

Микромир и Вселенная 2019

**Кварки.
Адроны**

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^- μ^- τ^-

ν_e ν_μ ν_τ

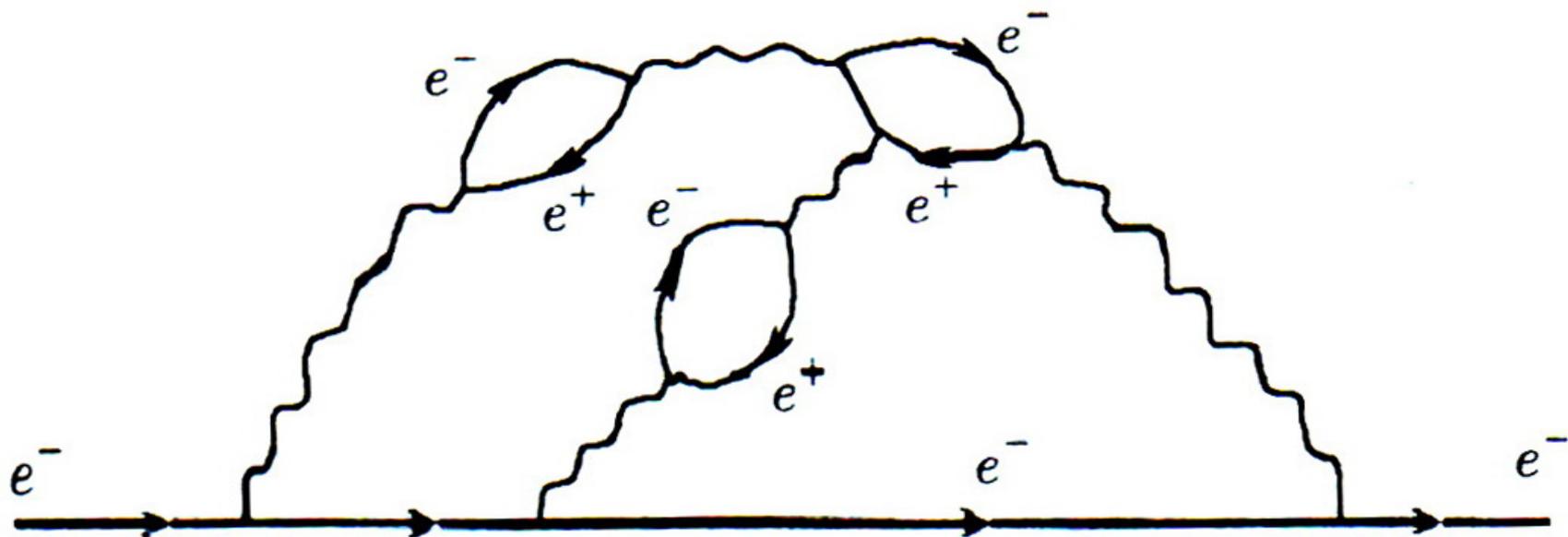
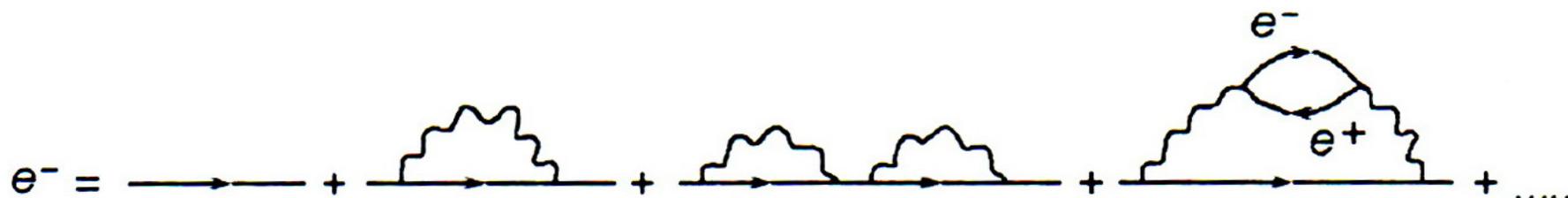
u c t

d s b

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

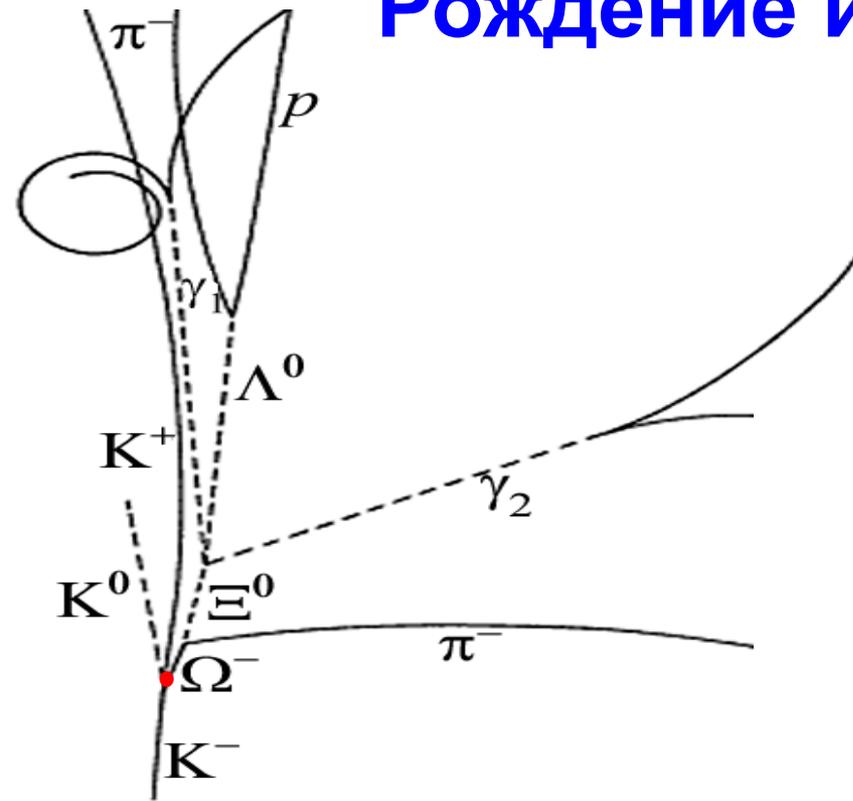
H - бозон Хиггса

ЭЛЕКТРОН



Диаграмма, описывающая свободный электрон

Рождение и распад Ω^- -гиперона



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

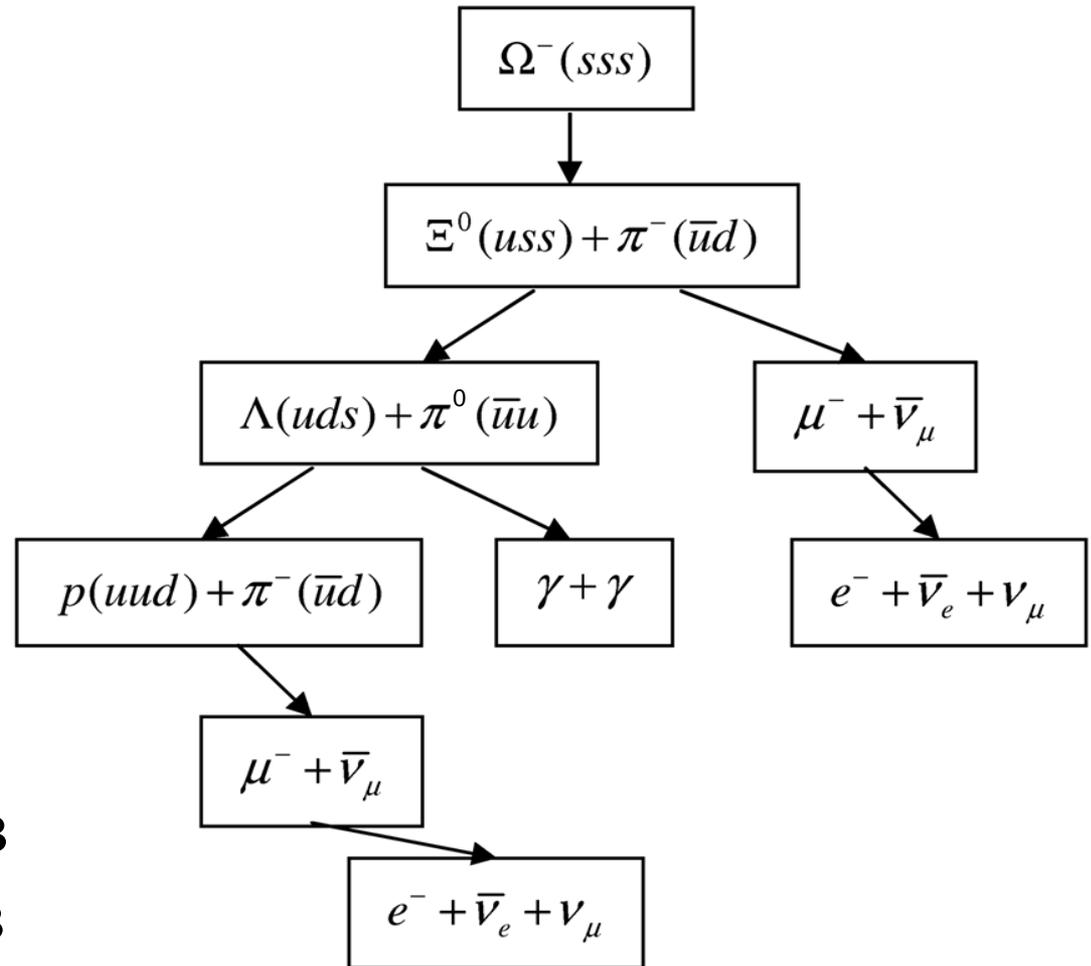
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

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

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



Адроны — элементарные частицы?

n (939.6 $MэВ$)

p (938.3 $MэВ$)

Λ (1116 $MэВ$)

Σ^+ (1189 $MэВ$)

Σ^- (1197 $MэВ$)

Σ^0 (1193 $MэВ$)

Ξ^0 (1315 $MэВ$)

Ξ^- (1321 $MэВ$)

π^+ (139 $MэВ$)

π^- (139 $MэВ$)

π^0 (134 $MэВ$)

K^+ (494 $MэВ$)

K^- (494 $MэВ$)

Кварки

1963 г. М. Гелл-Манн, Г. Цвейг

u

d *s*

Все обнаруженные до 1974 г. адроны можно было описать, составляя их из кварков трех типов — *u*, *d*, *s*. Каждой комбинации кварков соответствовала экспериментально наблюдаемая частица

Наблюдались только связанные состояния кварка в адронах. Возникла проблема — **отсутствие кварков в свободном состоянии.**

Кварковая структура адронов

p (uud)

n (udd)

Λ (uds)

Ξ^0 (uss)

Ξ^- (dss)

$$Q(u) = +\frac{2}{3}e$$

$$Q(d, s) = -\frac{1}{3}e$$

Кварки должны иметь дробный электрический заряд

π^+ ($u\bar{d}$)

K^+ ($u\bar{s}$)

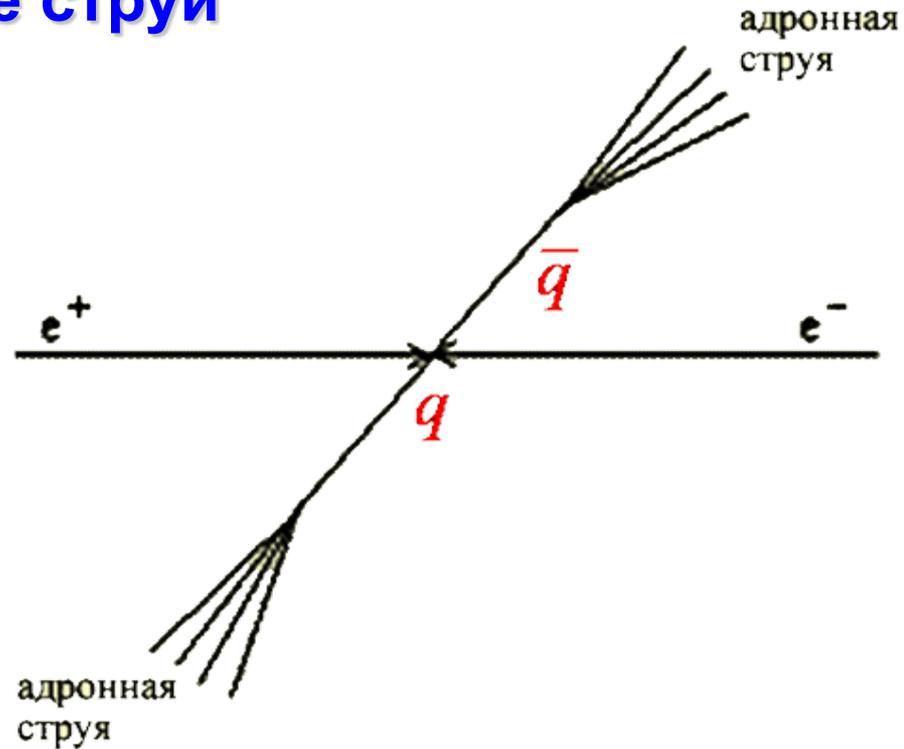
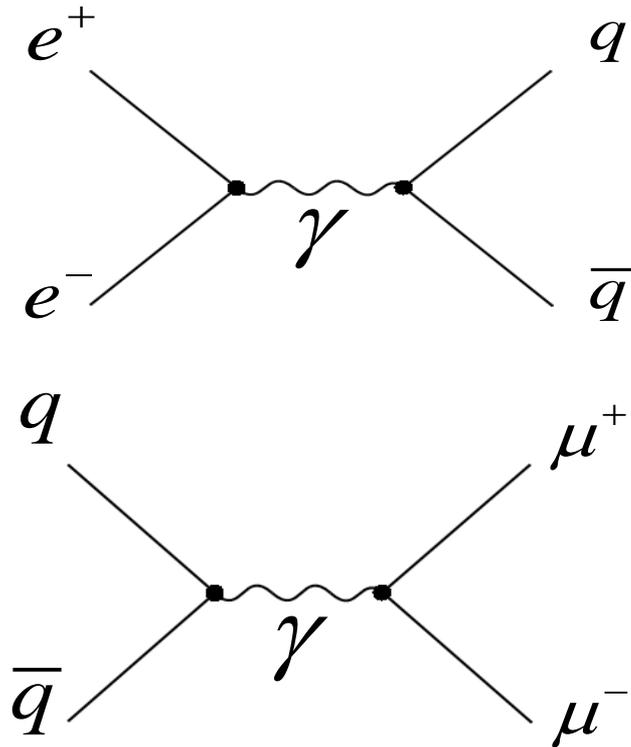
π^- ($\bar{u}d$)

K^- ($\bar{u}s$)

Кварки имеют спин

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

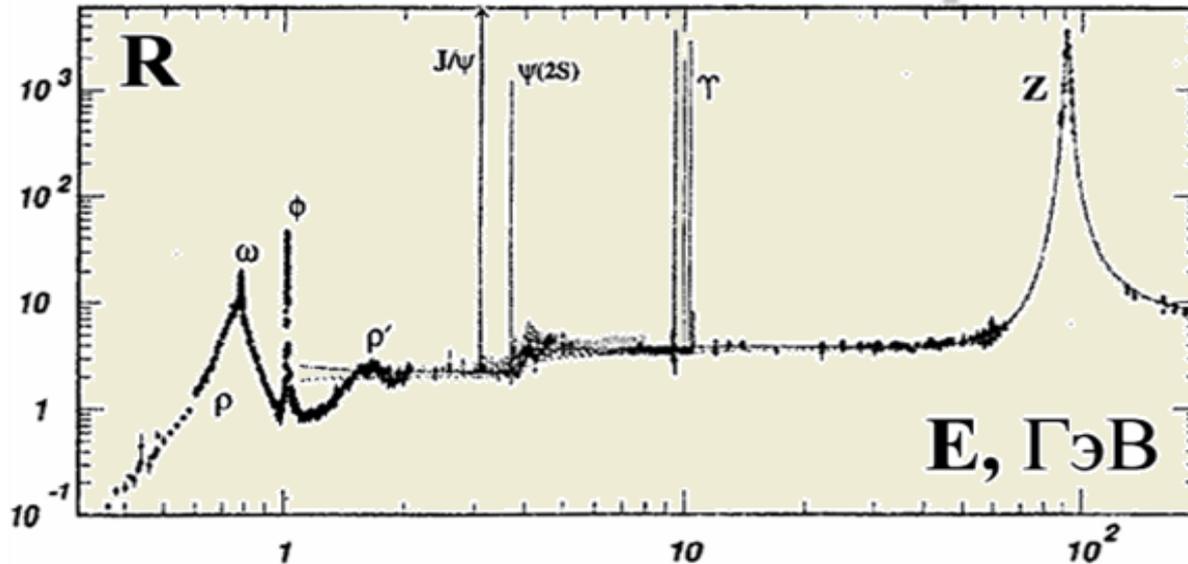
Как открывают кварки. Адронные струи



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.

1974 г. с-кварк



Одновременно две группы физиков объявили о наблюдении новой частицы.

- $p + Be \rightarrow e^+e^- + \text{остальные частицы}$.

Резонанс в спектре e^+e^- был назван J-частицей.

- $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$, $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$, $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$.

Резонанс был назван ψ -частицей.

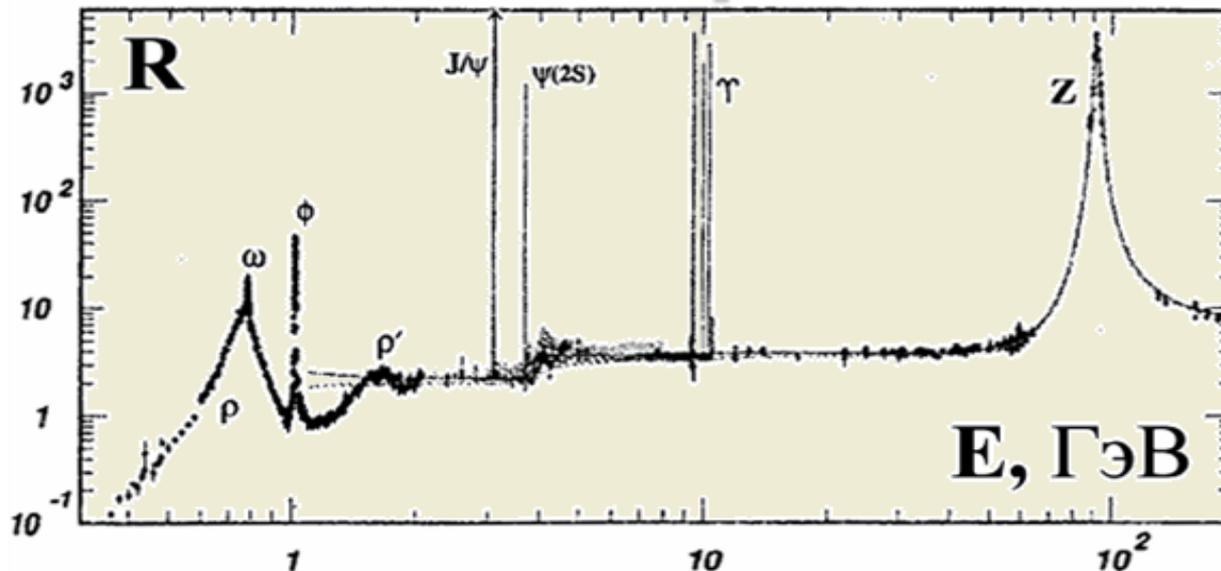
Наиболее интересным свойством новой частицы, окончательно названной **J/ψ -частицей**, является узкая ширина резонанса $\Gamma = 91$ КэВ. $E = 3,1$ ГэВ.

Нобелевская премия по физике

1976 г. – Б. Рихтер, С. Тинг.

За открытие тяжелой элементарной частицы нового типа

с-кварк

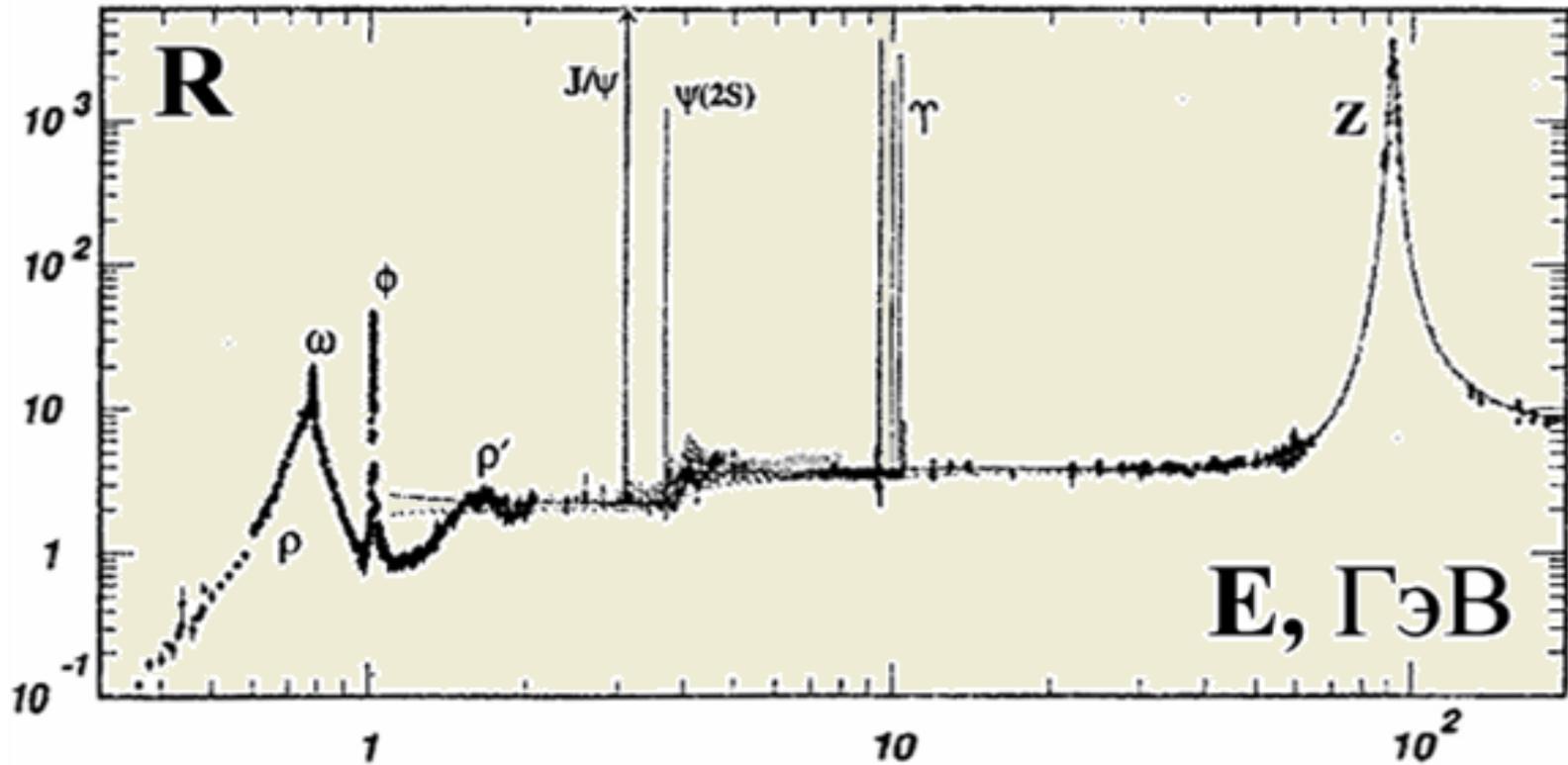


Ширина резонанса характеризует время жизни частицы τ :

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$$

Время жизни J/ψ -частицы почти в 1000 раз больше, чем у известных частиц такой массы. J/ψ -частица — мезон, состоящий из с-кварка и с-антикварка, т.е. частица со скрытым очарованием. с-кварк несет новое квантовое число с, названное «очарованием». Очарованный кварк порождает новое семейство адронов, имеющих в своем составе с-кварк или с-антикварк.

1977 г. b-кварк

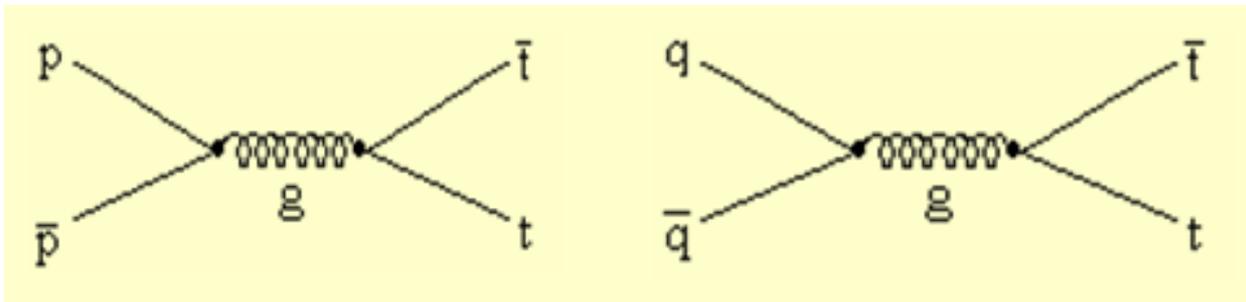


Было открыто несколько мезонов с массами в районе $10 \text{ ГэВ}/c^2$. Они получили название ипсилон-мезонов. Так же как и J/ψ -мезоны они наблюдались в реакции образования мюонных пар в протон-ядерных столкновениях и на электронно-позитронных коллайдерах. Также как J/ψ -мезоны это были долгоживущие частицы — ширина распада Υ -мезона 52 кэВ . Это означало существование пятого кварка b (beauty).

В состав Υ -мезона входят b -кварк и \bar{b} -антикварк, поэтому он обладает скрытой красотой.

Открытие t-кварка

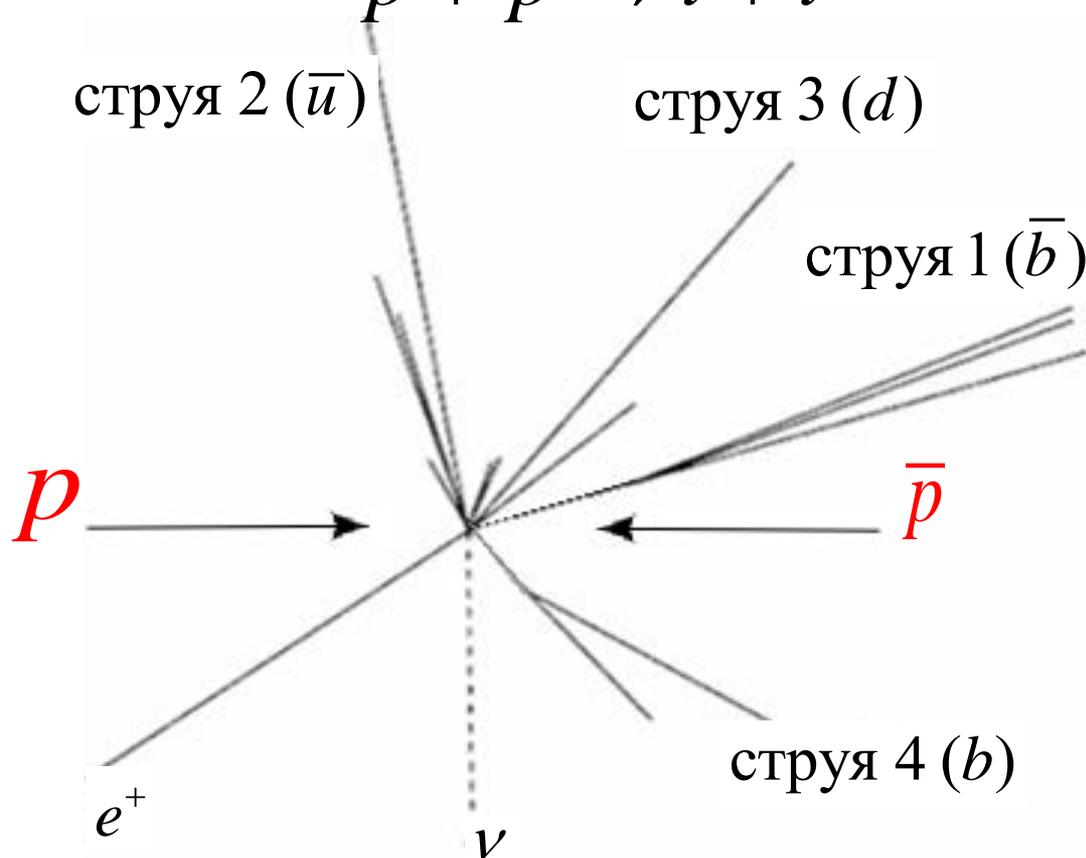
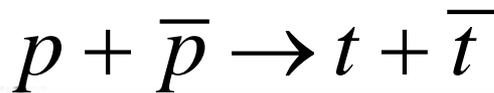
t-кварк был открыт в 1995 г. в столкновении пучков протонов и антипротонов (Теватрон, Фермилаб, США)



Один из кварков, входящих в состав протона, в результате сильного взаимодействия с одним из антикварков антипротона образует глюон g — квант сильного поля, который затем порождает пару $t\bar{t}$. По оценкам, вероятность рождения пары $t\bar{t}$ -кварков в столкновении протона и антипротона с энергиями ≈ 1 ТэВ должна была составлять 10^{-9} - 10^{-10} от общего числа наблюдаемых событий. Поэтому потребовалось несколько месяцев измерений и тщательного анализа событий, чтобы убедиться в существовании t-кварка и определить его характеристики.

Пример

Один из случаев распада $t\bar{t}$ -кварков, образовавшихся в реакции:



Кварки

u *c* *t*
d *s* *b*

На современном этапе развития наших представлений о структуре материи на первый план выходят «новые элементарные частицы» — кварки. Все адроны состоят из различных комбинаций *qqq, q \bar{q} , $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$* этих шести кварков.

Есть достаточно серьезные основания считать, что число кварков не должно быть больше шести.

Кварки являются фундаментальными частицами из которых состоят все сильновзаимодействующие частицы.

Кварки не существуют в свободном состоянии.

Они **заклочены** в адронах.

Силы, связывающие кварки в адронах, растут с увеличением расстояния между кварками. Это называют удержанием кварков в адронах или конфайнментом.

Спин кварков J

Кварки являются фермионами

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

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

Электрические заряды кварков $Q(e)$

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

**Так же, как в случае лептонов, известно
3 поколения кварков**

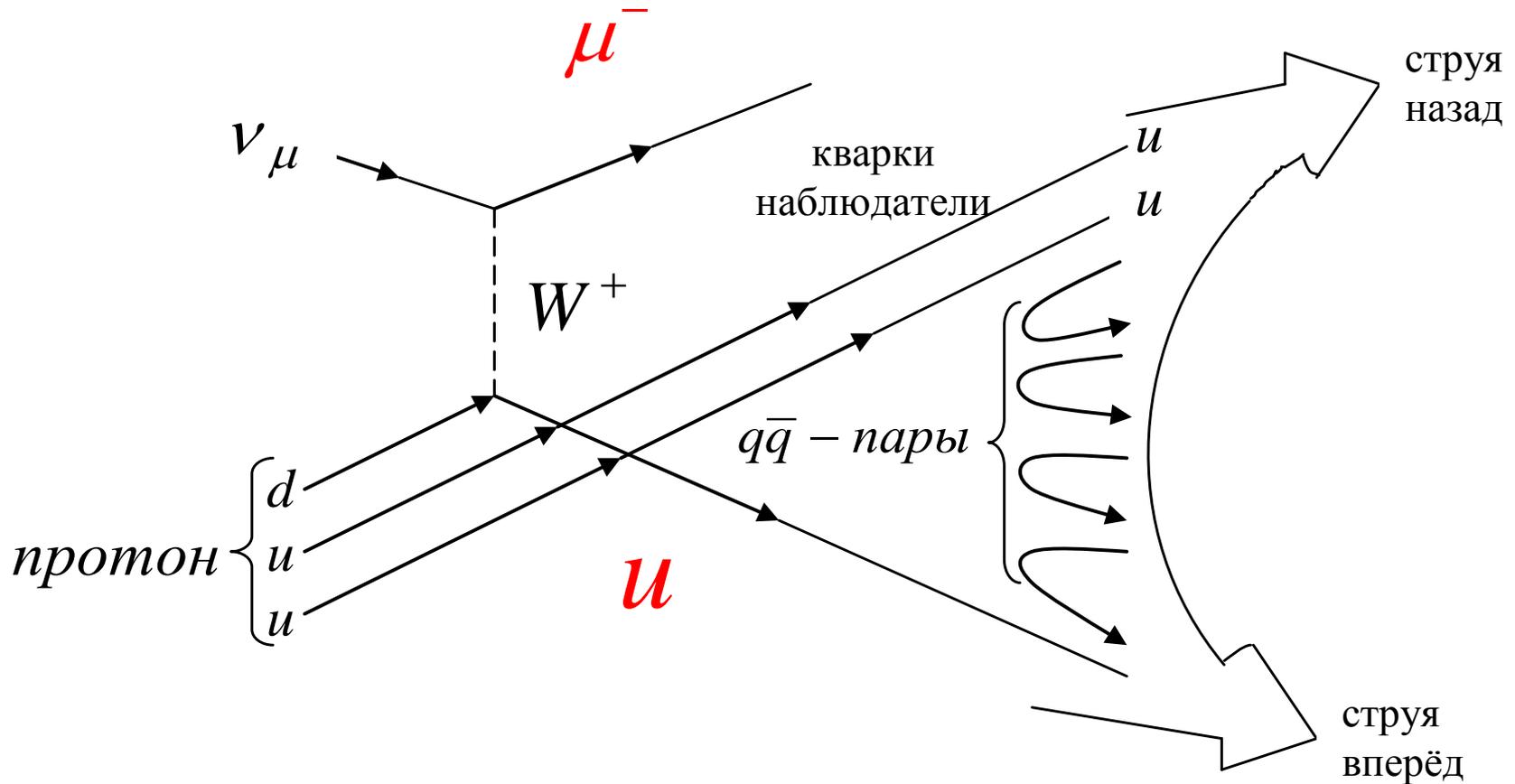
u, c, t кварки имеют электрический заряд $+2/3$

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

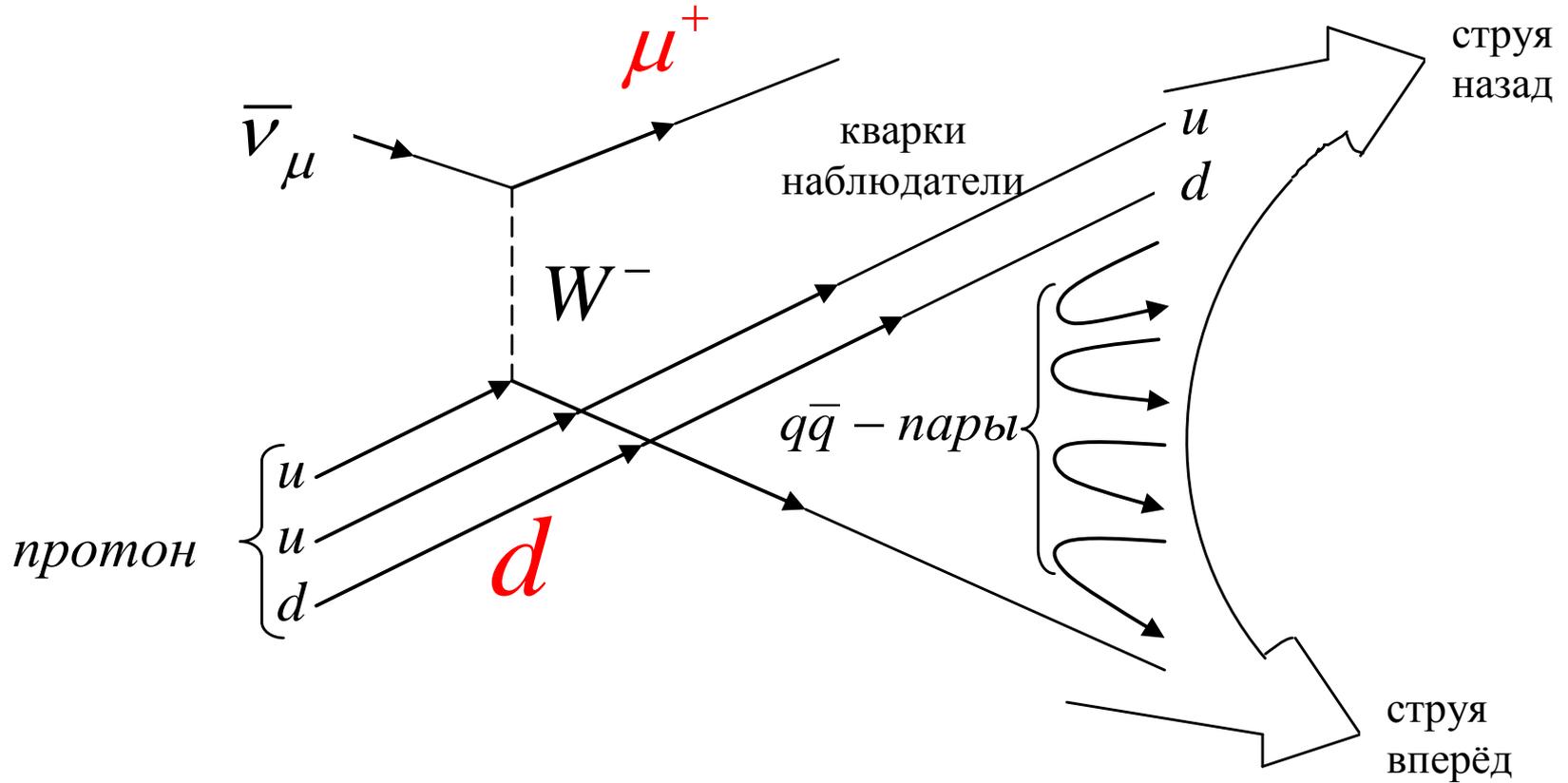


$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{струи адронов}$$

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

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

Электрические заряды кварков



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

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

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

Барионный заряд кварков B

Стандартная Модель приписывает лептонам три лептонных заряда L_e, L_μ, L_τ . Аналогичной характеристикой кварков – но одной и той же для всех кварков – является **барионный заряд B** . **Барионный заряд кварков $B(q)=+1/3$. Барионный заряд антикварков $B(\bar{q})=-1/3$** . Барионный заряд является аддитивным сохраняющимся квантовым числом. Не обнаружено каких-либо указаний на его несохранение.

Адроны, состоящие из трех кварков, имеют барионный заряд $B = 1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$ и называются барионами.

Антибарионы, состоящие из трех антикварков, имеют барионный заряд $B = -1/3 + (-1/3) + (-1/3) = -1$.

Мезоны, состоящие из одного кварка и одного антикварка, имеют барионный заряд $B = +1/3 + (-1/3) = 0$.

$$B(q) = +\frac{1}{3} \qquad B(\bar{q}) = -\frac{1}{3}$$

Изоспин u , d кварков

u - и d - кваркам приписывается изоспин $I = 1/2$ с проекциями I_3 на ось квантования в изоспиновом пространстве, равными соответственно $I_3 = +1/2$ (изоспин направлен вверх) и $I_3 = -1/2$ (изоспин направлен вниз):

$$u \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = +\frac{1}{2}$$

$$d \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = -\frac{1}{2}$$

$$\bar{u} \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = -\frac{1}{2}$$

$$\bar{d} \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = +\frac{1}{2}$$

Проблема цвета

$$\Omega^{-}(sss) \quad \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = 0$$

$m(\Omega^{-}) = 1672 \text{ МэВ}$

$$\Delta^{++}(uuu) \quad \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Delta^{++}) = 1232 \text{ МэВ}$

$$\Delta^{-}(ddd) \quad \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Delta^{-}) = 1232 \text{ МэВ}$

Проблема цвета

Без введения квантового числа «цвет», принимающего три значения, кварковая структура Δ^{++} , Δ^{-} , Ω^{-} противоречит принципу Паули.

Δ^{++} , Δ^{-} , Ω^{-} состоят из трех тождественных кварков: Δ^{++} – (uuu), Δ^{-} – (ddd), Ω^{-} – (sss). У всех частиц $J^P = 3/2^+$. Орбитальный момент относительного движения кварков равен нулю. Кварки являются фермионами и имеют спин $J = 1/2$. Для них возможны только две проекции спина на выделенное направление: $+1/2$ и $-1/2$. Для того чтобы образовалось состояние $3/2^+$, все три кварка должны иметь одинаковые проекции спинов. В каждом барионе три тождественных кварка имеют одинаковые квантовые числа. В то же время согласно принципу Паули тождественные фермионы не могут иметь одинаковые квантовые числа. Чтобы выполнялся принцип Паули, необходимо ввести для кварков ещё одно квантовое число – «цвет». Чтобы восстановить принцип Паули, «цвет» должен принимать три разных значения.

$$\Omega^{-} (sss) \quad \begin{array}{c} \uparrow \text{ (red)} \\ \uparrow \text{ (green)} \\ \uparrow \text{ (blue)} \end{array} \quad J^P = \frac{3}{2}^{+}, I = 0$$

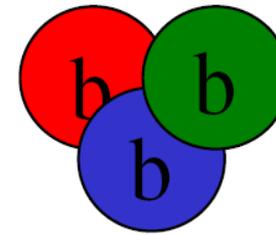
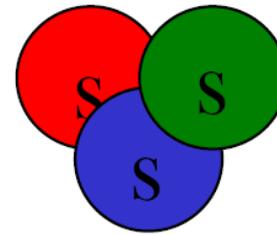
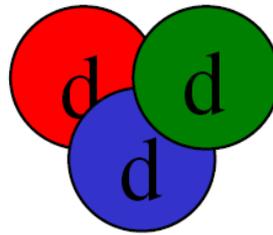
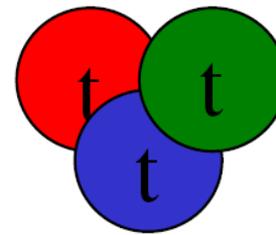
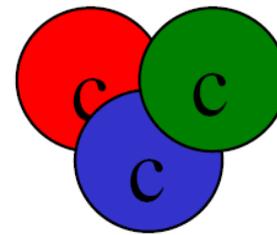
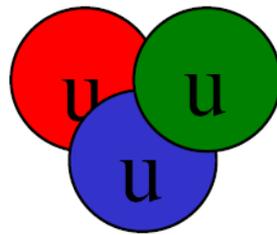
Ω^{-} состоит из одного красного s-кварка, одного зеленого s-кварка и одного синего s-кварка. Составляющие Ω^{-} -частицу s-кварки находятся в разных цветовых состояниях в полном соответствии с принципом Паули.

Цветные кварки

u u u *c c c* *t t t*
d d d *s s s* *b b b*

$6 \times 3 = 18$ цветных кварков

Кварки

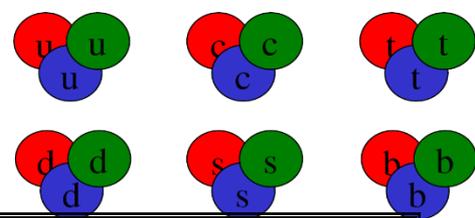


Кварки не существуют в свободном состоянии, а заключены в кварковых системах – адронах. Им нельзя освободиться от взаимодействий с находящимися в том же объеме другими кварками и глюонами.

Конституэнтные кварки – это «эффективные» кварки в адронах, движение и взаимодействие которых формирует адрон.

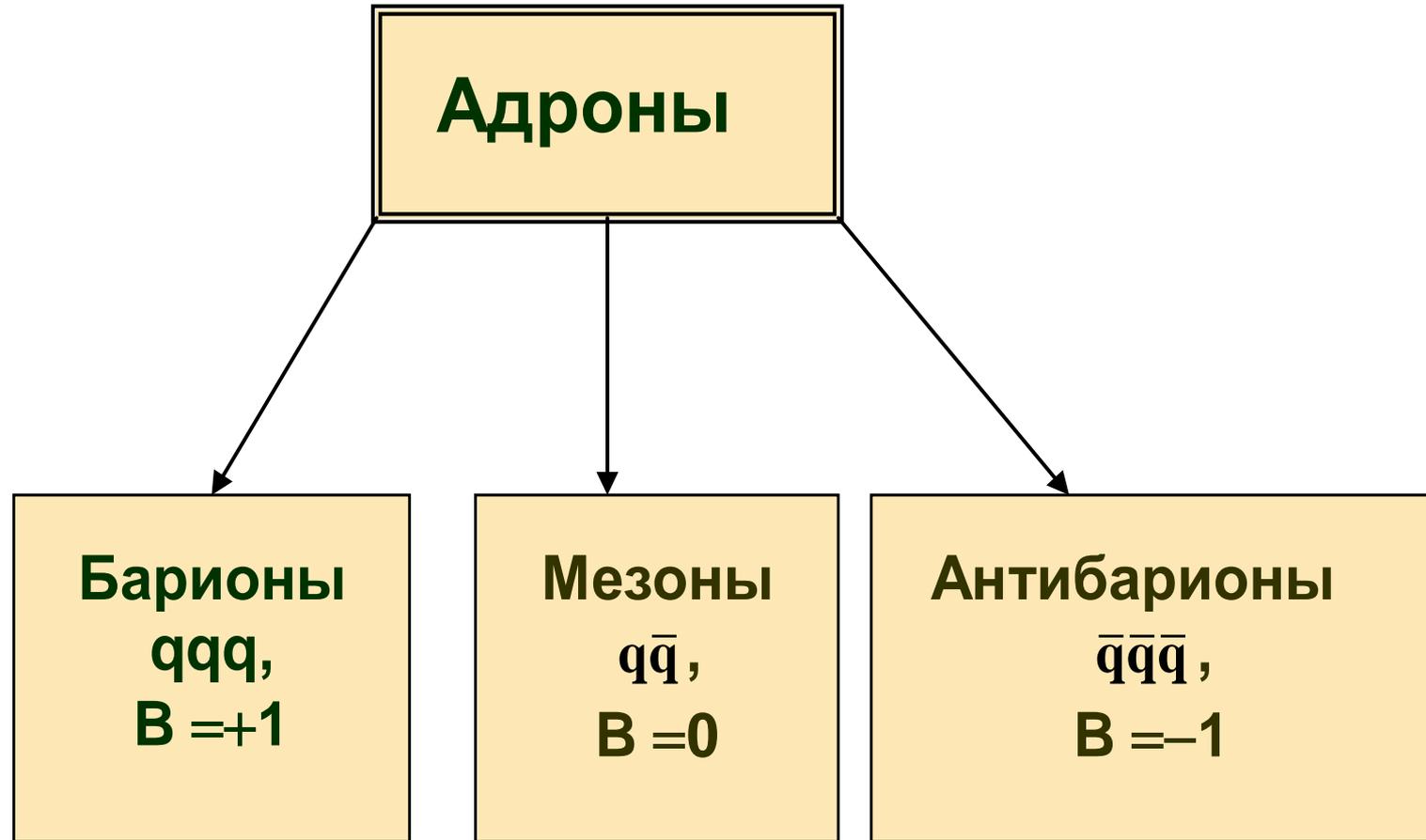
Токовые кварки – кварки, не испытывающие взаимодействия.

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

Адроны – системы связанных кварков



Кварки объединяются в частицы, называемые адронами.

Модель кварков

- Квантовые числа кварков, образующих адрон, определяют квантовые числа адронов. Адроны имеют определенные значения электрического заряда Q , спина J , чётности P , изоспина I . Квантовые числа s (странность), c (очарование или шарм), b (*bottom*) и t (*top*) разделяют адроны на обычные нестранные частицы (p, n, π, \dots), странные частицы ($K, \Lambda, \Sigma, \dots$), очарованные ($D, \Lambda_c, \Sigma_c, \dots$) и боттом-частицы (B, Λ_B, Ξ_B).
- t -кварк имеет время жизни $\approx 10^{-25}$ с, поэтому он не успевает образовать адрон.
- Всё многообразие адронов возникает в результате различных сочетаний u -, d -, s -, c -, b -кварков, образующих связанные состояния.
- барионы (фермионы с барионным числом $B = 1$) строятся из трех кварков;
- мезоны (бозоны с барионным числом $B = 0$) строятся из кварка и антикварка;
- квантовое число — цвет кварка — имеет три значения: красный, зеленый, синий;
- все известные адроны — бесцветны.

Антипротон 1955



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

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

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

$$Ч1 \quad \beta \geq 0.99$$

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

Нобелевская премия по физике
 1959 г. – Э. Сегре, О. Чемберлен.
 За открытие антипротона

Антинейтрон 1956

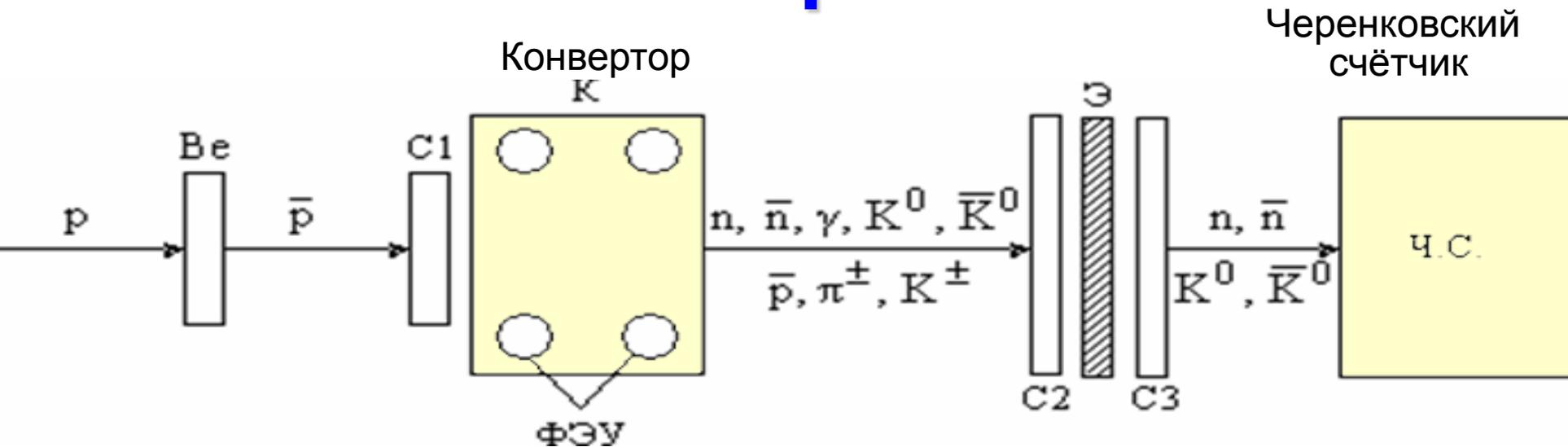


Схема эксперимента по регистрации антинейтронов



В результате $n - \bar{n}$ -аннигиляции образуются
сильновзаимодействующие частицы — π^- , К-мезоны.



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		$-(+)b$	$+(-)b$
Top		$+(-)t$	$-(+)t$
Время жизни		τ	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

Мезоны ($q\bar{q}$)

Мезоны — связанные состояния кварка и антикварка. Мезоны имеют барионное число $B = 0$. Массы и квантовые числа мезонов определяются типами кварка и антикварка, входящих в состав мезона, взаимной ориентацией их спинов и орбитальных моментов.

Кварковая модель позволяет качественно описать структуру мезонов, получить их квантовые числа.

$\pi^+ (u\bar{d})$

	u	\bar{d}	π^+
Q	+2/3	+1/3	+1
B	+1/3	-1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	+1/2	+1/2	+1
P	+1	-1	-1

$$M(\pi^+) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^+) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

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

$\pi^- (\bar{u}d)$

	\bar{u}	d	π^-
Q	-2/3	-1/3	-1
B	-1/3	+1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	-1/2	-1/2	-1
P	-1	1	-1

$$M(\pi^-) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^-) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

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

Барионы (qqq)

Протон (uud)

$$M(P) = 938.272 \text{ МэВ}$$

$\tau(P) = \text{стабильный}$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left(\frac{1}{2} \right)$$

Нейтрон (udd)

$$M(n) = 939.565 \text{ МэВ}$$

$$\tau(n) = 885.7 \pm 0.8 \text{ с}$$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

	u	u	d	p
Q	+2/3	+2/3	-1/3	+1
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	+1/2	-1/2	+1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

	u	d	d	n
Q	+2/3	-1/3	-1/3	0
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	-1/2	-1/2	-1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

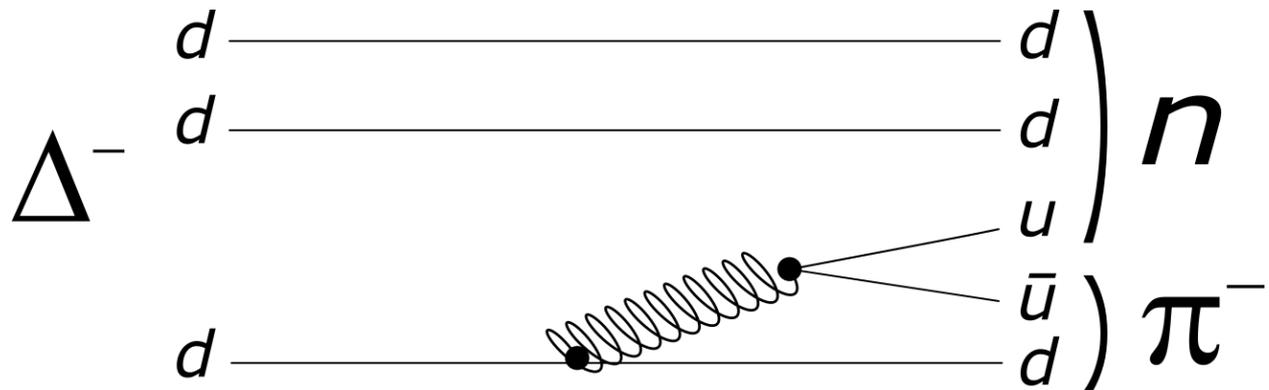
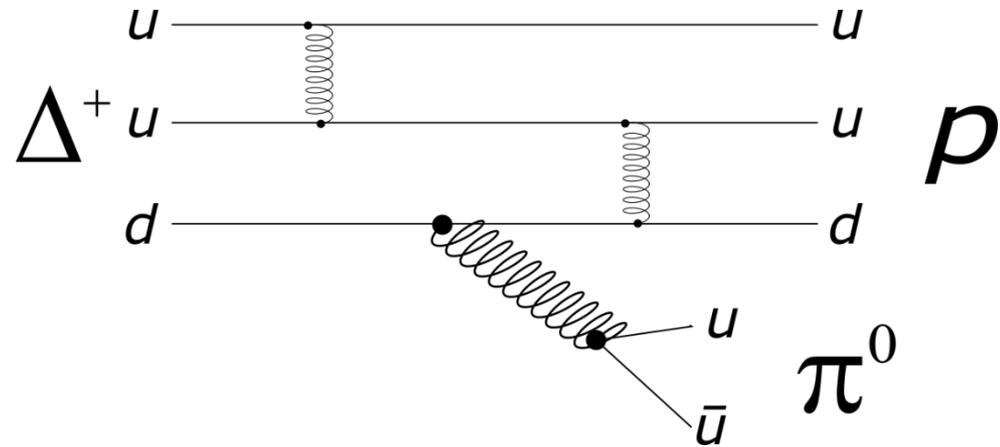
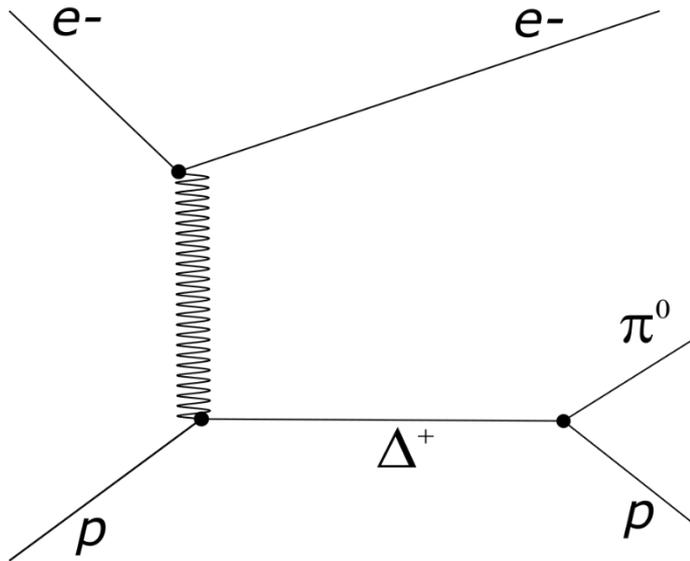
Кварковая структура барионов

Барионы — связанные состояния трёх кварков

Частица	Кварковый состав	Масса, mc^2 (МэВ)	Время жизни (с) или ширина (МэВ)	Спин, чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные каналы распада
p	uud	938.272	$>10^{31}$ лет	$1/2^+(1/2)$	
n	udd	939.565	885.7 ± 0.8	$1/2^+(1/2)$	$p e^- \nu$
Λ	uds	1115.683	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p \pi^-, n \pi^0$
Σ^+	uus	1189.37	$0.802 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p \pi^0, n \pi^+$
Σ^0	uds	1192.64	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda \gamma$
Σ^-	dds	1197.45	$1.48 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n \pi^-$
Ξ^0	uss	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
Ξ^-	dss	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
Ω^-	sss	1672.4	$0.81 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p, n) \pi^{0, \pm}$

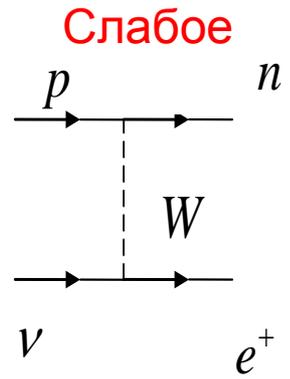
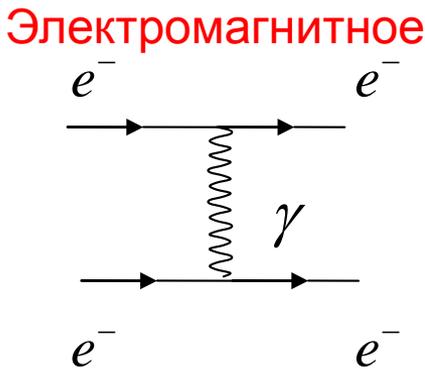
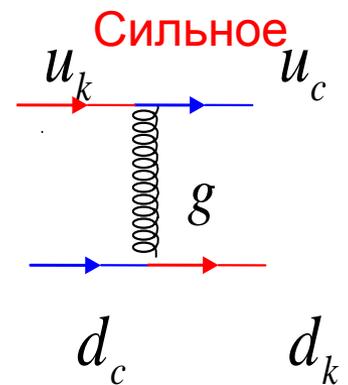
Возбужденное состояния протона. Δ -резонанс

($M = 1232 \text{ МэВ}$)



Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны
Сильное	Все цветные частицы	8 безмассовых глюонов, спин $J = 1$
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Безмассовый фотон, спин $J = 1$
Слабое	Кварки, лептоны, калибровочные бозоны W^{\pm}, Z	Массивные бозоны W^+, W^-, Z , спин $J = 1$, $m_W c^2 \approx 80 \text{ ГэВ}$, $m_Z c^2 \approx 91 \text{ ГэВ}$
Гравитационное	Все частицы	Безмассовый гравитон, спин $J = 2$



Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.