



Рождение и жизнь атомных ядер

Фундаментальные частицы

Как устроен протон?

Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Фермионы $J = 1/2, 3/2, \dots$		Бозоны $J=0, 1, 2 \dots$	
Барионы	Лептоны	Фотон	Мезоны
Нуклоны p, n	Электрон e^-	γ	Пионы π^-, π^+, π^0
Резонансы Δ, N	Мюон μ^-		Странные K -мезоны
Гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega^-$	Нейтрино ν_e		Нестранные ρ -, ω - мезон
$B = 1$	$L = 1$		$B = 0$

Лептоны

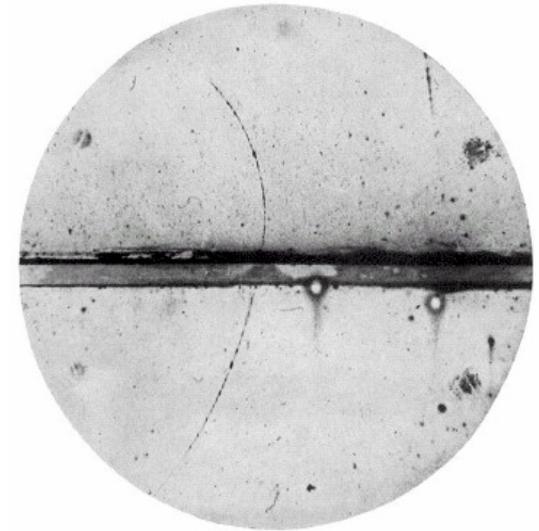
1897 г. Дж. Томсон. Открытие электрона

$$Q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; m_e = 1/2000 M(^1\text{H})$$

1932 г. Андерсон. Открытие позитрона

$$Q_{e^+} = q_e; m_{e^+} = m_e \quad J=1/2$$

Позитрон, зарегистрированный в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.



1937 г. К. Андерсон, С.Неддермейер. Открытие мюона.

$$Q_\mu = q_e; m_\mu = 200 m_e \quad J=1/2$$

$$\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

Лептоны

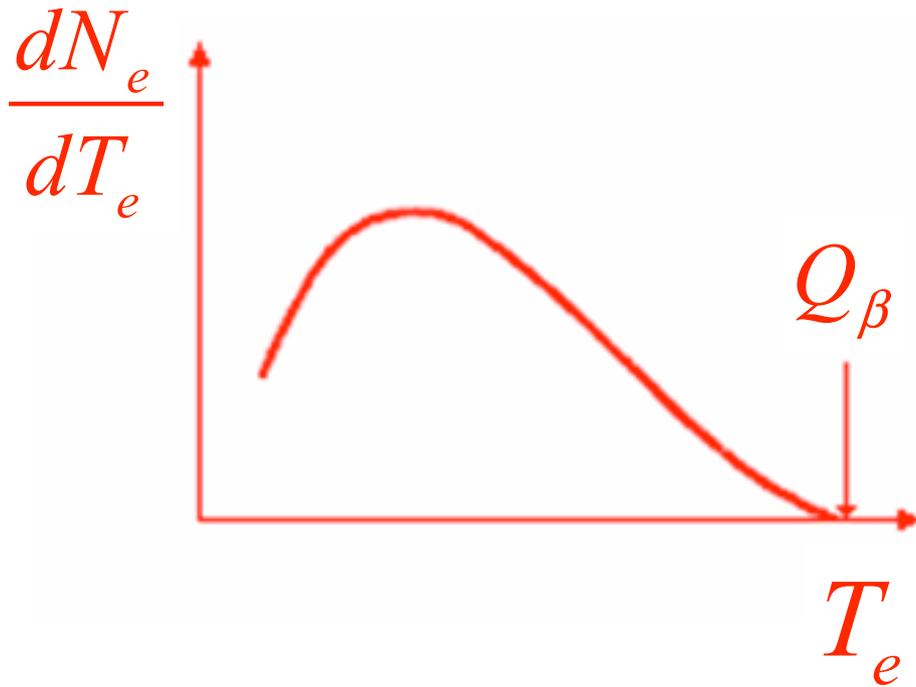
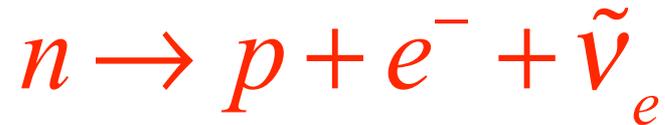
	Масса МэВ/с ²	Электр. заряд, q	Магнитный момент, μ	Лептонное число
e^-	0,511	-1	1.0012	$L_e = +1$
e^+	0,511	+1	1.0012	$L_e = -1$
μ^-	106	-1	1.0012	$L_\mu = +1$
μ^+	106	+1	1.0012	$L_\mu = -1$

Магнетон $\mu = \frac{q\hbar}{2mc}$

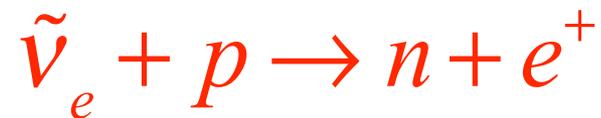
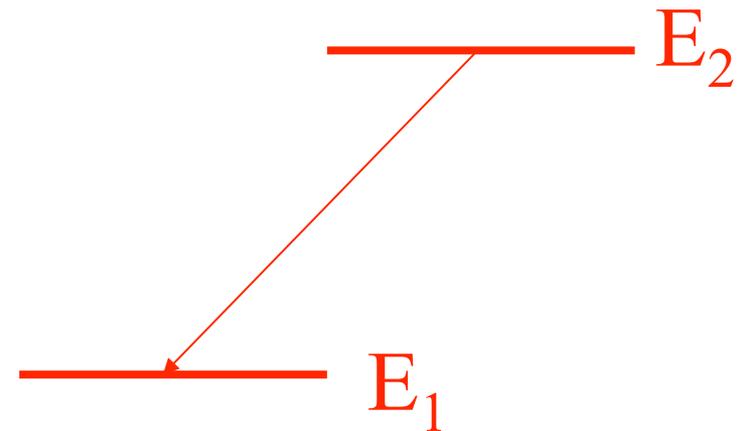


Нейтрино

1931 г. В.Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов β -распада



Алгебра частиц-античастиц

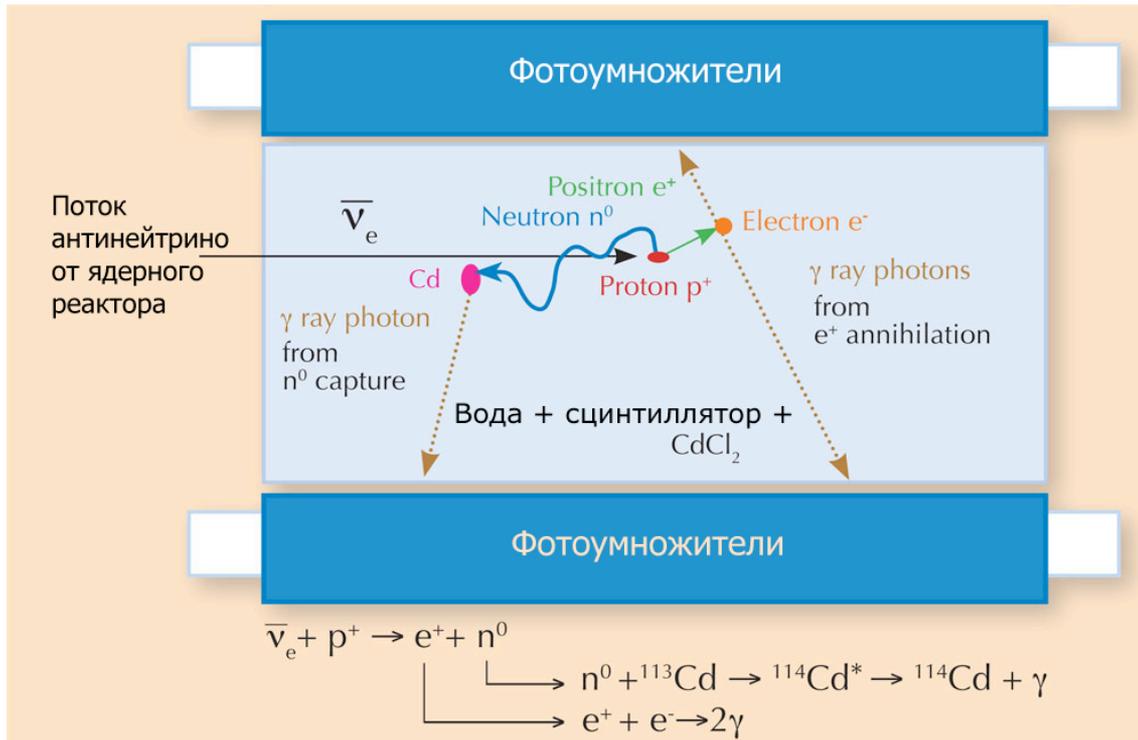


Нейтрино

1956 г. Ф. Райнес, К. Коэн. Регистрация антинейтрино



1995



$$\sigma = 12_{-4}^{+7} \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$$

100 дней измерений
567 событий
(фон 209 событий)

Тождественны ли ν_e и $\tilde{\nu}_e$?

Если ν_e и $\bar{\nu}_e$ являются тождественными частицами, то должна наблюдаться реакция



Это следует из того, что наблюдается реакция



Обе реакции ((*) и (**)) при тождественности ν_e и $\bar{\nu}_e$ должны иметь одинаковые, характерные для нейтрино сечения $\approx 10^{-43} \text{ см}^2$.



Если процесс (*) возможен, то под действием потока антинейтрино от реактора один из нейтронов, входящих в состав ядра ${}^{37}\text{Cl}$, должен превращаться в протон, что приводит к образованию радиоактивного изотопа ${}^{37}\text{Ar}$ с периодом полураспада 35.04 суток. Регистрируя радиоактивность изотопа ${}^{37}\text{Ar}$, можно судить о возможности протекания реакции (*).

Образование изотопа ${}^{37}\text{Ar}$ не было обнаружено.

$\sigma < 2 \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$. $M(\text{детектор}) = 4000 \text{ литров}$

Нейтрино

1962 г. Л. Ледерман, М. Шварц, Дж. Стейнбергер.
Открытие мюонного нейтрино



1988

- Идентификация двух типов нейтрино

- Распад пионов:

Эксперимент: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$

Образуются мюоны ?

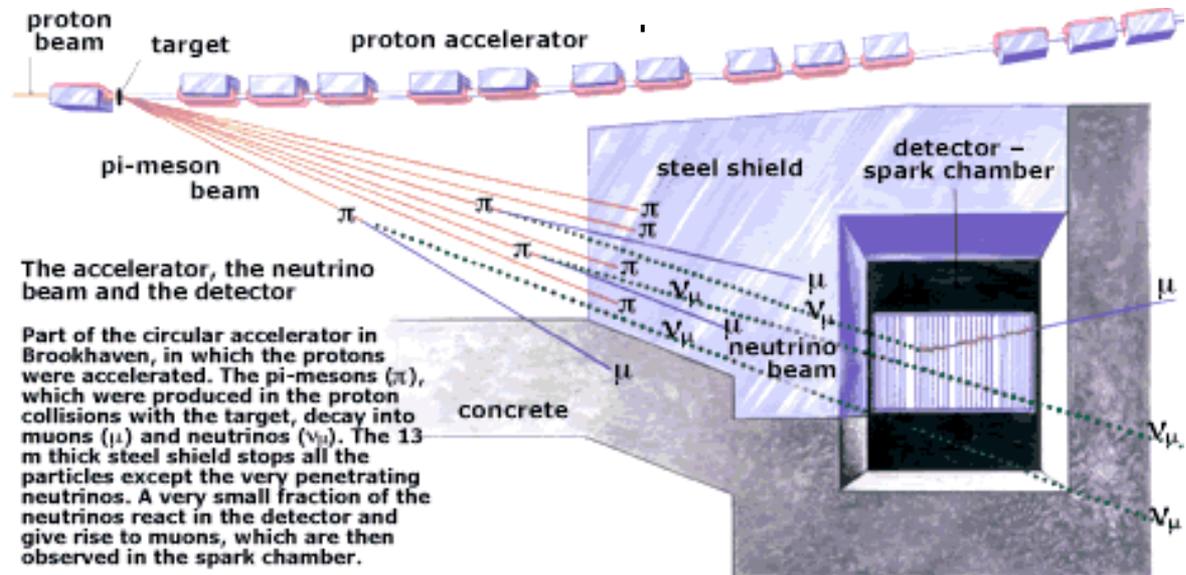
Или электроны?

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

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

Были зарегистрированы только мюоны, следовательно

$$\nu_e \neq \nu_\mu$$



Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

Лептоны

	Масса МэВ/с ²	Электрический заряд, q	Лептонное число
ν_e	$< 10^{-5}$	0	$L_e = +1$
e^-	0,511	-1	$L_e = +1$
$\bar{\nu}_e$	$< 10^{-5}$	0	$L_e = -1$
e^+	0,511	+1	$L_e = -1$
ν_μ	$< 0,2$	0	$L_\mu = +1$
μ^-	106	-1	$L_\mu = +1$
$\bar{\nu}_\mu$	$< 0,2$	0	$L_\mu = -1$
μ^+	106	+1	$L_\mu = -1$

Лептонные числа

Каждому поколению лептонов следует приписать свой лептонный заряд, соответственно L_e , L_μ . Этот заряд, как и обычный электрический заряд, является **сохраняющимся** и **аддитивным**, т. е. заряд системы лептонов равняется сумме лептонных зарядов отдельных лептонов и должен быть одинаковым до и после завершения любого процесса.

Закон сохранения L_e , L_μ

В процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, каждое лептонное число L_e , L_μ сохраняется порознь.

Лептонные числа

Во всех процессах происходящих в замкнутой системе лептонные числа L_e , L_μ , L_τ сохраняются порознь. Поэтому

наблюдаются процессы

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$

не наблюдаются процессы

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$$

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + \gamma) / w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-11},$$

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + e^- + e^+ \gamma) / w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-12}$$

Как устроен Мир

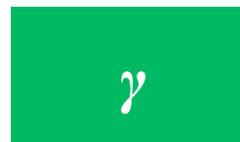
ФЕРМИОНЫ Лептоны

ν_e	ν_μ
e	μ

I

II

БОЗОНЫ



Электромагнитное

Слабое

АДРОНЫ

БАРИОНЫ

МЕЗОНЫ

нуклоны	p, n	пионы	π^+, π^0, π^-
резонансы	$\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$ и тд	каоны	K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0 и тд
гипероны	$\Lambda, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Omega^-$ и тд	«векторные»	$\rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega$ и тд

Магнитный момент

В теории Дирака магнитный момент точечной частицы:

$$\mu = (e\hbar/mc)\mathbf{S} = 1\mu,$$

$\mu_B = e\hbar/m_e c$ --- магнетон Бора

$\mu_N = e\hbar/m_p c$ --- ядерный магнетон

Электрон:

$$\mu_e = 1,00115965218076 \pm 0.0000000000000027 \mu_B$$

Мюон:

$$\mu_\mu = 1,0011659209 \pm 0.000000000006 \mu_B$$

Протон:

$$\mu_p = 2,792847356 \pm 0.0000000023 \mu_N$$

Нейтрон:

$$\mu_n = -1,9130427 \pm 0.00000005 \mu_N$$

Формфакторы нуклонов

Формула Розенблюта для рассеяния электронов

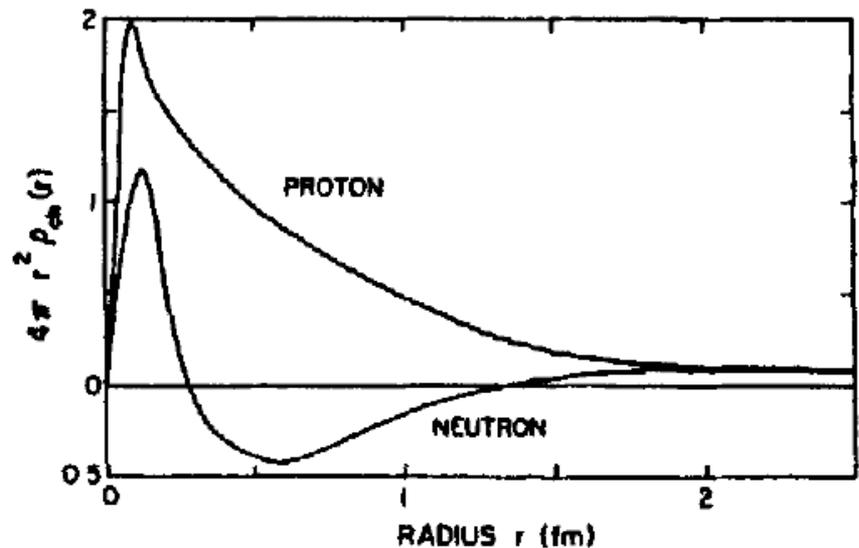
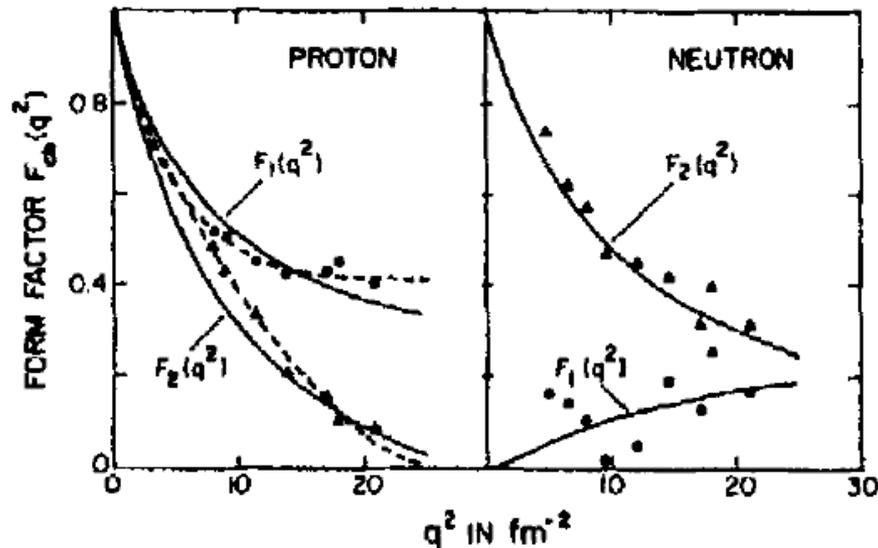
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{lab.}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{point}} \left\{ \frac{G_E^2(q^2) + \zeta G_M^2(q^2)}{1 + \zeta} + 2\zeta G_M^2(q^2) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right\} \quad \zeta = \left(\frac{\hbar q}{2Mc}\right)^2$$

$$G_E(0) = \begin{cases} 1 & \text{for a proton} \\ 0 & \text{for a neutron} \end{cases}$$

$$G_M(0) = \begin{cases} \mu_p & \text{for a proton} \\ \mu_n & \text{for a neutron,} \end{cases}$$

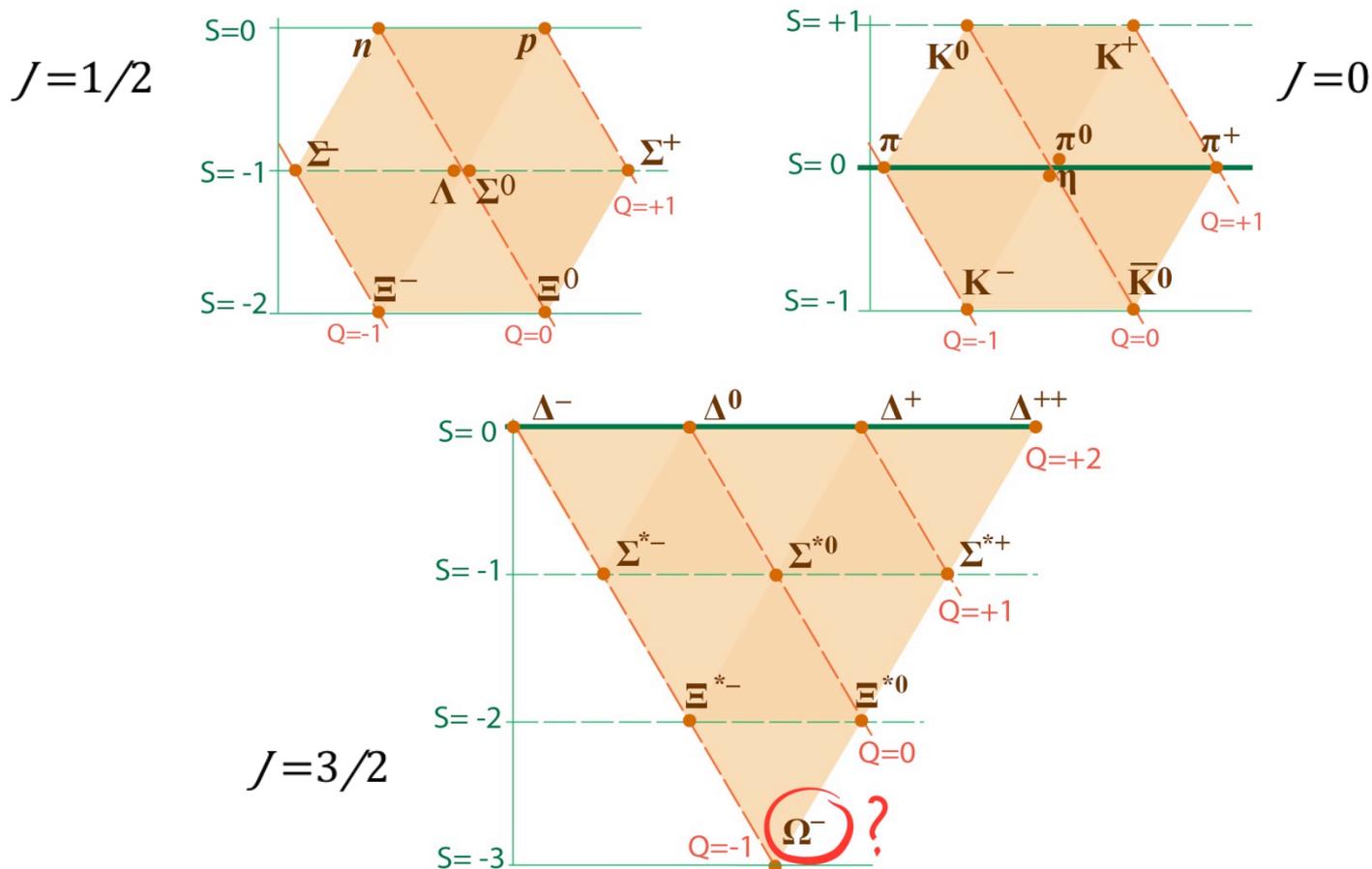
$$G_E(q^2) = F_1(q^2) - \zeta F_2(q^2)$$

$$G_M(q^2) = F_1(q^2) + F_2(q^2)$$



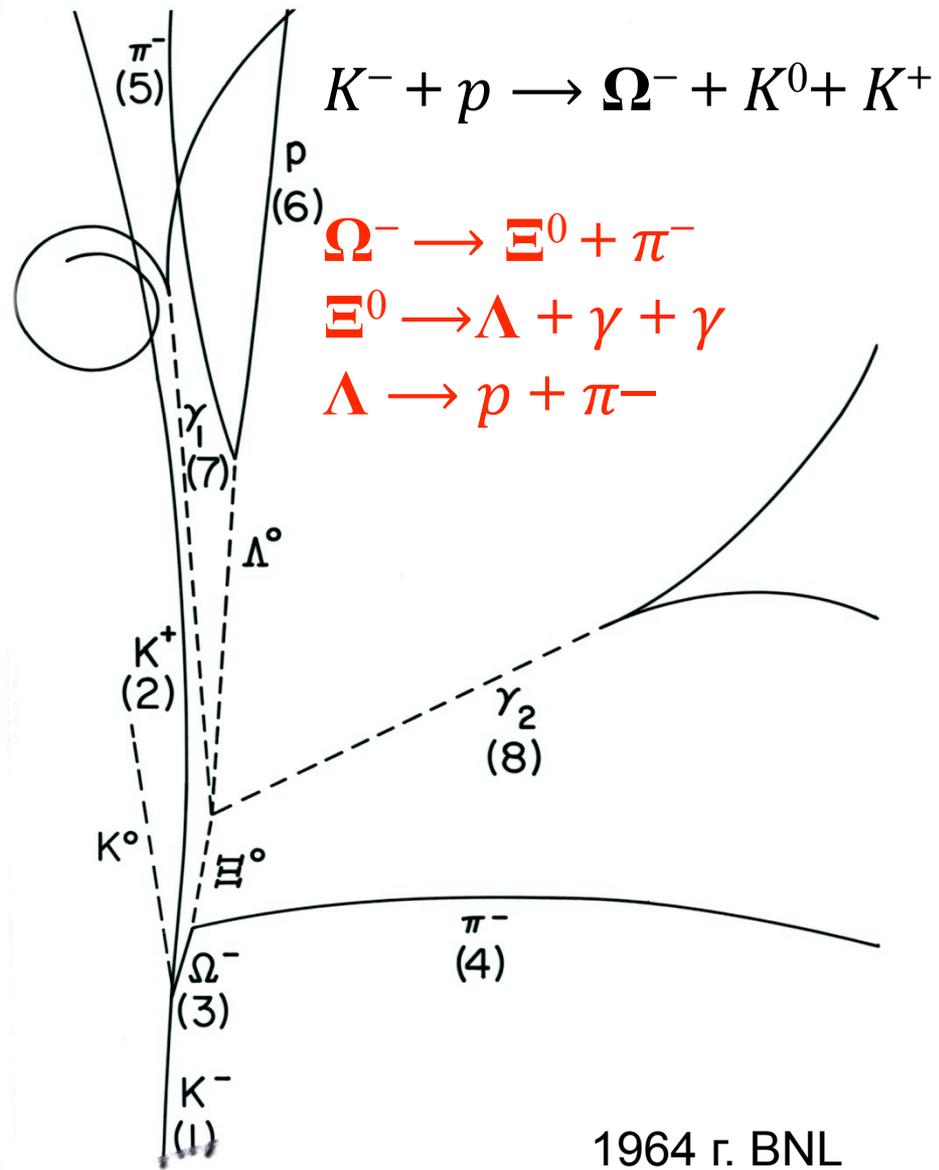
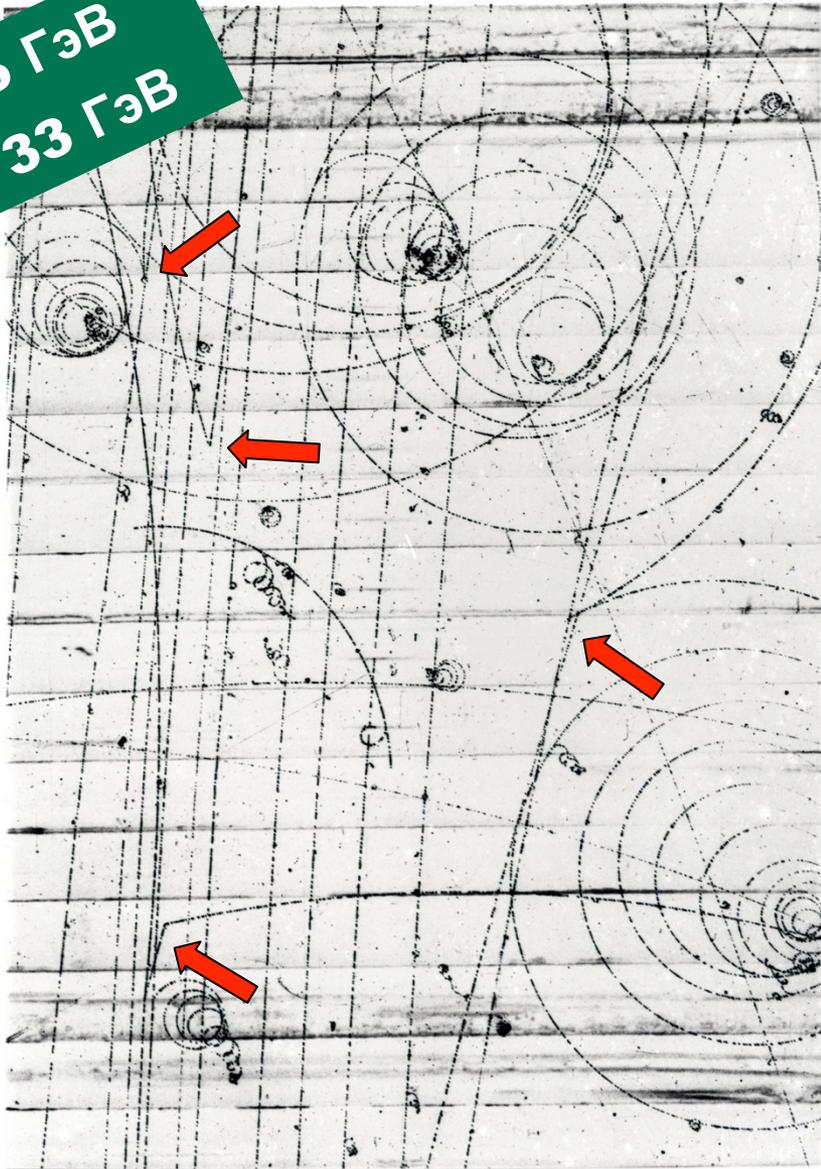
Кварковая модель

1961 г. М. Гелл-Манн, Восьмеричный путь



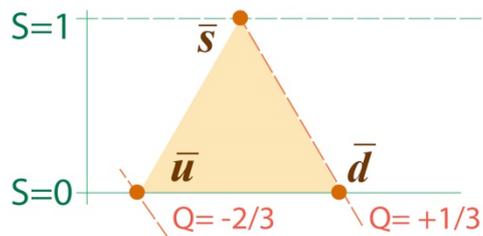
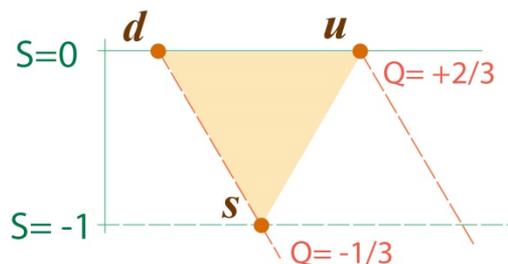
1964 г. Открытие Ω^- гиперона. BNL (Брукхевен), США

К 5 ГэВ
р 33 ГэВ



Кварковая модель

1964 г. М. Гелл-Манн, Дж. Цвейг. Модель кварков



$$J=1/2$$

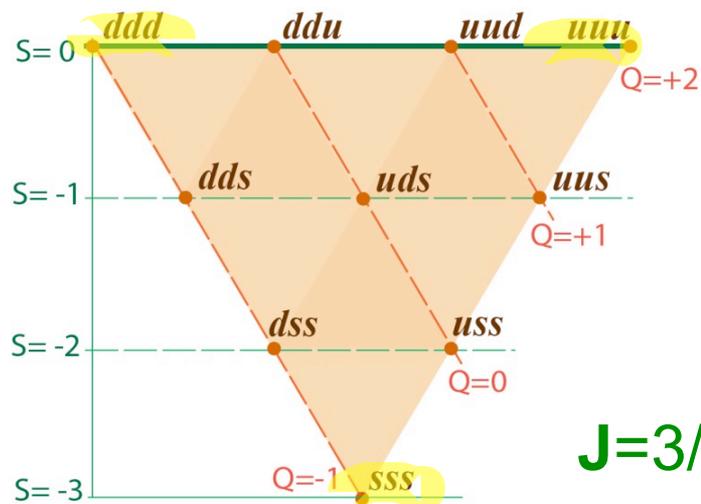
$$B(q)=1/3$$

$$B(\bar{q})=-1/3$$

Протон $p = uud$

Нейтрон $n = ddu$

Частицы	B	Состав
Барионы	1	qqq
Антибарионы	-1	$\bar{q}\bar{q}\bar{q}$
Мезоны	0	$\bar{q}q$



$$J=3/2^+$$



Нобелевская премия по физике

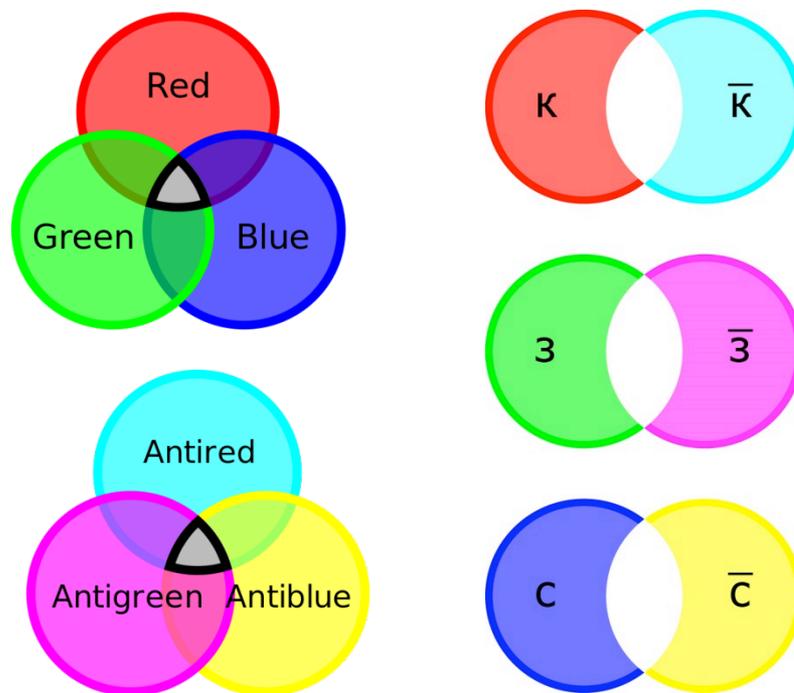
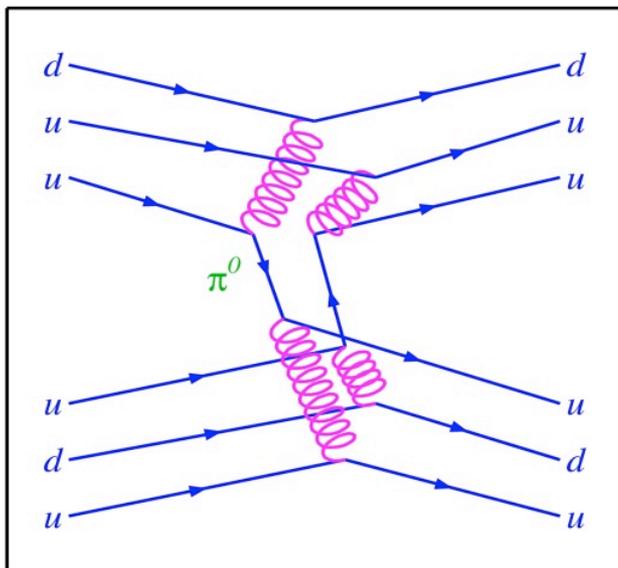
1969 г. – М. Гелл-Манн За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий

Кварковая модель

1965 г. Н.Н. Боголюбов, Б.М. Струминский, А.Н. Тавхелидзе
Квантовое число - цвет

$$J=3/2$$

Yukawa Particle Exchange



Квантовая хромодинамика (КХД) –
теория сильного взаимодействия

Кварковая модель

Спин кварков

Кварки являются фермионами

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

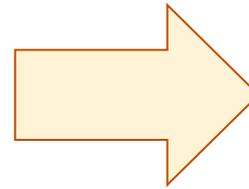
Заряд кварков

Протон $p = uud$

$$Q(p) = +1$$

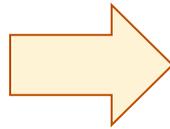
Нейтрон $n = ddu$

$$Q(n) = 0$$



$$2Q(u) + Q(d) = 1$$

$$Q(u) + 2Q(d) = 0$$

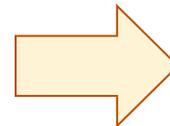


$$Q(u) = +2/3$$
$$Q(d) = -1/3$$

$$Q(\bar{u}) = -2/3$$
$$Q(\bar{d}) = +1/3$$

Λ -гиперон $\Lambda = uds$

$$Q(\Lambda) = 0$$



$$Q(s) = -1/3$$

$$Q(\bar{s}) = +1/3$$

Ноябрьская революция

1974 г. Открытие четвертого кварка.

SLAC (Стэнфорд) и BNL (Брукхевен), США

Тинг (AGS, BNL):

р 28 ГэВ

$$p + p \rightarrow V_0 + X, X... anything$$

Рихтер (SPEAR, SLAC):

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrons)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

e^+e^- 2x3 ГэВ

$$J/\psi = c\bar{c}$$

$$M(J/\psi) = 3096,9 \text{ МэВ}$$

$$J^P = 1^-$$

$$\tau = 7,2 \cdot 10^{-21} \text{ сек}$$

Шарм С=1

Нобелевская премия по физике

1976 г. – Б. Рихтер, С. Тинг, За основополагающий вклад в открытие тяжелой элементарной частицы нового типа J/ψ

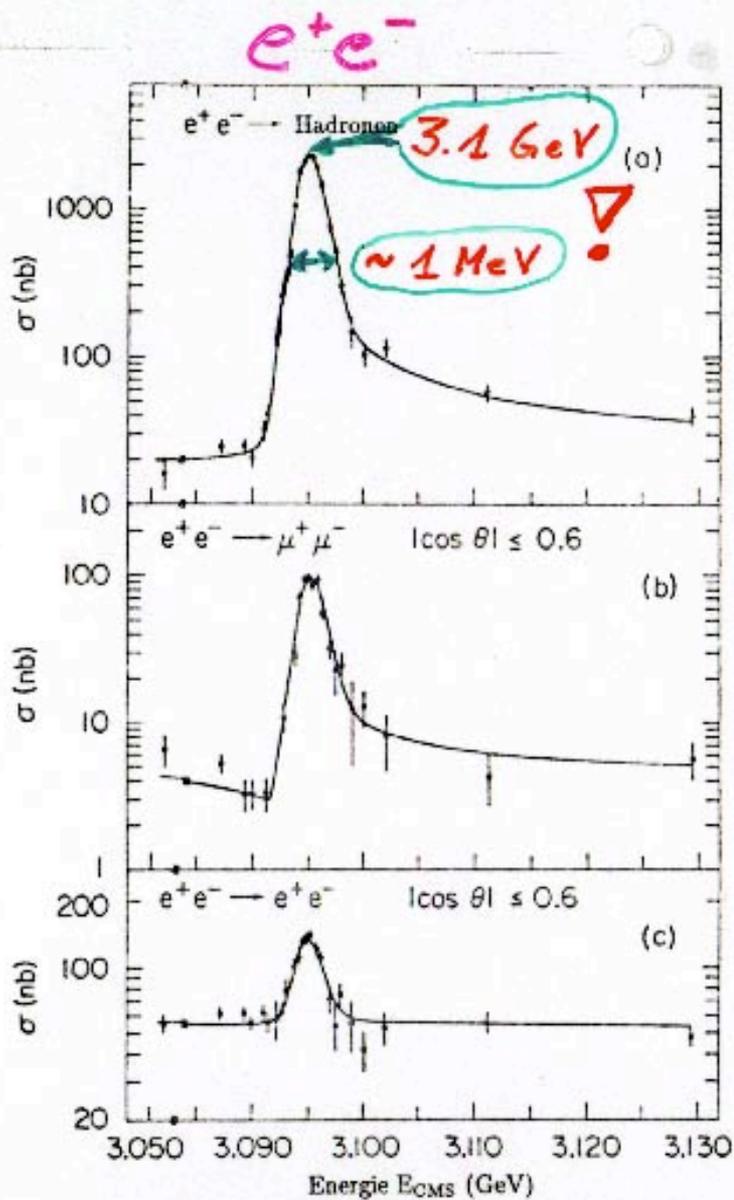


Abbildung 5.9 Ergebnisse der Messungen von Augustin et al. (1974), die die J/ψ -Resonanz bei einer Masse von 3.1 GeV zeigen. Die Resonanz wurde in e^+e^- -Kollisionen am Speicherring SPEAR des SLAC erzeugt.

J/ψ -MESON ($c\bar{c}$)

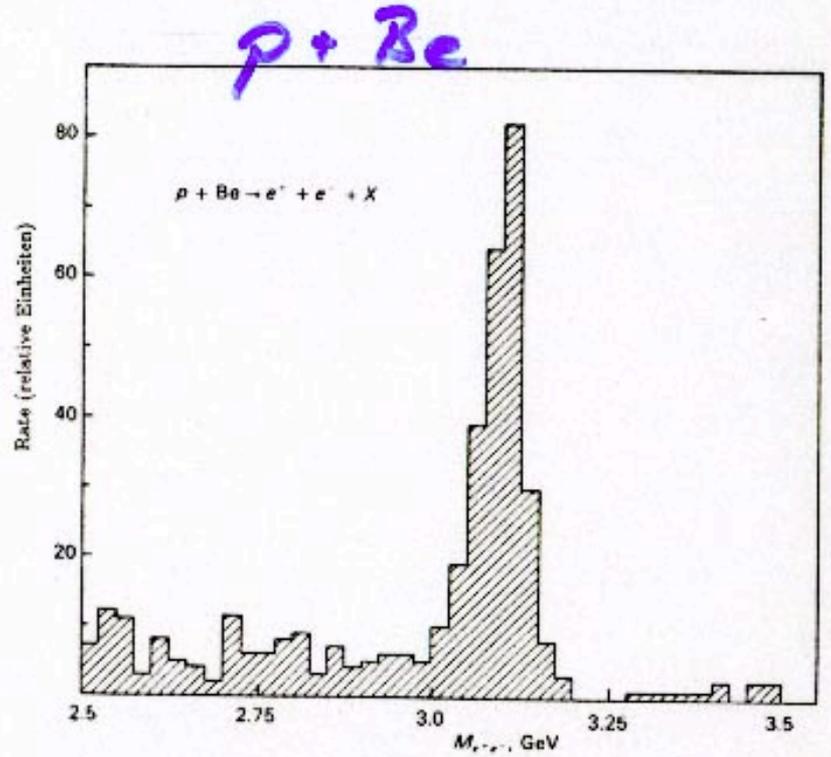


Abbildung 5.10 Die Ergebnisse von Aubert et al. (1974) zeigen die schmale J/ψ -Resonanz in der Verteilung der invarianten Masse des e^+e^- -Paares, das in inklusiven Reaktionen von Protonen an einem Berylliumtarget erzeugt wurde. Dies Experiment wurde am 28 GeV-AGS des Brookhaven National Laboratorys ausgeführt.

$M = 3097 \text{ MeV}$
 $L = 0, S = 1, P = -1$

АДРОНЫ

сильновзаимодействующие частицы

БАРИОНЫ

$$B = 1$$

qqq

МЕЗОНЫ

$$B = 0$$

$q\bar{q}$

АНТИБАРИОНЫ

$$B = -1$$

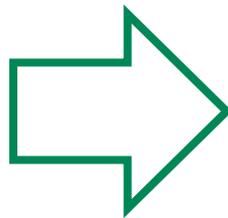
$\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

$$B = B(1)+B(2)+B(3) = 1$$

$$Q = Q(1)+Q(2)+Q(3)$$

$$I_3 = I_3(1)+I_3(2)+I_3(3)$$

$$S = S(1)+S(2)+S(3)$$



Нейтрон $n = ddu$

$$Q = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$$

$$I_3 = -1/2 - 1/2 + 1/2 = -1/2$$

$$S = 0 + 0 + 0 = 0$$

Барионное число B

$$p \not\rightarrow e^+ + \gamma$$

Закон сохранения числа барионов:

Во всех процессах, происходящих в природе, разность числа барионов и антибарионов **сохраняется**

Примеры

$$p + p \rightarrow p + p + p + p$$

$B: +1 + 1 = +1 + 1 + 1 + 1$

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

$B: +1 = +1 + 0$

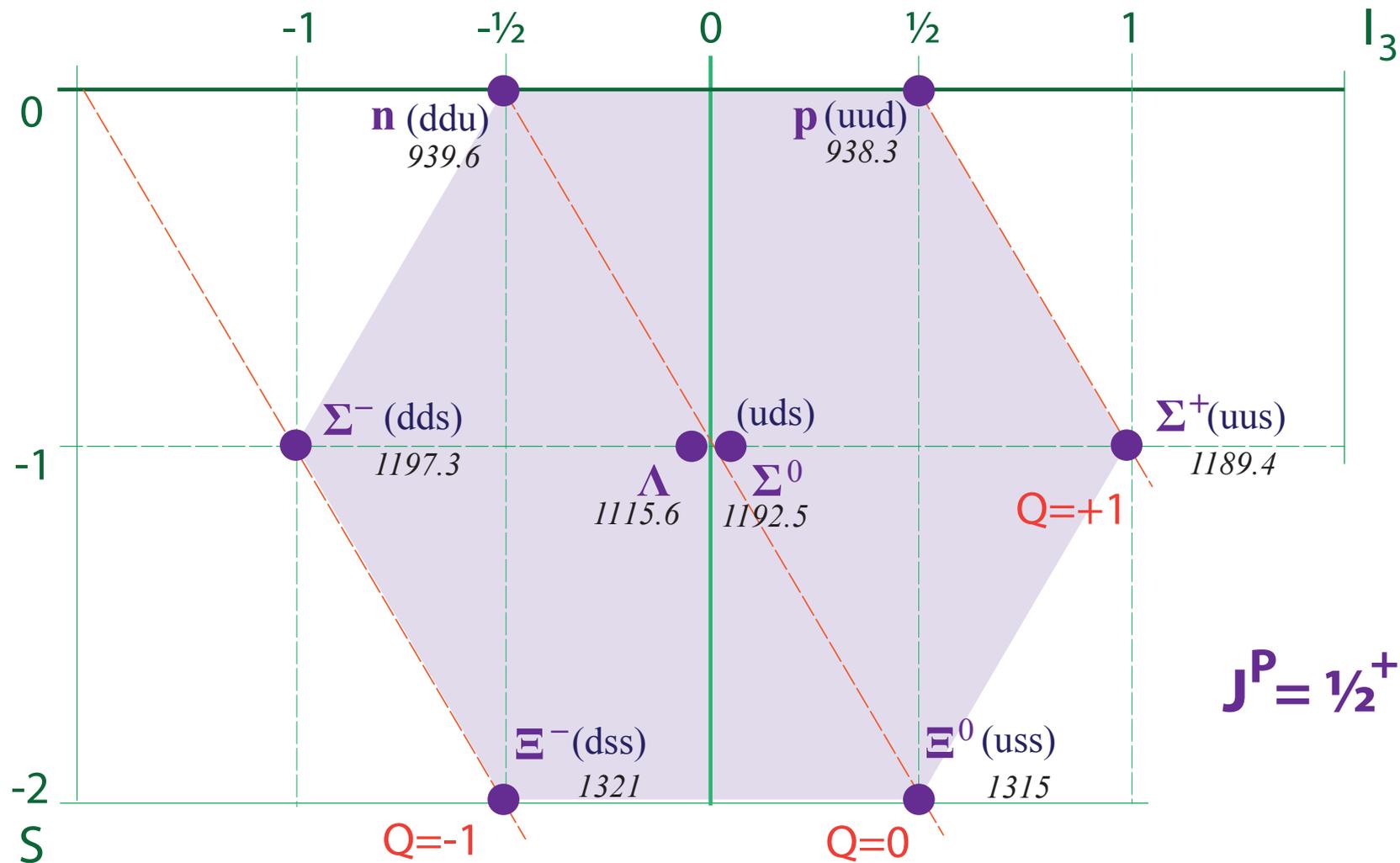
$$\Lambda \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$B: +1 \neq 0 + 0$

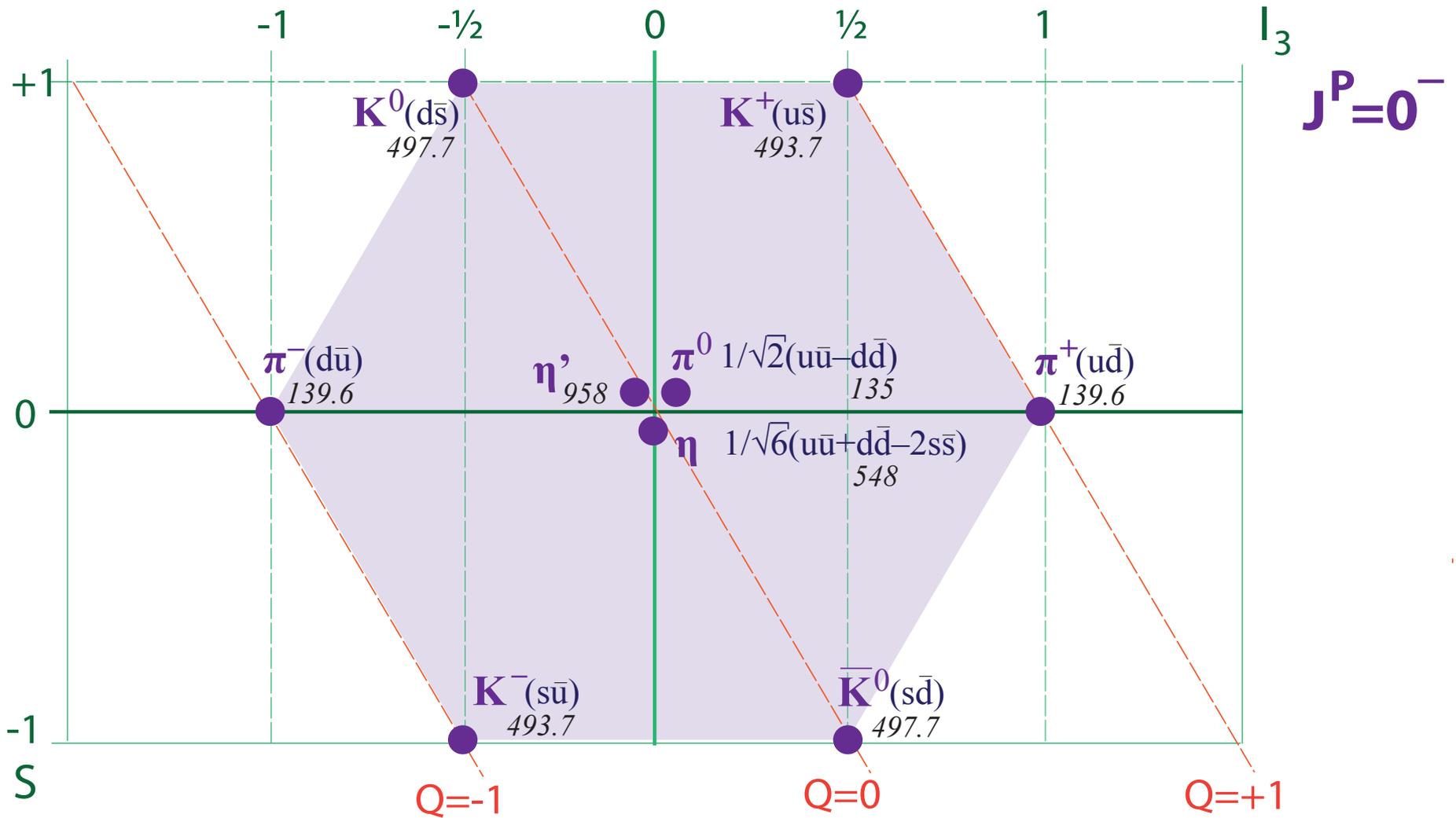
Закон сохранения барионного числа не выполняется.

Распад запрещен

Барионы (B=1)



Мезоны ($B=0$)



Как устроен Мир (Стандартная Модель)

ФЕРМИОНЫ

u	c	t	Кварки
d	s	b	
ν_e	ν_μ	ν_τ	Лептоны
e	μ	τ	
I	II	III	

БОЗОНЫ

g	Сильное
γ	Электромагнитное
W^\pm	Слабое
Z^0	

АДРОНЫ

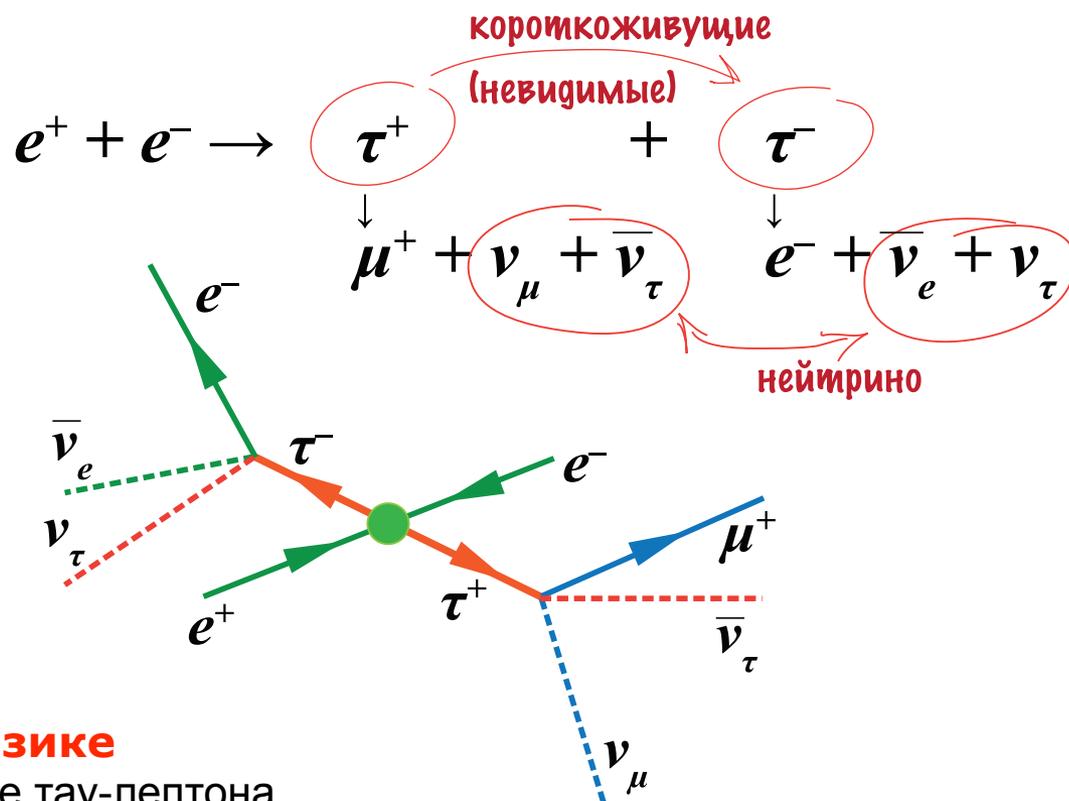
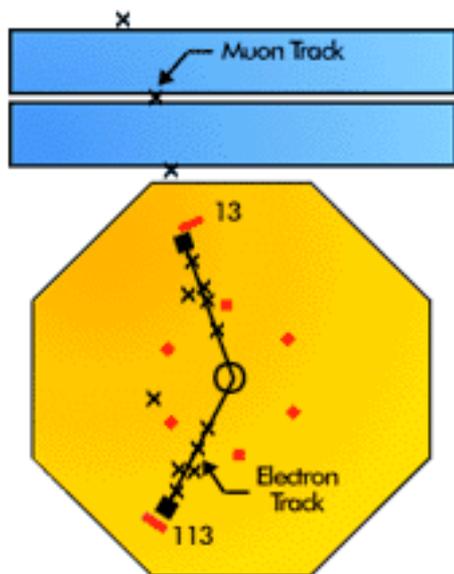
БАРИОНЫ (qqq)		МЕЗОНЫ ($q\bar{q}$)	
нуклоны	p, n	пионы	π^+, π^0, π^-
резонансы	$\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$ и тд	каоны	K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0 и тд
гипероны	$\Lambda, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Omega^-$ и тд	«векторные»	$\rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega$ и тд

Третье поколение – тау-лептон

1975 г. М. Перл (SLAC, Стэнфорд, США)

Открытие таона

$$Q_\tau = q_e; \quad m_\tau = 1776,82 \text{ МэВ}; \quad \tau_\tau = 290,6 \times 10^{-15} \text{ сек}$$



Нобелевская премия по физике

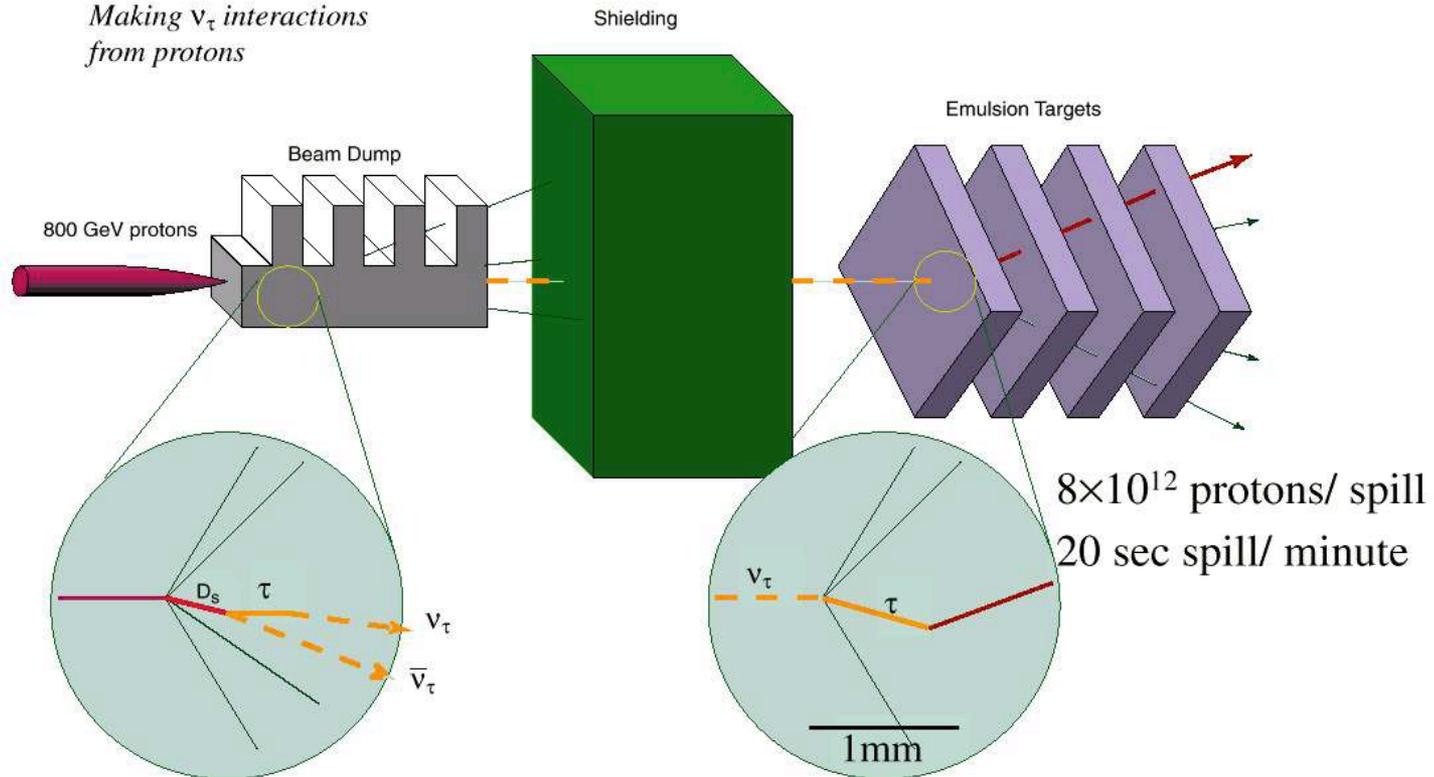
1995 г. – М. Перл, За открытие тау-лептона

Третье поколение – тау-нейтрино

2000 г. DONUT (Direct Observation of the NU Tau)
Fermilab, USA

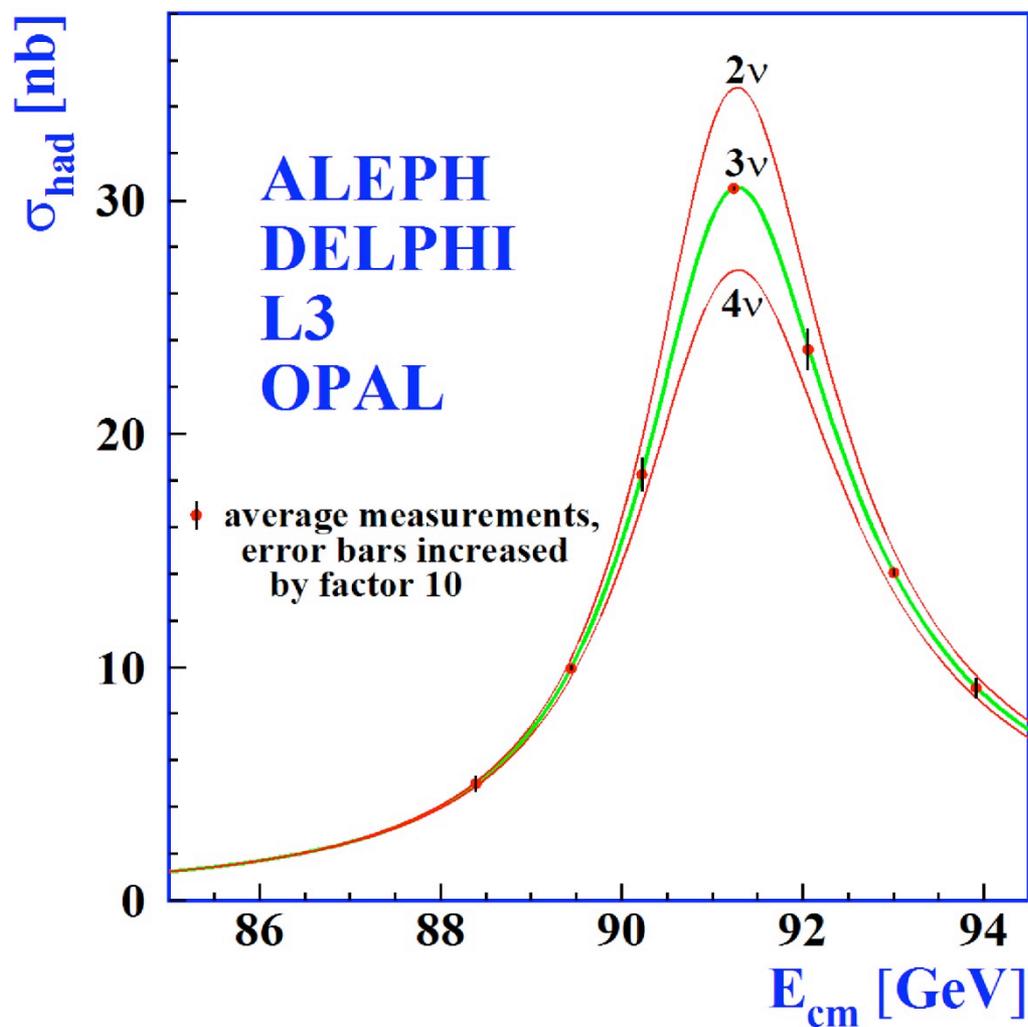
E-872

*Making ν_τ interactions
from protons*



В результате анализа 10^7 событий было надёжно зарегистрировано 4 события

Данные LEP - в природе существует не более трех легких нейтрино

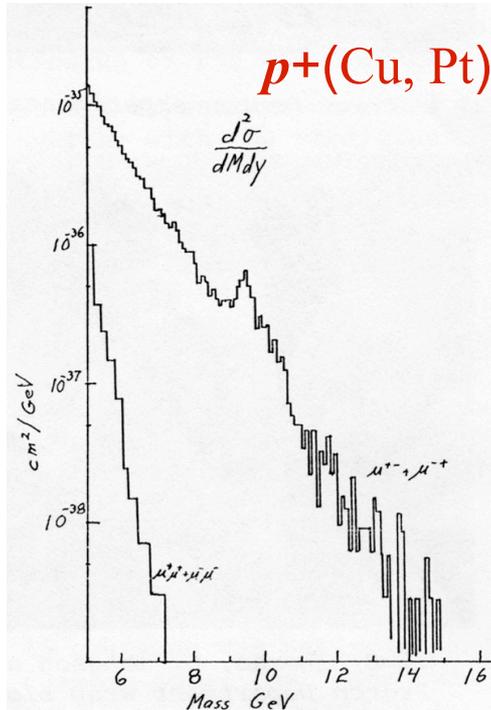


[Source: The ALEPH Collaboration et al., *Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance*, Physics Reports **427** (2006) 257; arXiv: hep-ex/0509008v3, Fig. 1.13.]

Третье поколение – b-кварк

1977 г. Л. Ледерман (TEVATRON, FNAL, Чикаго)

Открытие ипсилон-мезона Υ



$p + (\text{Cu, Pt}) \rightarrow \Upsilon (\text{ипсилон}) + \dots X$



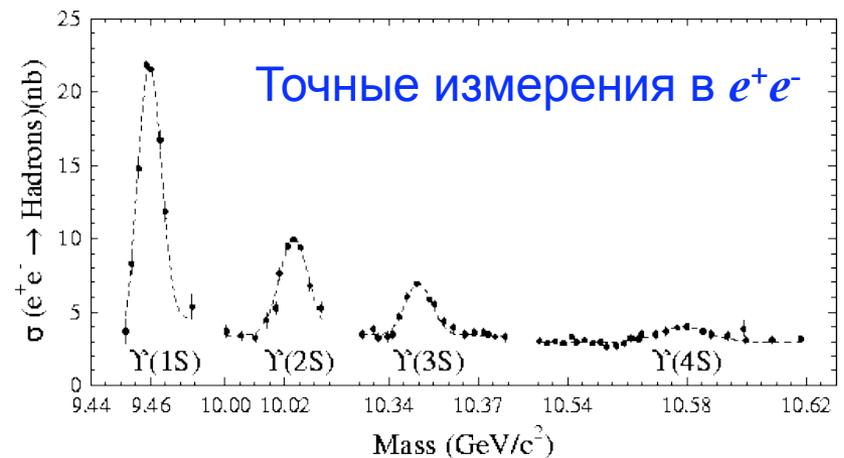
$$\Upsilon = b\bar{b}$$

$$M(\Upsilon) = 9460 \text{ МэВ}$$

$$J^P = 1^-$$

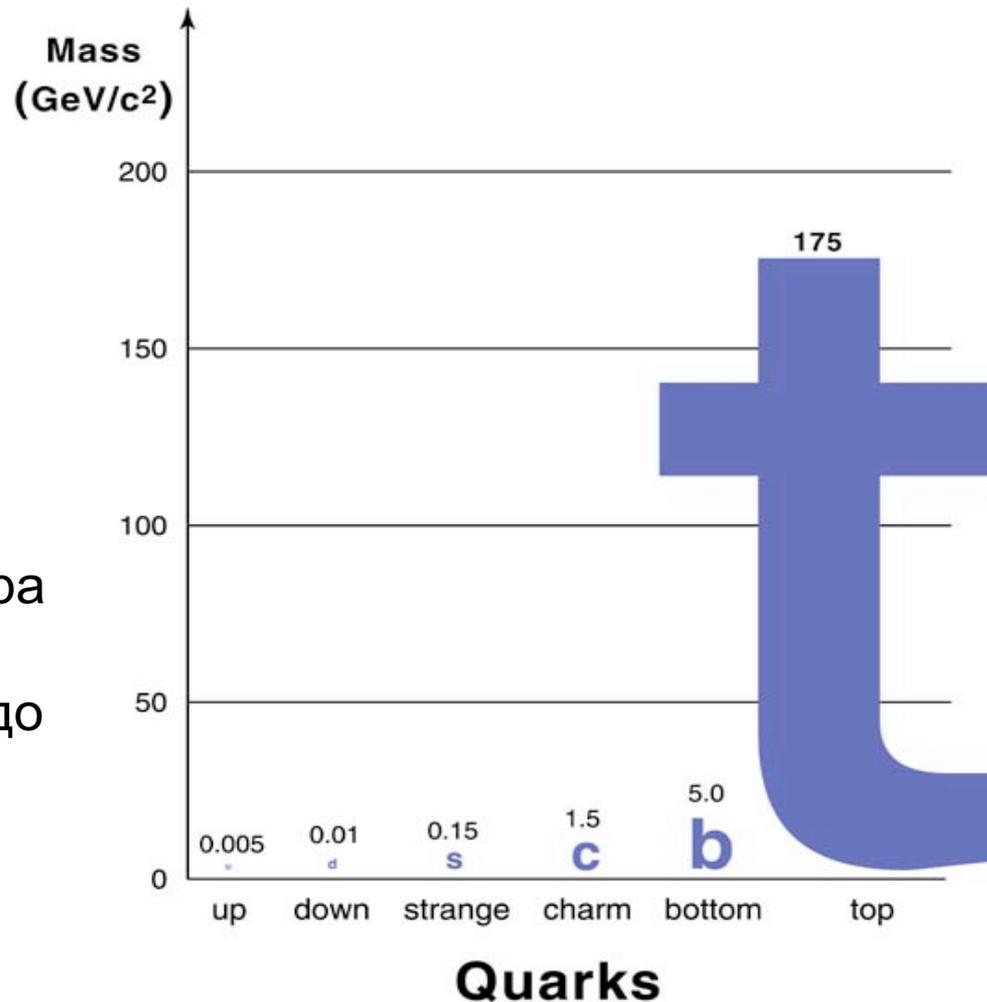
$$\tau = 1,218 \cdot 10^{-20} \text{ сек}$$

9000 событий $m_{\mu\mu} > 5 \text{ ГэВ}$
три резонанса



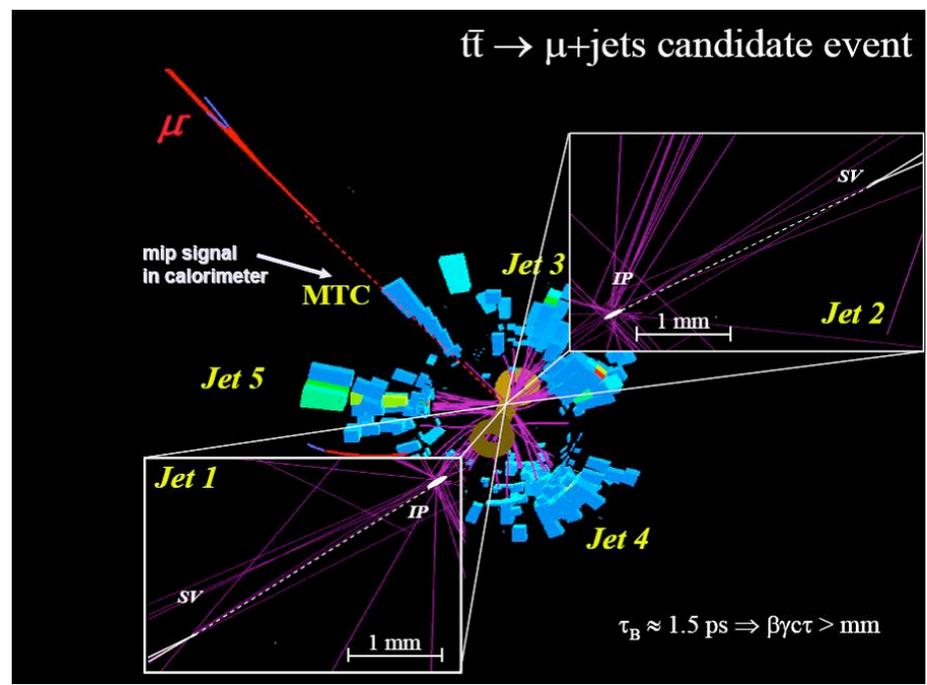
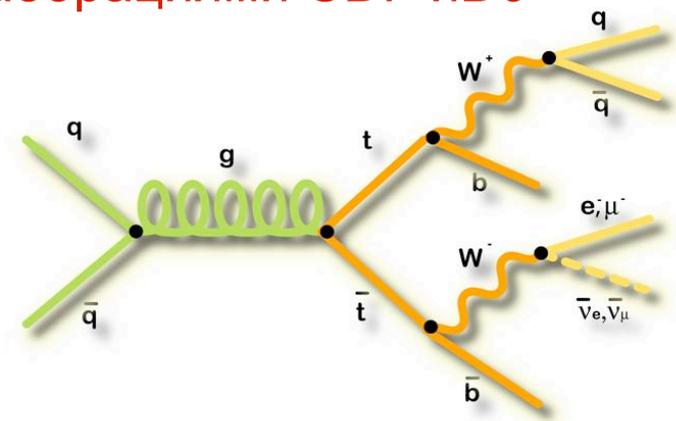
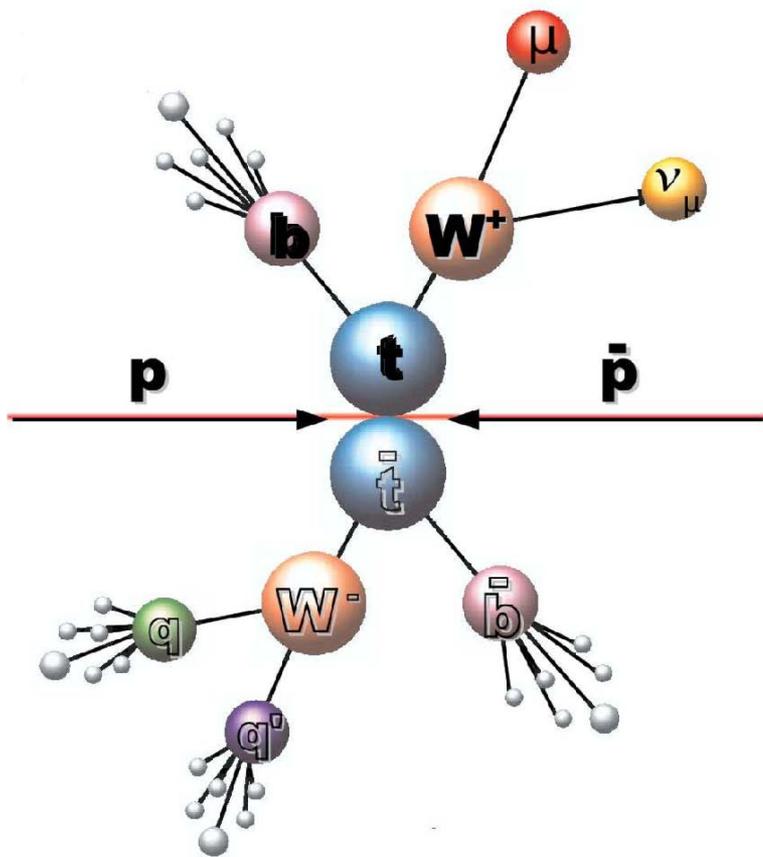
Третье поколение – t-кварк

QUARK MASSES



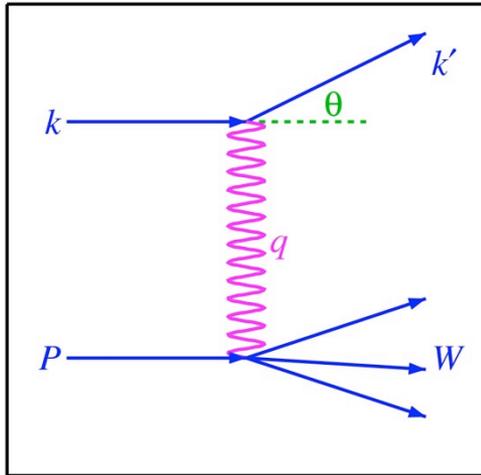
Топ-кварк чуть легче ядра золота, но точечная элементарная частица до 10^{-17} см

Самая тяжелая из существующих частиц (Тор quark) был открыт в Fermilab в 1995 году коллаборациями CDF и D0



Как увидеть кварки

$$e + p \rightarrow e + X$$

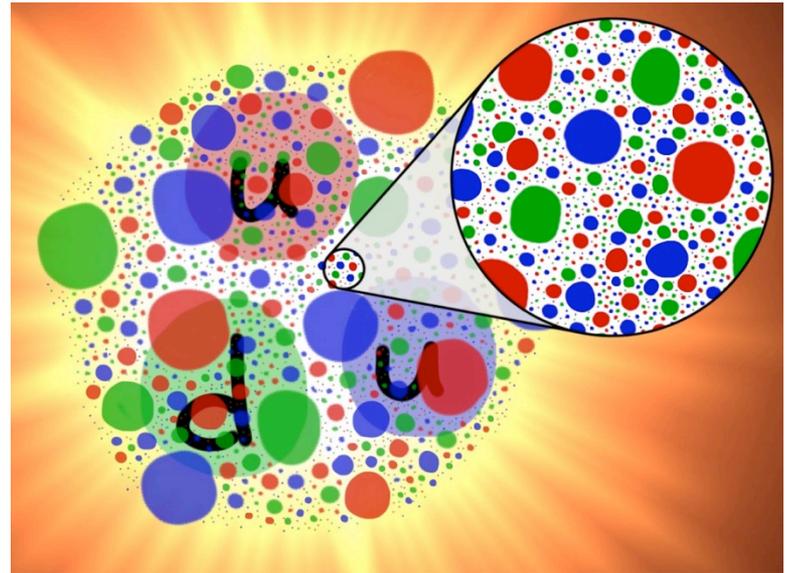


$W = M \rightarrow$ упругое рассеяние

$2 < W < 1 \text{ GeV} \rightarrow$ неупругое рассеяние

(возбуждение резонансов)

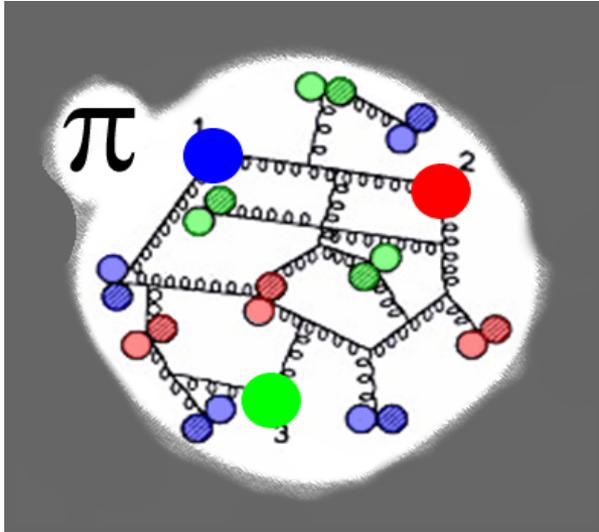
$W > 2 \text{ GeV} \rightarrow$ глубоко неупругое рассеяние



Нобелевская премия по физике

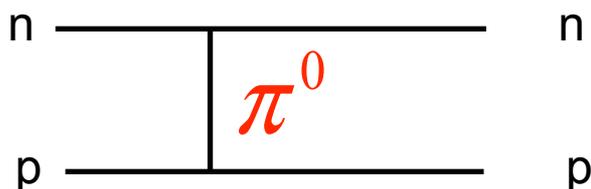
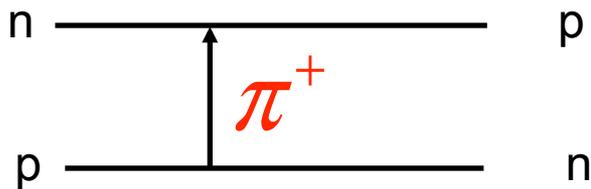
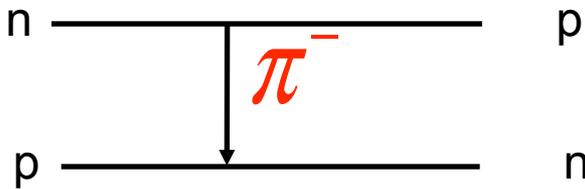
1990 г. – Дж. Фридман, Г. Кэндалл, Р. Тейлор За пионерские исследования глубоконеупругого рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах, что имело большое значение для развития кварковой модели в физике частиц

Структура протона



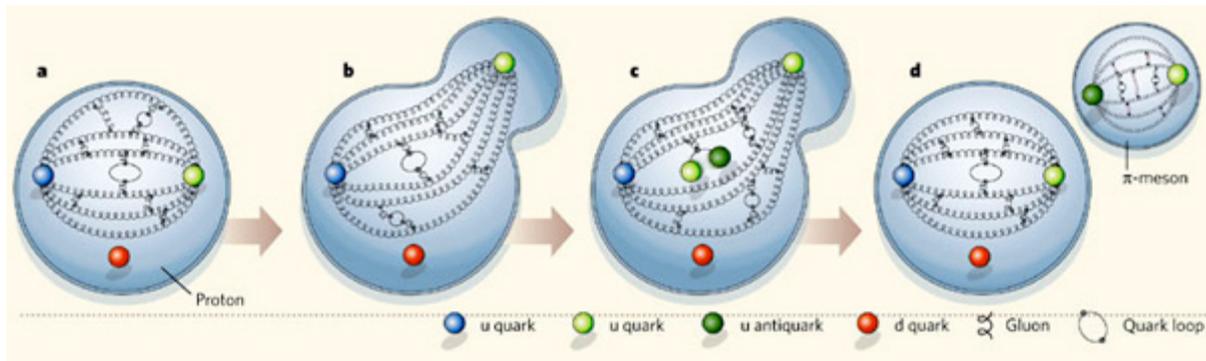
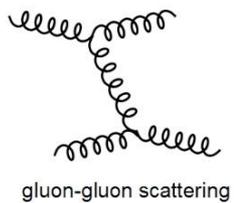
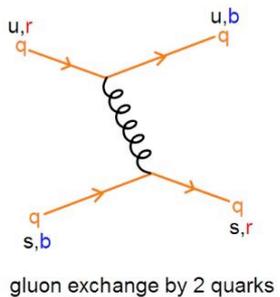
В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

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.

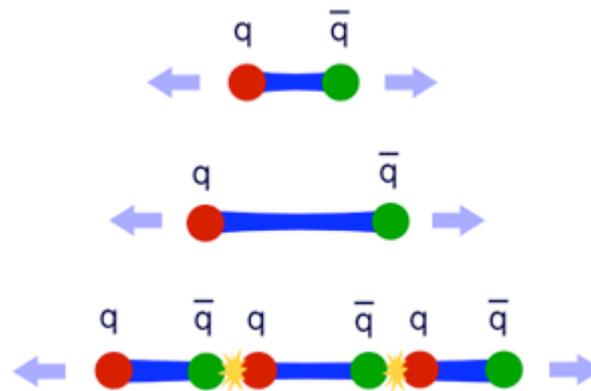
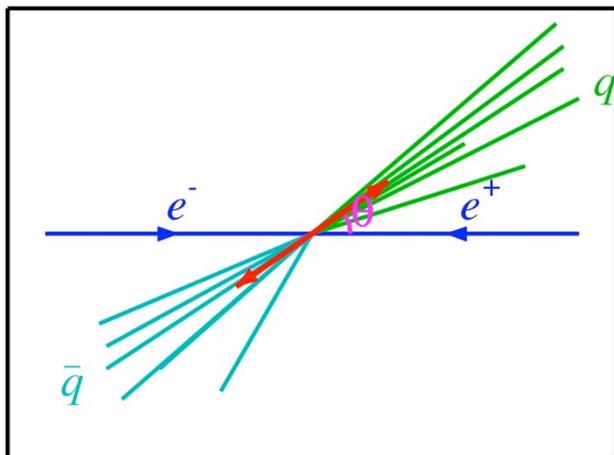


Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

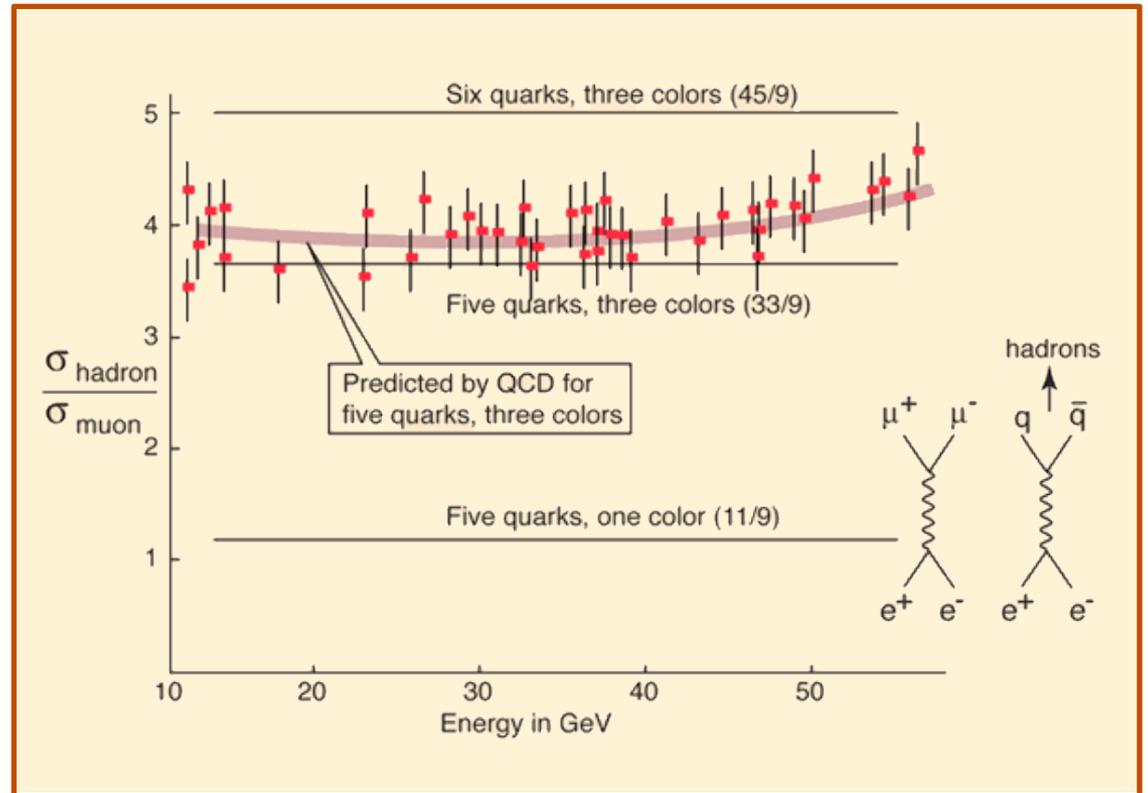
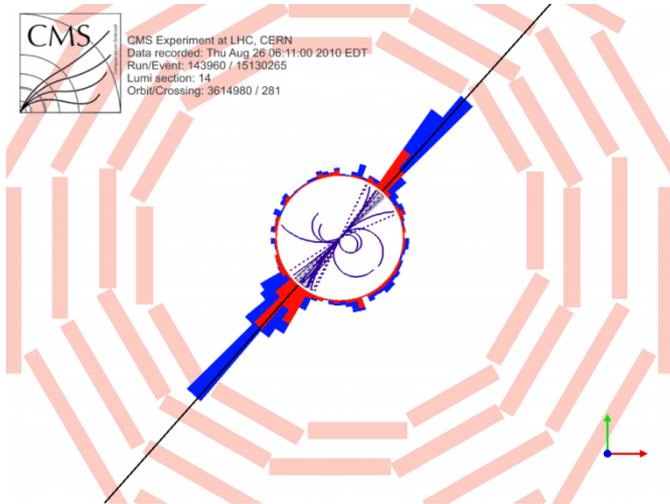
Адронизация



$e^+e^- \rightarrow \text{Hadrons}$

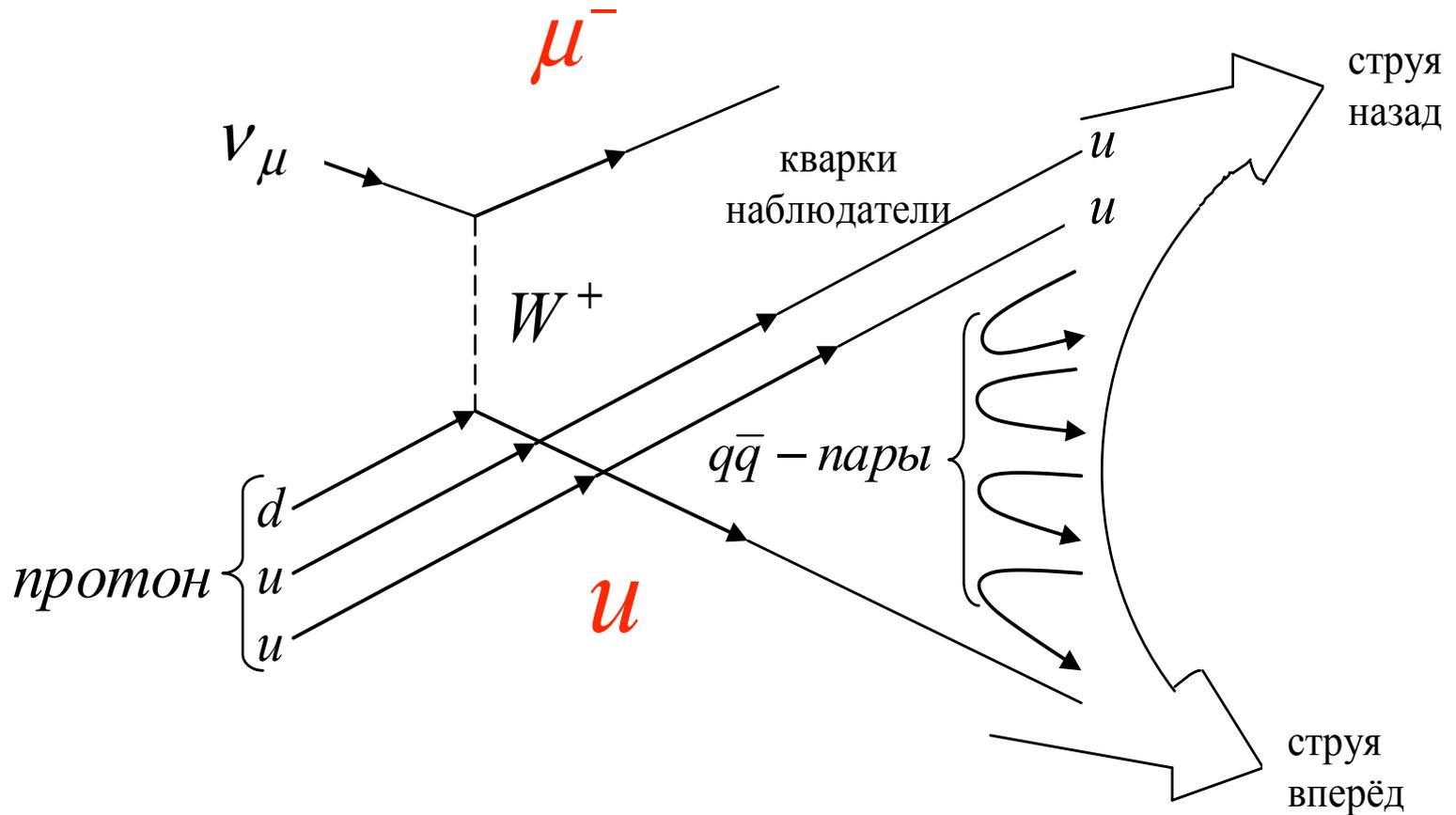


Как увидеть кварки



Particle Data Group, "Review of Particle Properties", Phys. Rev. D45, 1 (1992)

Электрические заряды кварков

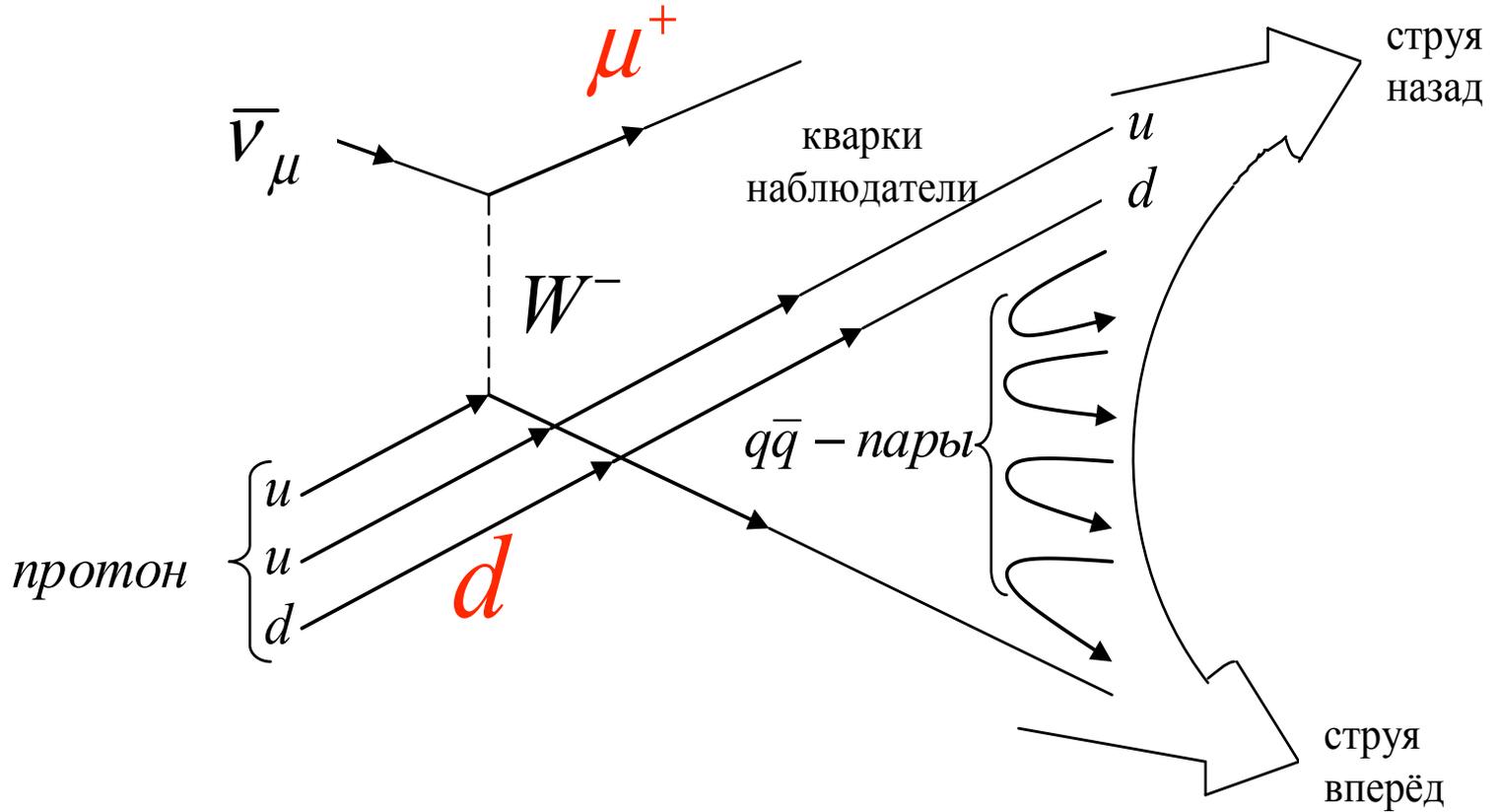


$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{струи адронов}$$

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

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

Электрические заряды кварков



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

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

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

КВАРКИ ($J=1/2$)

	Масса ГэВ/ c^2	Электрический заряд Q	Аромат
<i>u</i>	0,003	+2/3	$I_3 = +1/2$
<i>d</i>	0,006	-1/3	$I_3 = -1/2$
<i>c</i>	1,3	+2/3	$c = +1$
<i>s</i>	0,1	-1/3	$s = -1$
<i>t</i>	175	+2/3	$t = +1$
<i>b</i>	4,3	-1/3	$b = -1$

Фундаментальные фермионы ($J=1/2$)

ЛЕПТОНЫ ($L_l = 1$)

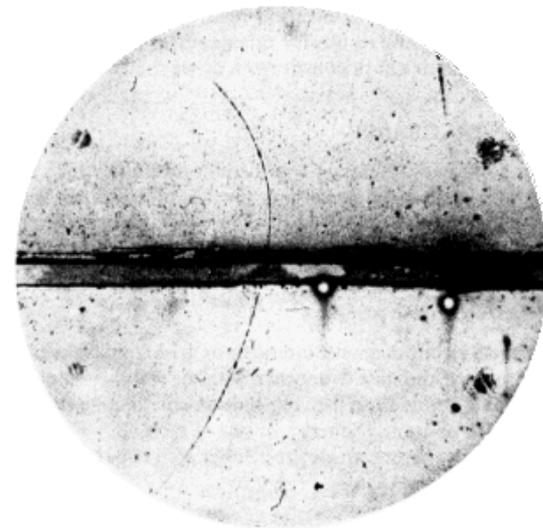
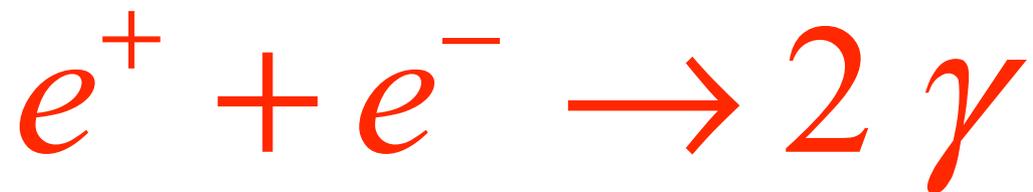
КВАРКИ ($B = 1/3$)

Аромат	Масса ГэВ/ c^2	Электр. заряд Q	Аромат	Масса ГэВ/ c^2	Электр. заряд Q
ν_e	$< 10^{-8}$	0	<i>u</i>	0,003	+2/3
e^-	0,000511	-1	<i>d</i>	0,006	-1/3
ν_μ	$< 0,0002$	0	<i>c</i>	1,3	+2/3
μ^-	0,106	-1	<i>s</i>	0,1	-1/3
ν_τ	$< 0,02$	0	<i>t</i>	175	+2/3
τ^-	1,777	-1	<i>b</i>	4,3	-1/3

Частица A	m	τ	J	Q	B	L_l	s	c	b	t	I	I_3
Античастица \bar{A}	m	τ	J	$-Q$	$-B$	$-L_l$	$-s$	$-c$	$-b$	$-t$	I	$-I_3$

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.

Нобелевская премия по физике

1936 г. – К. Андерсон.

За открытие позитрона

1927 г. – Ч. Вильсон.

За открытие метода, делающего видимыми траектории заряженных частиц с помощью конденсации пара

Антипротон 1955



Схема эксперимента по регистрации антипротонов



$$L(C_1 - C_2) = 12 \text{ м}$$

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

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

$$\text{Ч1} \quad \beta \geq 0.99$$

$$\text{Ч2} \quad 0.75 \leq \beta \leq 0.79$$

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

Антинейтрон 1956

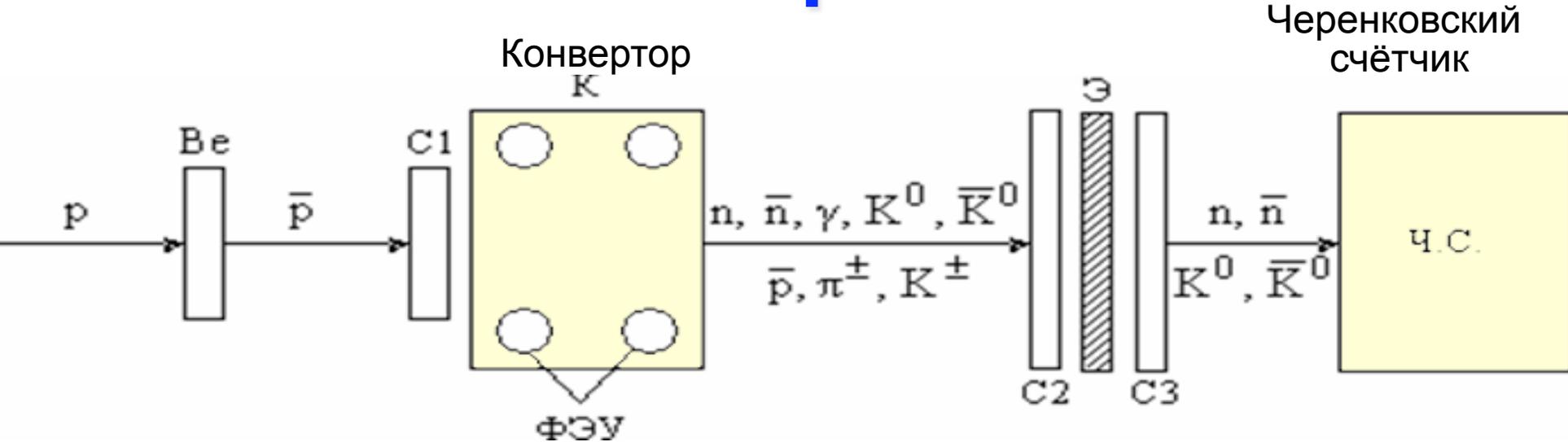
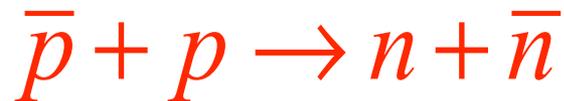


Схема эксперимента по регистрации антинейтронов



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



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)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

Как устроен Мир (Стандартная Модель)

