

# Микромир и Вселенная 2019

**Кварки.  
Адроны**

# Фундаментальные частицы Стандартной Модели

$e^-$        $\mu^-$        $\tau^-$

$\nu_e$        $\nu_\mu$        $\nu_\tau$

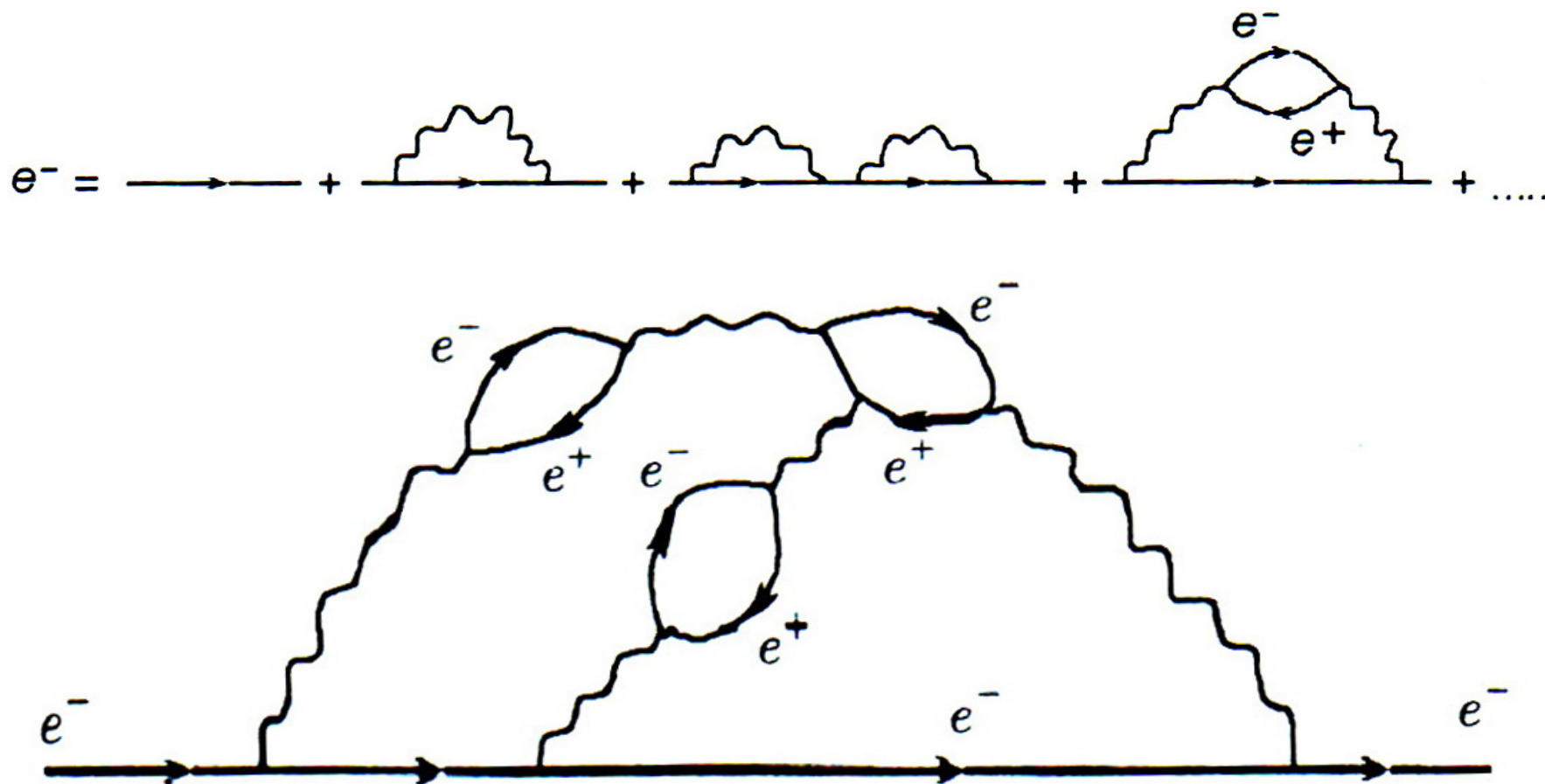
$u$        $c$        $t$

$d$        $s$        $b$

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

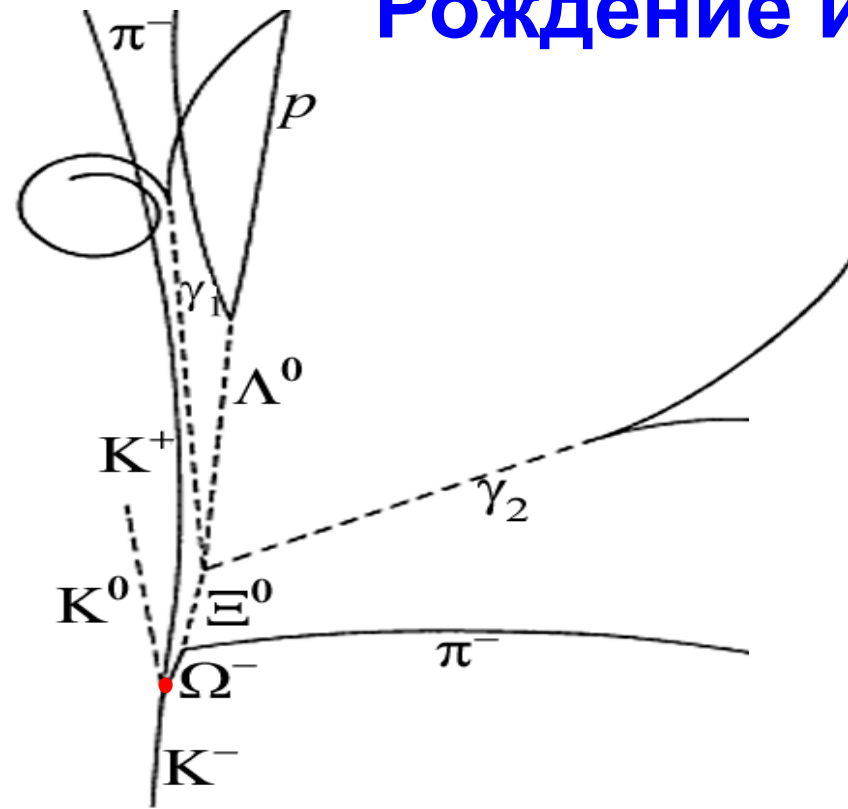
$H$  - бозон Хиггса

# ЭЛЕКТРОН



Диаграмма, описывающая свободный электрон

# Рождение и распад $\Omega^-$ -гиперона



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

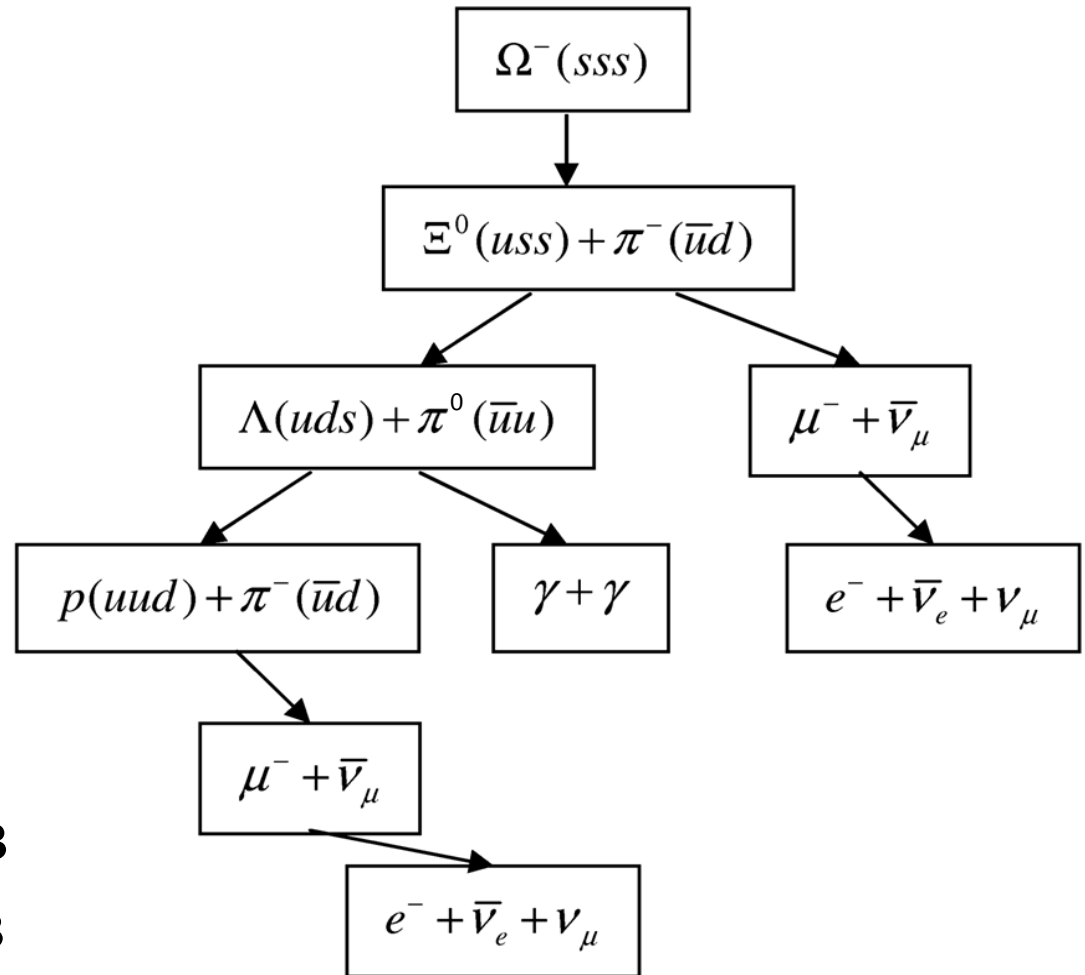
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

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

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



# Адроны — элементарные частицы?

$n$  (939.6  $MэВ$ )

$p$  (938.3  $MэВ$ )

$\Lambda$  (1116  $MэВ$ )

$\Sigma^+$  (1189  $MэВ$ )

$\Sigma^-$  (1197  $MэВ$ )

$\Sigma^0$  (1193  $MэВ$ )

$\Xi^0$  (1315  $MэВ$ )

$\Xi^-$  (1321  $MэВ$ )

$\pi^+$  (139  $MэВ$ )

$\pi^-$  (139  $MэВ$ )

$\pi^0$  (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

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

Кварки должны иметь дробный электрический заряд

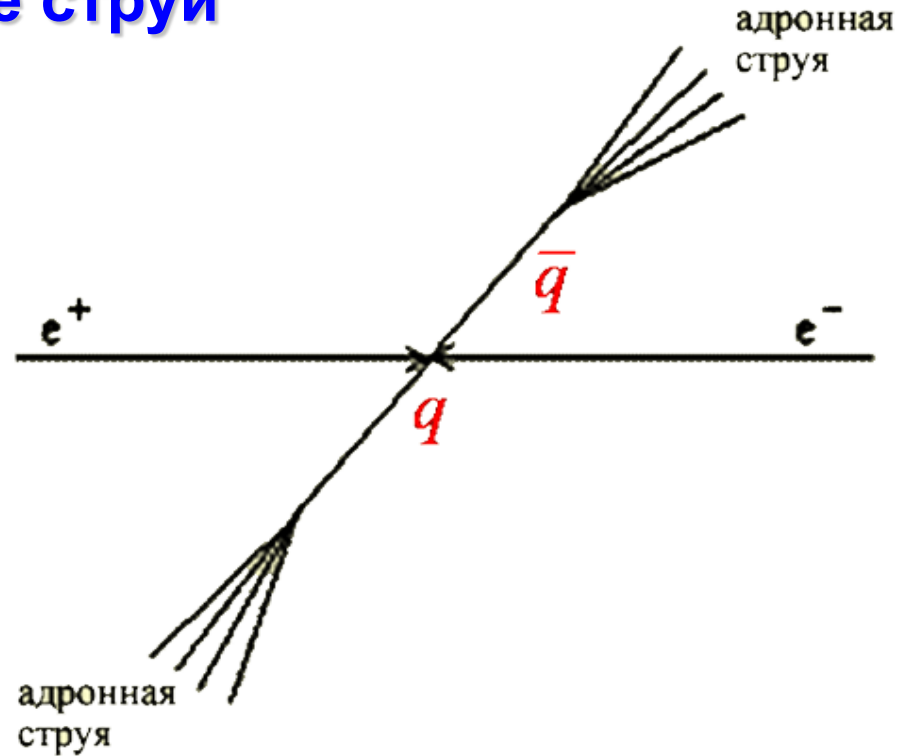
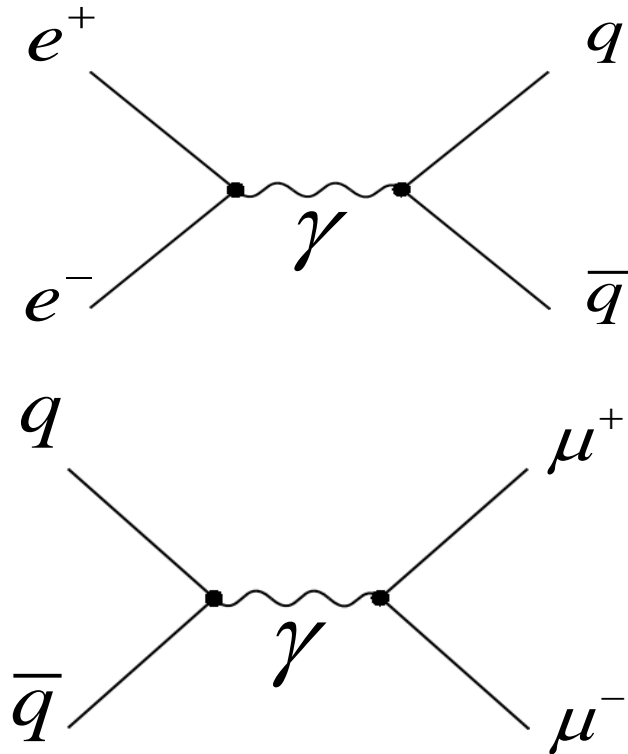
$$\begin{array}{ll} \pi^+ & (u\bar{d}) \\ \pi^- & (\bar{u}d) \end{array} \quad \begin{array}{ll} K^+ & (u\bar{s}) \\ K^- & (\bar{u}s) \end{array}$$

Кварки имеют спин

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



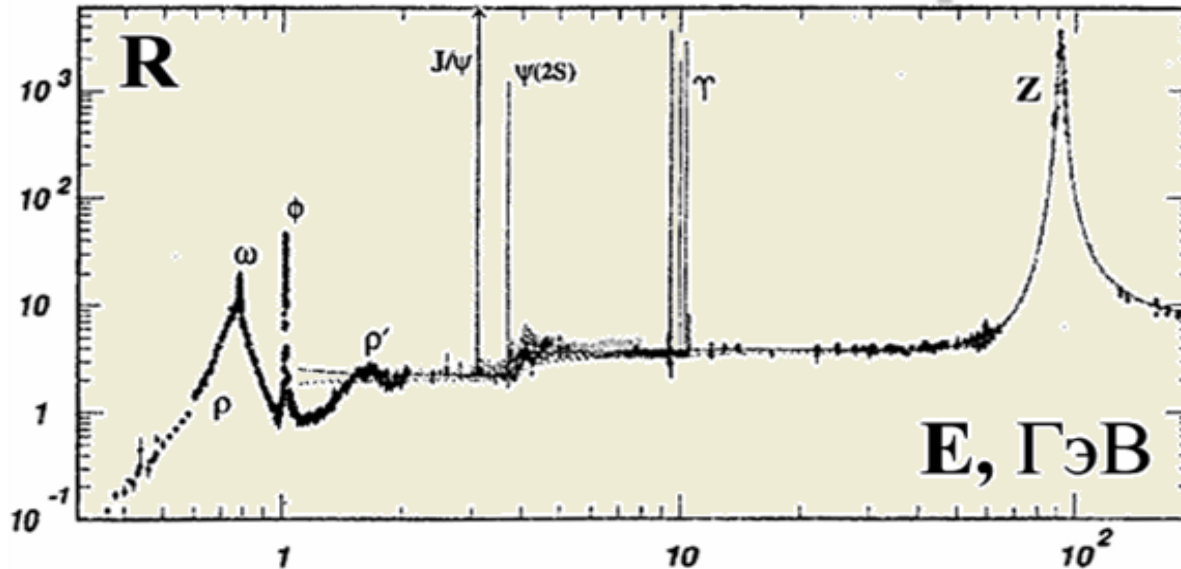
# Как открывают кварки. Адронные струи



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  $\psi$ -частицей.

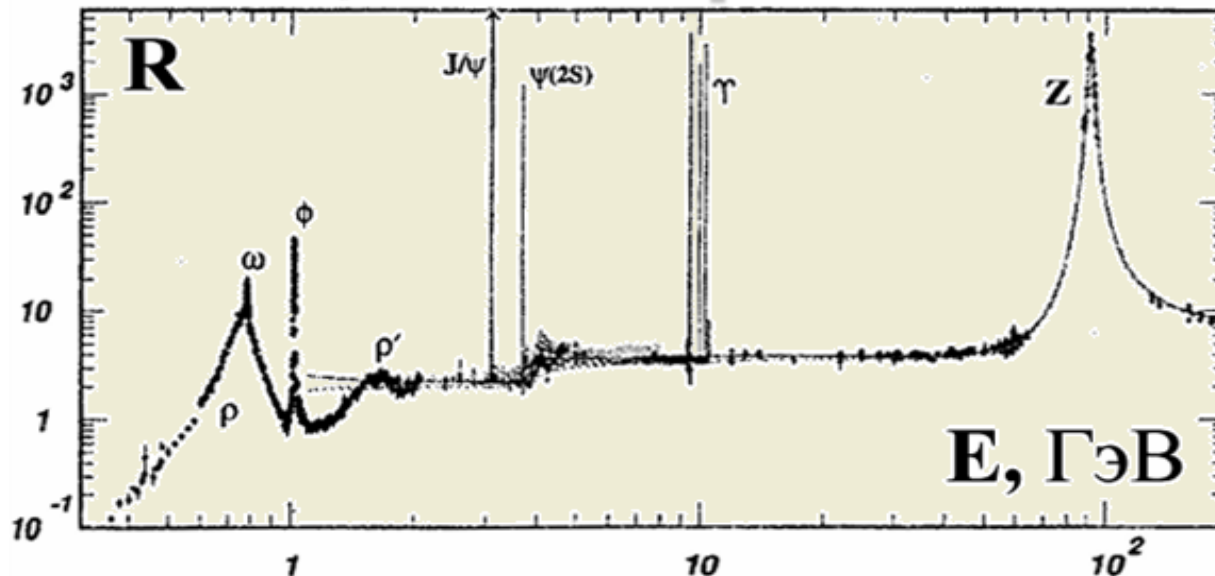
Наиболее интересным свойством новой частицы, окончательно названной **J/ψ-частицей**, является узкая ширина резонанса  $\Gamma = 91$  КэВ.  $E = 3,1$  ГэВ.

**Нобелевская премия по физике**

1976 г. – Б. Рихтер, С. Тинг.

За открытие тяжелой элементарной частицы нового типа

# с-кварк

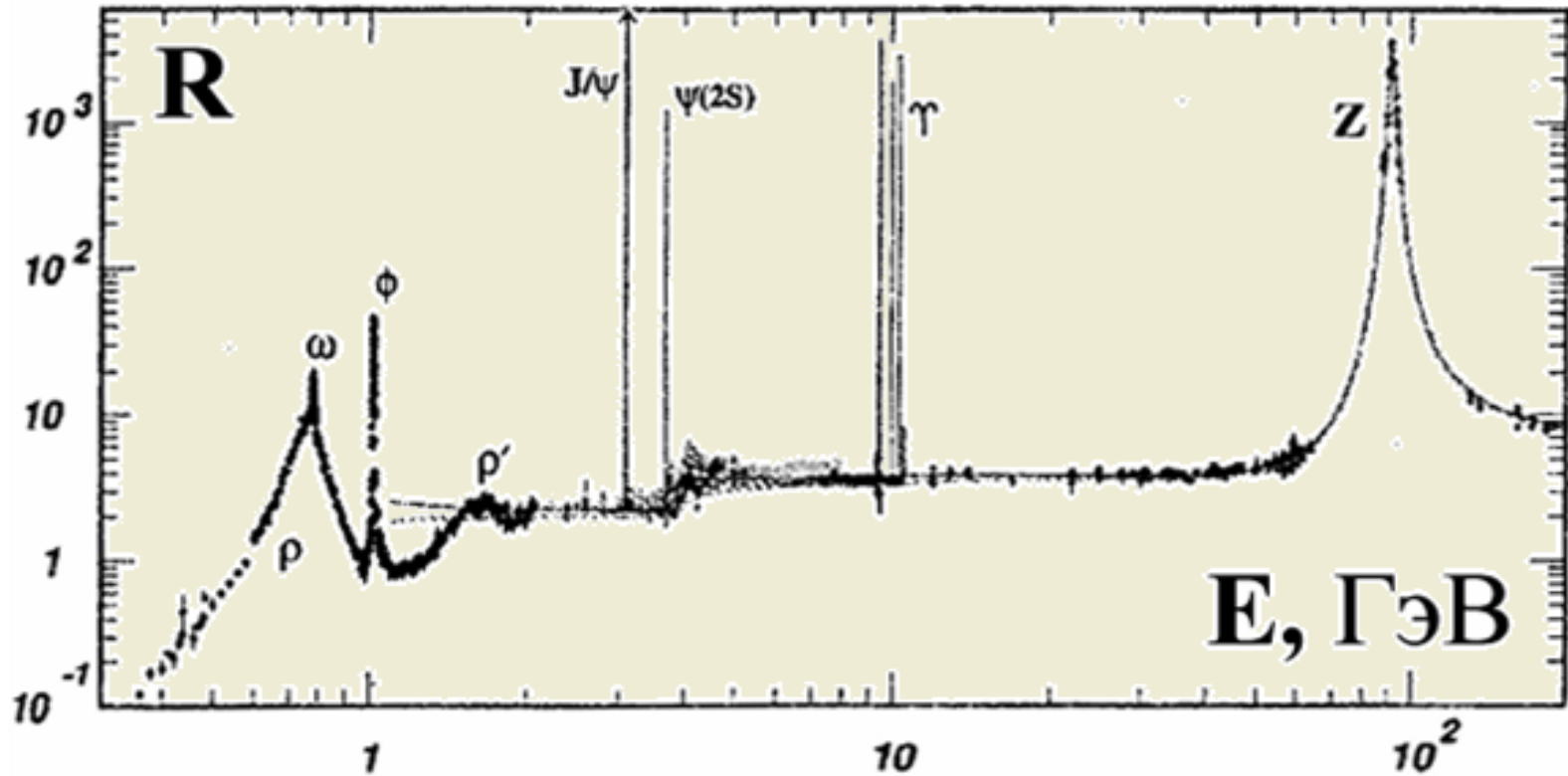


Ширина резонанса характеризует время жизни частицы  $\tau$ :

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

Время жизни  $J/\psi$ -частицы почти в 1000 раз больше, чем у известных частиц такой массы.  $J/\psi$ -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

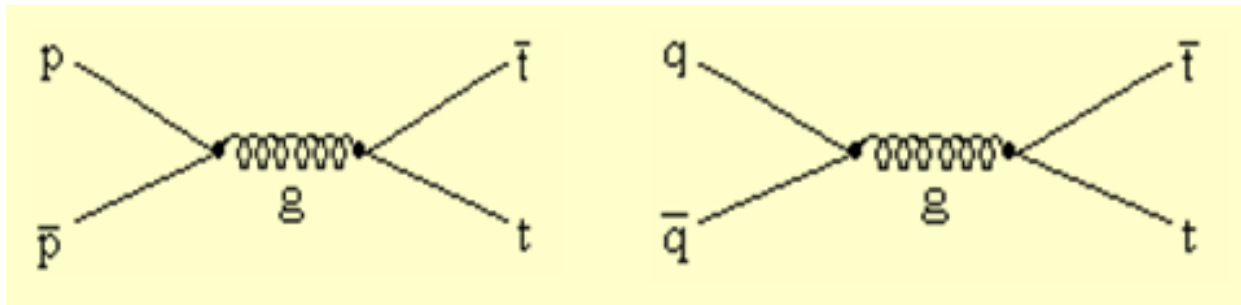


Было открыто несколько мезонов с массами в районе  $10 \text{ ГэВ}/c^2$ . Они получили название ипсилон-мезонов. Так же как и  $J/\psi$ -мезоны они наблюдались в реакции образования мюонных пар в протон-ядерных столкновениях и на электронно-позитронных коллайдерах. Также как  $J/\psi$ -мезоны это были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

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

# Открытие t-кварка

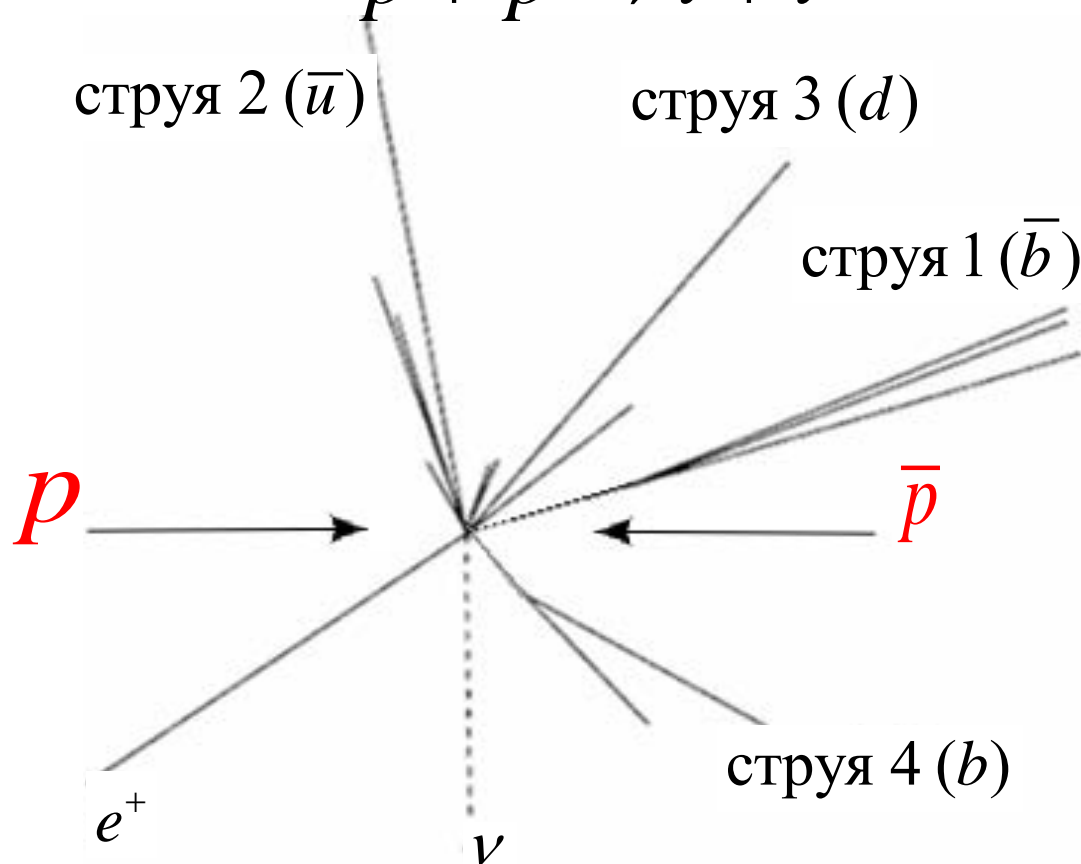
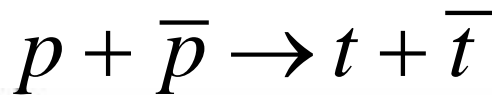
t-кварк был открыт в 1995 г. в столкновении пучков протонов и антипротонов (Теватрон, Фермилаб, США)



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  $\approx 1$  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**

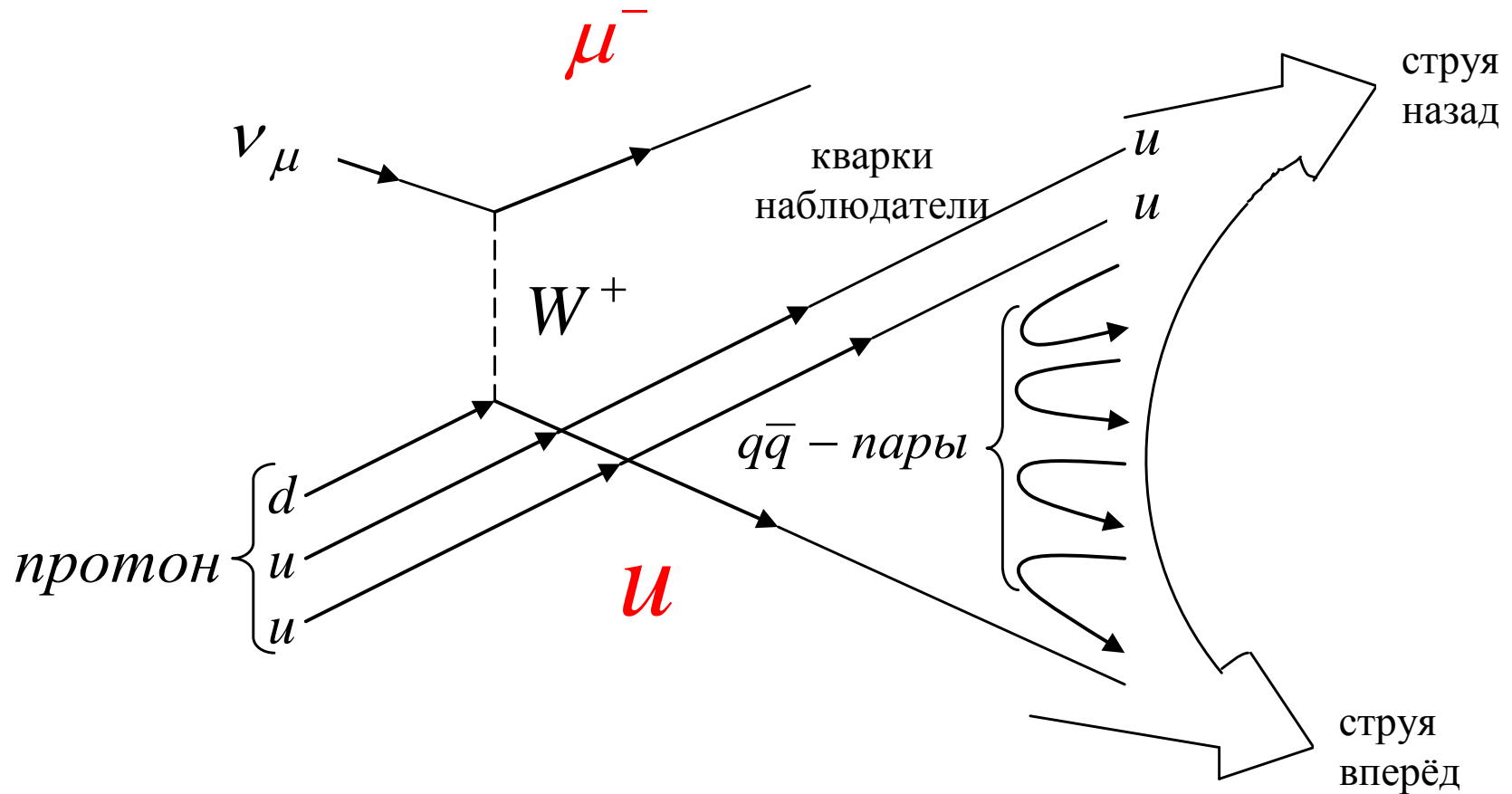
$u, c, t$  кварки имеют электрический заряд  $+2/3$

$d, s, b$  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

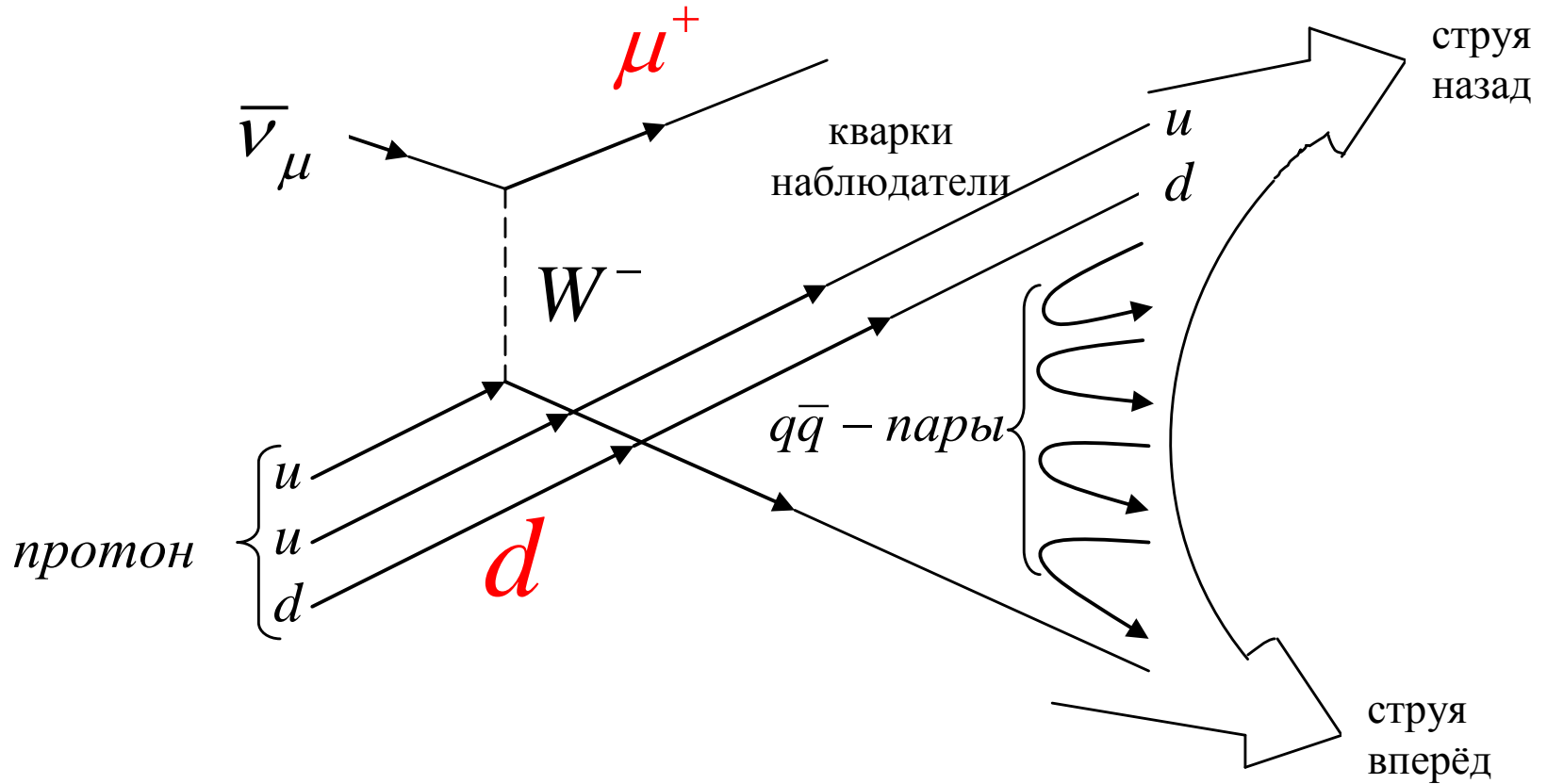


$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{струи адронов}$$

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

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

# 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  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . 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  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^{-}$ ,  $\Omega^{-}$  противоречит принципу Паули.

$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^{-}$ ,  $\Omega^{-}$  состоят из трех тождественных кварков:  $\Delta^{++}$  – (uuu),  $\Delta^{-}$  – (ddd),  $\Omega^{-}$  – (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.

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

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

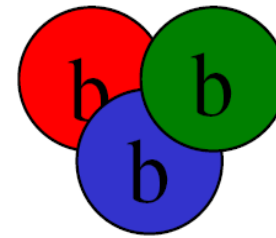
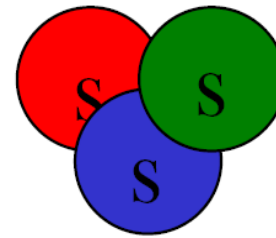
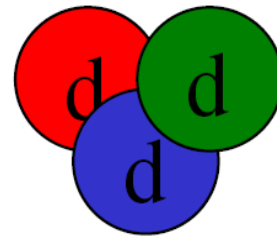
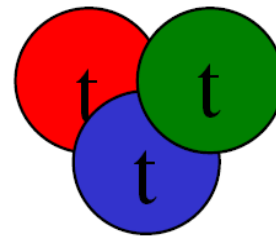
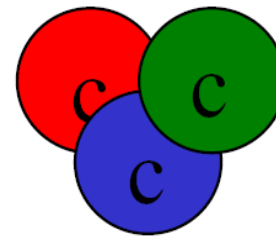
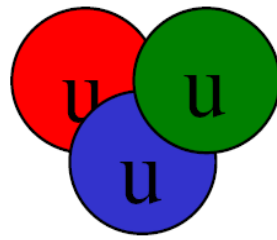
# Цветные кварки

*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

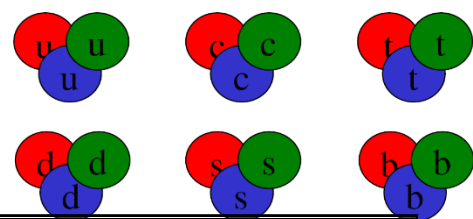


Кварки не существуют в свободном состоянии, а заключены в кварковых системах – адронах. Им нельзя освободиться от взаимодействий с находящимися в том же объеме другими кварками и глюонами.

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

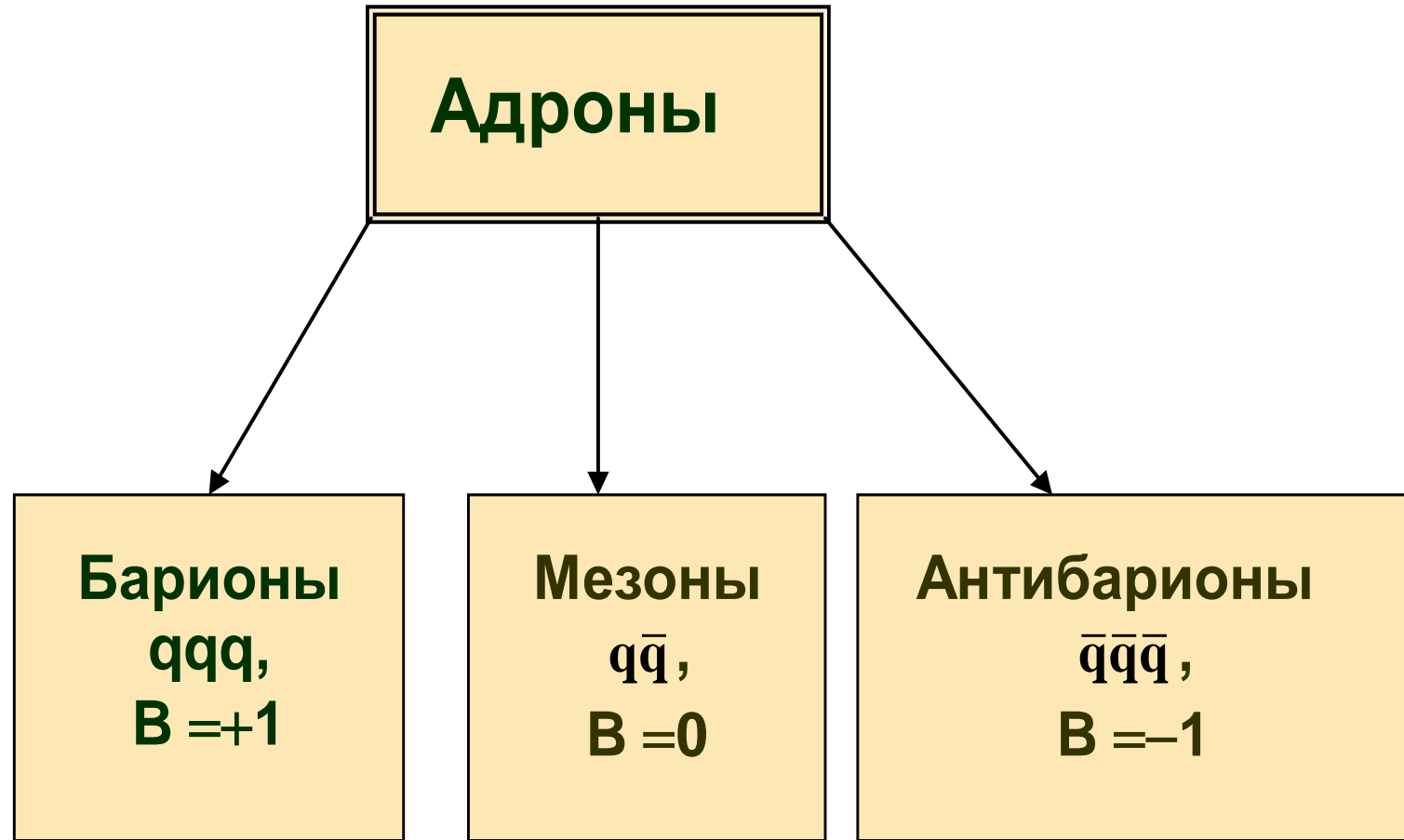
**Токовые кварки** – кварки, не испытывающие взаимодействия.

# 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 <sub>3</sub>	-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 конститутэнтного кварка mc <sup>2</sup> , 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

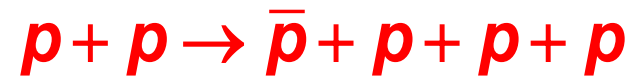
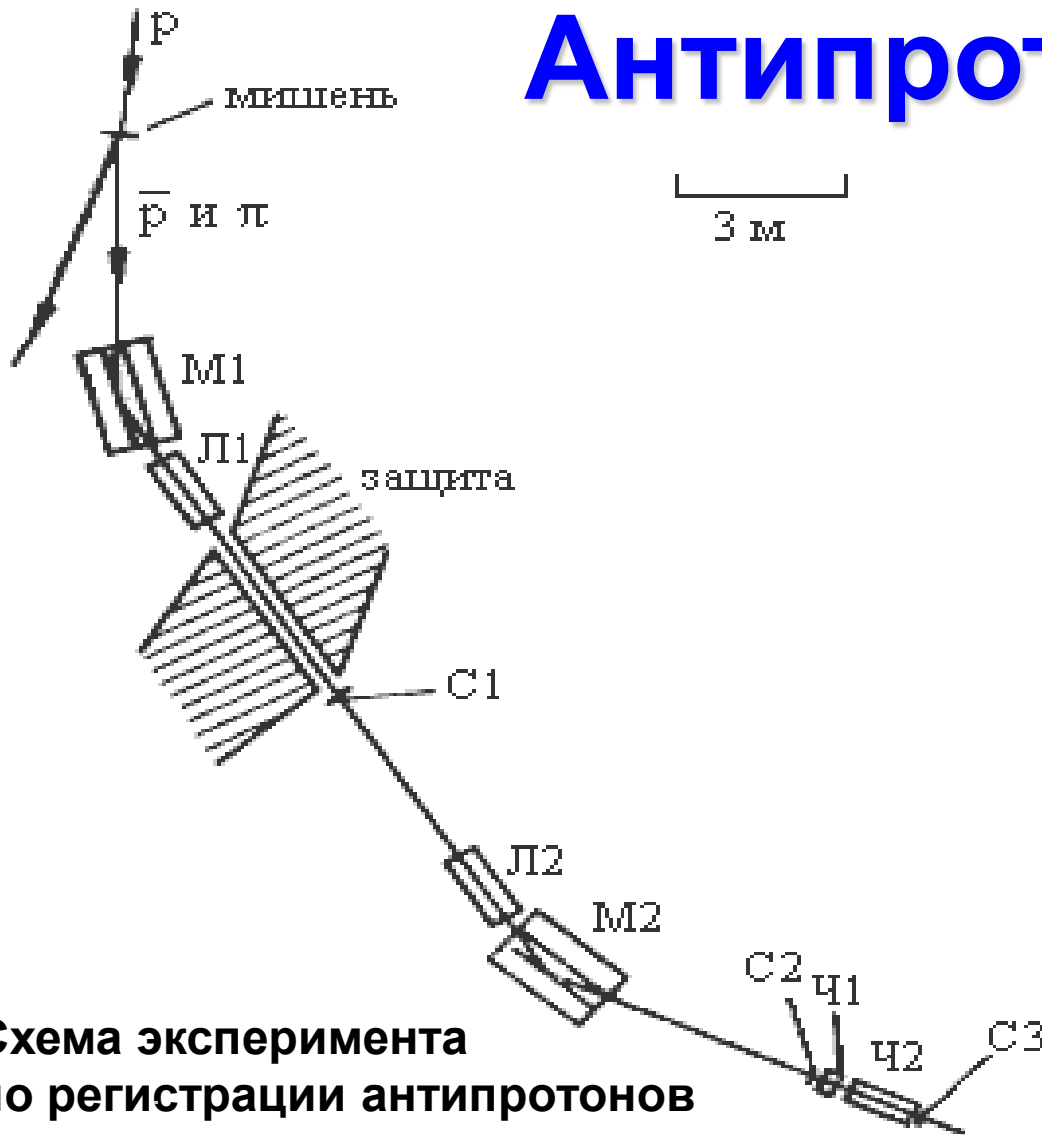


Кварки объединяются в частицы, называемые адронами.

# 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 ( $p, n, \pi, \dots$ ), странные частицы ( $K, \Lambda, \Sigma, \dots$ ), очарованные ( $D, \Lambda_c, \Sigma_c, \dots$ ) и боттом-частицы ( $B, \Lambda_B, \Xi_B$ ).
- $t$ -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

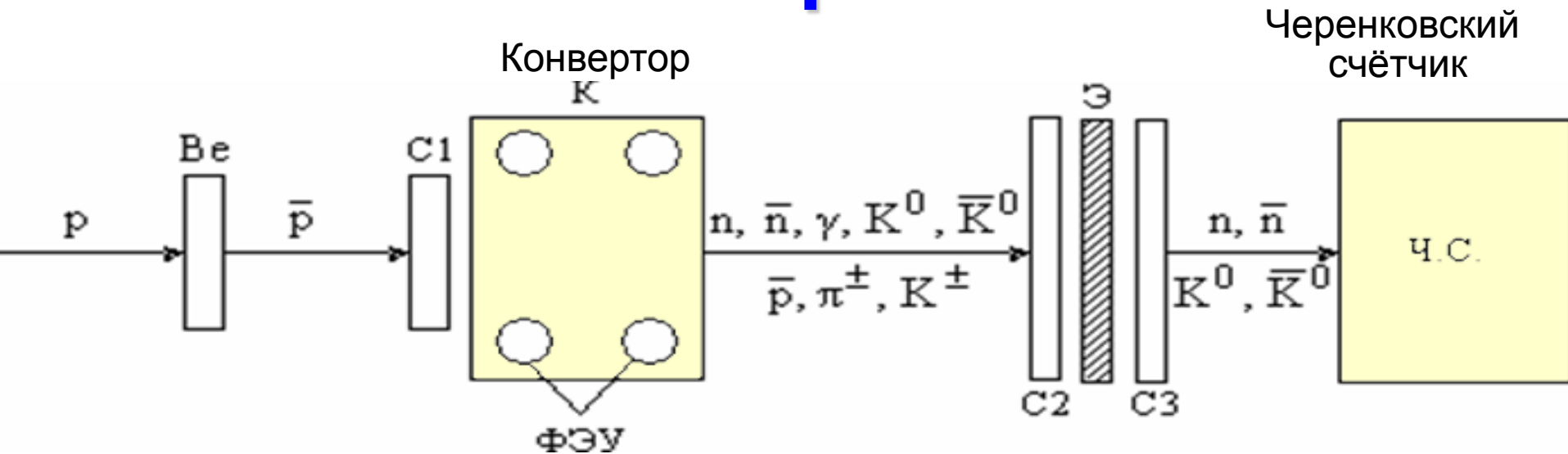


Схема эксперимента по регистрации антинейтронов



В результате  $n - \bar{n}$ -аннигиляции образуются  
сильновзаимодействующие частицы —  $\pi^-$ , 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		$\tau$	
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	$\bar{d}$	$\pi^+$
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	$\pi^-$
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

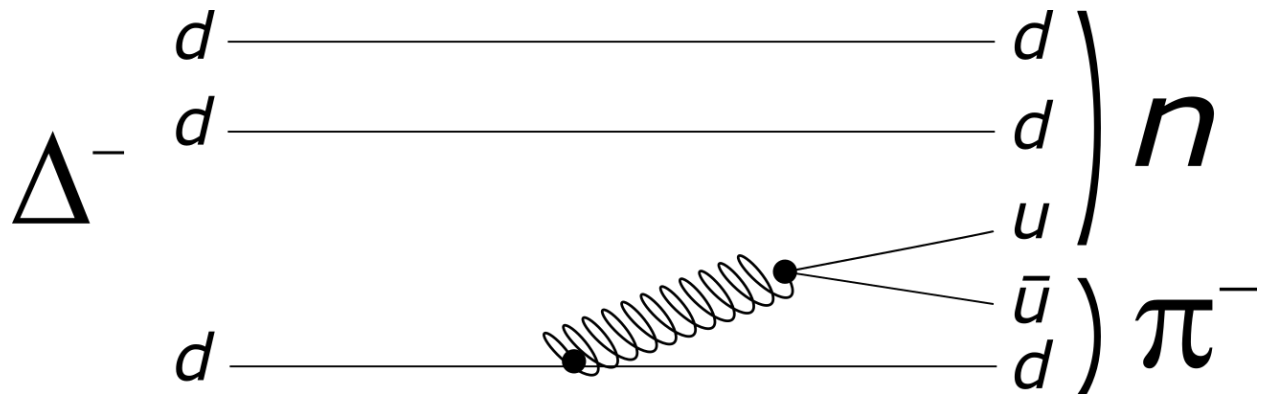
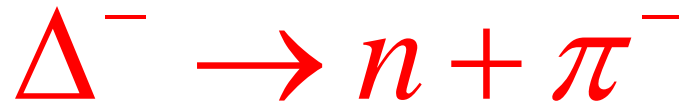
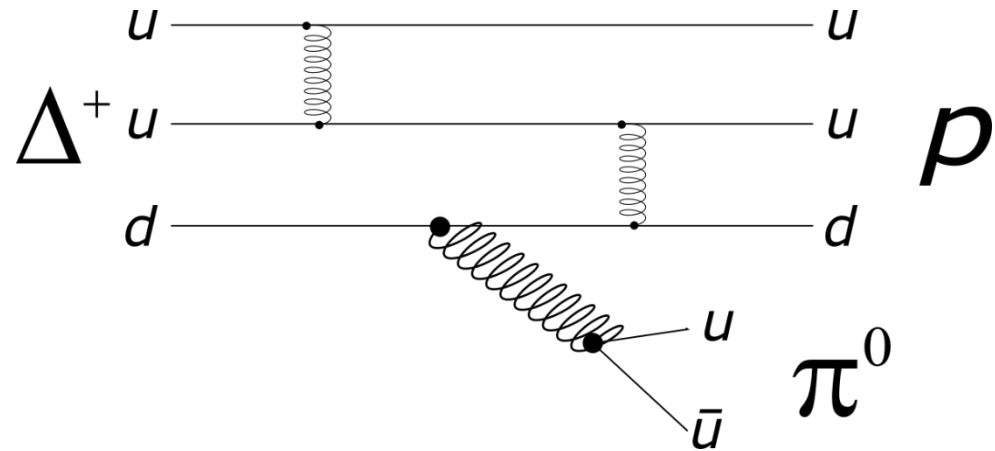
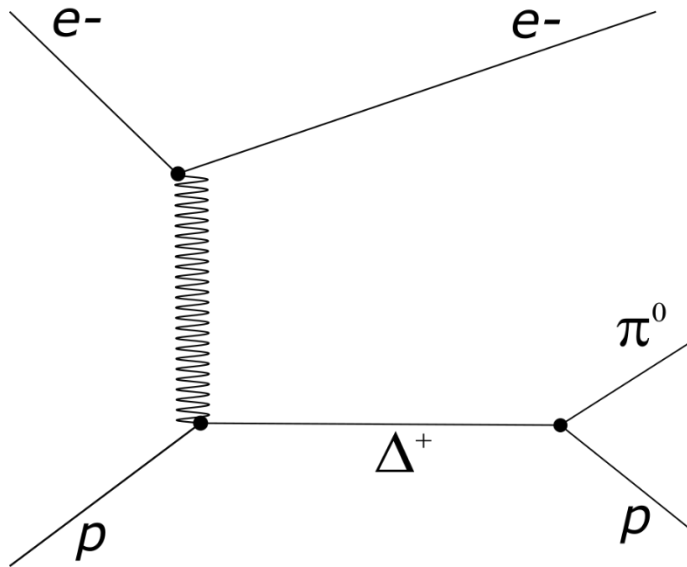
# Кварковая структура барионов

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	$885.7 \pm 0.8$	$1/2^+(1/2)$	$p e^- \nu$
$\Lambda$	uds	1115.683	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p \pi^-, n \pi^0$
$\Sigma^+$	uus	1189.37	$0.802 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p \pi^0, n \pi^+$
$\Sigma^0$	uds	1192.64	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda \gamma$
$\Sigma^-$	dds	1197.45	$1.48 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n \pi^-$
$\Xi^0$	uss	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
$\Xi^-$	dss	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
$\Omega^-$	sss	1672.4	$0.81 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
$\Delta^{++}$ $\Delta^+$ $\Delta^0$ $\Delta^-$	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p, n) \pi^{0, \pm}$

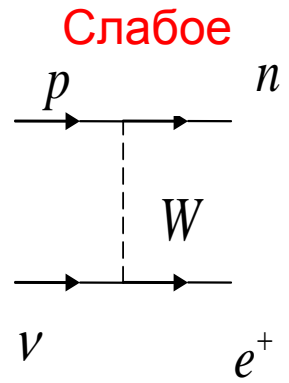
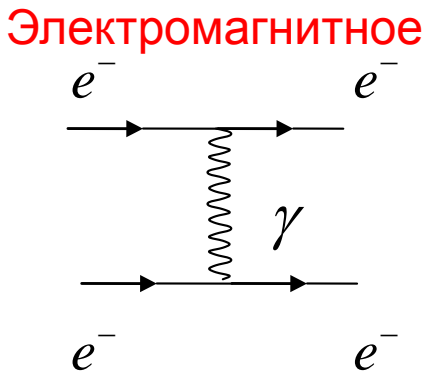
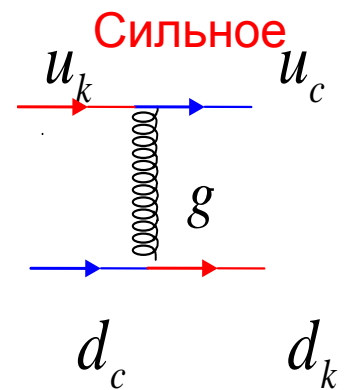
# Возбужденное состояния протона. $\Delta$ -резонанс

( $M = 1232 \text{ МэВ}$ )



# 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.