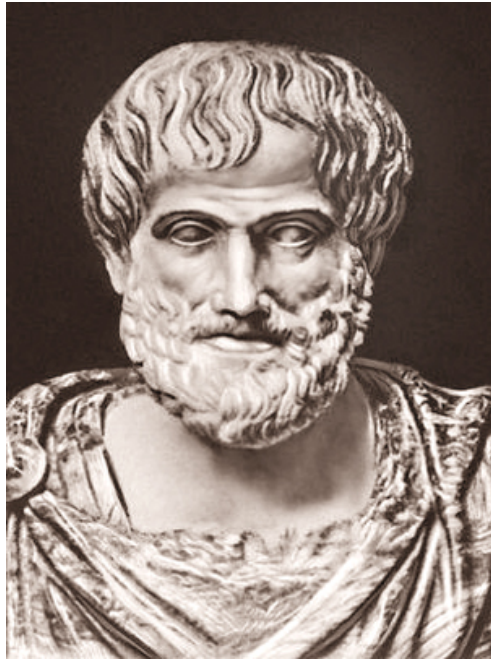




Микромир и Вселенная



Аристотель



384 – 322 гг. до н.э.

Дедуктивный метод объяснения явлений природы, не предусматривающий обращения к эксперименту

Ньютон

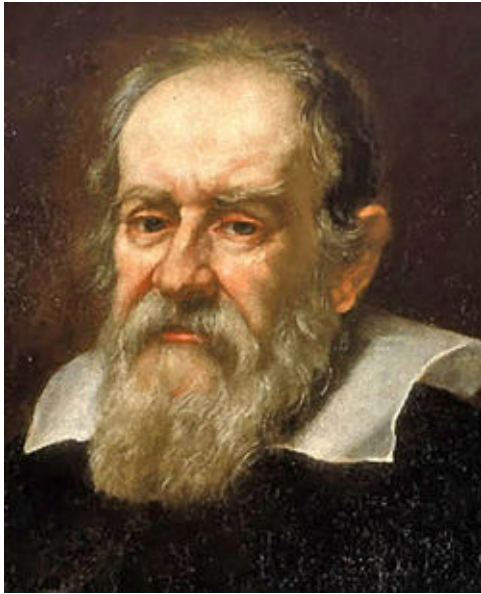


Исаак Ньютон
1642 – 1727

Законы Ньютона

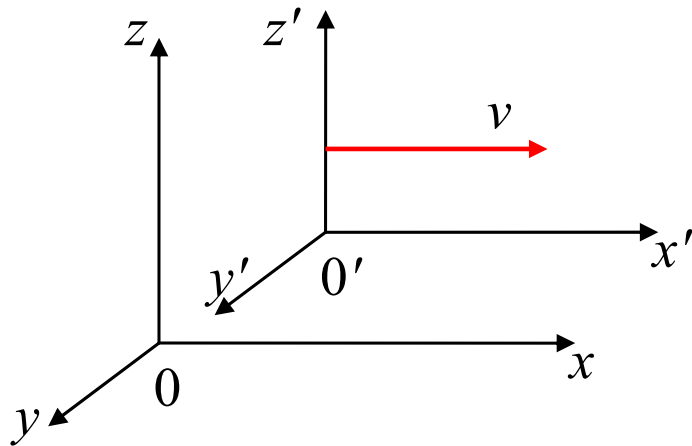
$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Г. Галилей



Галилео Галилей
1564 – 1642

- Заложил основы научного подхода в описание физического мира
- Сформулировал понятие движения
- Сформулировал законы движения падающих тел
- 1638 Принцип относительности



$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

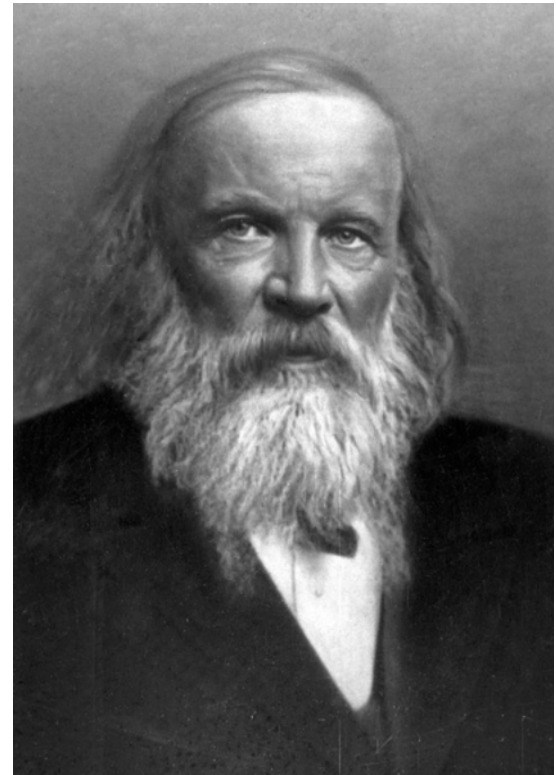
$$t' = t$$

$$\vec{V} = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$$

Химические элементы



Антуан Лавуазье
1743 – 1794



Д. И. Менделеев
1834 – 1907

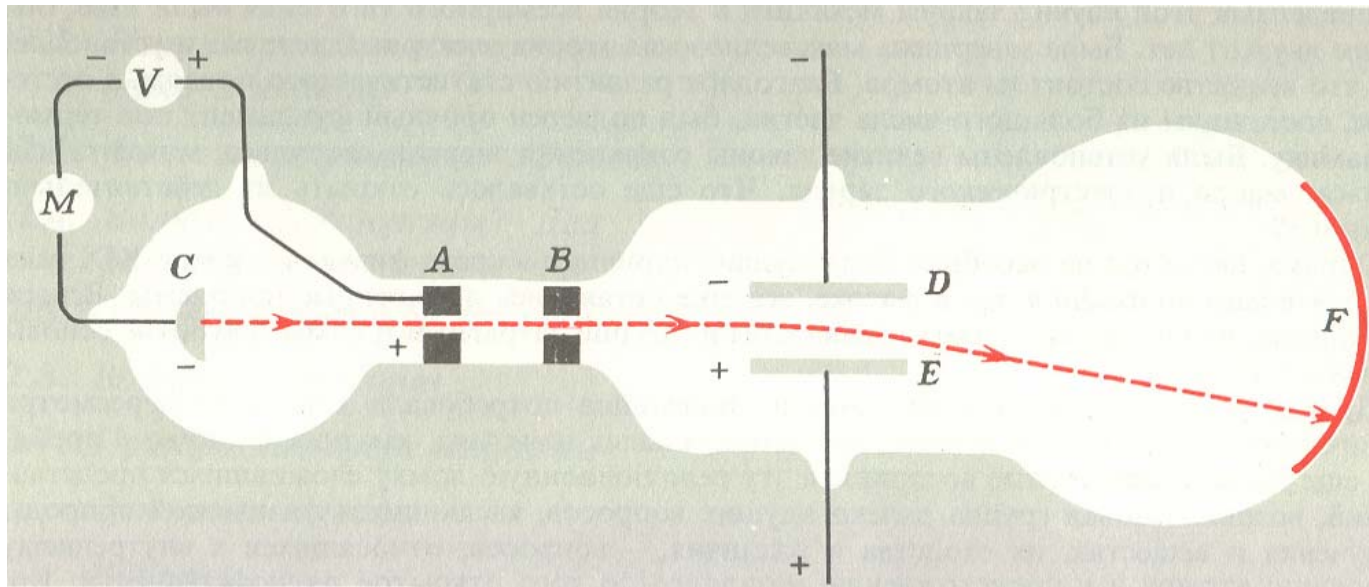
Дж. Дж. Томсон

1897 Электрон

1904 Модель атома



Дж. Дж. Томсон
1856 - 1940



1911 г. Опыты по рассеянию α -частиц

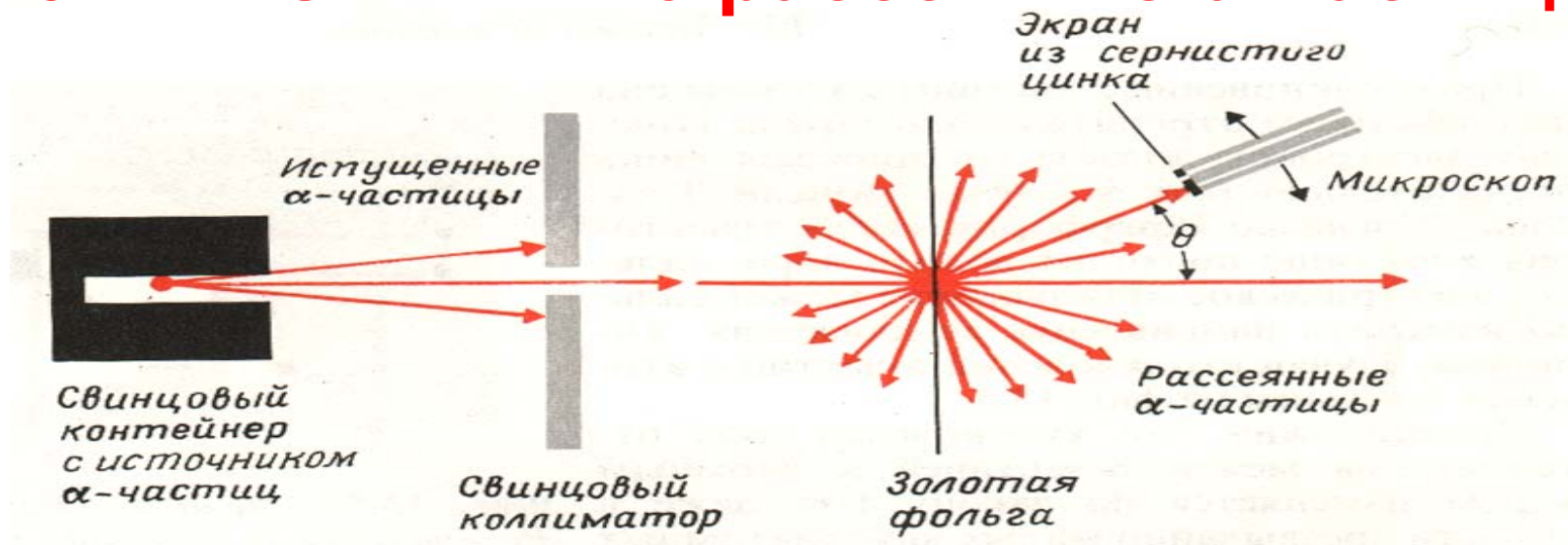
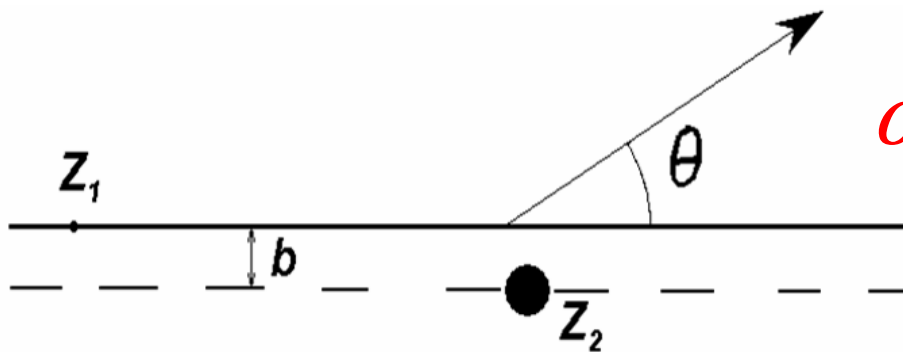


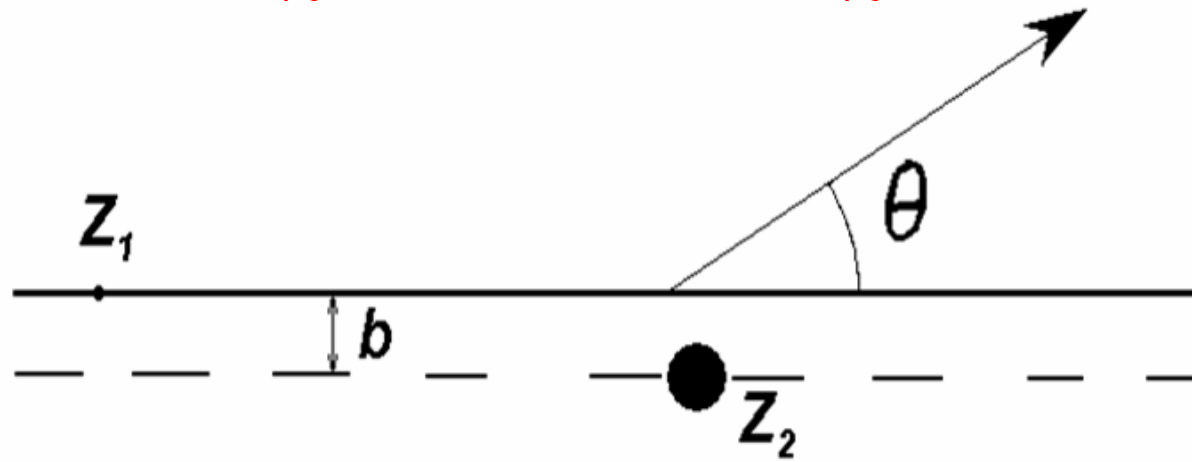
Схема эксперимента, в котором исследовалось рассеяние альфа-частиц



Из опытов по рассеянию α -частиц следовало, что масса атома практически полностью сосредоточена в небольшой центральной части атома – атомном ядре.

Атомное ядро

1911 - Э. Резерфорд. Открыто атомное ядро

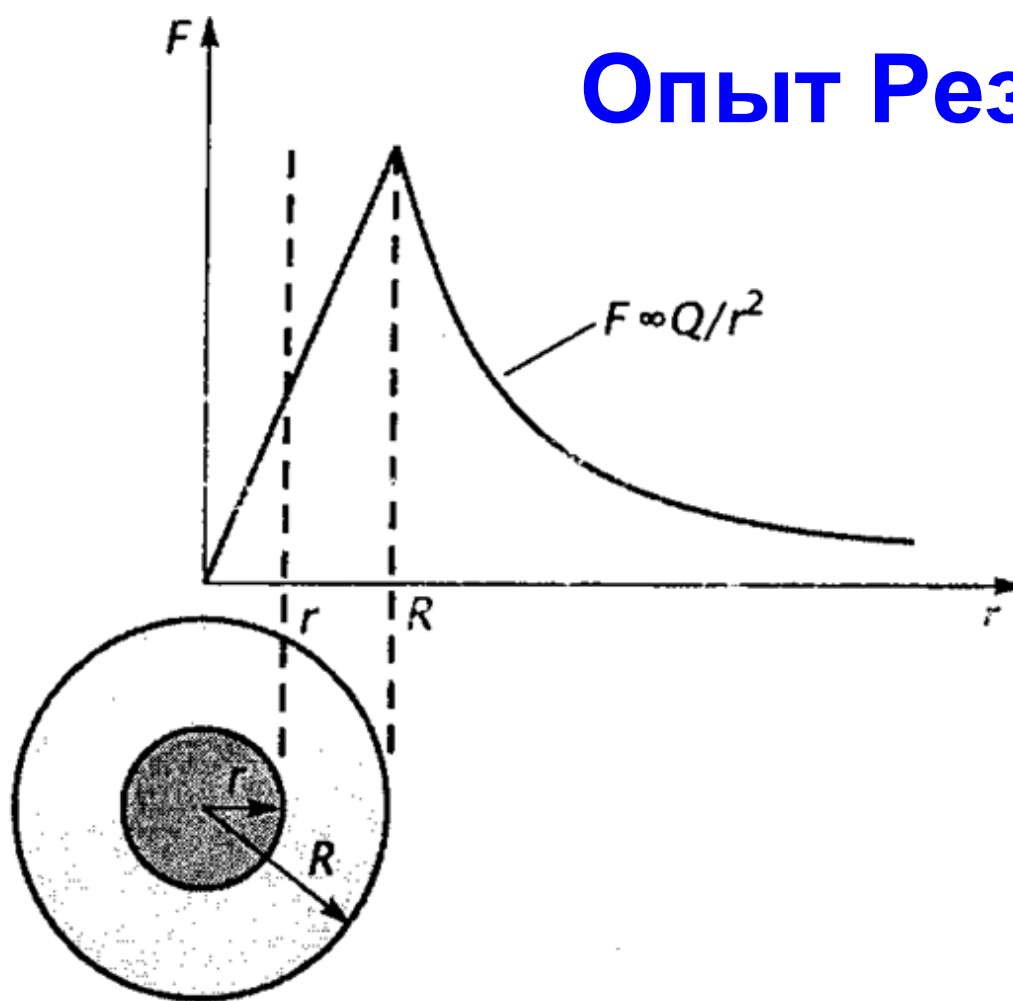


$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2bE}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \times \frac{1}{\left(\sin^4 \frac{\theta}{2} \right)}$$

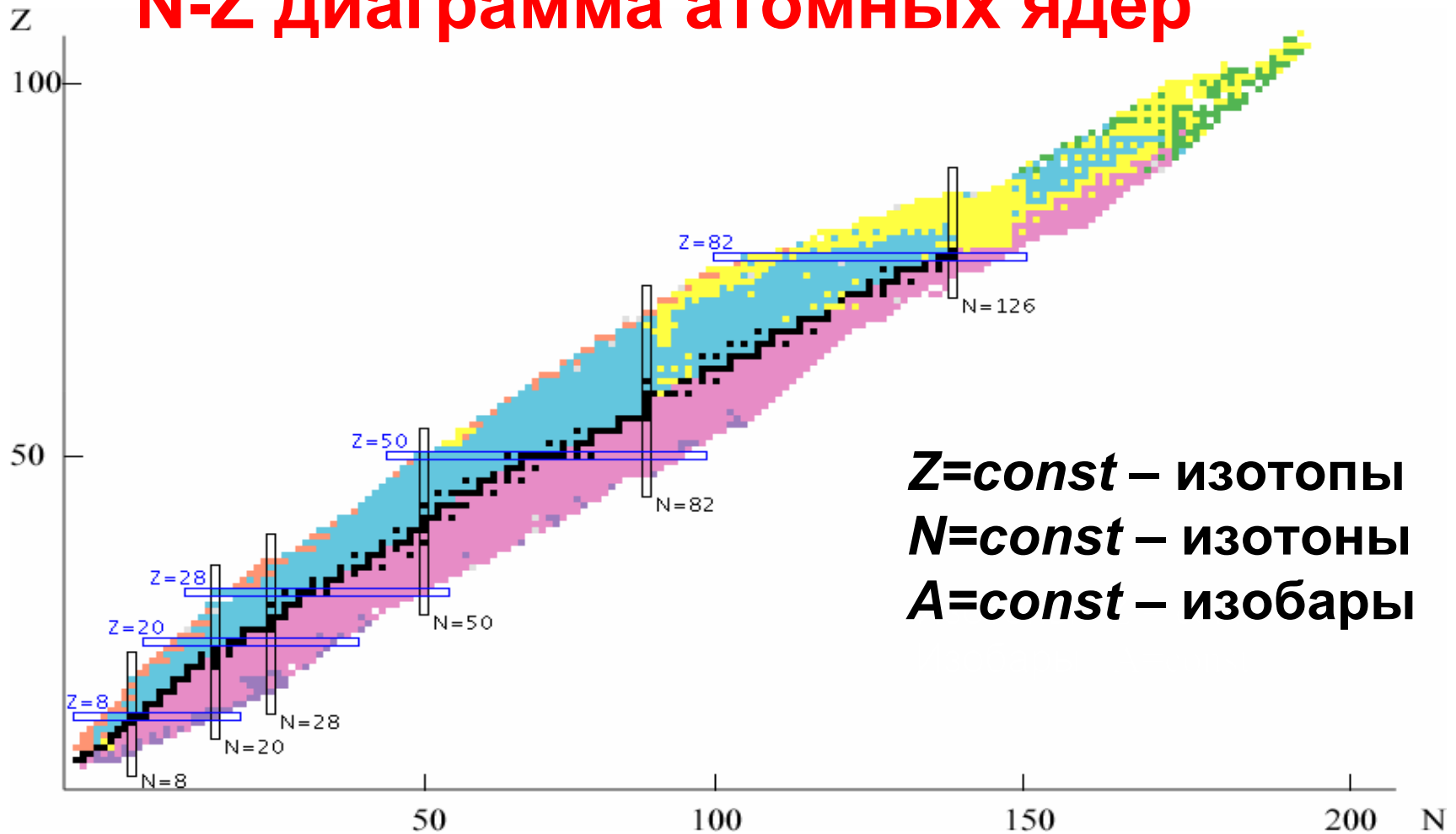
$$F = \frac{Z_1 e Z_2 e}{R^2}$$

Опыт Резерфорда

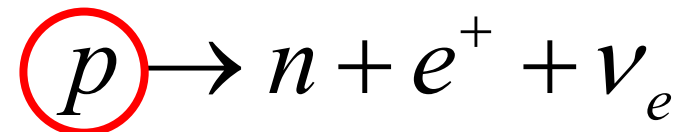
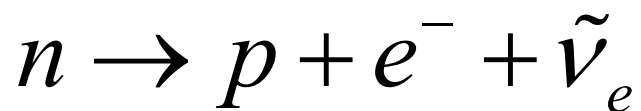


Зависимость силы, действующей на точечный заряд, от расстояния r до центра однородно заряженной сферы радиусом R . Внутри сферы сила пропорциональна $q'/r^2 = Qr/R^3$, где $q' = Q(r/R)^3$ — заряд, заключенный в пределах сферы радиусом r .

N-Z диаграмма атомных ядер

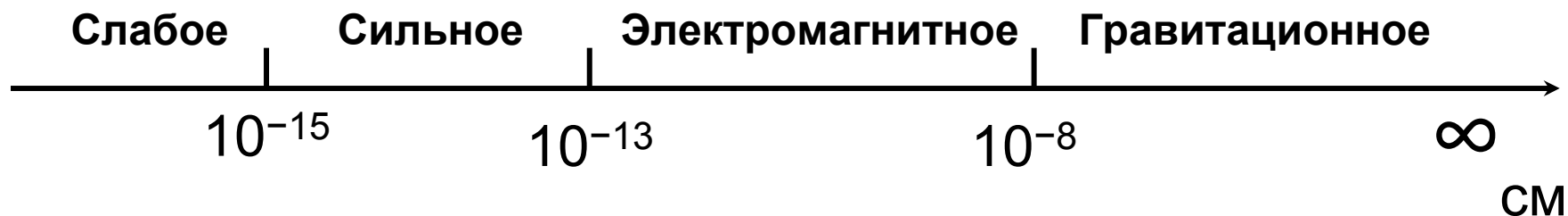


Что удерживает нейтроны и протоны в атомном ядре?
Изменение свойств нейтрона и протона в атомном ядре.



4 типа взаимодействий

- Гравитационное взаимодействие
- Электромагнитное взаимодействие
- Сильное взаимодействие
- Слабое взаимодействие



Как устроен Мир. 30-е годы XX века



e, p, n

В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц — **электрона**, **протона** и **нейтрона**. Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны. Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.

Ускорители. Мир частиц

Адроны

Лептоны

Барионы

Мезоны

n (939.6 $MэВ$)

π^+ (139 $MэВ$)

p (938.3 $MэВ$)

π^- (139 $MэВ$)

Λ (1116 $MэВ$)

π^0 (134 $MэВ$)

Σ^+ (1189 $MэВ$)

K^+ (494 $MэВ$)

Σ^- (1197 $MэВ$)

K^- (494 $MэВ$)

Σ^0 (1193 $MэВ$)

Ξ^0 (1315 $MэВ$)

Ξ^- (1321 $MэВ$)

e^- (0,511 $MэВ$)

μ^- (106 $MэВ$)

τ^- (1777 $MэВ$)

ν_e, ν_μ, ν_τ

Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Лептоны

e^-

μ^-

τ^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

Адроны

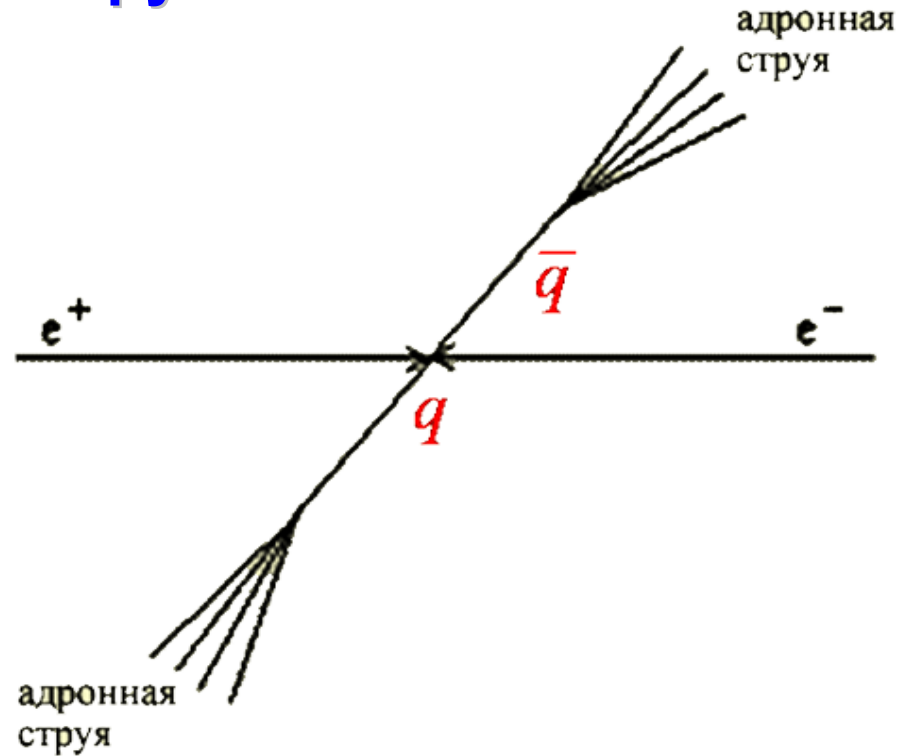
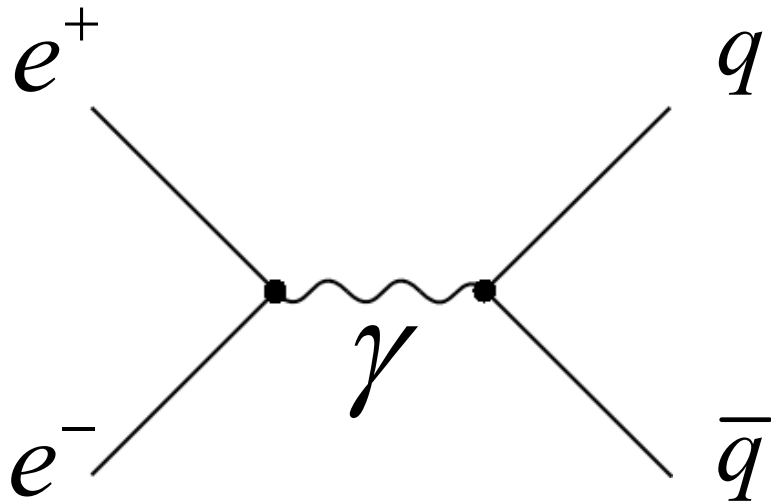
Барионы

$$J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

Мезоны

$$J = 0, 1, 2, \dots$$

Как открывают кварки. Адронные струи



Кварки являются реальными частицами, т.к. имеются наблюдаемые эффекты их существования на малых расстояниях. Один из таких эффектов проявляется в образовании адронных струй.

Адронная струя — это совокупность адронов летящих в одном направлении. Если бы кварки реально не существовали, то адроны, рождающиеся в e^+e^- -столкновениях, разлетались бы равномерно по всем направлениям.

Электрические заряды кварков $Q (e)$

u	c	t	$+\frac{2}{3}$
d	s	b	$-\frac{1}{3}$

Известно 3 поколения кварков

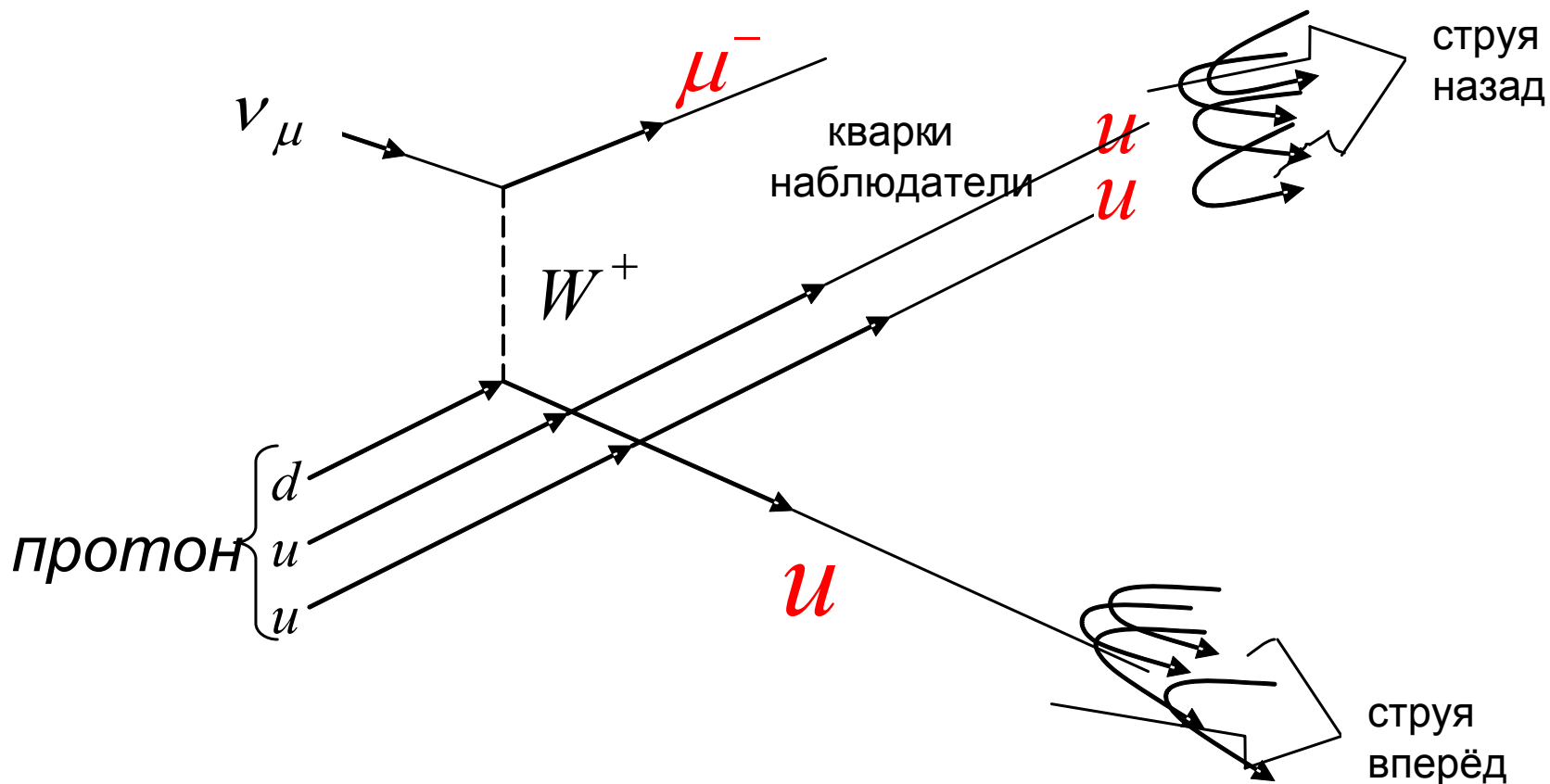
u, c, t кварки имеют электрический заряд $+2/3$

d, s, b кварки имеют электрический заряд $-1/3$

$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$ антикварки имеют электрический заряд $-2/3$

$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$ антикварки имеют электрический заряд $+1/3$

Электрические заряды кварков

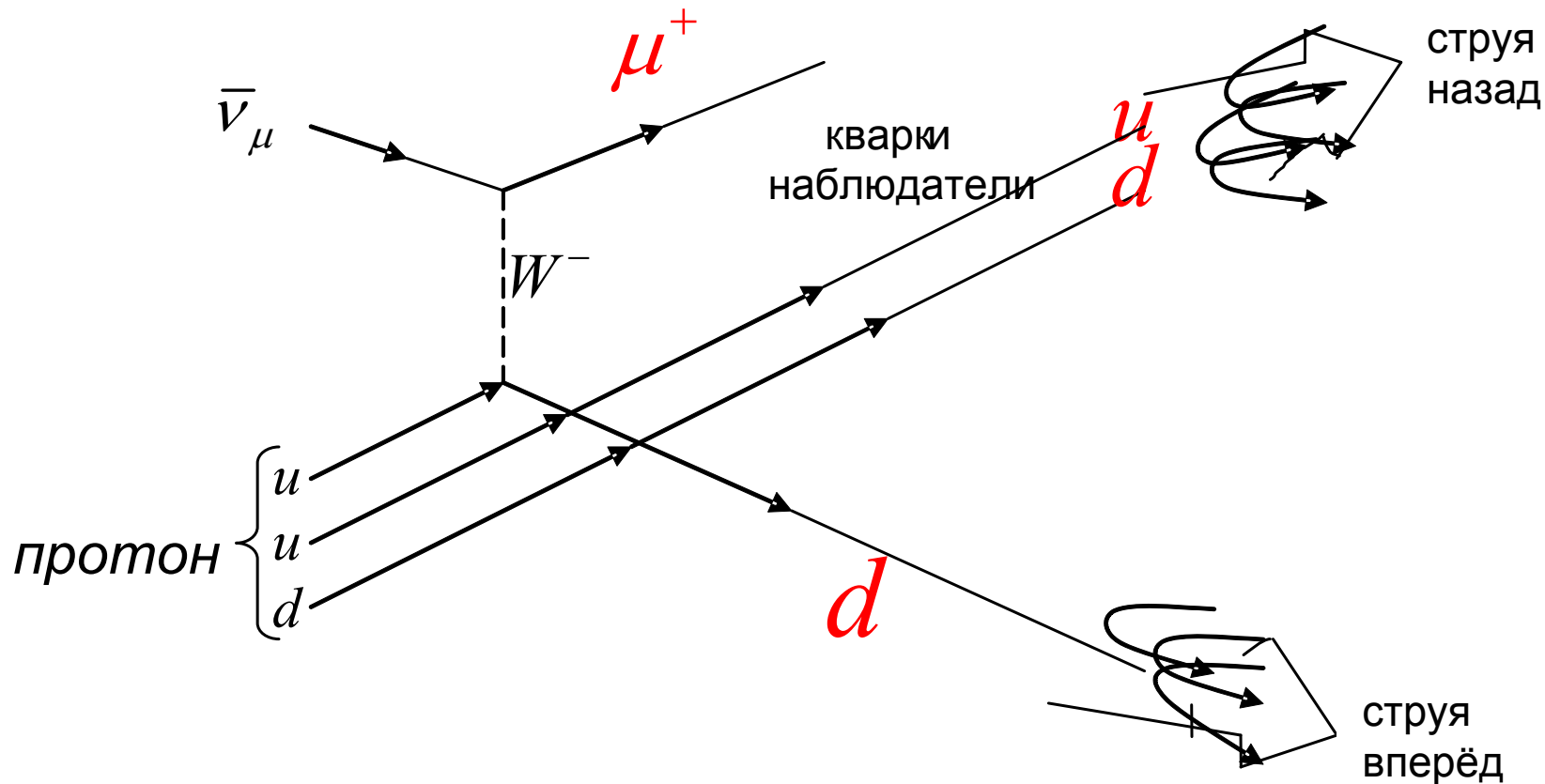


$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{струи адронов}$$

$$\nu_\mu + d \rightarrow \mu^- + u$$

$$Q(u) = 0.65 \pm 0.12$$

Электрические заряды кварков



$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + \text{струи адронов}$$

$$\bar{\nu}_\mu + u \rightarrow \mu^+ + d$$

$$Q(d) = -0.33 \pm 0.09$$

Кварковая структура адронов

$$\begin{array}{ll} p & (uud) \\ n & (udd) \\ \Lambda & (uds) \\ \Xi^0 & (uss) \\ \Xi^- & (dss) \end{array} \quad Q(u, c, t) = +\frac{2}{3}e$$
$$\quad \quad \quad Q(d, s, b) = -\frac{1}{3}e$$

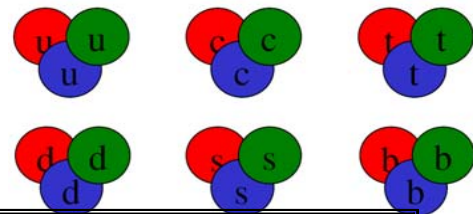
Кварки должны иметь дробный электрический заряд

$$\begin{array}{ll} \pi^+ & (u\bar{d}) \\ \pi^- & (\bar{u}d) \end{array} \quad \begin{array}{ll} K^+ & (u\bar{s}) \\ K^- & (\bar{u}s) \end{array}$$

Кварки имеют спин

$$J(q) = \frac{1}{2}$$

Кварки



Характеристика	Тип кварка (аромат)					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд Q, в единицах e	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число B	1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3
Спин J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность P	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина I ₃	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность s	0	0	-1	0	0	0
Очарование (charm) c	0	0	0	+1	0	0
Bottom b	0	0	0	0	-1	0
Top t	0	0	0	0	0	+1
Масса конституэнтного кварка $m c^2$, ГэВ	0.33	0.33	0.51	1.8	5	180
Масса токового кварка	4–8 МэВ	1.5–4 МэВ	80–130 МэВ	1.1-1.4 ГэВ	4.1–4.9 ГэВ	174±5 ГэВ

Как устроен Мир. Конец XX века

ФЕРМИОНЫ

Спин $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)			Кварки (спин = 1/2)				
Аромат		Масса, ГэВ/c ²	Аромат		Масса, ГэВ/c ²	Электрический заряд	
ν_e	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$	1 поколение	u	up	0,003	2/3
e	электрон	0,0005111		d	down	0,006	-1/3
ν_μ	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	2 поколение	c	charm	1,3	2/3
μ	мюон	0,106		s	strange	0,1	-1/3
ν_τ	тау-нейтрино	$< 0,02$	3 поколение	t	top	175	2/3
τ	тау	1,7771		b	bottom	4,3	-1/3

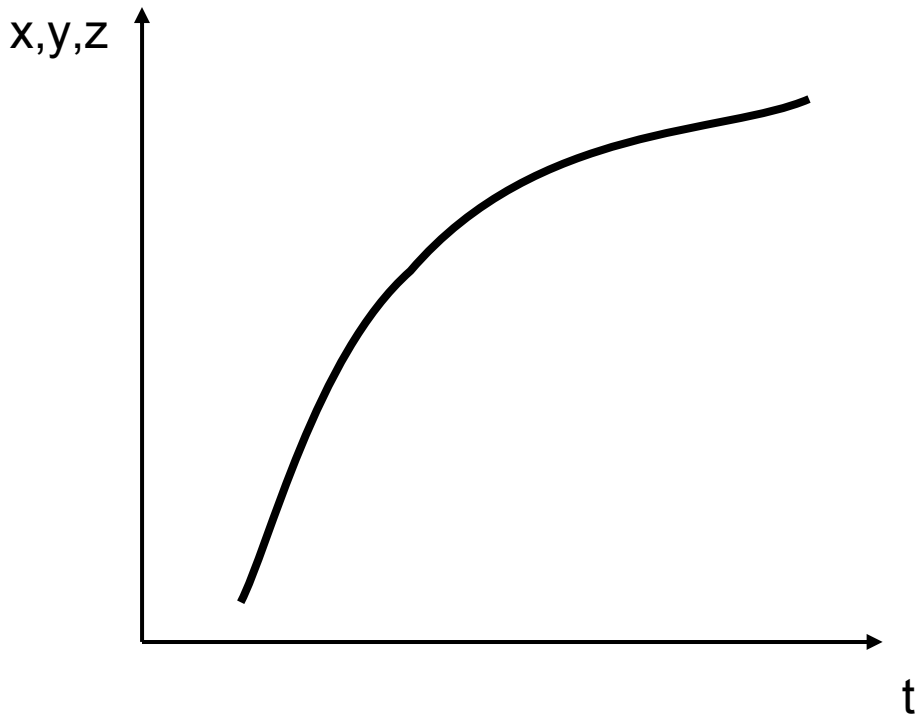
Стабильные частицы

e^- — электрон, e^+ — позитрон

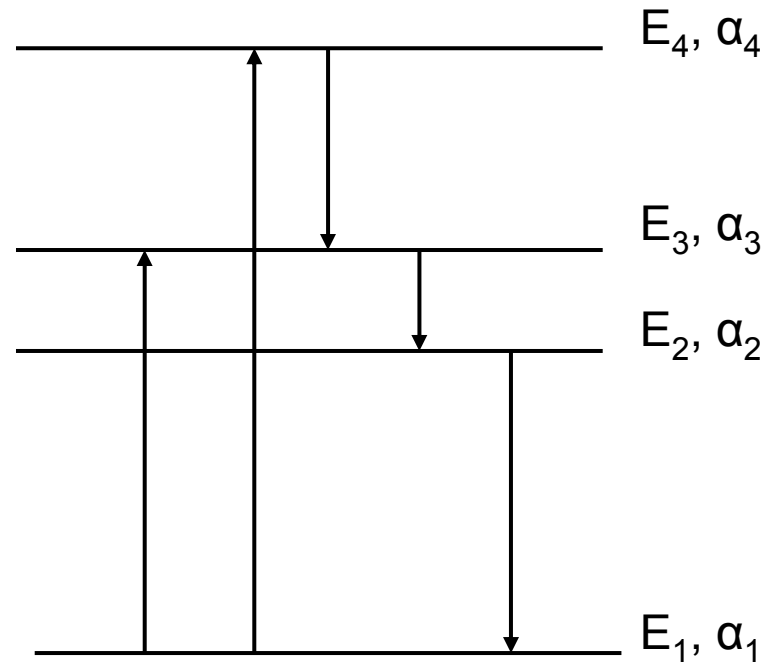
p — протон, \bar{p} — антипротон

? $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$

Эволюция физики



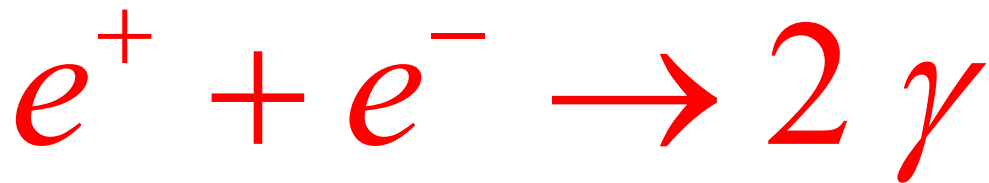
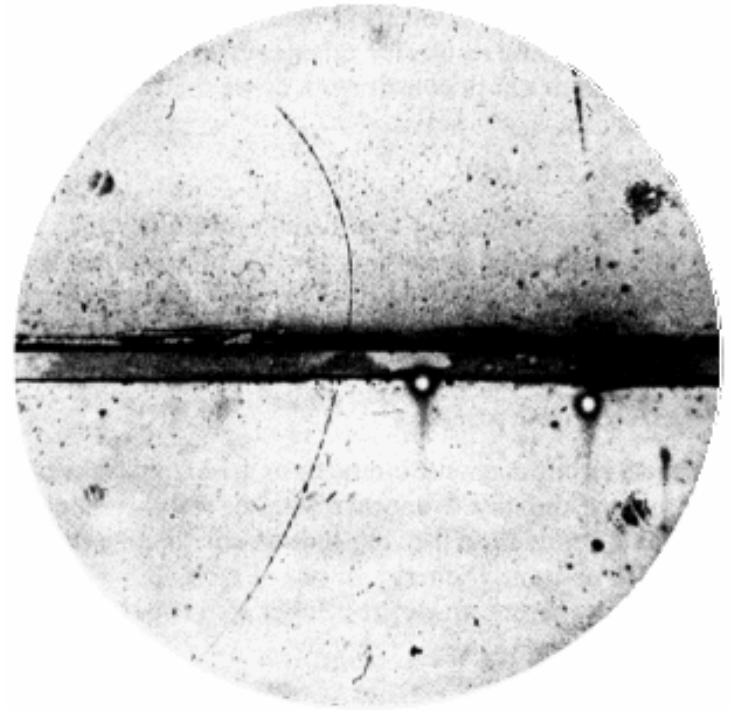
Классический мир



Квантовый мир

1932 г. К. Андерсон. Позитрон e^+

$$M = 0,511 \text{ МэВ}$$



Наблюдение позитрона в камере Вильсона в магнитном поле. Тонкая изогнутая прерывистая линия, идущая снизу вверх – трек позитрона. Темная полоса, пересекающая трек - слой вещества, в котором позитрон теряет часть энергии, и по выходе из которого двигается с меньшей скоростью. Поэтому трек искривлён сильнее.

Античастицы

В 1928 г. П. Дираком на основе анализа релятивистского уравнения было предсказано существование позитрона

Открытия античастиц

1932 – Позитрон

1955 – Антипротон

1956 – Антинейтрон

1966 – Антидейтерий

1970 – Антигелий

1998 – Антиводород

Каждая частица имеет своего двойника – античастицу. Античастица обладает рядом характеристик, имеющих те же численные значения что и частица, и некоторые характеристики с противоположным знаком. Так частица и античастица имеют одинаковые массы и спины и противоположные значения зарядов.

Связь характеристик частиц и античастиц

Характеристика		Частица	Античастица
Масса		M	
Спин		J	
Чётность	<i>фермион</i>	$+(-)1$	$-(+)1$
	<i>бозон</i>	$+(-)1$	$+(-)1$
Электрический заряд		$+(-)Q$	$-(+)Q$
Магнитный момент		$+(-)\mu$	$-(+)\mu$
Барионное число		$+B$	$-B$
Лептонное число		$+L_e, +L_\mu, +L_\tau$	$-L_e, -L_\mu, -L_\tau$
Изоспин		I	
Проекция изоспина		$+(-)I_3$	$-(+)I_3$
Странность		$-(+)s$	$+(-)s$
Очарование (Charm)		$+(-)c$	$-(+)c$
Bottom		$-(+)b$	$+(-)b$
Топ		$+(-)t$	$-(+)t$
Время жизни		τ	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

Законы сохранения

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электромагнитное	Слабое
Аддитивные законы сохранения			
Электрический заряд, Q	+	+	+
Энергия, E	+	+	+
Импульс, p	+	+	+
Момент количества движения, J	+	+	+
Барионный заряд, B	+	+	+
Лептонные заряды L_e, L_μ, L_τ	+	+	+
Странность, s	+	+	-
Charm, c	+	+	-
Bottom, b	+	+	-
Top, t	+	+	-
Изоспин, I	+	-	-
Проекция изоспина, I_3	+	+	-

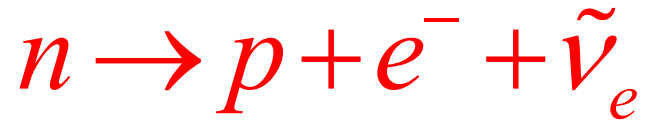
Рождение и смерть частиц

$$E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$$

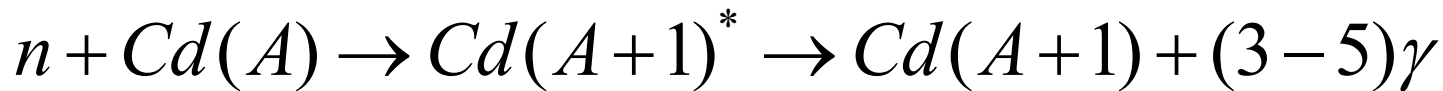
$$E = mc^2$$

Электронное антинейтрино

1953–1956. Ф. Райнес, К. Козн

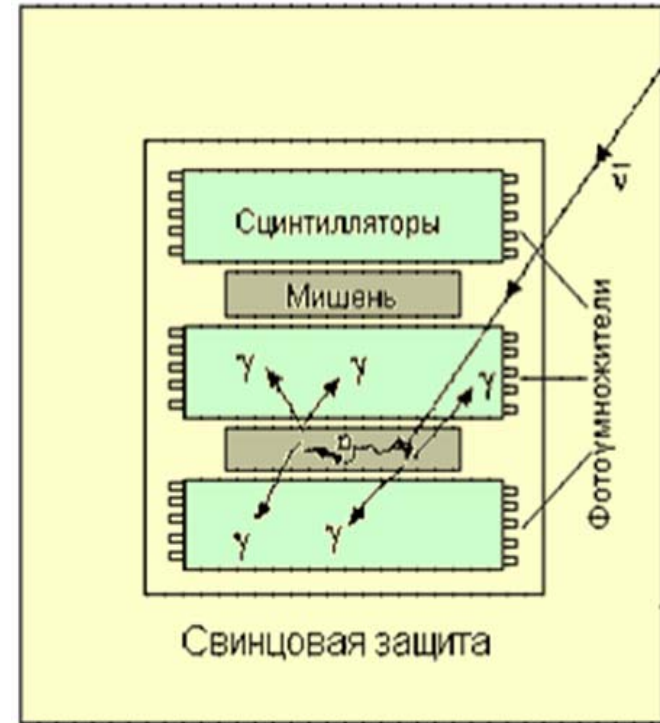


Источник антинейтрино – ядерный реактор

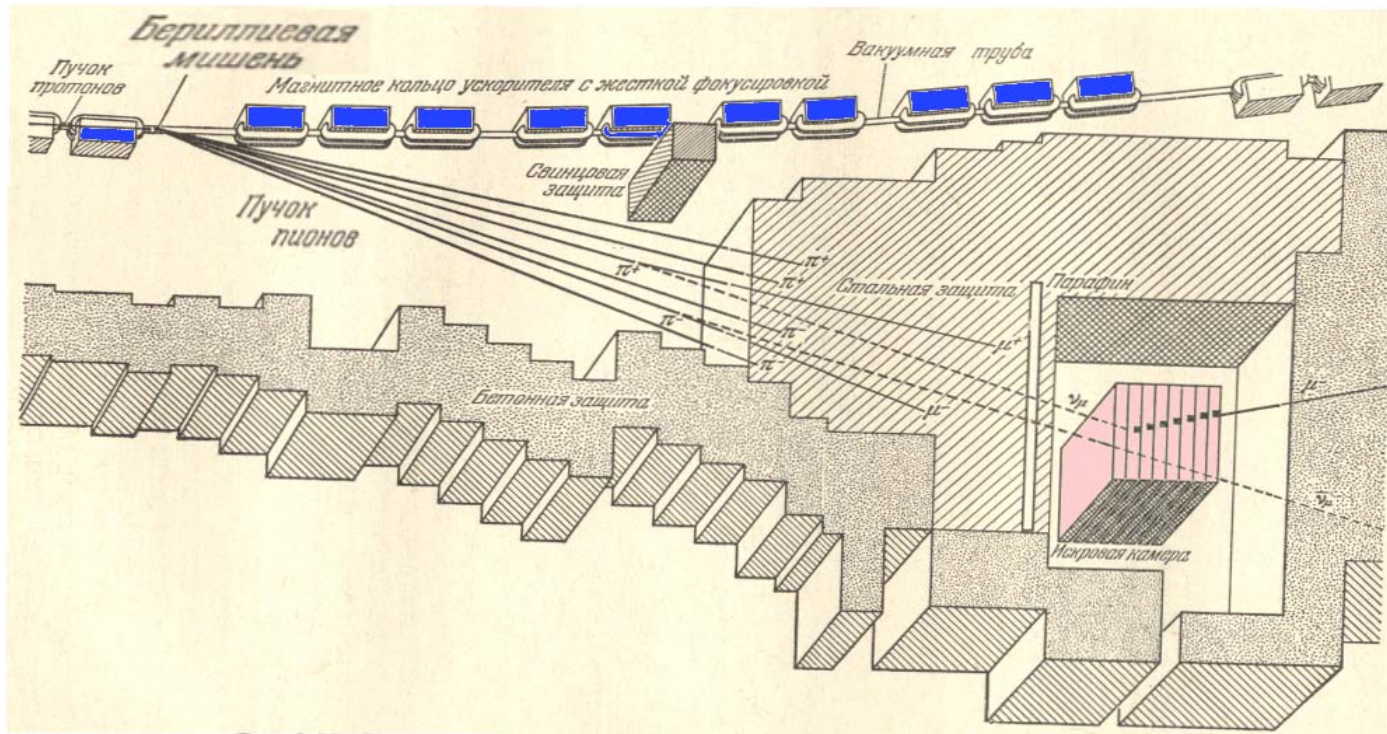


$$\sigma(\tilde{\nu}_e p) = 10^{-43} \text{ см}^2$$

$$t = 200 \text{ часов. } N = 567. \text{ Фон} = 209$$



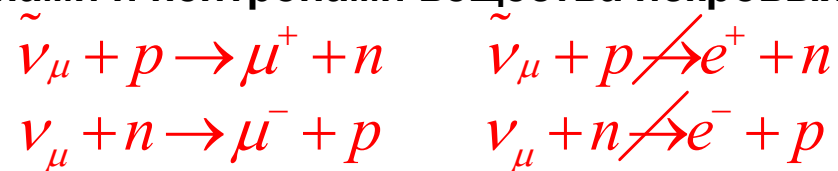
Мюонное нейтрино



Мюонные нейтрино образовывались в результате распада π^+ , π^- - мезонов.



Мюонные нейтрино детектировались в искровых камерах по результатам их взаимодействия с протонами и нейтронами вещества искровых камер.



В искровых камерах наблюдались только положительно и отрицательно заряженные мюоны. Не было зарегистрировано ни одного случая образования электронов или позитронов.

Антипротон 1955

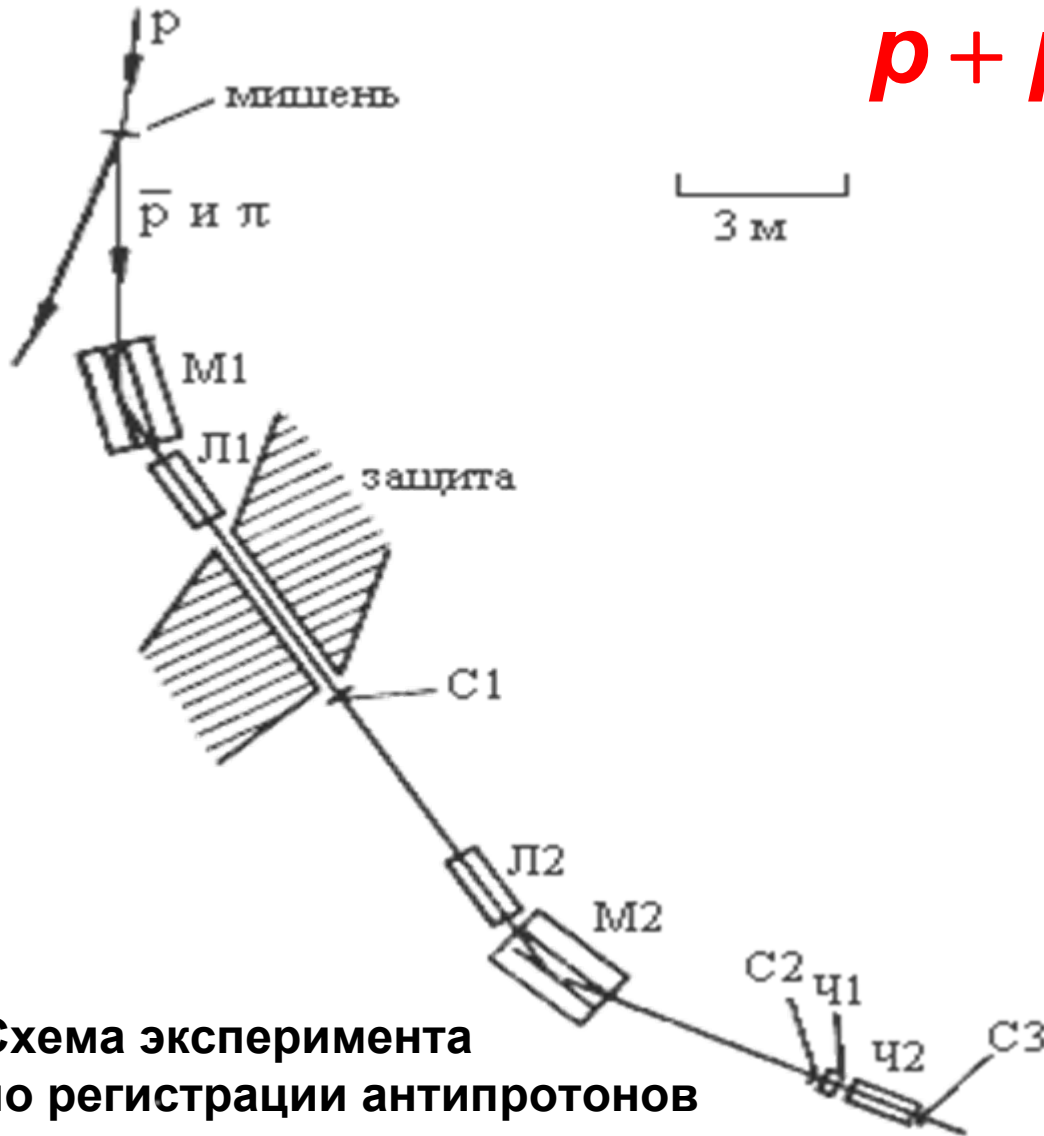
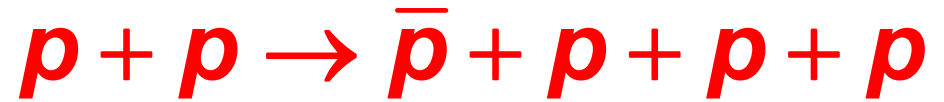


Схема эксперимента по регистрации антипротонов

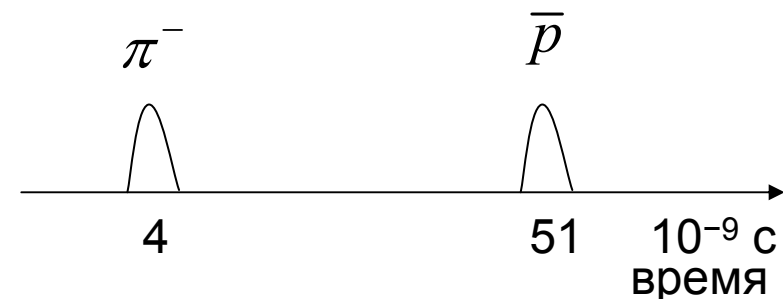
$$L(C_1 - C_2) = 12m$$

$$\tau(\pi^-) = 4 \cdot 10^{-9} c$$

$$\tau(\bar{p}) = 51 \cdot 10^{-9} c$$

$$Ч1 \quad \beta \geq 0.99$$

$$Ч2 \quad 0.75 \leq \beta \leq 0.79$$



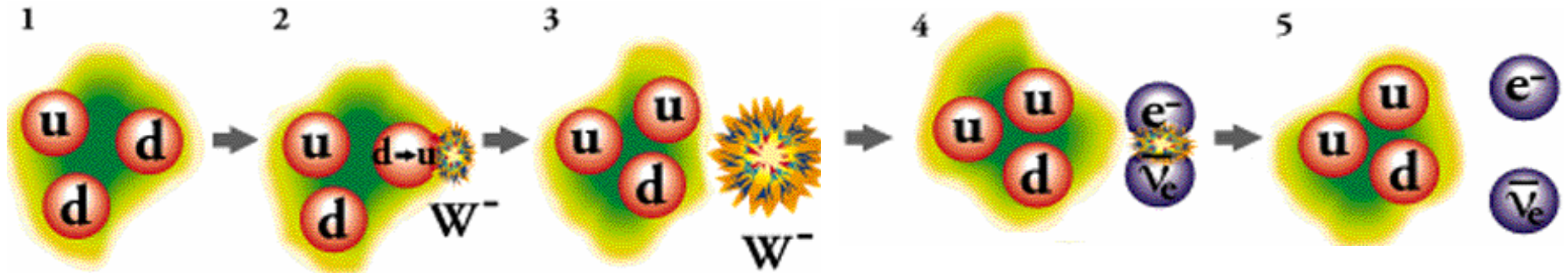
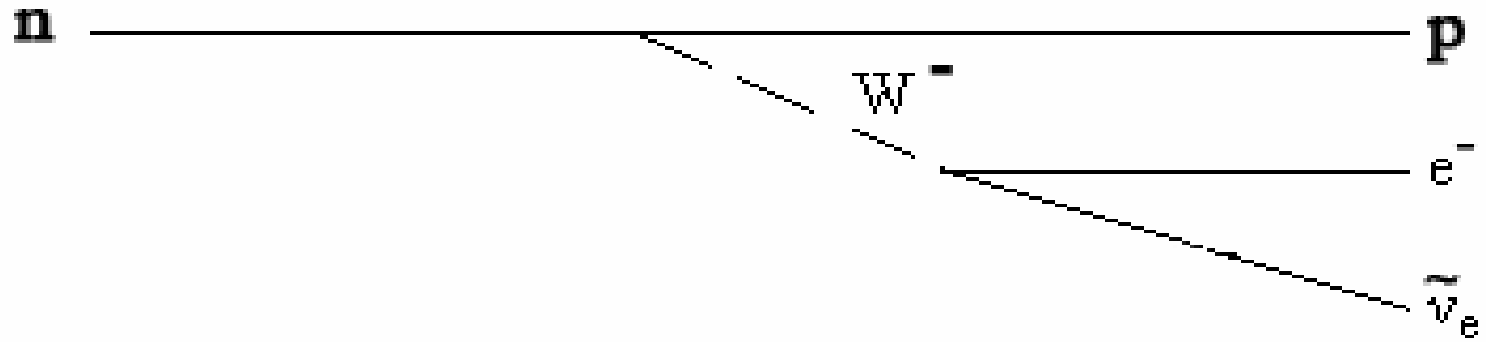
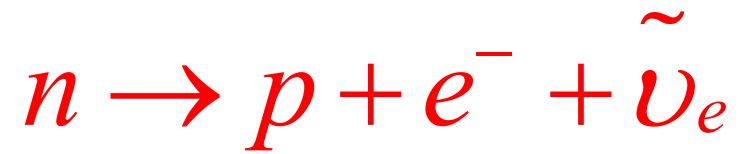
Лептоны. Антилептоны ($J=1/2$)

	Масса, МэВ	Q	L_e	L_μ	L_τ
e^-	0,511	-1	+1	0	0
e^+	0,511	+1	-1	0	0
μ^-	106	-1	0	+1	0
τ^-	1777	-1	0	0	+1
ν_e	~ 0	0	+1	0	0
$\tilde{\nu}_\tau$	~ 0	0	0	0	-1

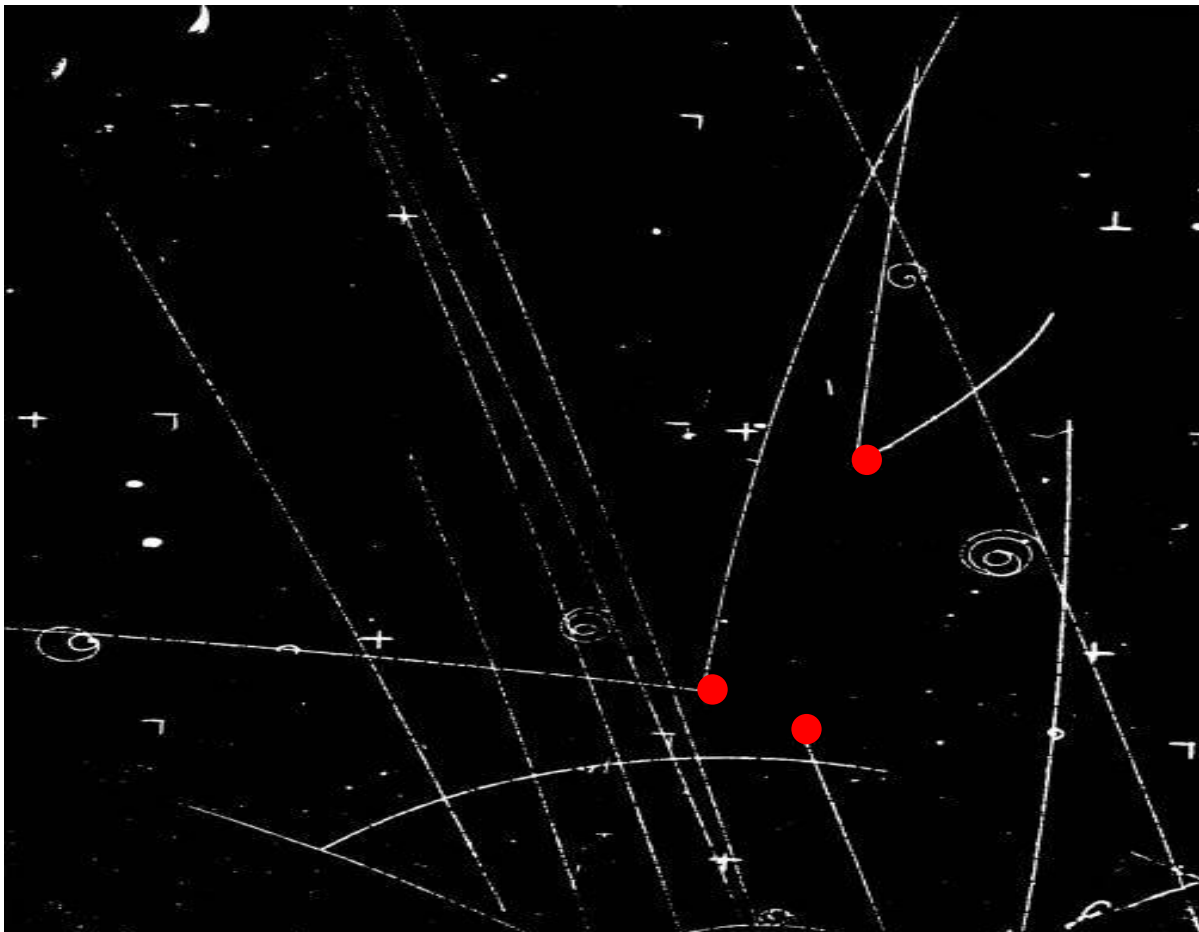
Барионы. Антибарионы

	Масса, МэВ	Q	J	кварки	B	I	s	c	b	t
p	938,3	+1	1/2	uud	+1	1/2	0	0	0	0
\bar{n}	939,6	0	1/2	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	-1	1/2	0	0	0	0
π^+	139,6	+1	0	$u\bar{d}$	0	1	0	0	0	0
π^-	139,6	-1	0	$\bar{u}d$	0	1	0	0	0	0
K^+	494	+1	0	$u\bar{s}$	0	1/2	+1	0	0	0
Λ^0	1116	0	1/2	uds	+1	0	-1	0	0	0
Σ^0	1189	0	1/2	uds	+1	1	-1	0	0	0
Ξ^0	1315	0	1/2	uss	+1	1	-2	0	0	0
Λ_c^+	2285	+1	1/2	udc	+1	0	0	+1	0	0
Δ^{++}	1232	+2	3/2	uuu	+1	3/2	0	0	0	0

Распад нейтрона

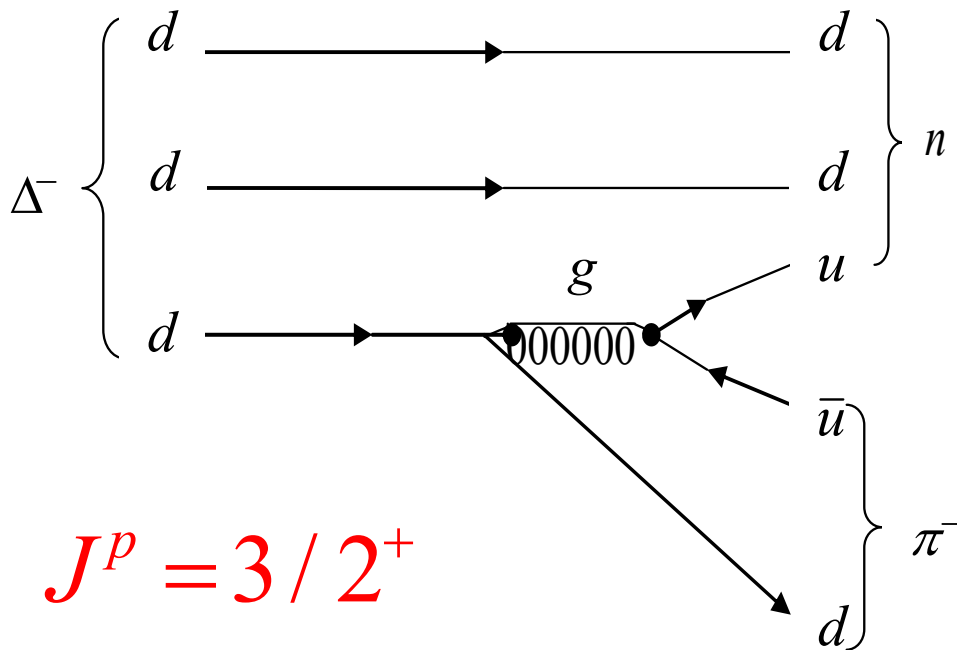


Наблюдение частиц в пузырьковой камере

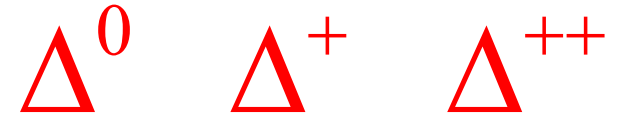


Сильные распады адронов

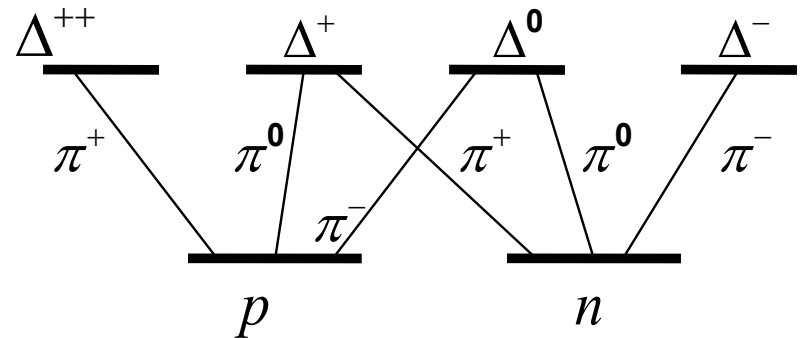
Все адроны за исключением протона являются *нестабильными частицами* и характеризуются способом распада и средним временем жизни τ . Определяющим для скорости распада является фундаментальное взаимодействие, ответственное за распад адрона. Быстрее всех – за характерное время $\approx 10^{-23}$ с – происходят распады за счёт сильного взаимодействия.



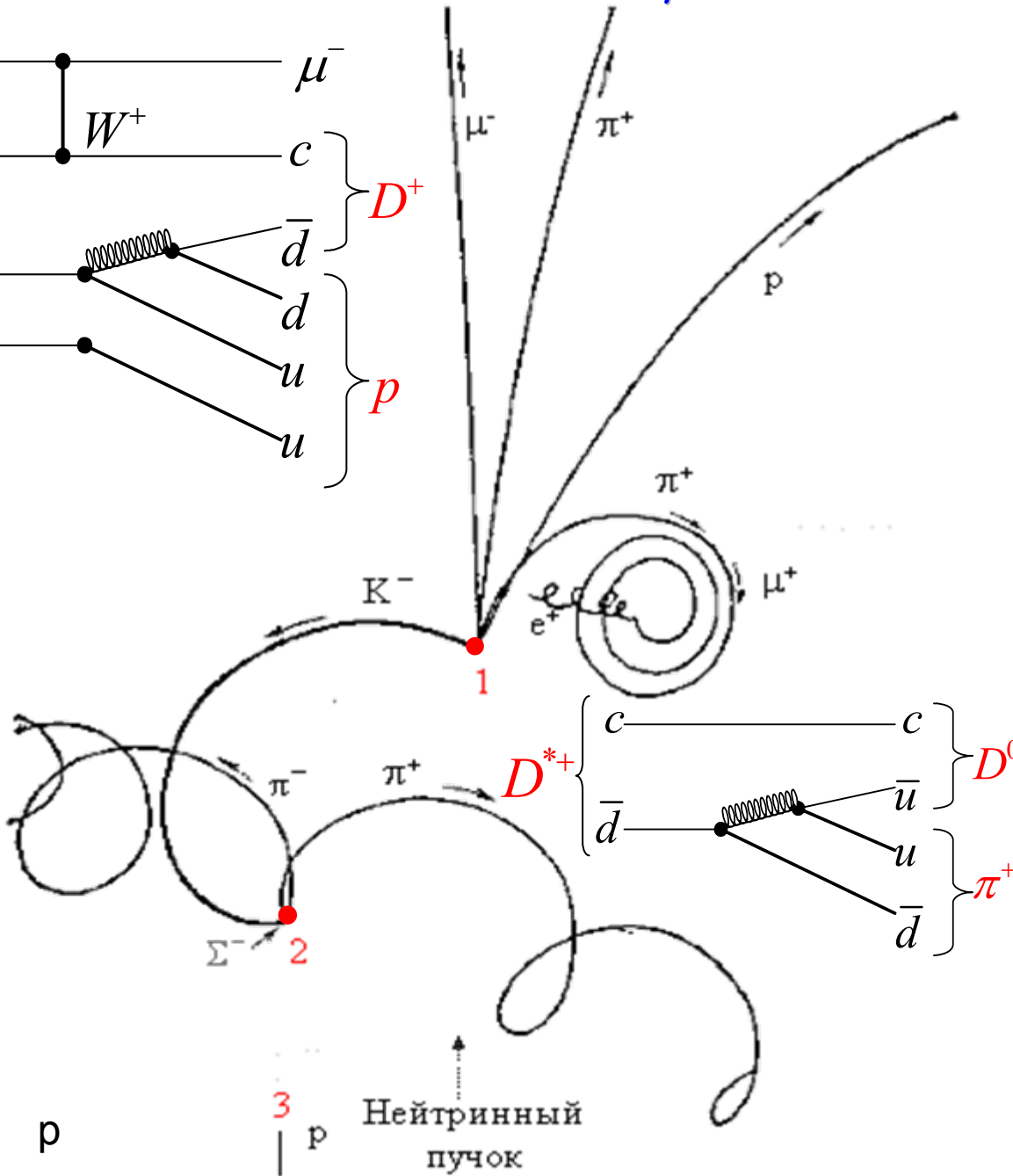
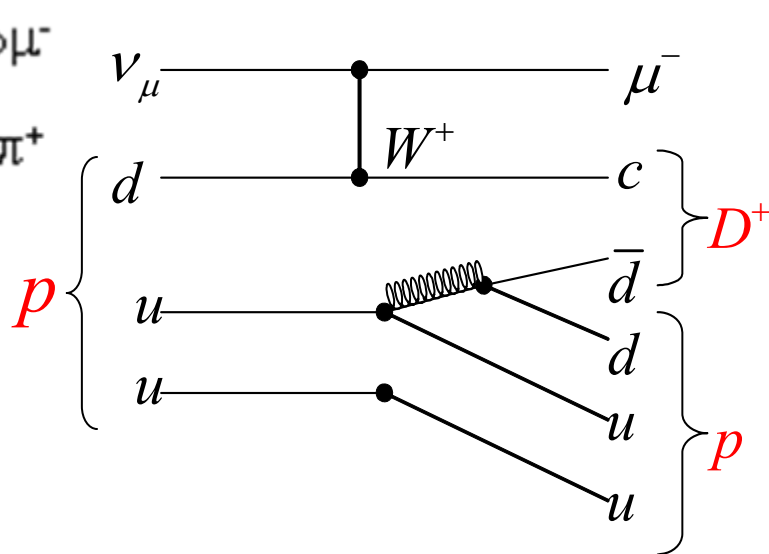
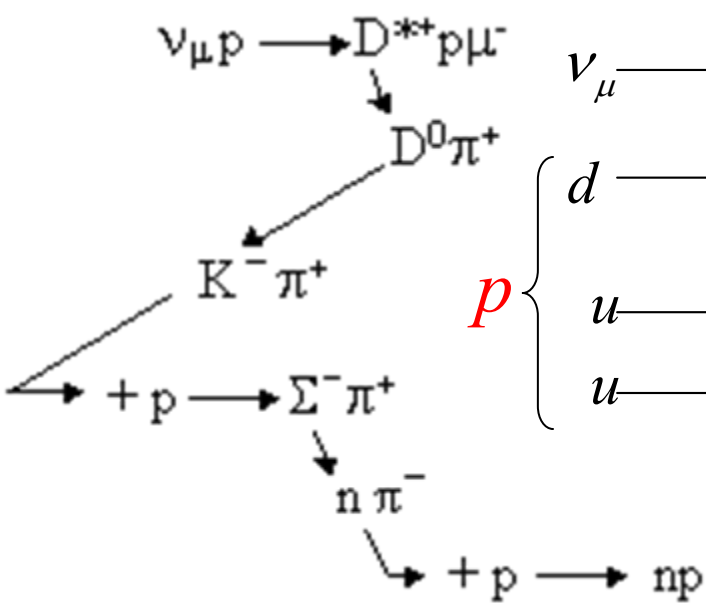
$$J^P = 3/2^+$$



$$M(\Delta) = 1232 \text{ МэВ}$$

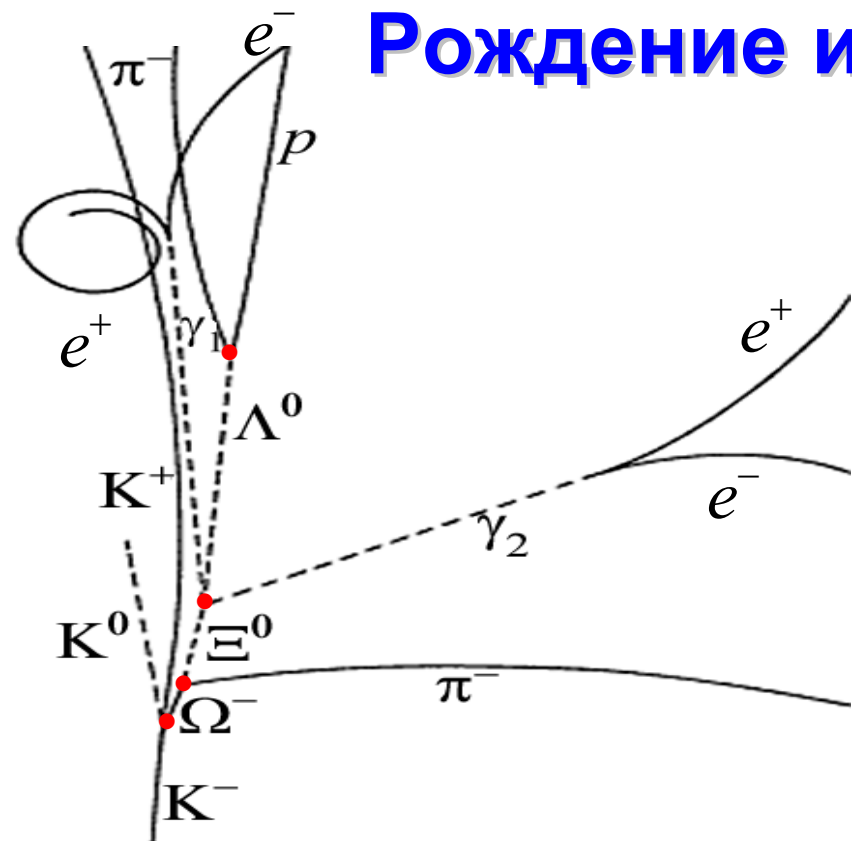


Образование D^{*+} резонанса в реакции $\nu_\mu + p$



- $M(D^{*+})(c\bar{d}) = 2010 \text{ МэВ}$
- $M(D^0)(c\bar{u}) = 1864 \text{ МэВ}$
- $M(\mu^-) = 105,7 \text{ МэВ}$
- $M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$
- $M(K^-) = 493,7 \text{ МэВ}$
- $M(\Sigma^-) = 1197,3 \text{ МэВ}$

Рождение и распад Ω^- -гиперона



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

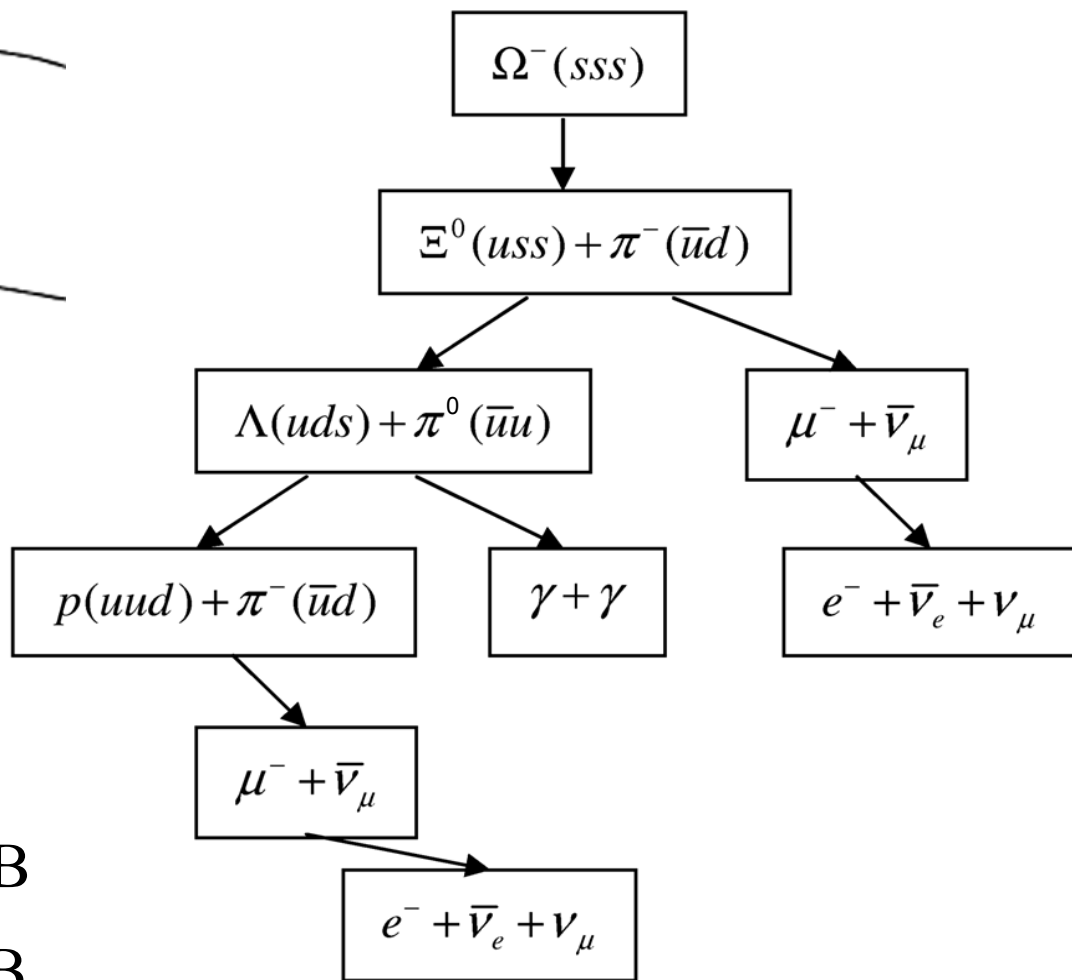
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^-, \mu^+) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$$



Каналы распада	Относительные вероятности
$\mu^+ \nu_\mu$	63.4%
$\pi^+ \pi^0$	21.1%
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	5.6%
$\pi^0 e^+ \nu_e$	4.9%
$\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	3.3%
$\pi^+ \pi^0 \pi^0$	1.7%
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	$5.5 \cdot 10^{-3}$
$\pi^0 \pi^0 \gamma$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$2.7 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	$4.1 \cdot 10^{-5}$
$\pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	$2.1 \cdot 10^{-5}$
$e^+ \nu_e$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
$\pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	$1.4 \cdot 10^{-5}$

Распады K^+ - мезона

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

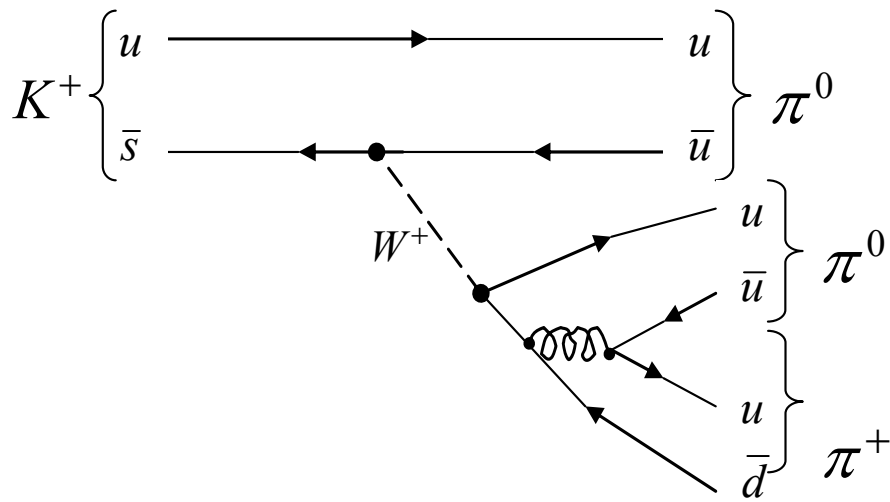
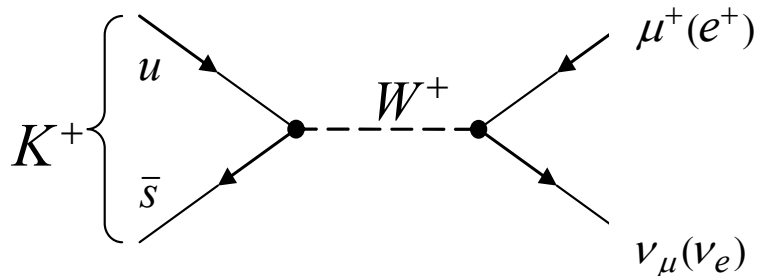
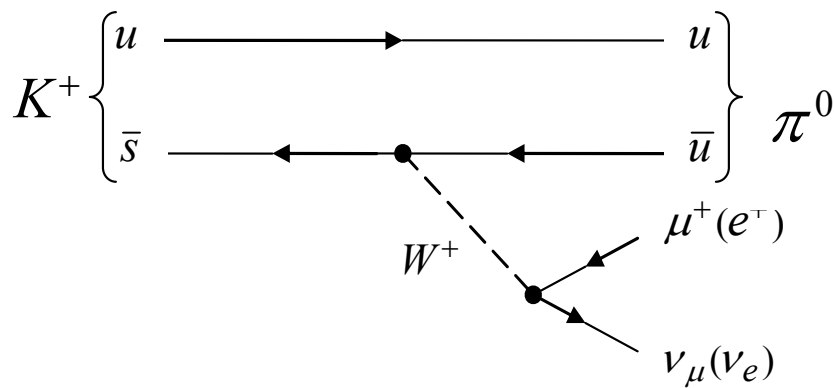
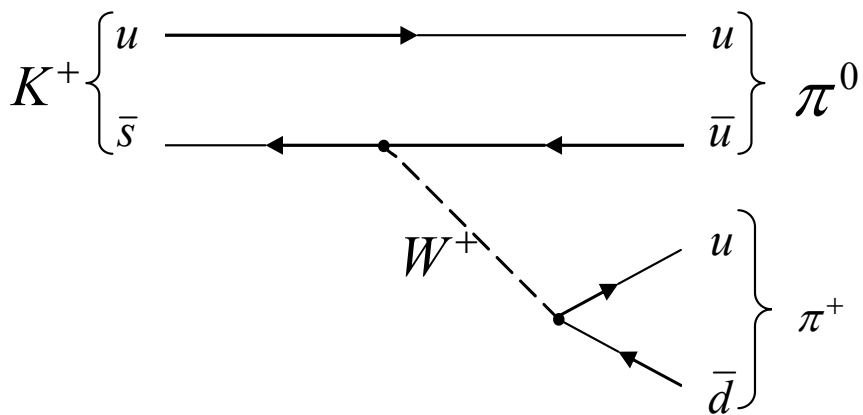
$$J^P(I) = 0^-(1/2)$$

Распады K^+ - мезона

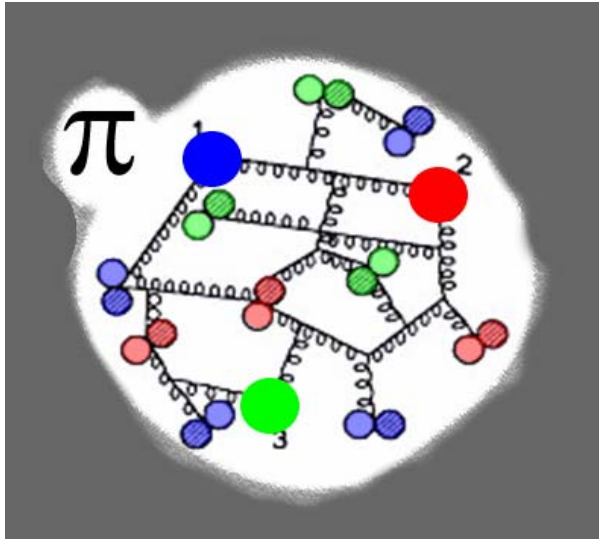
$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

$$J^P = 0^-$$

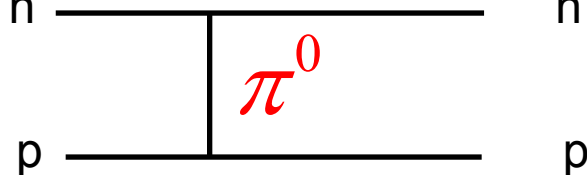
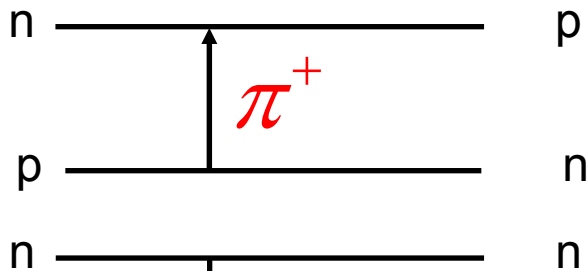
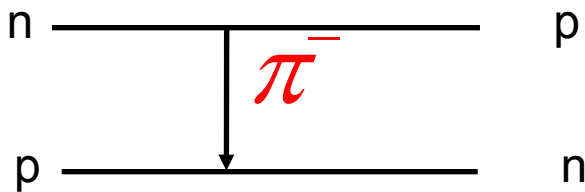


Структура протона



В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

1. Внутри нуклона обнаружены точечноподобные объекты – партоны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партонов $< 10^{-17}$ см.
2. Заряженные партоны имеют характеристики кварков – их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$.
3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутренней энергии нуклона.



Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

Как устроен Мир. Конец XX века

ФЕРМИОНЫ

Спин $J = 1/2$

Лептоны (спин = 1/2)			Кварки (спин = 1/2)				
Аромат		Масса, ГэВ/с ²		Аромат		Масса, ГэВ/с ²	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$< 1 \cdot 10^{-8}$		1 поколение	u	up	0,003
e	электрон	0,0005111	d		down	0,006	-1/3
ν_μ	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	2 поколение	c	charm	1,3	2/3
μ	мюон	0,106		s	strange	0,1	-1/3
ν_τ	тау-нейтрино	$< 0,02$	3 поколение	t	top	175	2/3
τ	тау	1,7771		b	bottom	4,3	-1/3

Стабильные частицы

e^- — электрон, e^+ — позитрон

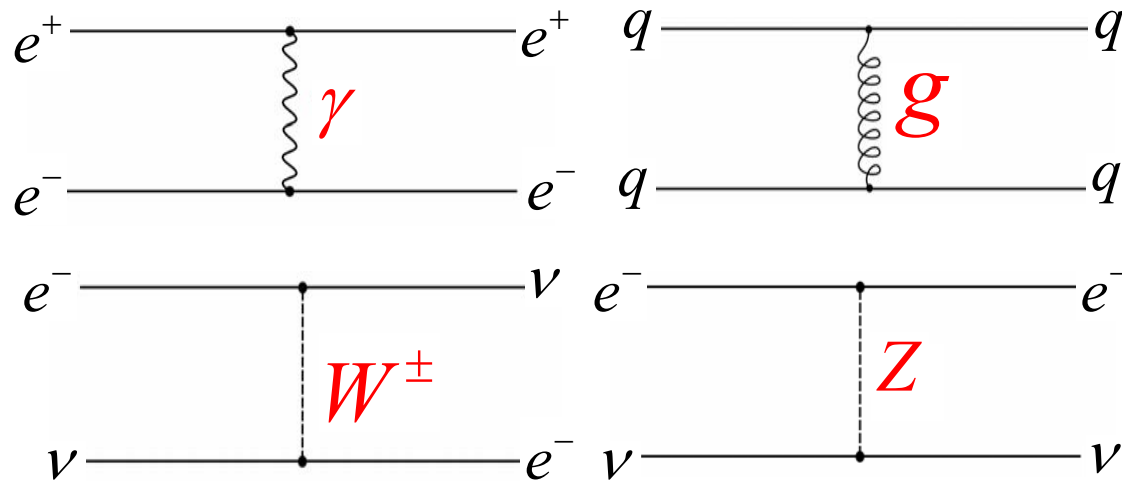
p — протон, \bar{p} — антипротон

? $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$

Взаимодействия

Спин $J=1$

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	$1 \text{ ФМ} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	∞	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	W^+, W^-, Z , $m(W^\pm) = 80 \text{ ГэВ}$, $m(Z) = 91 \text{ ГэВ}$.	$10^{-2} \text{ ФМ} = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$, безмассовый	∞	10^{-38}



2013 г.
Бозон Хиггса
H
125 ГэВ
Спин $J=0$

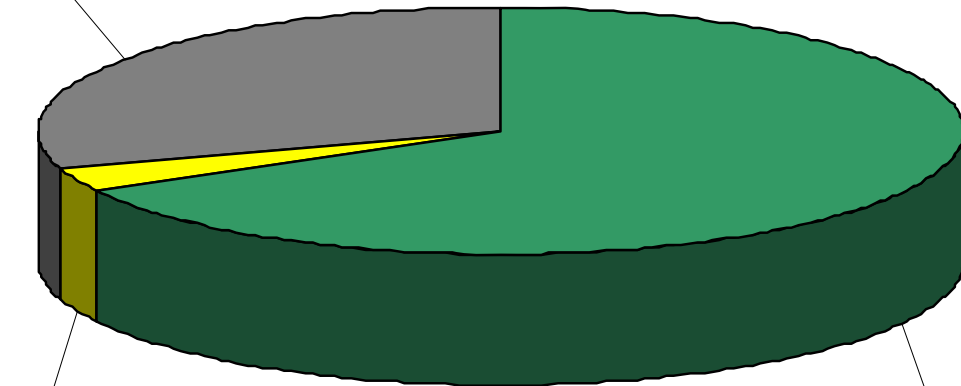
Как устроен Мир. 2014 г.

Характеристики Вселенной

БАРИОНЫ	0.02-0.05
в том числе, ЗВЁЗДЫ:	0.002-0.003
ФОТОНЫ	$4.9 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО	$3.3 \cdot 10^{-5}$
ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ	0.2-0.4
ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (ВАКУУМ)	0.6-0.8
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ	1.02 ± 0.02

Темная
материя

Барионы



Вакуум