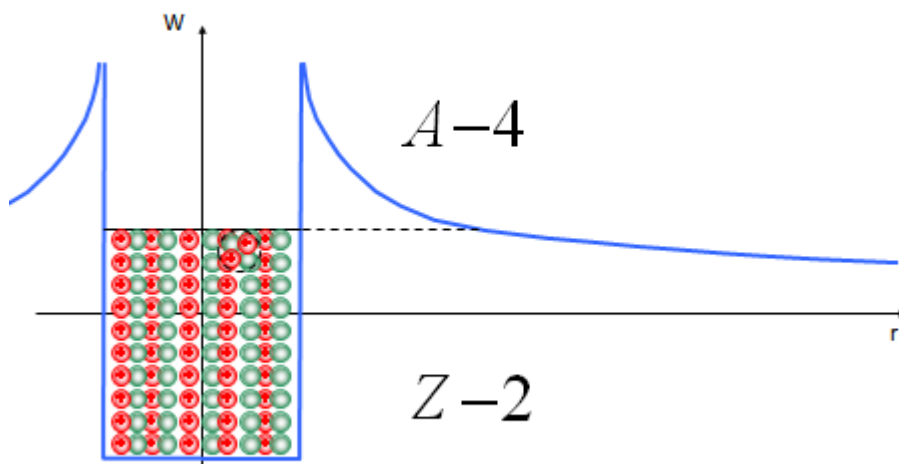
При α -распаде $\rightarrow \alpha, \beta$ и γ -излучения!

α -частица = ядро атома гелия ${}^4_2\text{He} = {}^4_2\alpha$,

поэтому при вылете α -частицы Z уменьшается на 2 единицы, а массовое число M уменьшается на 4 единицы.

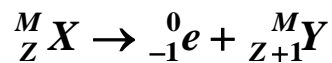


α -распад

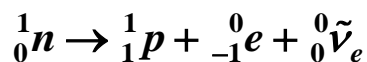


β -частица = электрон ${}^0_{-1}e$,

поэтому при вылете β -частицы Z возрастает на единицу, а массовое число M остается прежним.



Электронов в ядре нет! Протон – стабилен, нейтрон – распадается:



${}^0_0\tilde{\nu}_e$ – электронное антинейтрино. $T_{1/2} = 14$ мин.

γ -излучение = фотон $Z = 0, M = 0$ – ядро из возбужденного состояния переходит в менее возбужденное.

При α -распаде выполняются законы сохранения электрического заряда и массового числа:

$$\begin{aligned} q_x &= q_\alpha + q_Y & q_x &= q_e + q_Y \\ M_x &= M_\alpha + M_Y & M_x &= +M_Y \end{aligned} \quad (10-4)$$

Алхимики → «железо» → золото !

Общие сведения

Ядерная реакция — процесс образования новых ядер или частиц при столкновениях ядер или частиц.

По механизму взаимодействия ядерные реакции делятся на два вида:

реакции с образованием составного ядра, это двухстадийный процесс, протекающий при не очень большой кинетической энергии сталкивающихся частиц (примерно до 10 МэВ).

прямые ядерные реакции, проходящие за *ядерное время*, необходимое для того, чтобы частица пересекла ядро.

Главным образом такой механизм проявляется при очень больших энергиях бомбардирующих частиц.

Теория механизма реакции с образованием составного ядра была разработана Нильсом Бором в 1936 году совместно с теорией капельной модели ядра и лежит в основе современных представлений о большой части ядерных реакций.

Составное ядро

Согласно этой теории ядерная реакция идёт в два этапа.

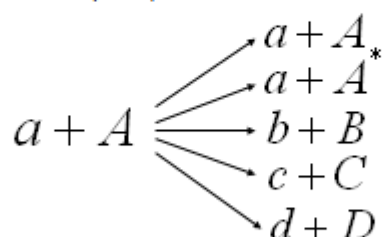
В начале исходные частицы образуют промежуточное (составное) ядро за *ядерное время*, то есть время, необходимое для того, чтобы частица пересекла ядро, примерно равное $10^{-23} — 10^{-21}$ с.

При этом составное ядро всегда образуется в возбуждённом состоянии, так как оно обладает избыточной энергией, приносимой частицей в ядро в виде энергии связи нуклона в составном ядре и части его кинетической энергии, которая равна сумме кинетической энергии ядра-мишени с массовым числом A и частицы в системе центра инерции.

Каналы реакции

Переход в невозбуждённое состояние может осуществляться различными путями, называемыми **каналами реакции**.

Типы и квантовое состояние налетающих частиц и ядер до начала реакции определяют *входной канал* реакции.

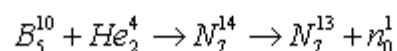
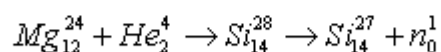
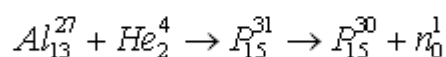
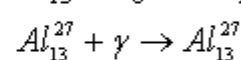
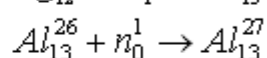
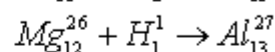
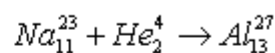


После завершения реакции совокупность образовавшихся **продуктов реакции** и их квантовых состояний определяет *выходной канал* реакции.

Реакция полностью характеризуется входным и выходным каналами.

Впоследствии, при условии одинаковой энергии возбуждения, это составное ядро может распасться путём, обратным любой из этих реакций с определённой вероятностью, не зависящей от истории возникновения этого ядра.

Вероятность же образования составного ядра зависит от энергии и от сорта ядра-мишени



Законы сохранения

При ядерных реакциях выполняются все законы сохранения классической физики.

Закон сохранения электрического заряда

Закон сохранения числа нуклонов

Закон сохранения энергии

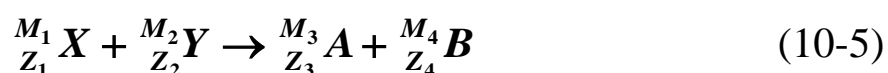
Закон сохранения импульса

Закон сохранения момента импульса

Эти законы накладывают ограничения на возможность осуществления ядерной реакции.

Даже энергетически выгодный процесс всегда оказывается невозможным, если сопровождается нарушением какого-либо закона сохранения.

Ядерные реакции



при этом

$$\begin{aligned} M_1 + M_2 &= M_3 + M_4 \\ Z_1 + Z_2 &= Z_3 + Z_4 \end{aligned} \quad (10-6)$$

если ${}_{Z_4}^{M_4}B = {}_2^4\alpha$, ${}_1^1p$, ${}_1^0n$ или ${}_{-1}^0e$ и т. п.

→ можно идентифицировать из (10-6) и (10-5) ядро ${}_{Z_3}^{M_3}A$.

Энергия реакции

Если W_1, W_2, W_3, W_4 — полные энергии двух частиц до реакции и после реакции, то на основании закона сохранения энергии:

$$W_1 + W_2 = W_3 + W_4$$

При образовании более двух частиц соответственно число слагаемых в правой части этого выражения должно быть больше.

Полная энергия частицы равна её энергии покоя Mc^2 и кинетической энергии W_k , поэтому:

$$M_1c^2 + M_2c^2 + W_{1k} + W_{2k} = M_3c^2 + M_4c^2 + W_{3k} + W_{4k}$$

Величина Q , которая называется **энергией реакции**, равна:

$$Q = (W_3 + W_4) - (W_2 + W_1)$$

Энергия реакции

Если $Q > 0$, то реакция сопровождается выделением свободной энергии и называется **экзоэнергетической**, если $Q < 0$, то реакция сопровождается поглощением свободной энергии и называется **эндоэнергетической**.

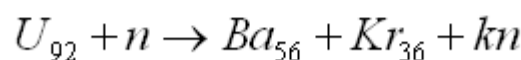
Реакция деления

Изучение взаимодействия нейтронов с веществом привело к открытию ядерных реакций нового типа.

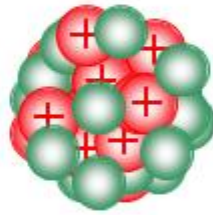
В 1939 г. О. Ган и Ф. Штрассман исследовали химические продукты, получающиеся при бомбардировке нейтронами ядер урана.

Среди продуктов реакции был обнаружен барий - химический элемент с массой много меньше, чем масса урана.

Задача была решена немецкими физиками Л. Мейтнер и О. Фришем, показавшими, что при поглощении нейтронов ураном происходит деление ядра на два осколка.



Деление ядра



Реакция деления

При делении ядра урана тепловой нейтрон с энергией ~ 0.1 эВ освобождает энергию ~ 200 МэВ.

Существенным моментом является то, что этот процесс сопровождается появлением нейтронов, способных вызывать деление других ядер урана – цепная реакция деления.

Таким образом, один нейтрон может дать начало разветвленной цепи делений ядер, причем число ядер, участвующих в реакции деления будет экспоненциально возрастать.

Открылись перспективы использования цепной реакции деления в двух направлениях:

управляемая ядерная реакция деления – [создание атомных реакторов](#);

неуправляемая ядерная реакция деления – создание ядерного оружия.

Ядерное оружие

■ Первую атомную бомбу приготовили в США к середине 1945 г.; Работы по созданию бомбы возглавлял Роберт Оппенгеймер (1904-1967 гг.).



■ Первая советская атомная бомба была взорвана в 1949 году близ города Семипалатинска (Казахстан).



■ 5 августа 1945 г. на японский город Хиросиму была сброшена бомба необычайной разрушительной силы.

Виды ядерных взрывов



Наземный



Наводный



Воздушный



Подземный



Подводный

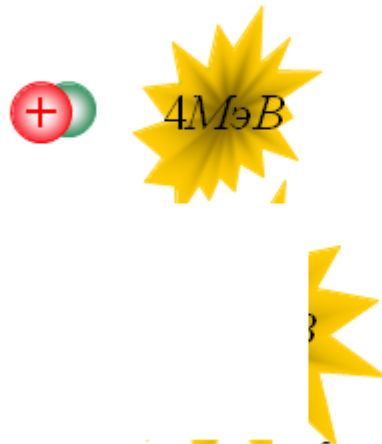


Высотный

Реакции синтеза

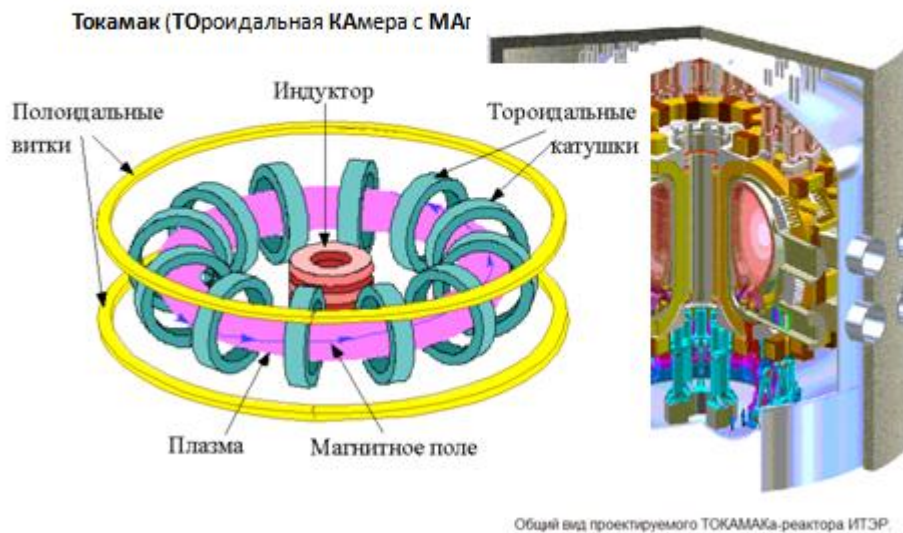
Зависимость удельной энергии связи ядер от массового числа показывает, что слияние двух легких ядер также приводит к освобождению энергии. Основные реакции, которые могут быть использованы для получения энергии

Реакции синтеза



Для поддержания реакции синтеза необходима температура порядка десятков миллионов градусов.
Проблемы создания промышленной установки для получения энергии за счет реакций синтеза пока еще не решены.

Управляемый синтез



Общий вид проектируемого ТОКАМАКа-реактора ИТЭР.

12. Физика элементарных частиц

Кроме уже известных частиц – электрон, протон, нейтрон, в космических лучах и в экспериментах на ускорителях заряженных частиц было обнаружено большое количество новых частиц, которые назвали **элементарными частицами**.

На сегодня строгой классификации элементарных частиц (типа таблицы Менделеева) не существует.

Элементарные частицы можно объединить в три группы: **фотоны**, **лептоны** и **адроны**. Элементарные частицы, отнесенные к каждой из этих групп, обладают общими свойствами и характеристиками, которые отличают их от частиц другой группы.

К группе **фотонов** относится единственная частица – **фотон**, который переносит электромагнитное взаимодействие, хотя в эл/м взаимодействии участвуют в той или иной степени все частицы, как заряженные, так и нейтральные (кроме нейтрино). Спин фотона равен 1.

К группе **лептонов** относятся электрон, мюон, таон, соответствующие им нейтрино, а также их античастицы. Все лептоны имеют спин, равный $1/2$.

Лептонам приписывают, так называемый **лептонный заряд**: для лептонов он равен $+1$, для антилептонов он равен -1 , для всех остальных элементарных частиц он равен 0.

Для лептонного заряда существует закон сохранения: в замкнутой системе при любых процессах взаимопревращаемости элементарных частиц лептонный заряд сохраняется.

Таблица

Группа	Название частицы		Заряд, в ед. e	Масса покоя, в ед. m_e	Спин, в ед. \hbar	Лептонный заряд	Барионный заряд
Фотоны	Фотон		0	0	1	0	0
Лептоны	Электрон		1	1	$\frac{1}{2}$	+1	0
	Эл. нейтрино		0	0	$\frac{1}{2}$	+1	0
	Мюон		1	206,8	$\frac{1}{2}$	+1	0
	Мюон.нейтрино		0	0	$\frac{1}{2}$	+1	0
	Таон		1	3487	$\frac{1}{2}$	+1	0
	Таон. нейтрино		0	0	$\frac{1}{2}$	+1	0
Адроны	Мезоны		0 1	264,1– –1074	0	0	0
	Барионы	Протон	1	1836	$\frac{1}{2}$	0	+1
		Нейтрон	0	1838	$\frac{1}{2}$	0	+1
		Гиперон	0 1	2183– 3273	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$	0	+1

Основную часть элементарных частиц составляют **адроны**. К этой группе относятся мезоны, нуклоны (протон, нейтрон) и гипероны, а также их античастицы (нуклоны и гипероны часто объединяют в группу **барионов**). Мезоны имеют спин равный 0, спин барионов равен $1/2$ или $3/2$.

Адронам приписывают **барионный заряд**: для всех барионов он равен $+1$, для антибарионов он равен -1 , для мезонов и их античастиц он равен 0.

Для барионного заряда существует закон сохранения: в замкнутой системе при любых процессах взаимопревращаемости элементарных частиц барионный заряд сохраняется.

В последние годы увеличение числа элементарных частиц происходит в основном вследствие расширения группы адронов.

Поэтому развитие работ по их классификации все время сопровождалось поисками новых, более фундаментальных частиц, которые могли бы служить базисом для построения всех частиц.

Гипотеза о существовании таких «суперэлементарных» частиц, названных кварками, была высказана в 1964 году Цвейгом и Гелл-Маном. Согласно кварковой модели фотон и лептоны являются элементарными частицами, а все адроны состоят из трех кварков, имеющих дробные электрический $\left(+\frac{1}{3}\left(-\frac{1}{3}\right); +\frac{2}{3}\left(-\frac{2}{3}\right)\right)$ и барионный $\left(+\frac{1}{3}\left(-\frac{1}{3}\right)\right)$ заряды. (Каждому из этих четырех кварков соответствует свой антикварк).

В настоящее время признана точка зрения, что между лептонами и кварками существует симметрия: число лептонов должно быть равно числу типов кварков. В 1977 г. был открыт еще один кварк с зарядом $+1/3$, предполагается, что существует и шестой кварк с зарядом $+2/3$.

Является ли схема из шести лептонов и шести кварков окончательной или же число лептонов (кварков) будет расти, покажут дальнейшие исследования.

Фундаментальные частицы

Таким образом, физики продвинулись ещё немного вглубь строения вещества: самыми элементарными, точечными частями вещества сейчас считаются *лептоны* и *кварки*.

Для них (вместе с калибровочными бозонами) применяется термин «фундаментальные частицы».

Стандартная модель физики частиц

КВАРКИ			ЛЕПТОНЫ			
+2/3	u	c	t	ν_e	ν_μ	ν_τ 0
-1/3	d	s	b	e^-	μ^-	τ^- -1
АНТИКВАРКИ			АНТИЛЕПТОНЫ			
-2/3	\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$ 0
+1/3	\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}	e^+	μ^+	τ^+ +1
Бозоны						
масса	0	0	91.2 ГэВ	80.4 ГэВ		
заряд	0	0	0	± 1		
спин	1	1	1	1		
	γ	g	Z^0	W^\pm	H	
	фотон	глюон	слабое взаимодействие	слабое взаимодействие		

Что дальше...???

Поскольку кварки и антикварки никогда не были обнаружены в свободном состоянии, то на основании симметрии между лептонами и кварками, проявляемой в электромагнитном взаимодействии, появляются гипотезы о том, что эти частицы состоят из более фундаментальных частиц — **ПРЕОНОВ**

Преоны — гипотетические элементарные частицы, из которых могут состоять кварки и *лептоны*. Несмотря на то, что на сегодняшний момент нет пока никаких экспериментальных указаний на неточечность кварков и лептонов, ряд соображений (наличие трёх поколений фермионов, наличие трёх цветов кварков, симметрия между кварками и лептонами) указывает на то, что они могут быть составными частицами.