

Тайны атомных ядер

2017

Фундаментальные частицы

Как устроен протон

Фундаментальные частицы

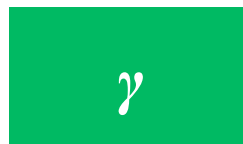
ФЕРМИОНЫ Лептоны

ν_e	ν_μ
e	μ

I

II

БОЗОНЫ



Электромагнитное

Слабое
Сильное

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:

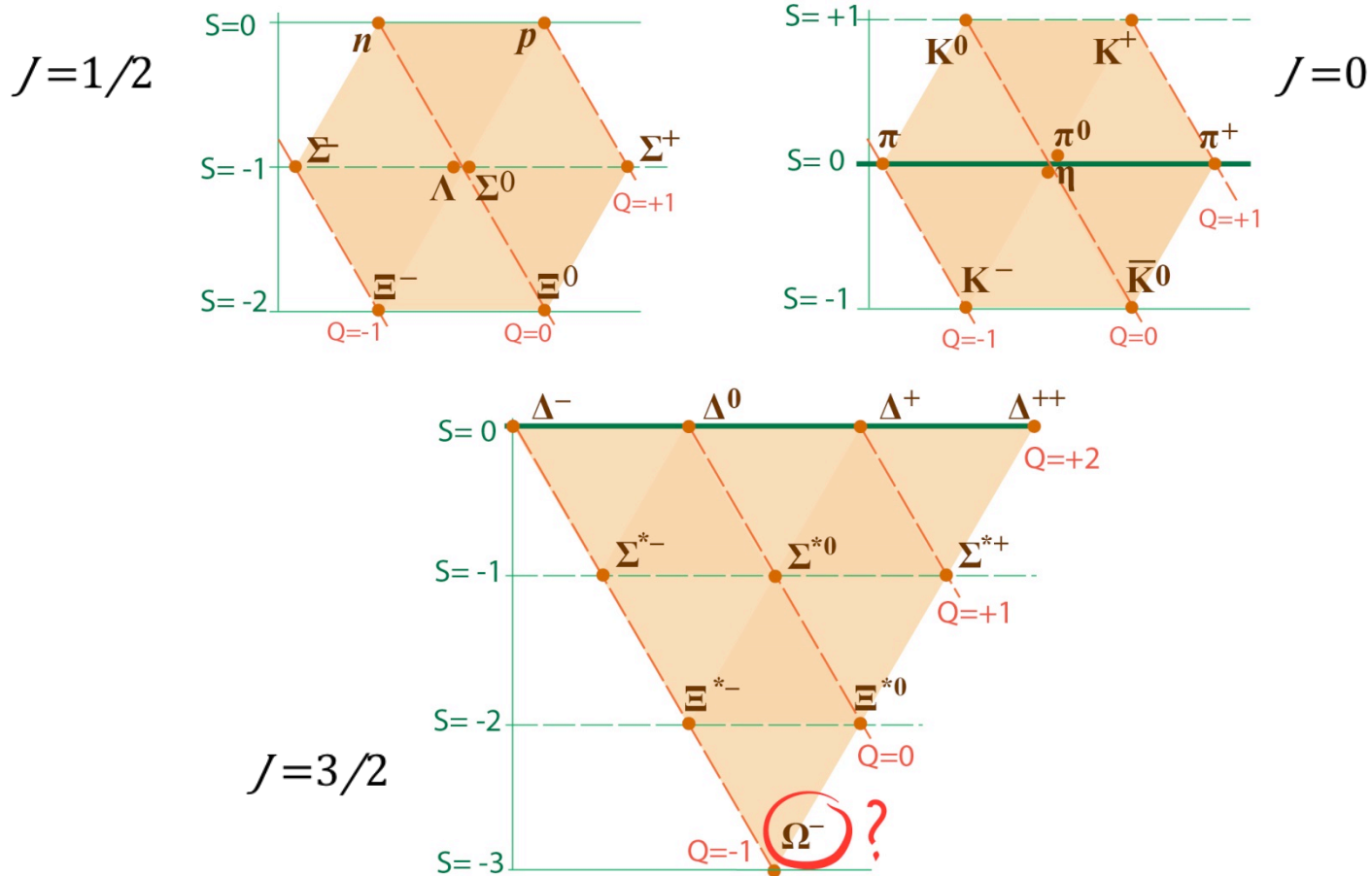
$$\mu_p = 2,792847356 \pm 0.0000000023 \mu_N$$

Нейтрон:

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

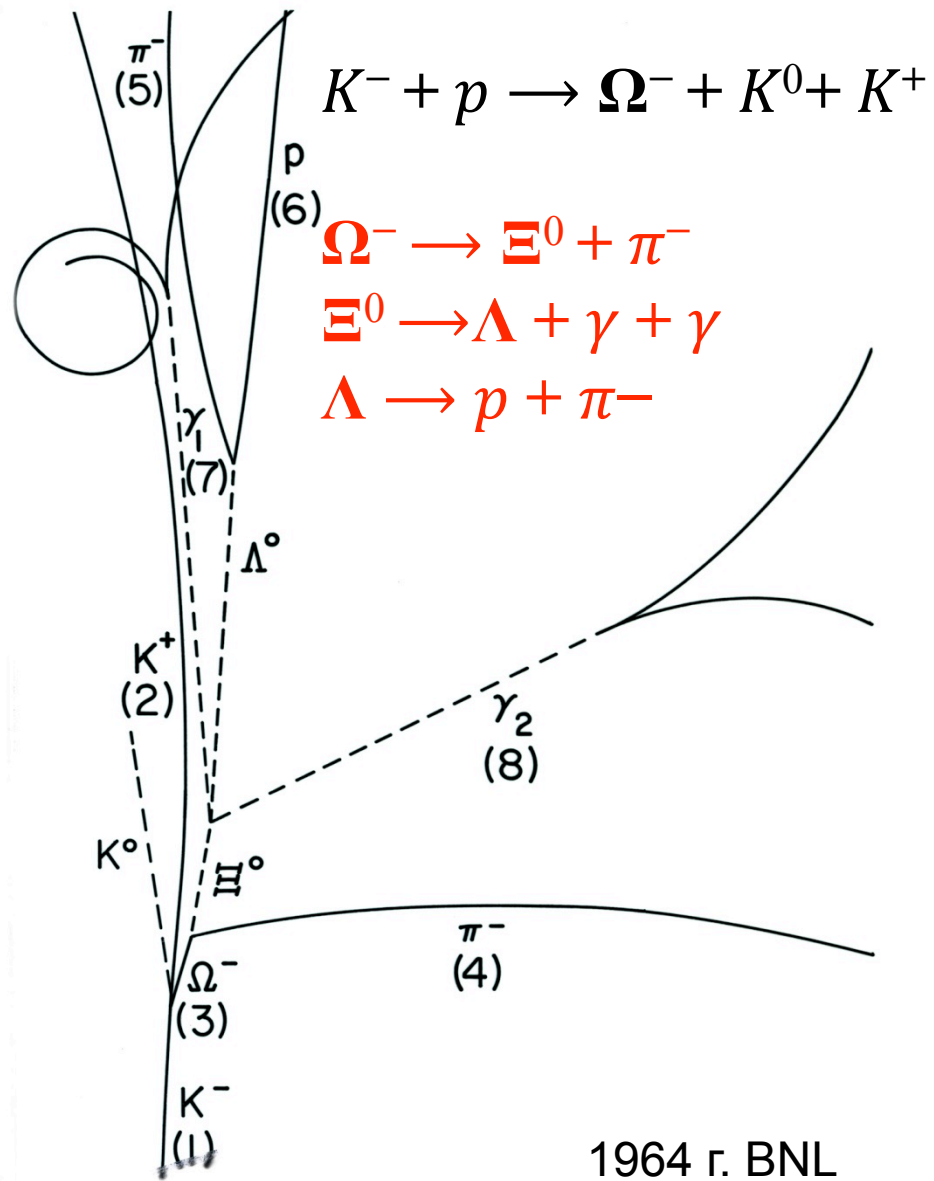
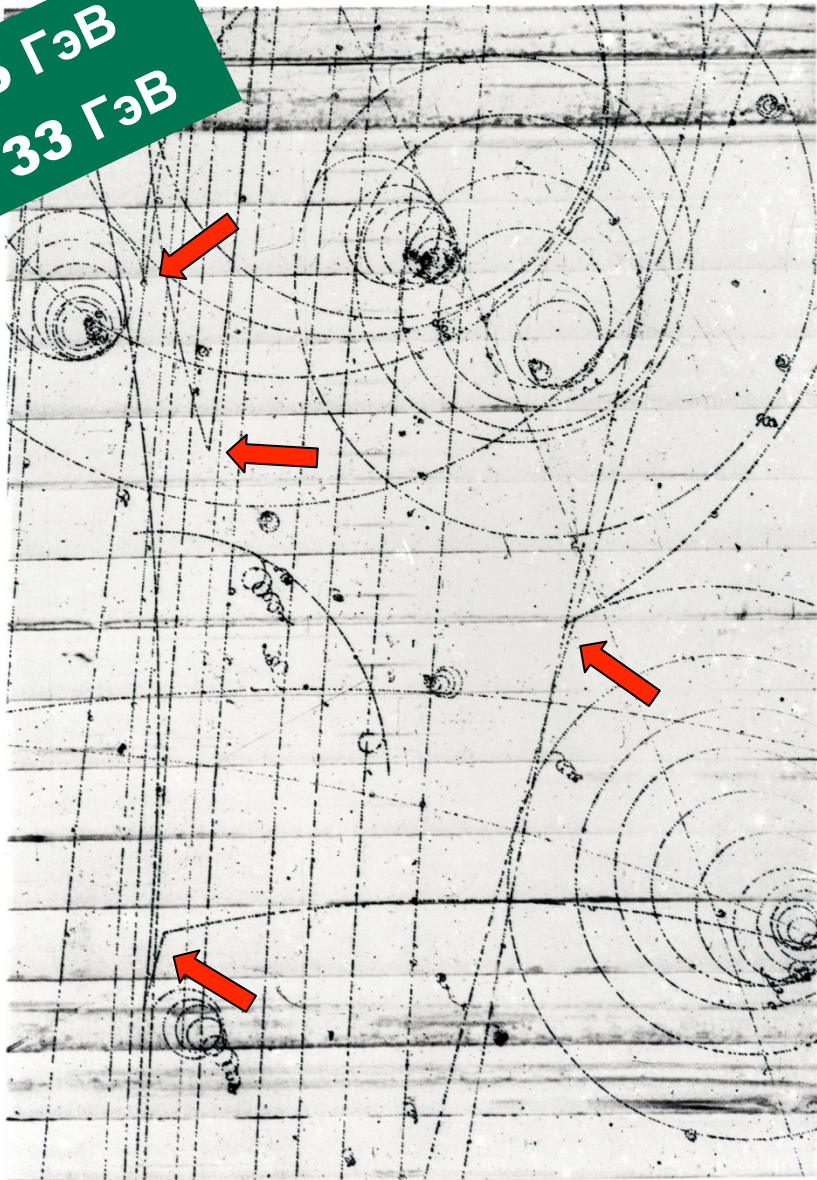
Кварковая модель

1961 г. М. Гелл-Манн, Восьмеричный путь



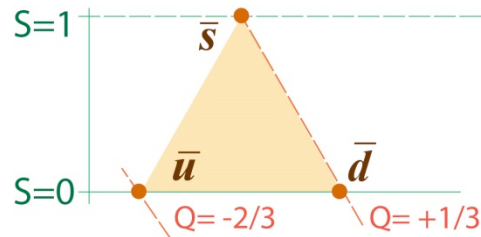
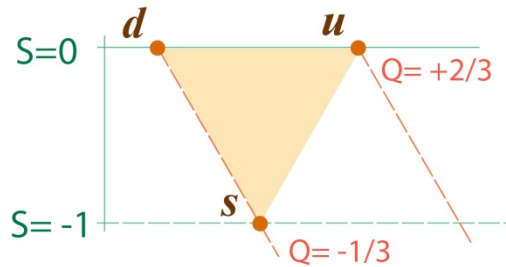
1964 г. Открытие Ω^- гиперона. BNL (Брукхевен), США

К 5 ГэВ
p 33 ГэВ



Кварковая модель

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



$$J=1/2$$

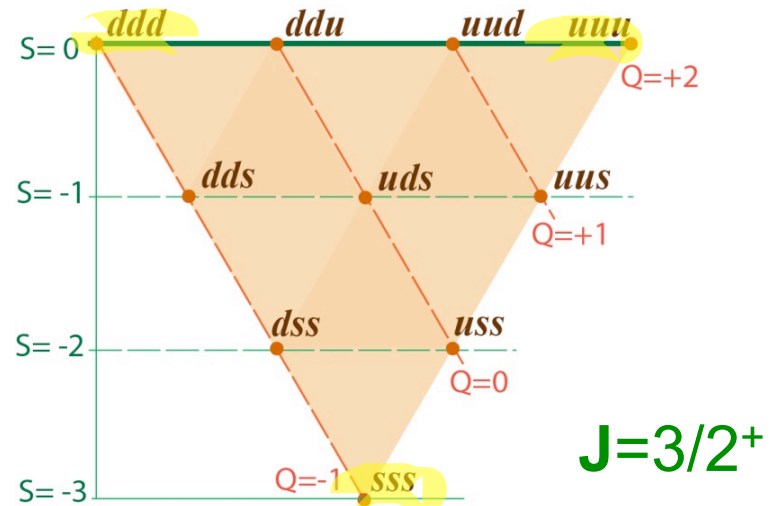
$$B(q)=1/3$$

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

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

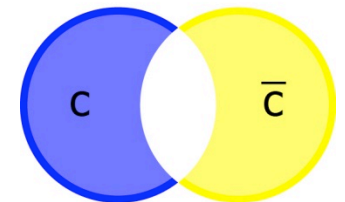
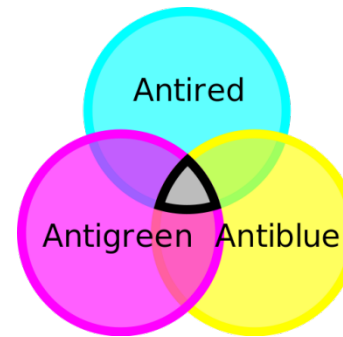
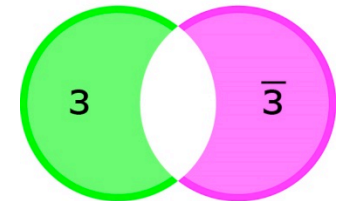
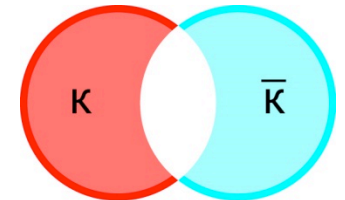
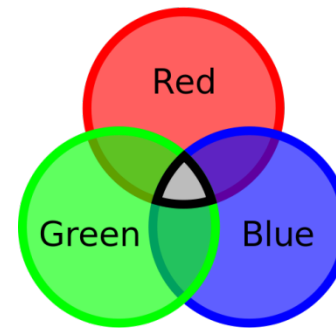
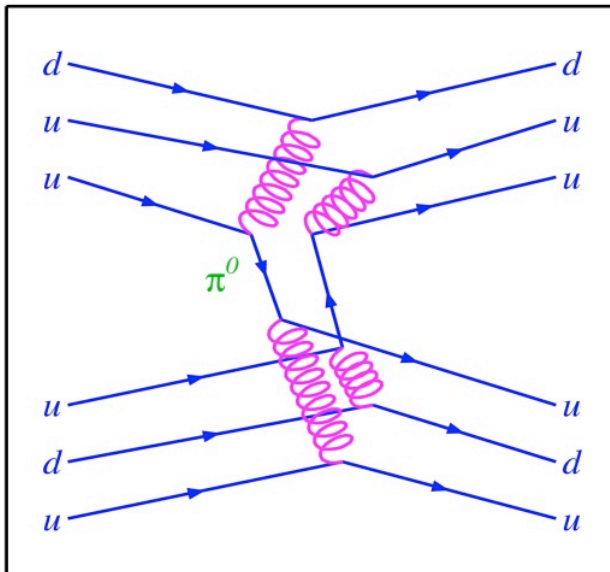
1969 г. – М. Гелл-Манн За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий

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

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

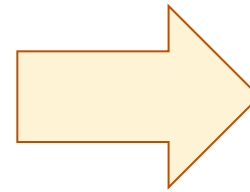
Заряд кварков

Протон $p = uud$

$$Q(p) = +1$$

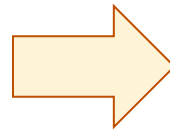
Нейтрон $n = ddu$

$$Q(n) = 0$$



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

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

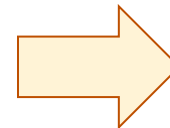


$$Q(u) = +2/3$$
$$Q(d) = -1/3$$

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

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):

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

р 28 ГэВ

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 C=1



Нобелевская премия по физике

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

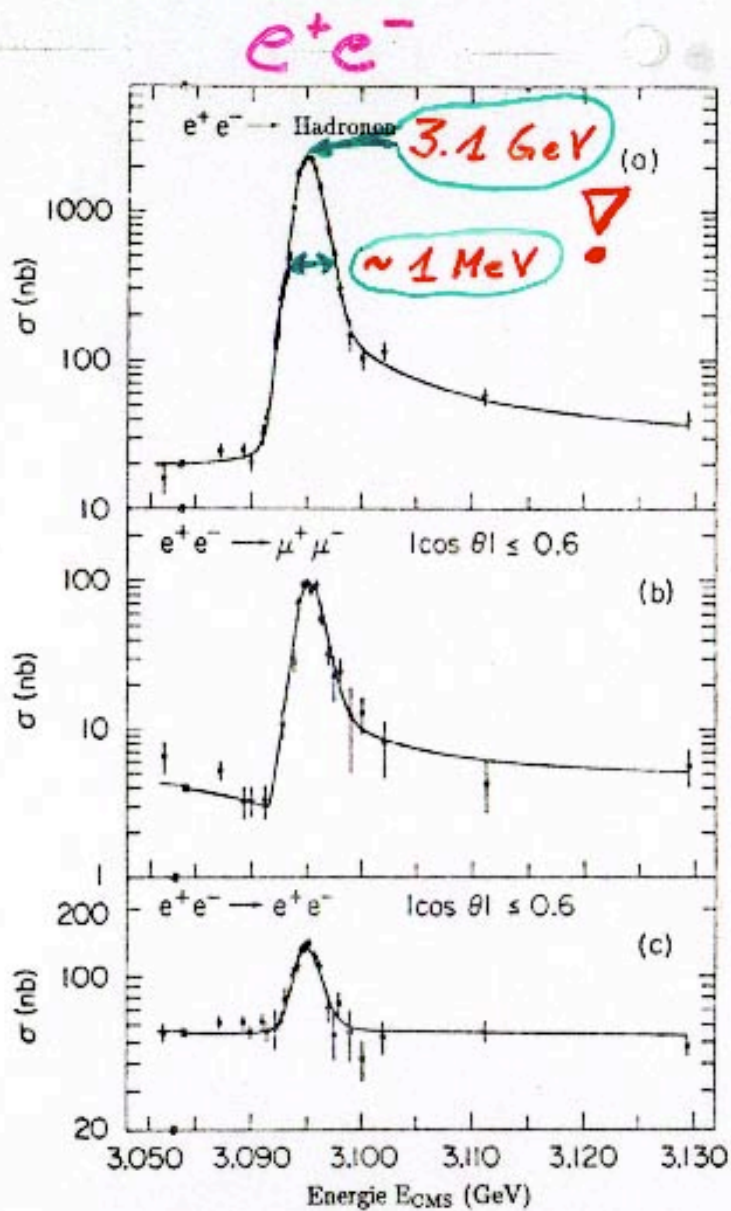


Abbildung 5.9 Ergebnisse der Messungen von Augustin et al. (1974), die die J/ψ -Resonanz bei einer Masse von 3.1 GeV zeigen. Die Resonanz wurde in e^+e^- -Kollisionen am Speicherring SPEAR des SLAC erzeugt.

J/ψ -MESON ($c\bar{c}$)

$p + \text{Be}$

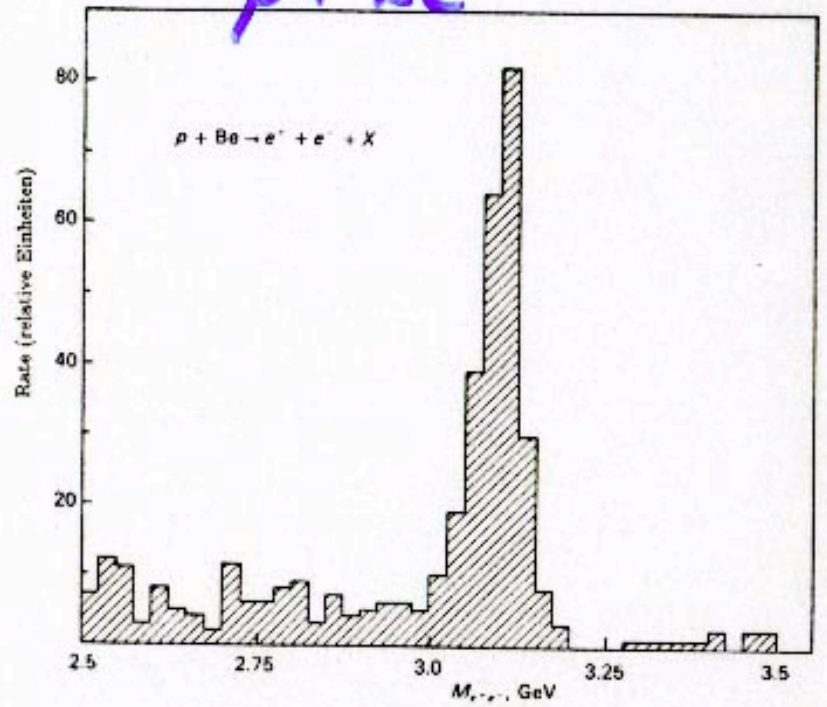


Abbildung 5.10 Die Ergebnisse von Aubert et al. (1974) zeigen die schmale J/ψ -Resonanz in der Verteilung der invarianten Masse des e^+e^- -Paares, das in inklusiven Reaktionen von Protonen an einem Berylliumtarget erzeugt wurde. Dies Experiment wurde am 28 GeV-AGS des Brookhaven National Laboratorys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

$$B = -1$$

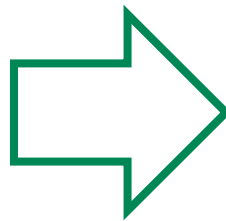
$\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

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

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

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

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



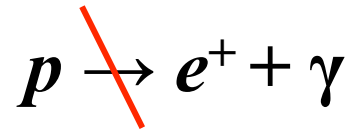
Нейтрон $n = ddu$

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

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

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

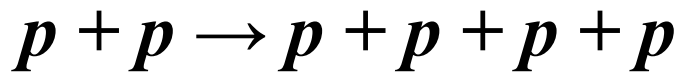
Барионное число В



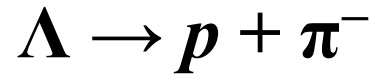
Закон сохранения числа барионов:

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

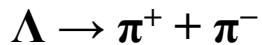
Примеры



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



$$B: +1 = +1 + 0$$

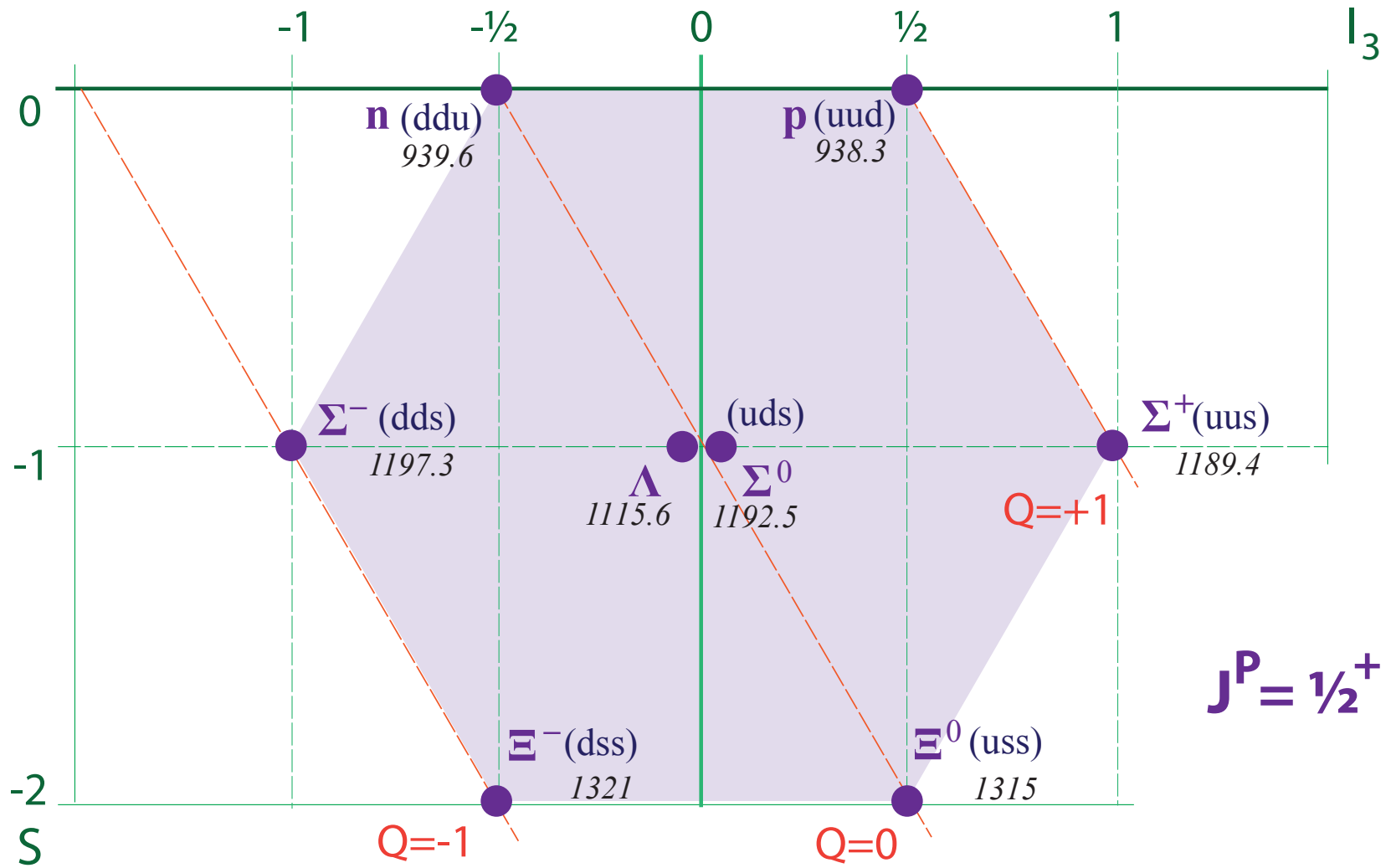


$$B: +1 \neq 0 + 0$$

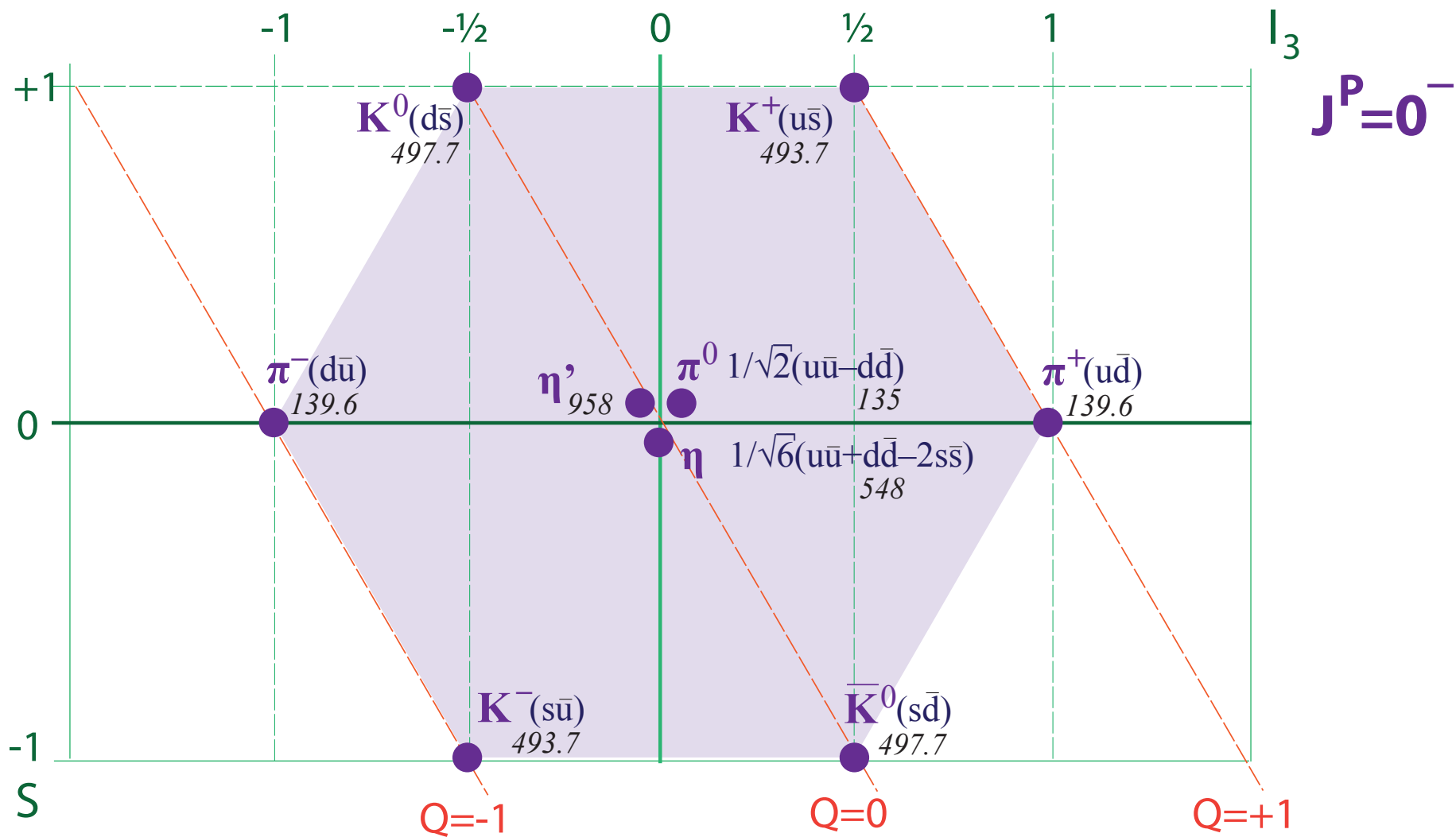
Закон сохранения барионного числа не выполняется.

Распад запрещен

Барионы (B=1)



Мезоны ($B=0$)



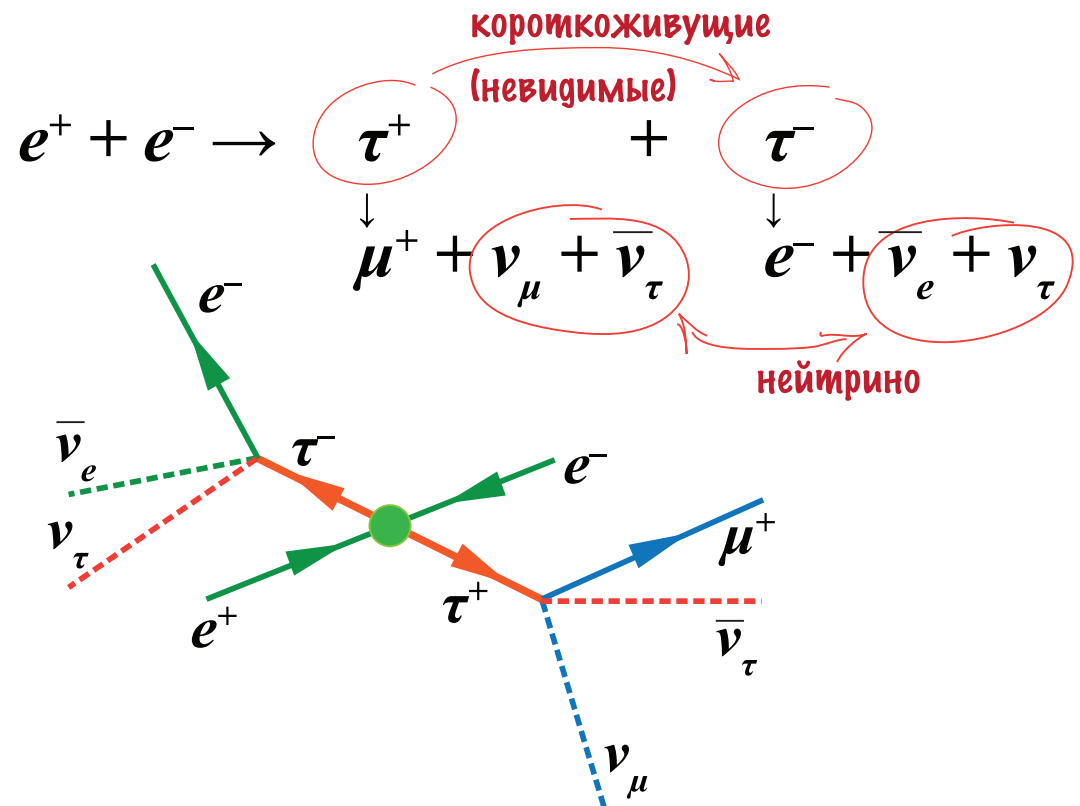
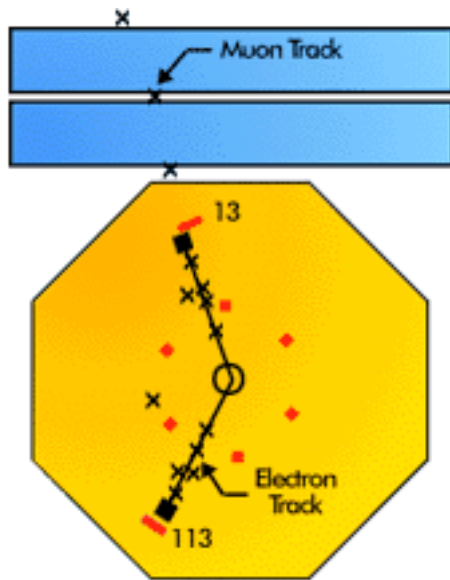
Третье поколение – тау-лептон

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

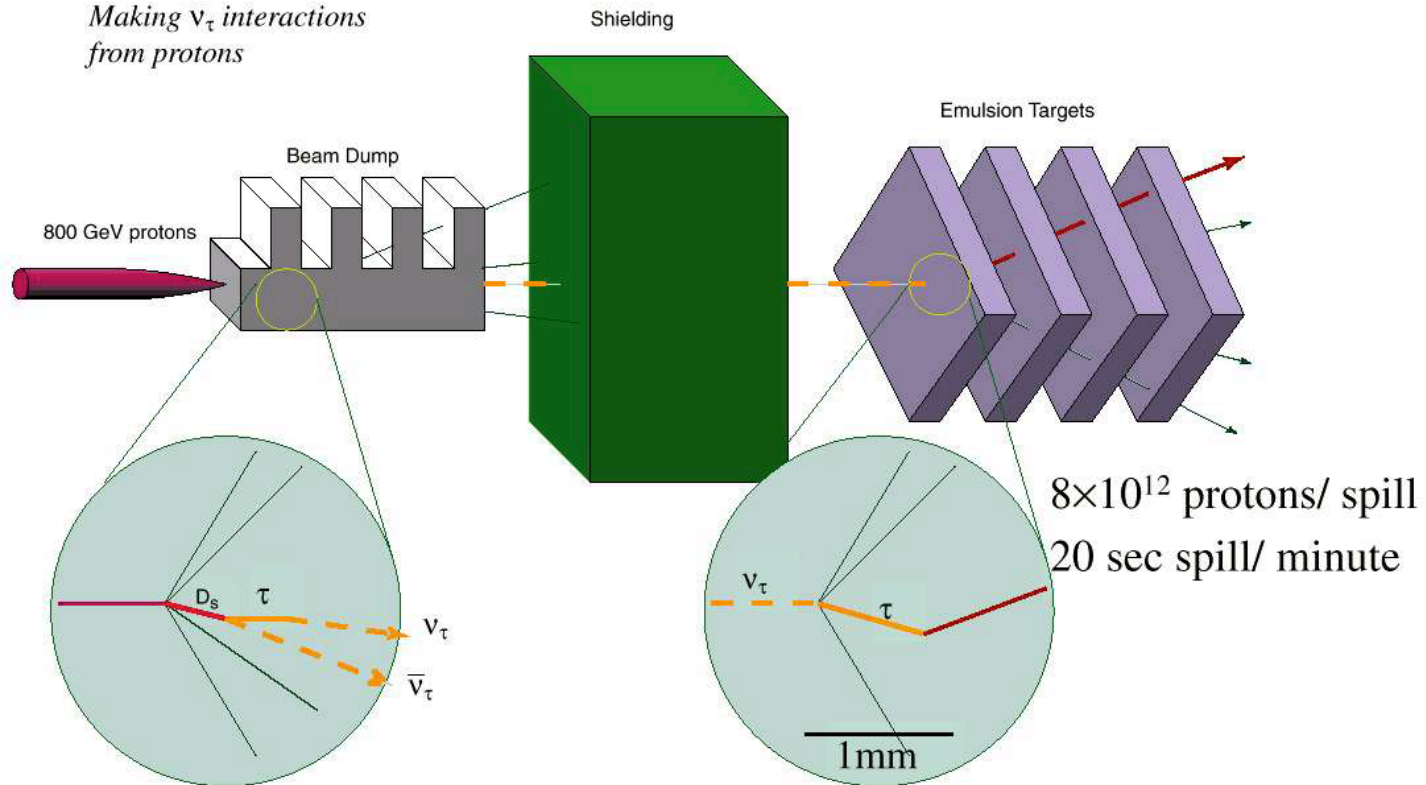
1995 г. – М. Перл, За открытие тау-лептона

Третье поколение – тау-нейтрино

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

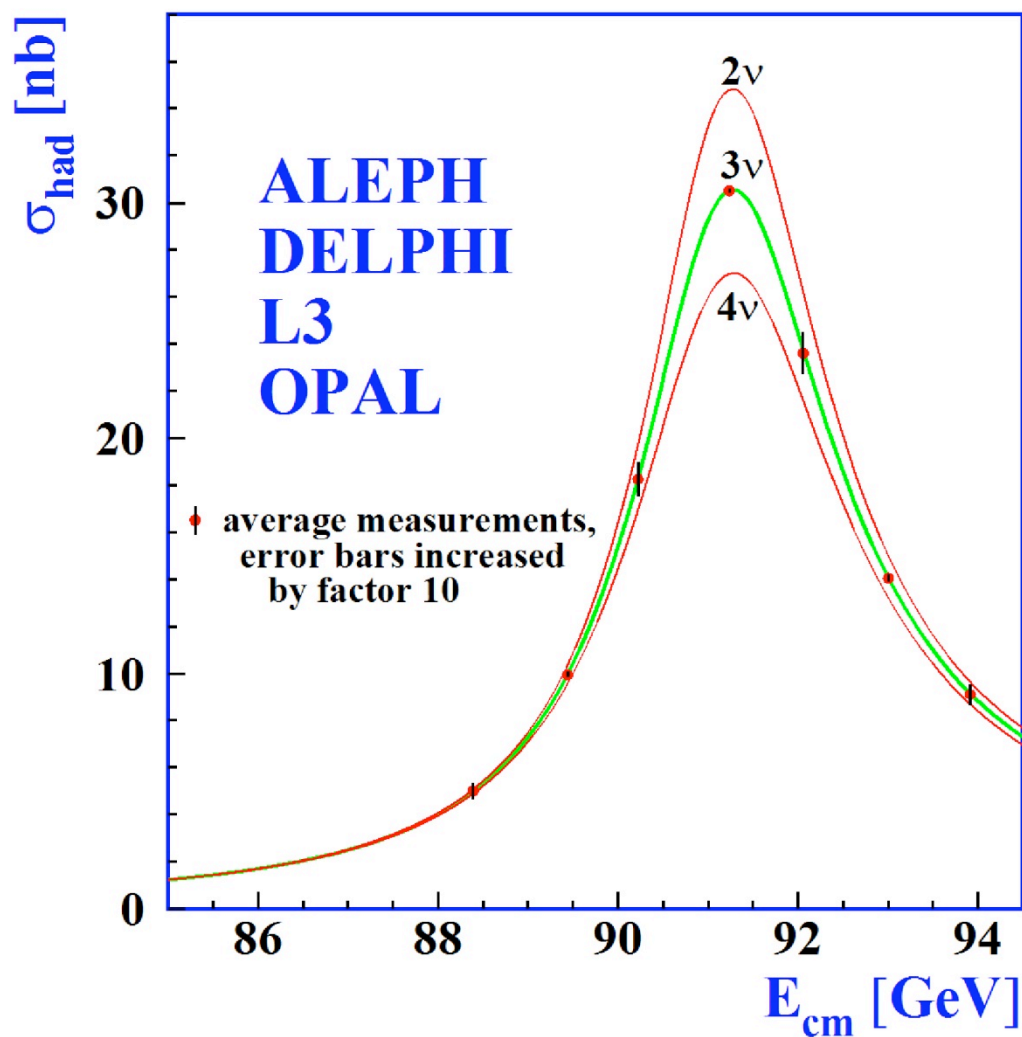
E-872

*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

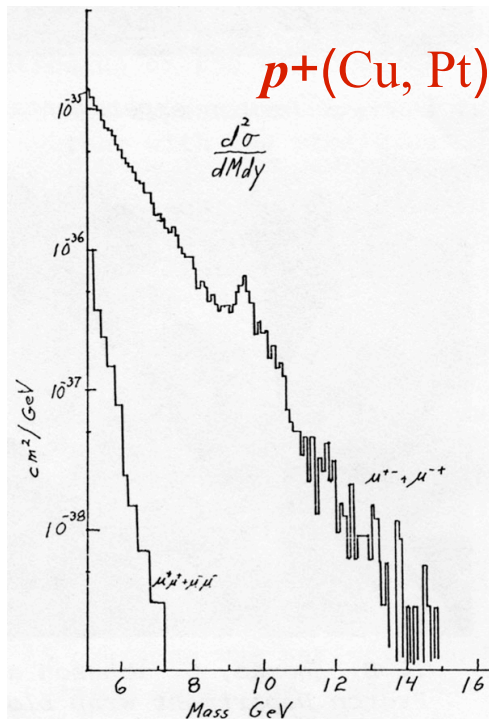


[Source: The ALEPH Collaboration et al., *Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance*, Physics Reports **427** (2006) 257; arXiv: hep-ex/0509008v3, Fig. 1.13.]

Третье поколение – b-кварк

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

Открытие ипсилон-мезона Υ



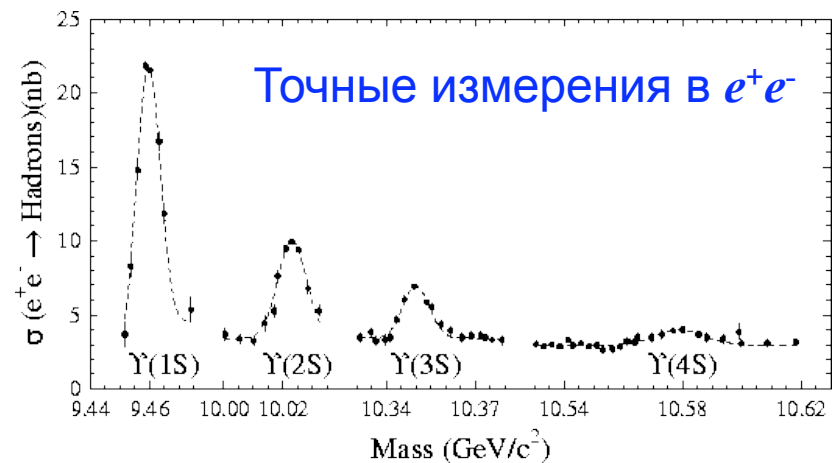
$$\Upsilon = b\bar{b}$$

$$M(\Upsilon) = 9460 \text{ МэВ}$$

$$J^P = 1^-$$

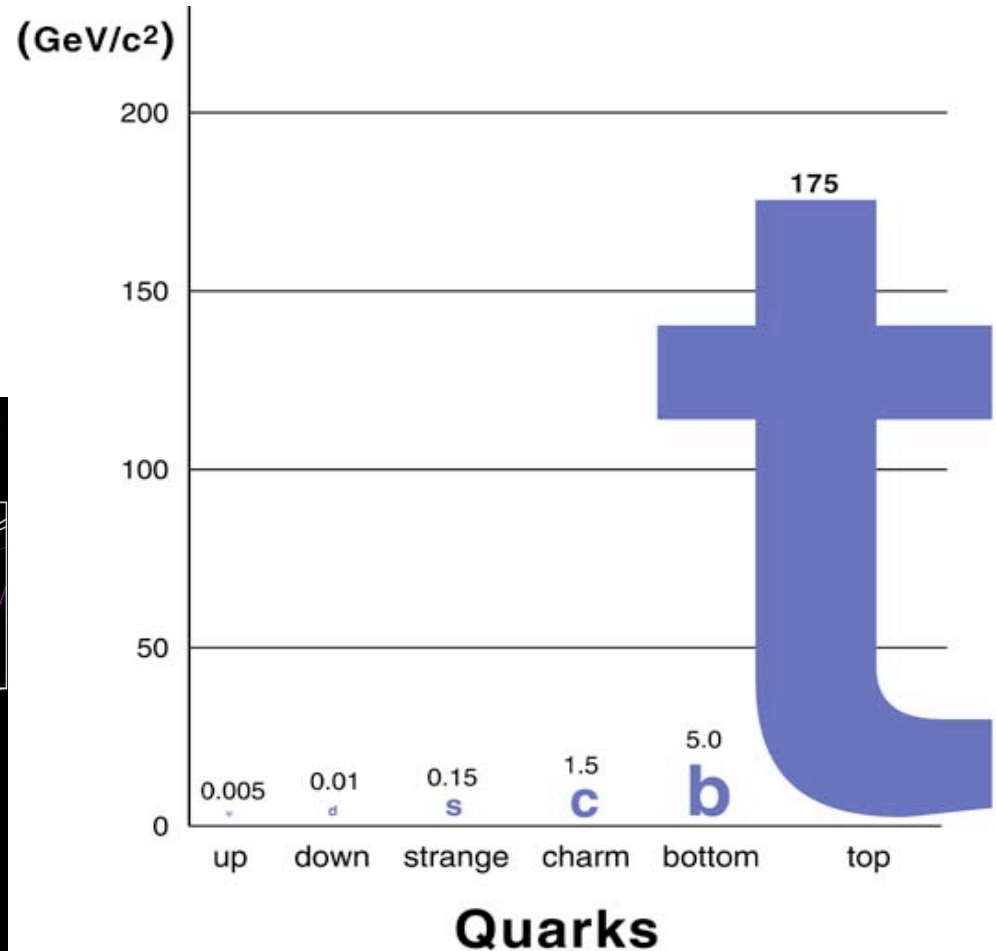
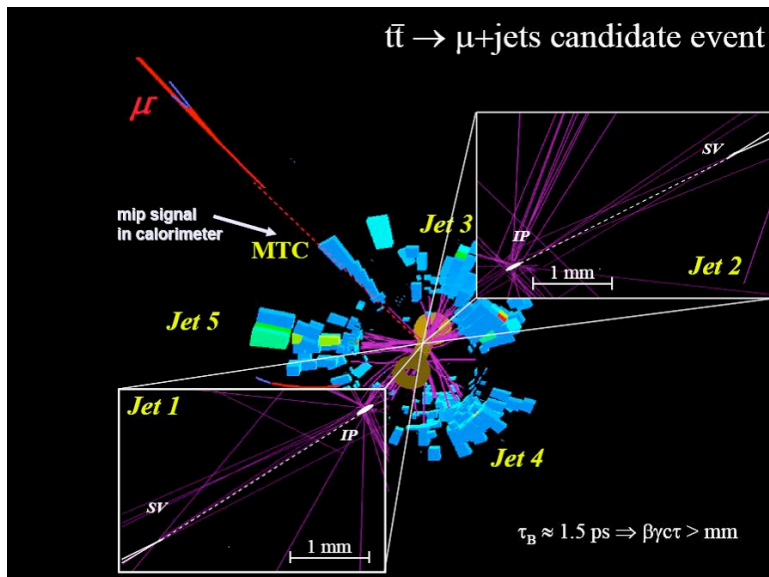
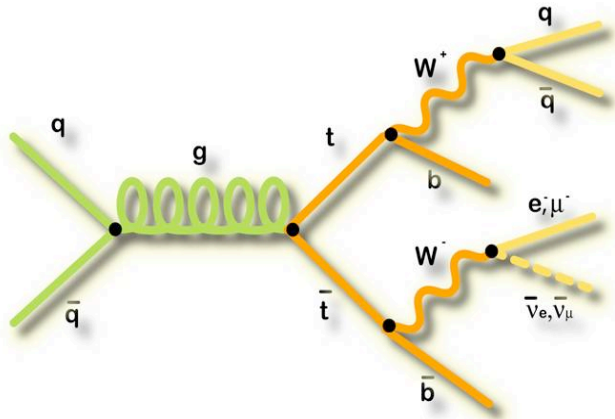
$$\tau = 1,218 \cdot 10^{-20} \text{ сек}$$

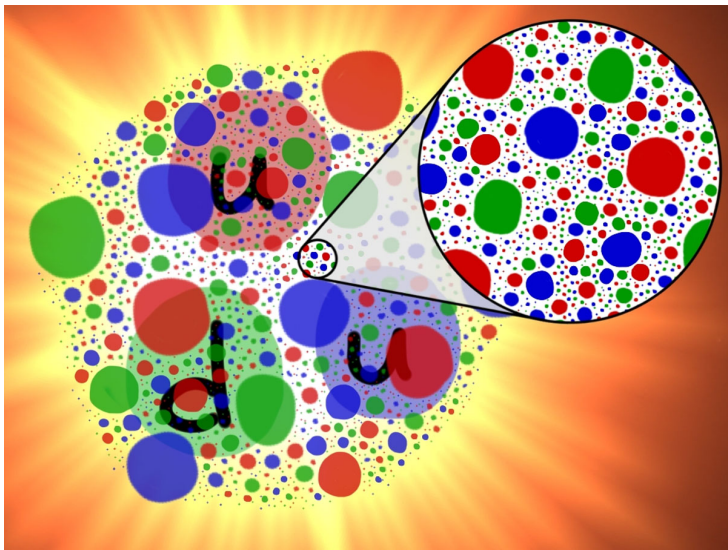
9000 событий $m_{\mu\mu} > 5 \text{ ГэВ}$
три резонанса



Третье поколение – t-кварк

Топ-кварк чуть легче ядра золота, но точечная элементарная частица до 10^{-17} см (Fermilab, 1995 г. коллаборации CDF и D0)

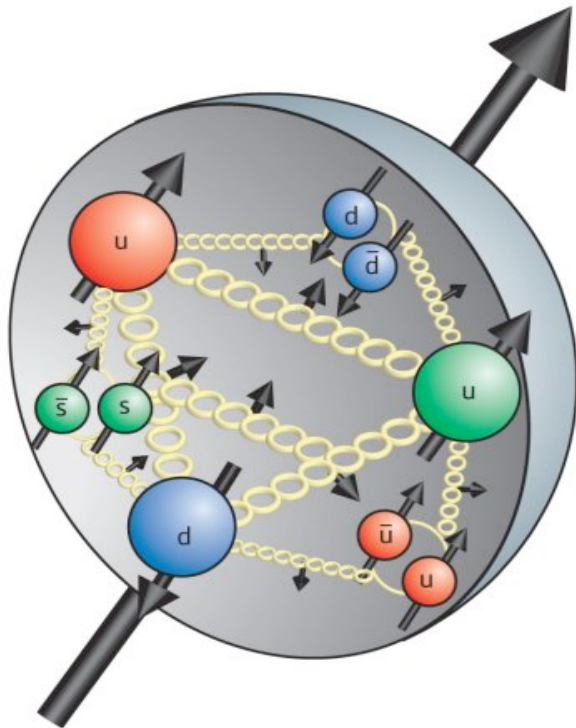




Структура протона

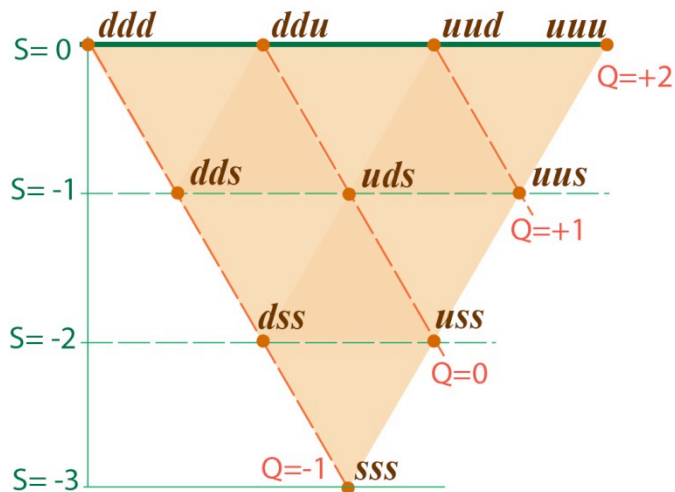
В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

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.

Сильное взаимодействие. Цвет

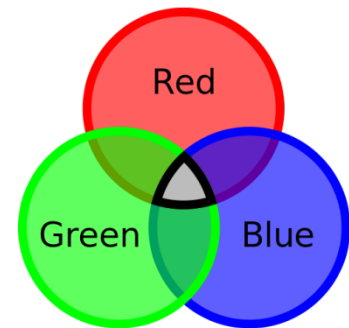


$$\vec{J} = \frac{3}{2} : \uparrow\uparrow\uparrow$$

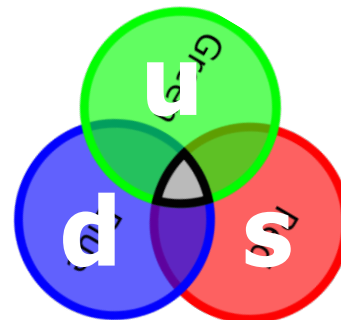
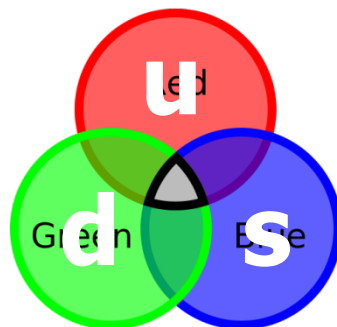
$$\Omega^- : sss$$

$$\Delta^- : ddd$$

$$\Delta^{++} : uuu$$



$\Lambda (uds)$

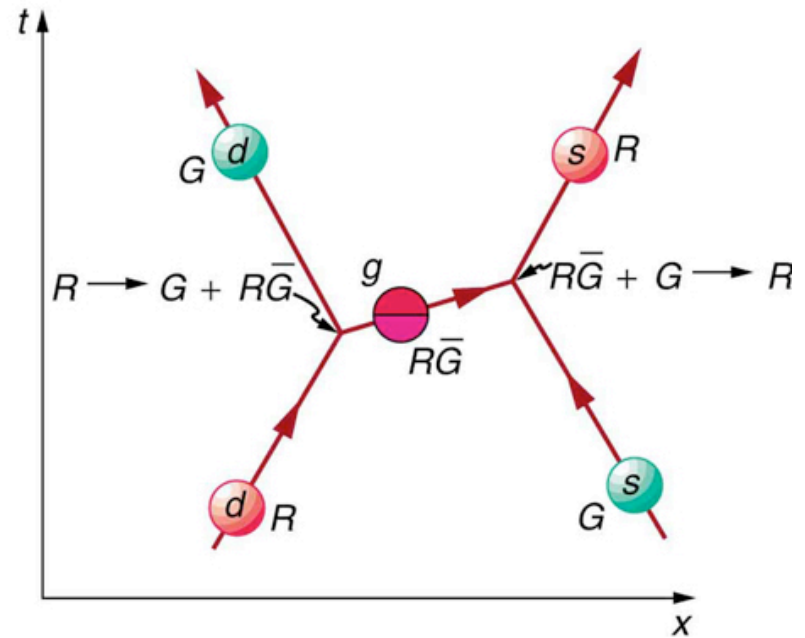


Глюоны



Color	R	G	B	R	G	B	White	
Anticolor								
	\bar{G}	\bar{R}	\bar{B}	\bar{B}	\bar{B}	\bar{G}		

$$J^P(g) = 1^-$$

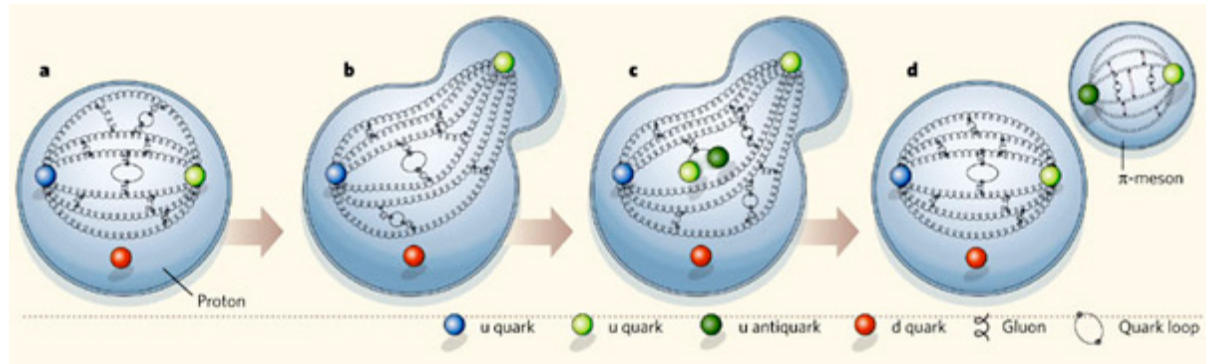
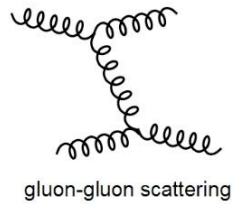
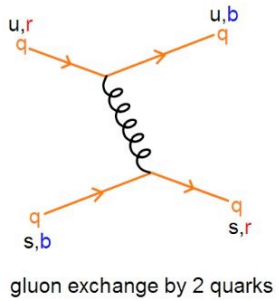


Глюоны – безмассовые электрически нейтральные частицы со спином $J = 1$, четностью $P = -1$, переносят сильное, т. е. цветное взаимодействие между кварками.

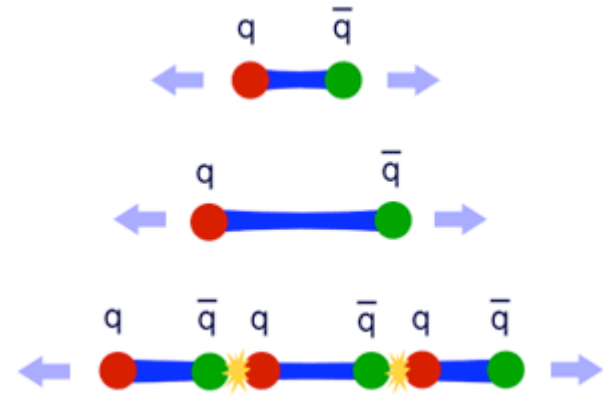
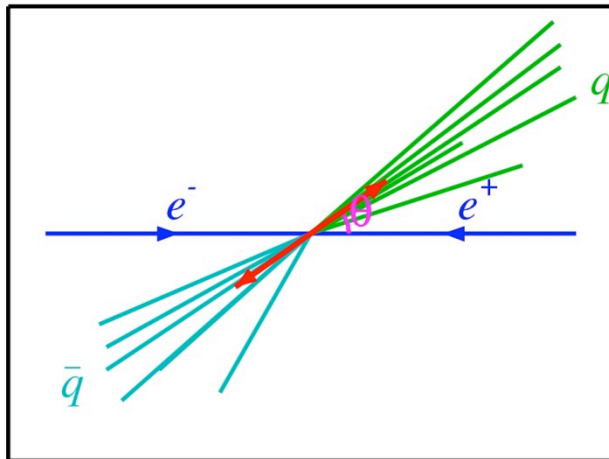
При испускании или поглощении глюона кварки изменяют цвет. При этом остальные квантовые числа кварка и его аромат не изменяются.

Глюоны сами обладают цветом. Цветовая структура глюона отличается от цветовой структуры кварка.

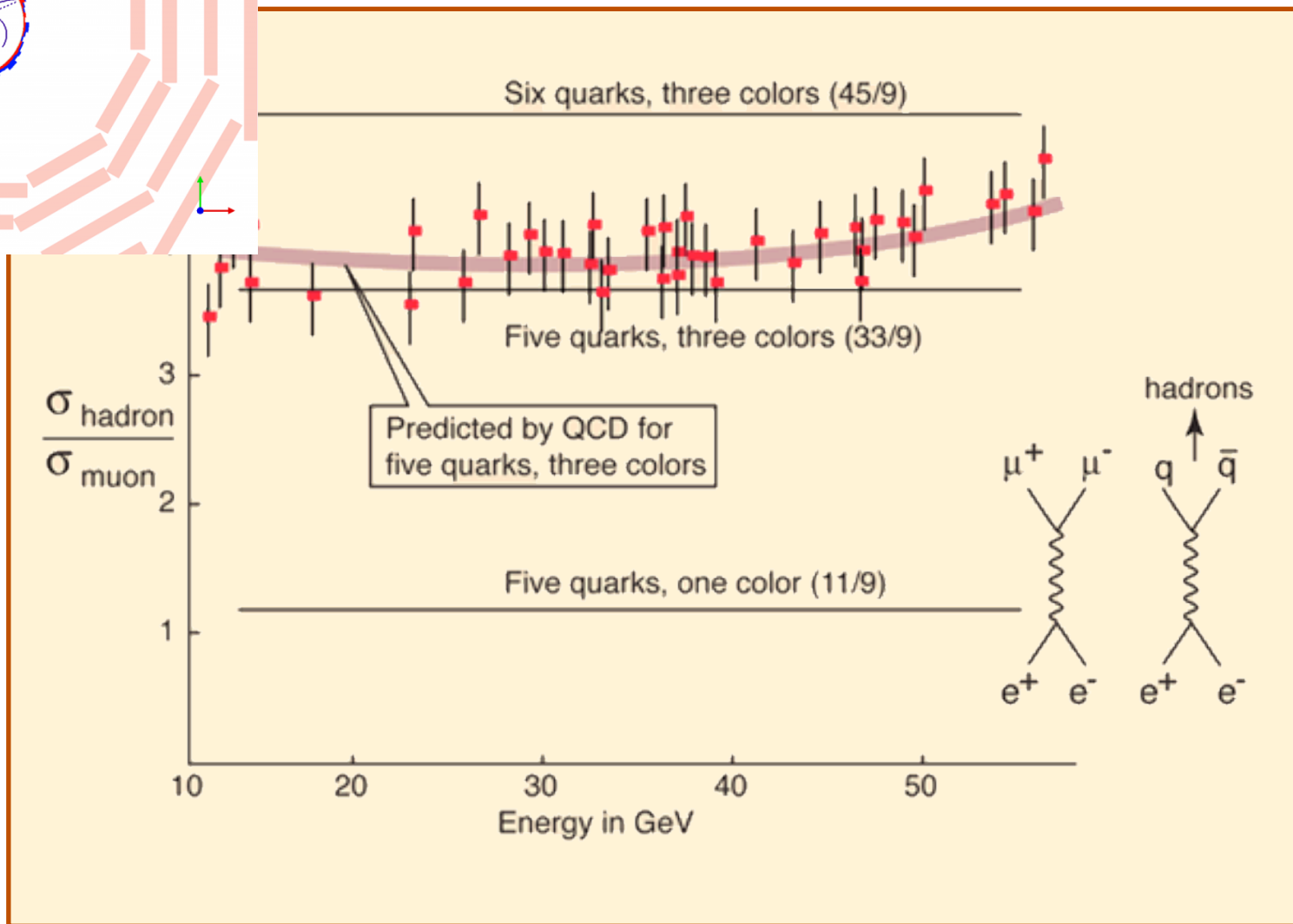
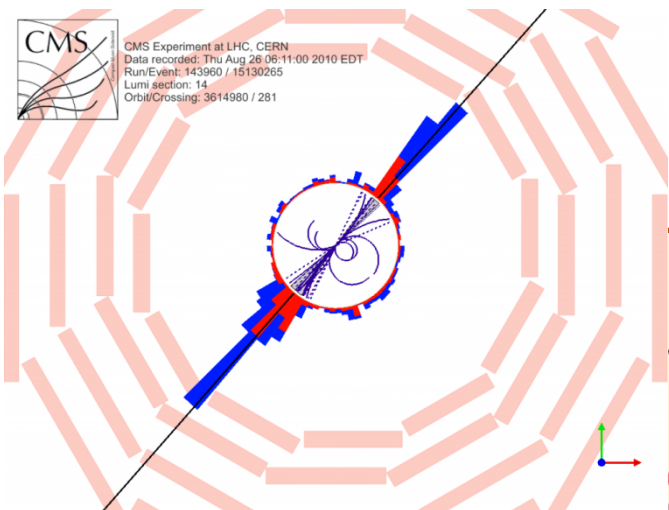
Адронизация



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

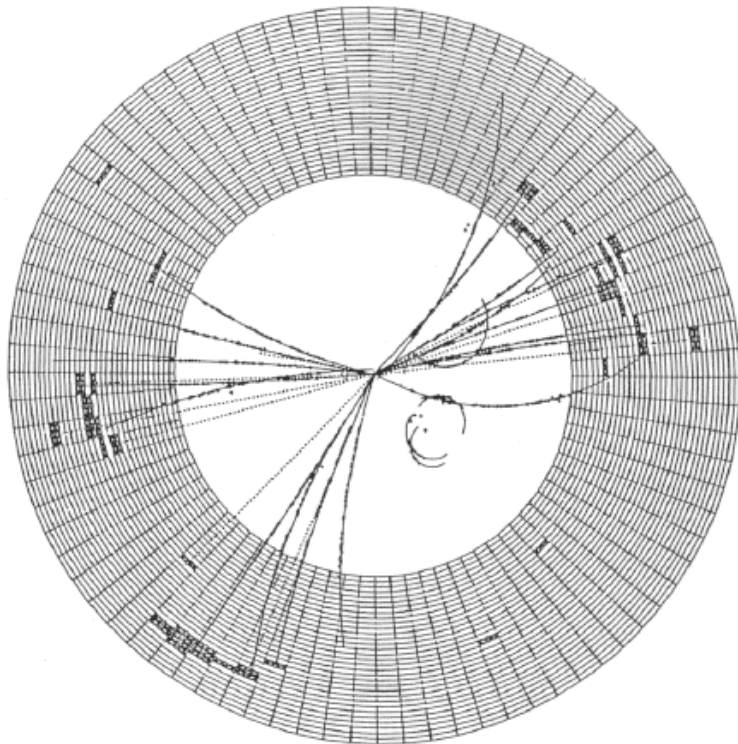


Как увидеть кварки

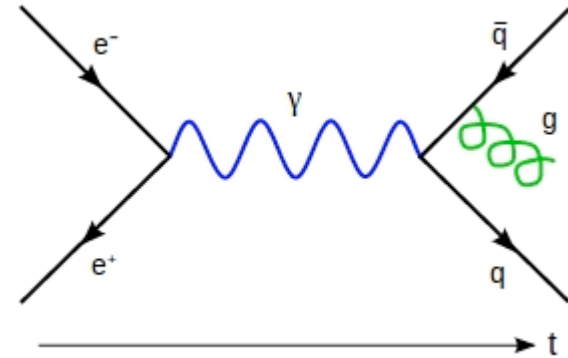


Как увидеть глюоны

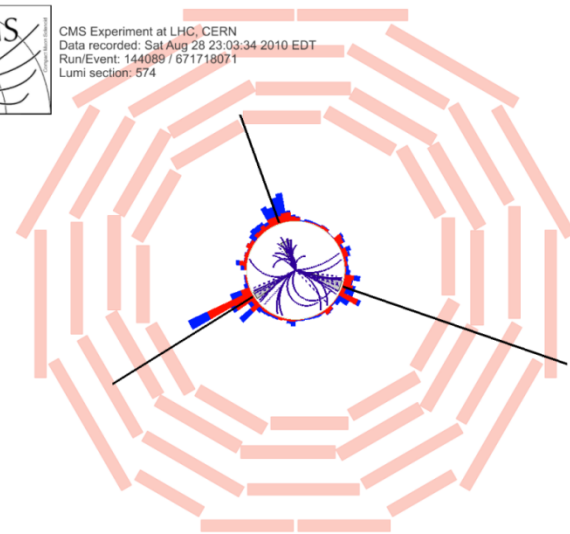
1979 г. Экспериментальное подтверждение существования глюона (DESY, Гамбург)



*** SUHS (GEV) *** PTOT 35.768 PTRANS 29.964 PLONG 15.788 CHARGE -2
TOTAL CLUSTER ENERGY 15.169 PHOTON ENERGY 4.893 NR OF PHOTONS 11



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sat Aug 28 23:03:34 2010 EDT
Run/Event: 144089 / 671718071
Lumi section: 574



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	u	0,003	+2/3
e^-	0,000511	-1	d	0,006	-1/3
ν_μ	$< 0,0002$	0	c	1,3	+2/3
μ^-	0,106	-1	s	0,1	-1/3
ν_τ	$< 0,02$	0	t	175	+2/3
τ^-	1,777	-1	b	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	$-I_3$

Взаимодействие частиц

Сезон бозонов

Фундаментальные частицы СМ

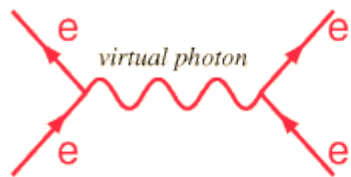
ФЕРМИОНЫ ($J=1/2$)

u	c	t
d	s	b
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

I

II

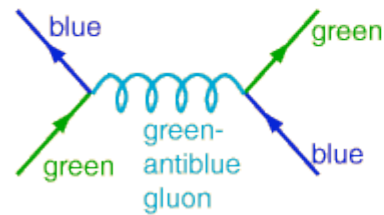
III



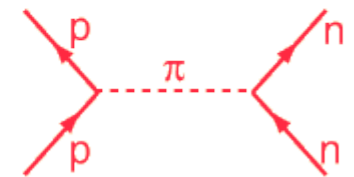
Electromagnetic



Weak



between quarks



between nucleons

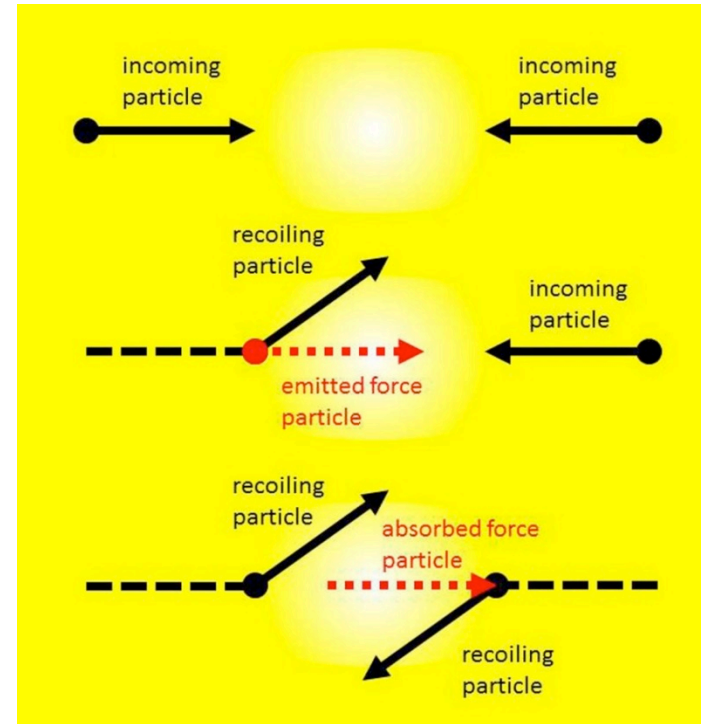
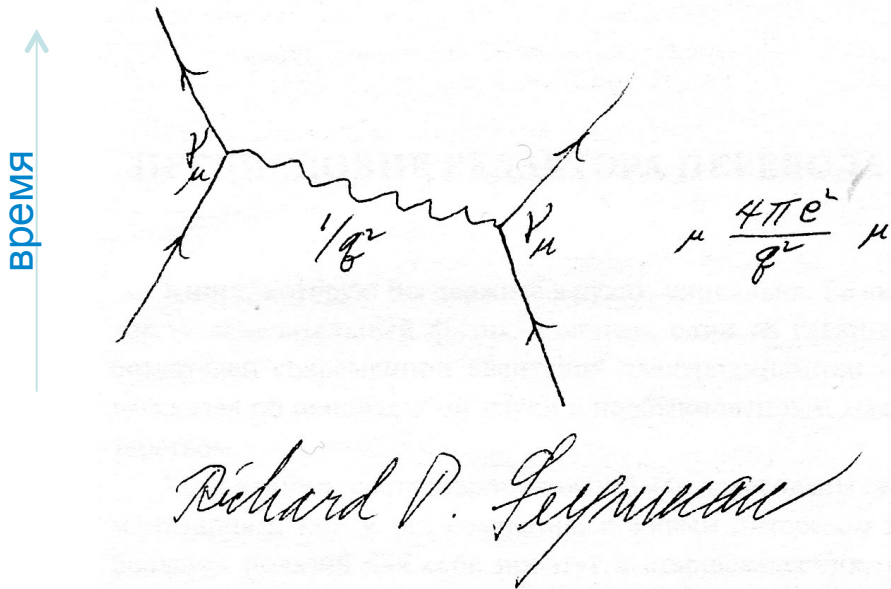
БОЗОНЫ ($J=1$)

Кварки	g	Сильное
	γ	
Лептоны	W^\pm	Слабое
	Z^0	

Strong Interaction

Взаимодействия

1949 г. С. Томонага, Р. Фейнман, Дж. Швингер
Квантовая электродинамика

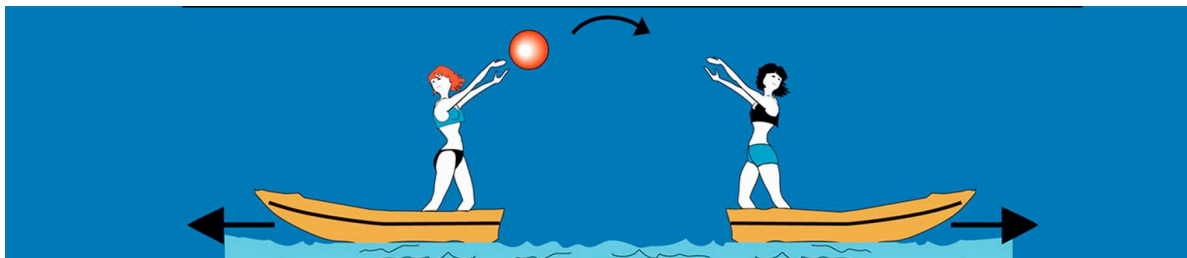


Нобелевская премия по физике

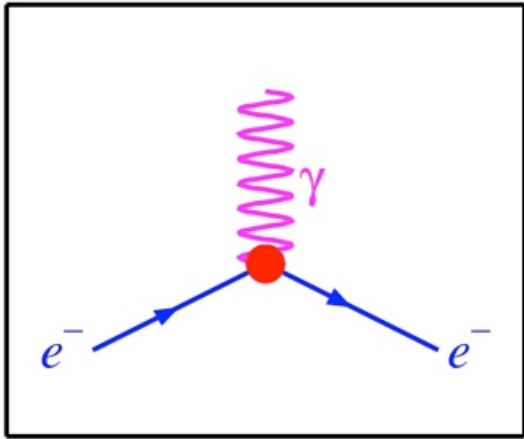
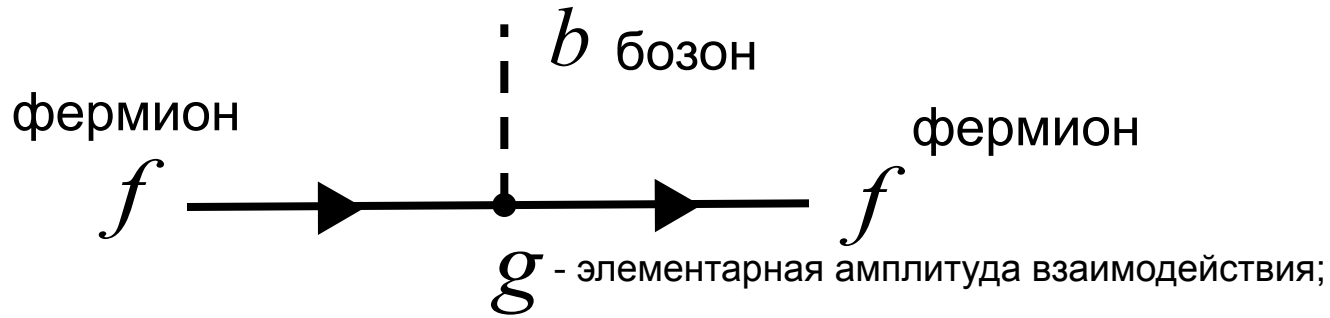
1965 г. – С.Томонага, Р.Фейнман, Дж.Швингер За фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц

Взаимодействия частиц

	Гравитация	Слабое	Электро-магнитное	Сильное	
		Электрослабое		фундаментальное	остаточное
Действует на:	М, E	Аромат	Q	color	
Частицы	Все	q, l, ν	q, l	Кварки (q)	адроны
Переносчик	Гравитон ?	W^+, W^-, Z^0	γ	глюоны	мезоны
Радиус	∞	$\sim 10^{-2}$ фм	∞	~ 1 фм	
Сила между протонами в ядре	10^{-36}	10^{-7}	1		20
Сила между кварками (10^{-2} фм)	10^{-41}	10^{-4}	1	60	

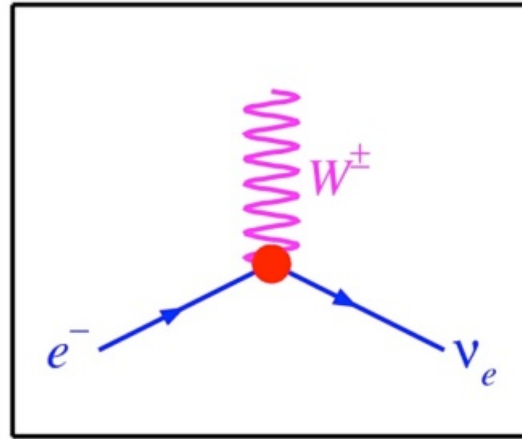


Взаимодействия частиц

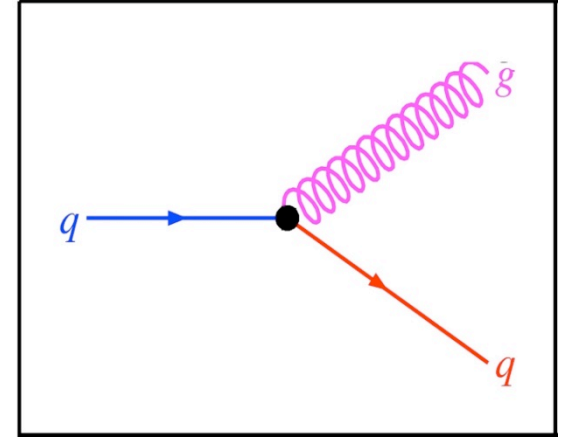


$$g_{\text{эл}} = \sqrt{\alpha_e}$$

$$\alpha_e = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}$$



$$g_w = \sqrt{\alpha_w}$$



$$g_s = \sqrt{\alpha_s}$$

Законы сохранения

Характеристика		Сильное	Электро-магнитное	Слабое
Энергия, импульс	E, p	+	+	+
Момент	J	+	+	+
Электрический заряд	Q	+	+	+
Барионный заряд	B	+	+	+
Лептонные заряды	L_e, L_μ, L_τ	+	+	+
Ароматы кварков	I_3, S, C, b, t	+	+	-
Четность				
Пространственная	P	+	+	-
Зарядовая	C	+	+	-
Временная	T	+	+	-
Комбинированная	CP	+	+	-
	CPT	+	+	+

Теорема Нетер

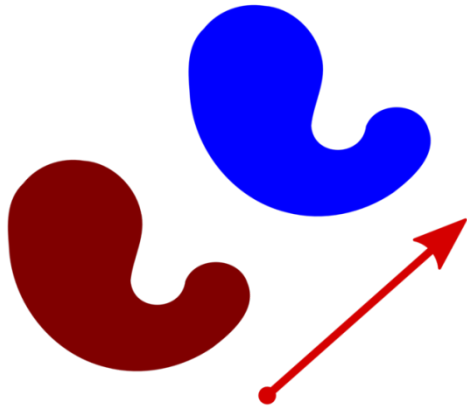


Каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует некоторый закон сохранения

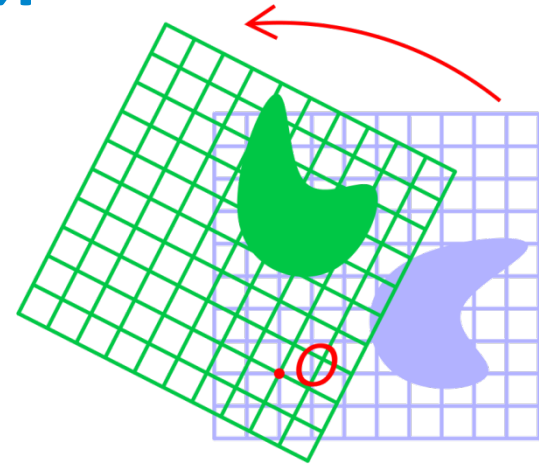
Эмми Нётер, 1918 год

Симме́трия (др.-греч. *συμμετρία* «соразмерность», от *μετρέω* — «меряю»), в широком смысле — соответствие, неизменность (инвариантность), проявляемые при каких-либо изменениях, преобразованиях (например: положения, энергии, другого)

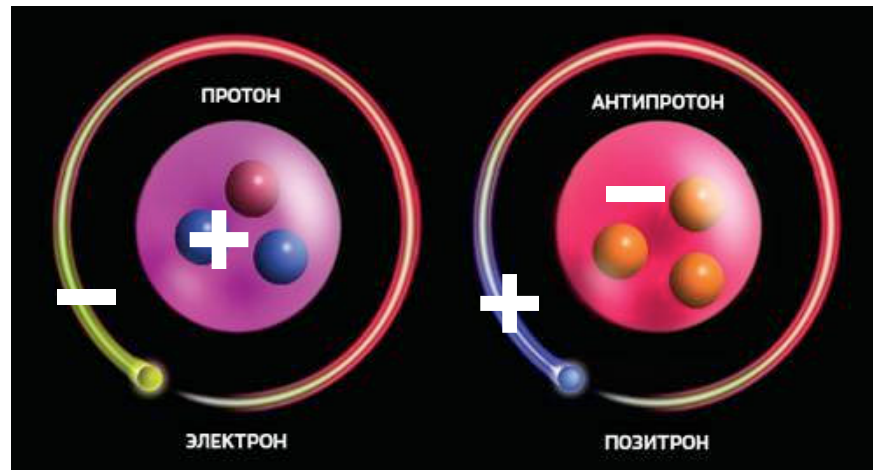
Симметрии



Перенос (однородность пространства и времени)
закон сохранения энергии E ,
импульса p

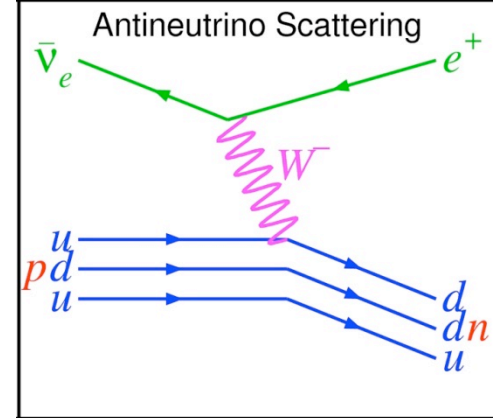
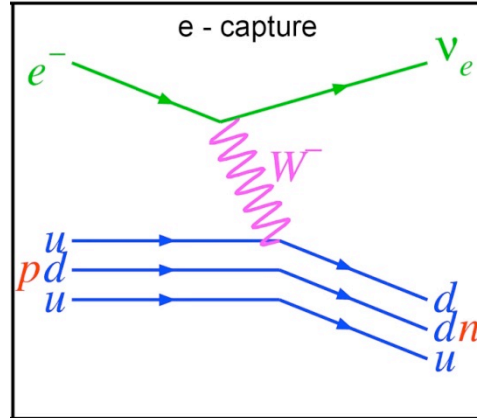
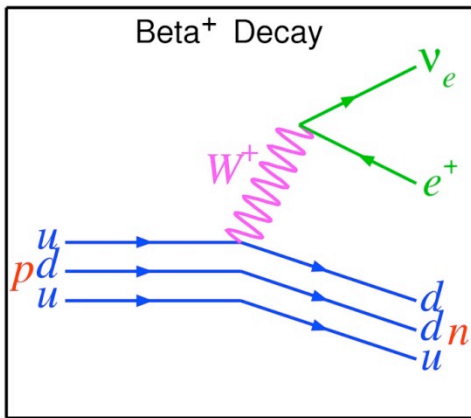
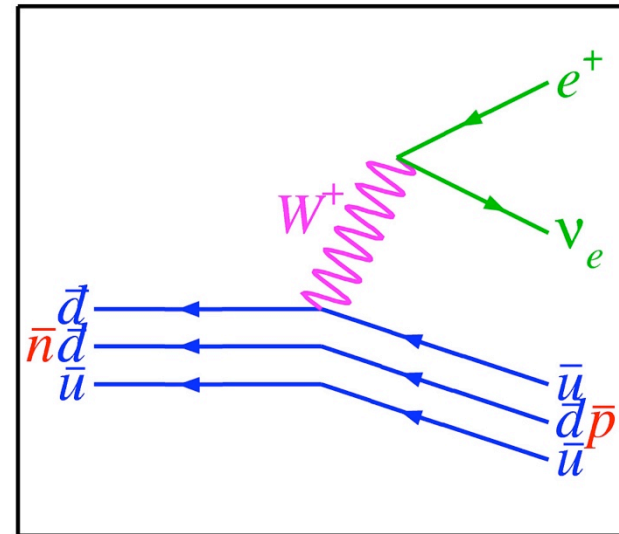
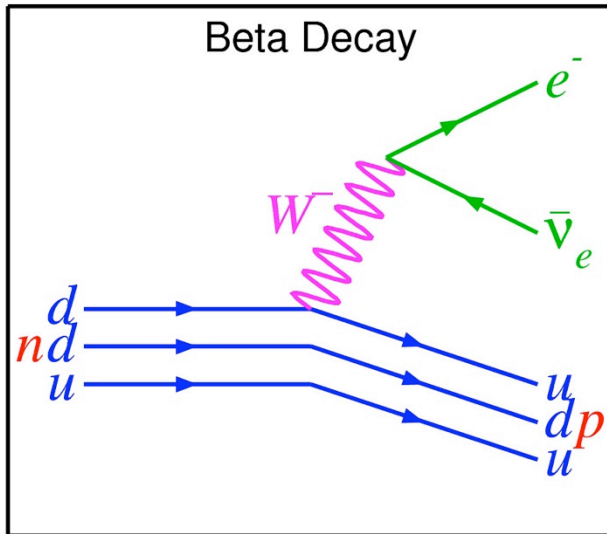


Поворот (изотропность пространства)
закон сохранения момента
импульса J

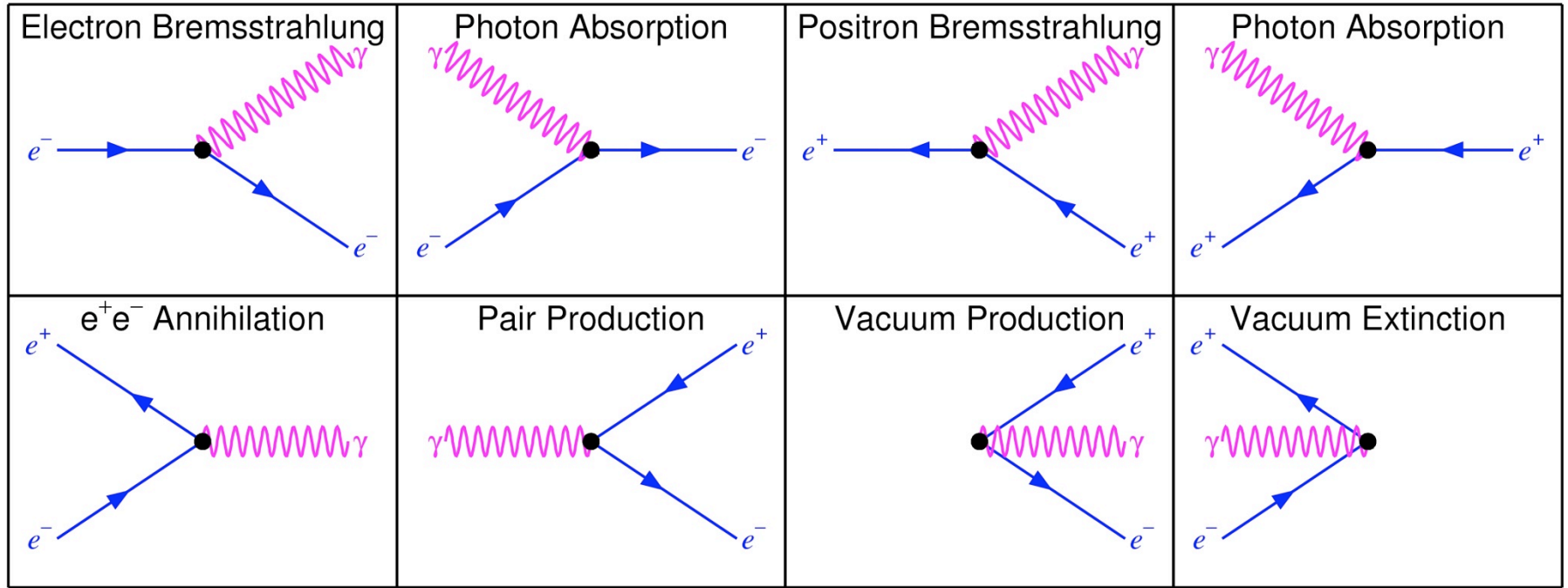


Зарядовая симметрия

Диаграммы Фейнмана



Электромагнитное взаимодействие



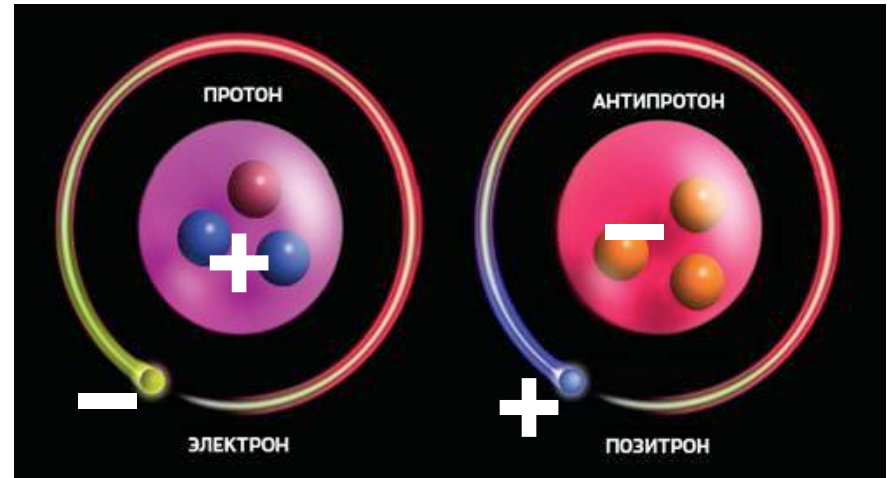
→ Time

$$\alpha_e = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137}$$

Зарядовое сопряжение (C - четность)

$$Q, B, L_l, I_3, s, c, b, t \xrightarrow{C} -Q, -B, -L_l, -I_3, -s, -c, -b, -t$$

$$A \xrightarrow{C} \bar{A}$$



$$A = \bar{A}$$

$$e^+ e^-, q\bar{q} (\pi^0, J/\psi, \Upsilon \text{ и тд})$$

$$\mathbf{n} \neq \bar{\mathbf{n}}, \quad \mathbf{\nu} \neq \bar{\mathbf{\nu}}$$

Обращение времени (T – четность)

$$t \xrightarrow{T} -t$$

$$(a + b \rightarrow c + d) \xrightarrow{T} (c + d \rightarrow a + b)$$

С точностью 10^{-3} вероятности прямых и обратных реакций совпадают

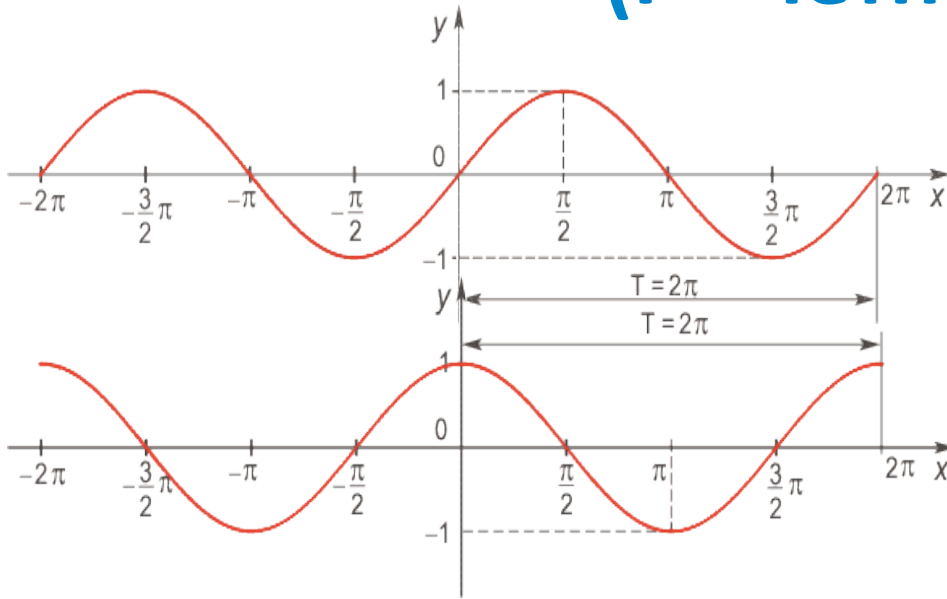
Уравнения классической физики (Ньютона и Максвелла)
T-инвариантны

CPT - теорема

1954 г. Г. Людерс, В. Паули
Доказательство CPT-теоремы

Наш мир и мир, являющийся его зеркальным отражением
с заменой всех частиц на античастицы
и движением всех объектов в обратном направлении
идентичны

Пространственная инверсия (P - четность)



$$\hat{P}(f(x)) = f(-x) = -f(x)$$

$$P = -1$$

$$\hat{P}(f(x)) = f(-x) = f(x)$$

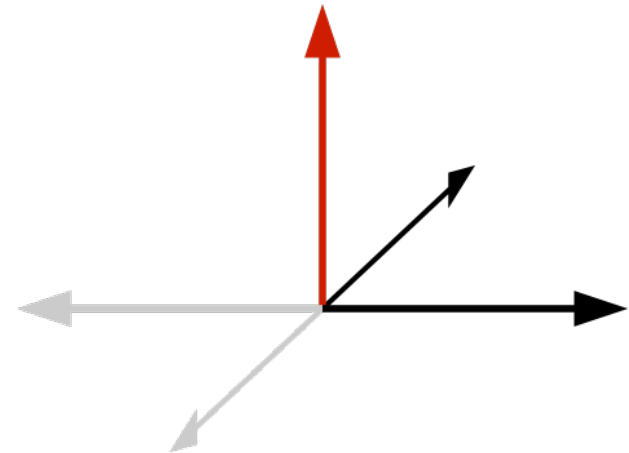
$$P = +1$$

V – полярный вектор:

$$\vec{x}, \vec{p}: \hat{P}(\vec{V}) = -\vec{V}$$

A – аксиальный вектор:

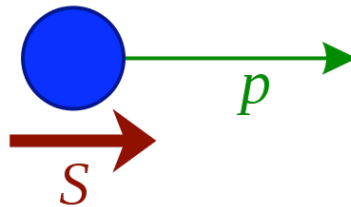
$$\vec{J} = [\vec{x} \times \vec{p}]: \hat{P}(\vec{A}) = \vec{A}$$



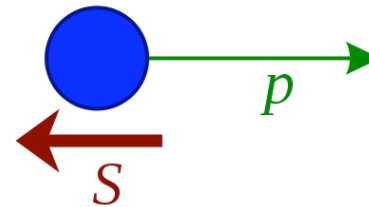
Киральная симметрия



$$h = \frac{\vec{S}\vec{p}}{|\vec{S}\vec{p}|}$$



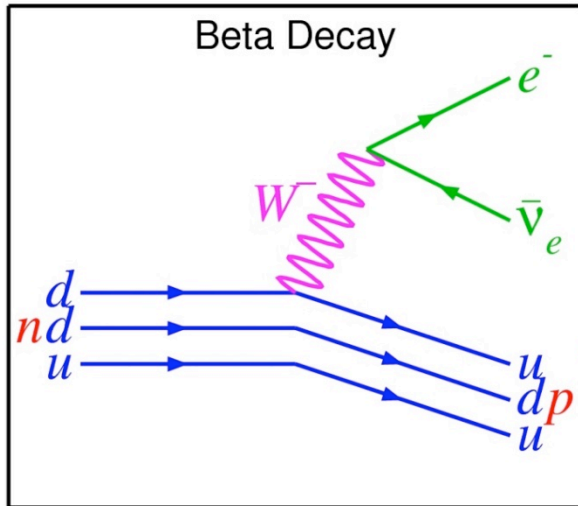
антинейтрино $\bar{\nu} =$
ПРАВЫЕ



нейтрино $\nu =$
ЛЕВЫЕ

Нарушение P - четности

1956 г. Т. Д. Ли, Ч. Н. Янг Нарушение P-четности в слабом взаимодействии



Вейль

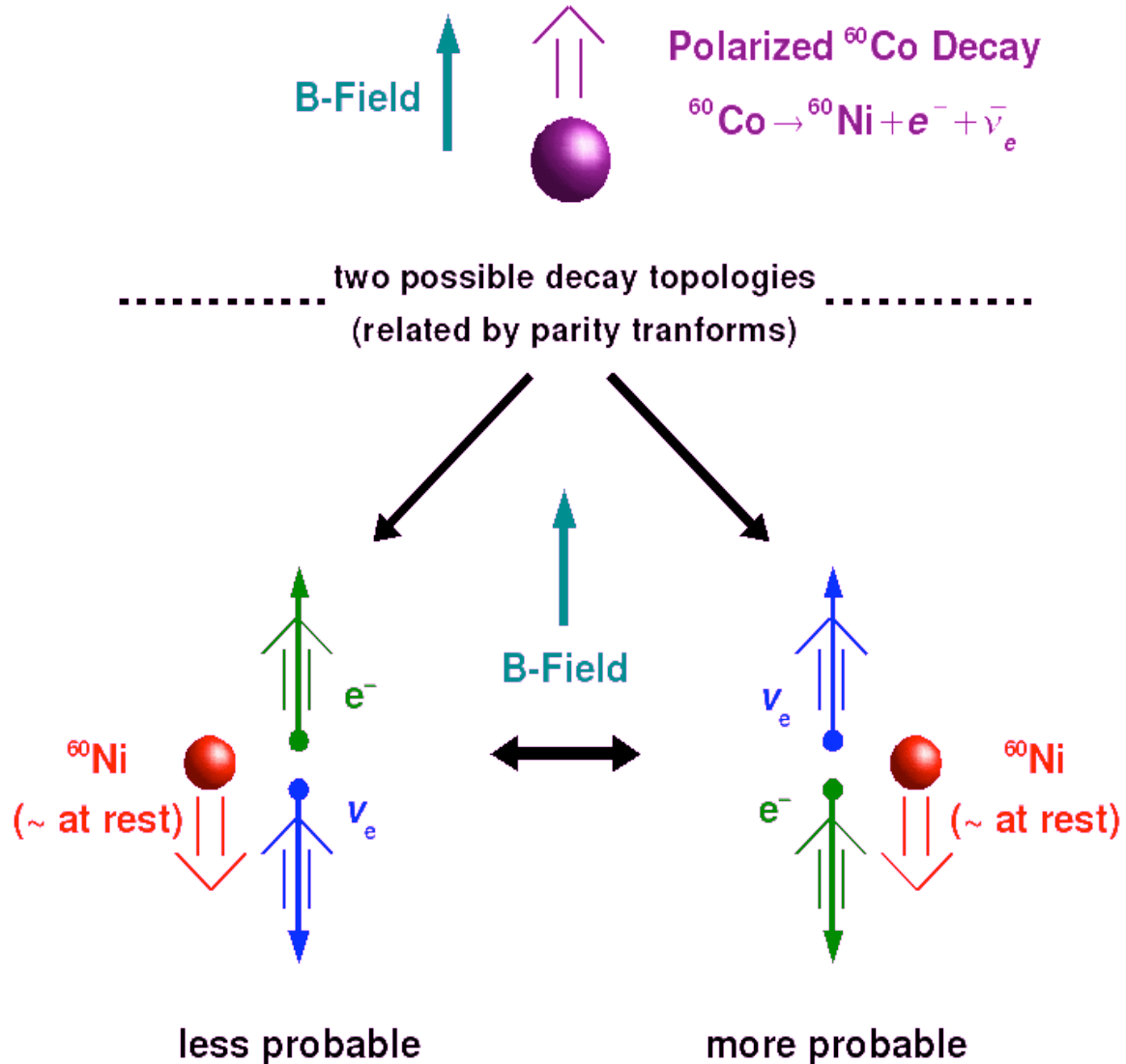
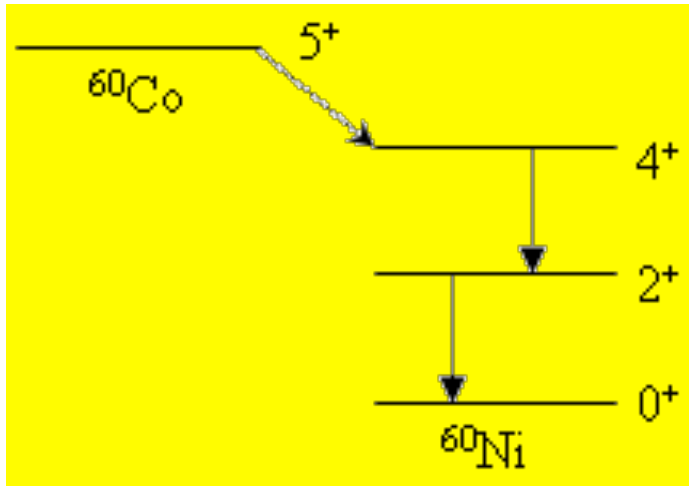


Нобелевская премия по физике

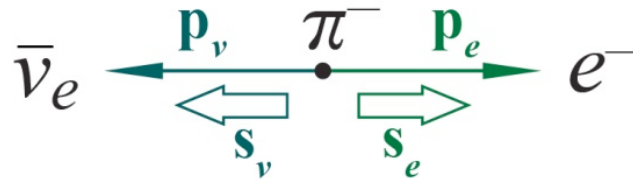
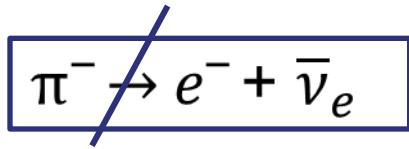
1957 г. – Ли, Янг За проницательное исследование так называемых законов чётности, которое привело к важным открытиям в физике элементарных частиц

Нарушение P - четности

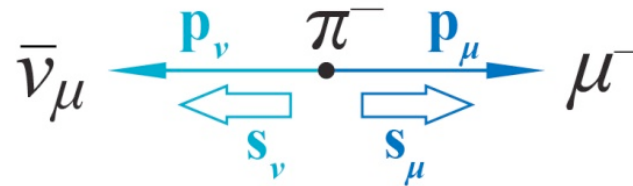
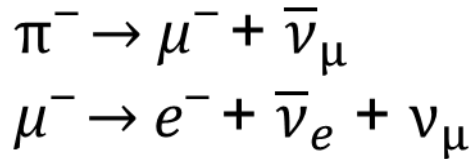
1957 г. Ву, Амблер,
Хайард, Хоппес, Хадсон.
Экспериментальное
подтверждение
нарушения P-четности



Распад пиона



$$T_e \approx 70 \text{ МэВ} \gg m_e$$

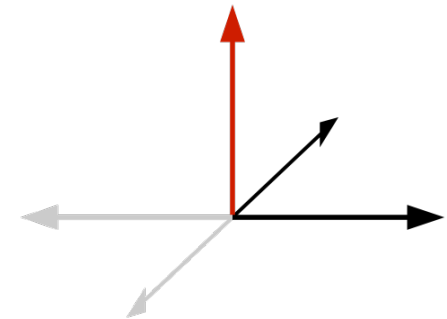


$$T_\mu \approx 4 \text{ МэВ} \ll m_\mu$$

1956 г. Р. Фейнман, М. Гелл-Манн, Р. Маршак, Дж. Сударшан
Теория слабого взаимодействия (V-A теория)

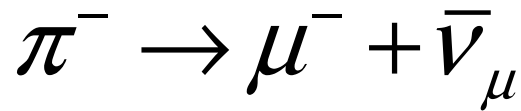
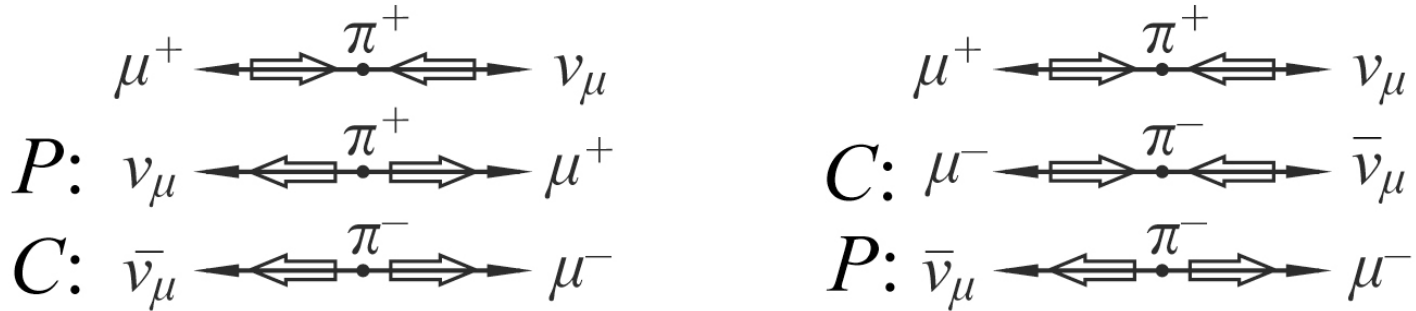
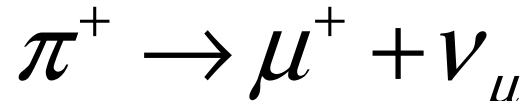
$$\psi = \psi_L + \psi_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$



CP - симметрия

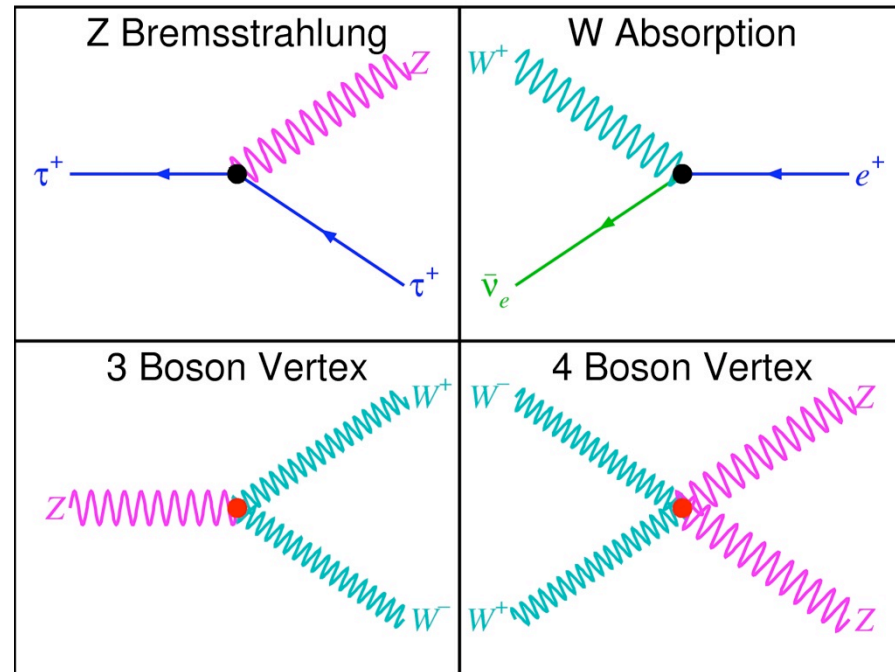
1957 г. Л. Ландау Сохранение CP-четности



1964 г. Д. Кронин, В. Фитч Экспериментальное обнаружение нарушения CP-четности в распадах K-мезонов

Электрослабое взаимодействие

	Слабое	Электро-магнитное
Действует на:	Аромат	Q
Частицы	q, l, ν	q, l
Переносчик	W^+, W^-, Z^0	γ
Радиус	$\sim 10^{-2}$ фм	∞
Симметрия	$SU(2)_L$	$U(1)$
Нарушение	P, C, CP	



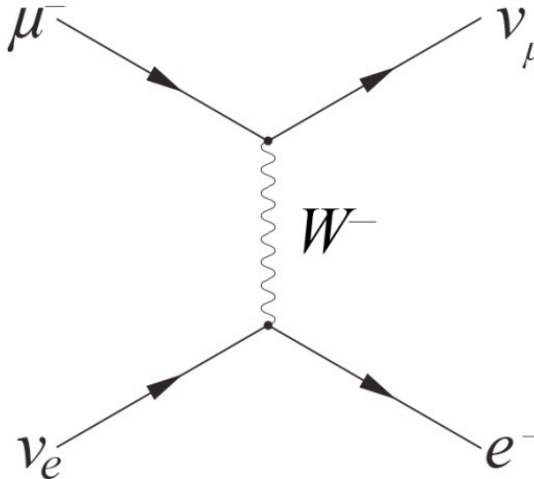
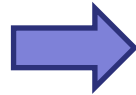
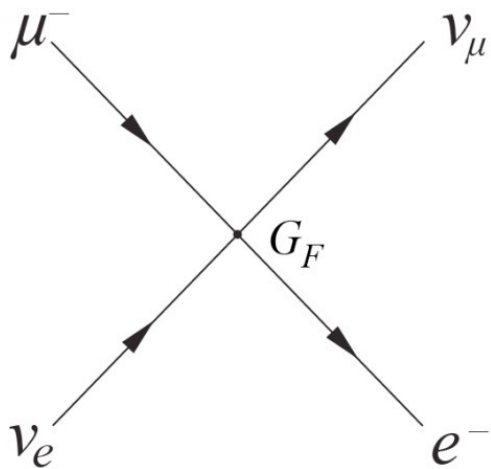
Радиус взаимодействия

$$r_{weak} \sim \frac{\hbar c}{M_W c^2} \sim 10^{-2} \text{ Фм}$$

Взаимодействия

1967 г. С. Вайнберг, А. Салам, Ш. Глэшоу

Теория электрослабого взаимодействия

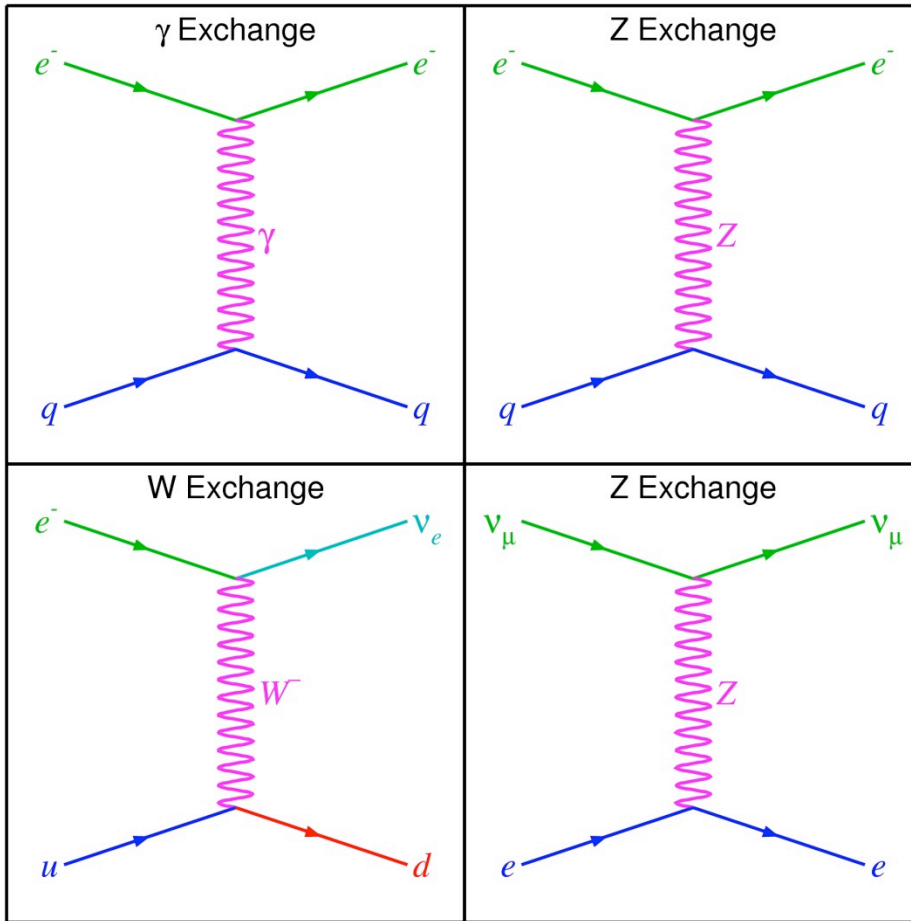


W^+, W^-, Z^0

$$G_F = \frac{\sqrt{2}g^2}{8M_W^2}$$

$$g \sin \theta_W = \sqrt{4\pi\alpha}$$

$$\alpha = \frac{1}{137}$$



$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_W$$

$$\sin^2 \theta_W = 0.232$$

(из экспериментов)

$$M_W \approx 80 \text{ ГэВ}$$

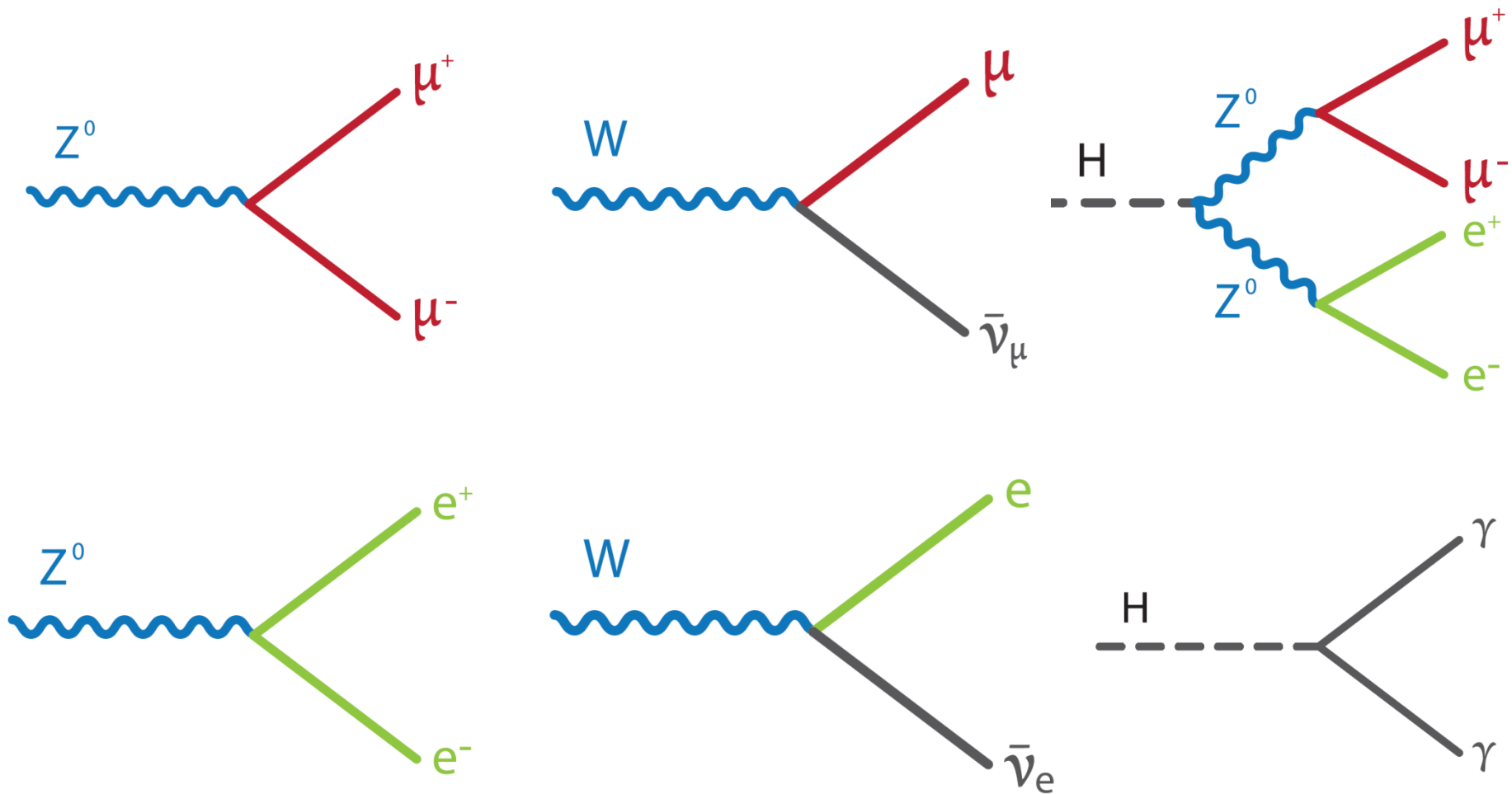
$$M_Z \approx 90 \text{ ГэВ}$$



Нобелевская премия по физике

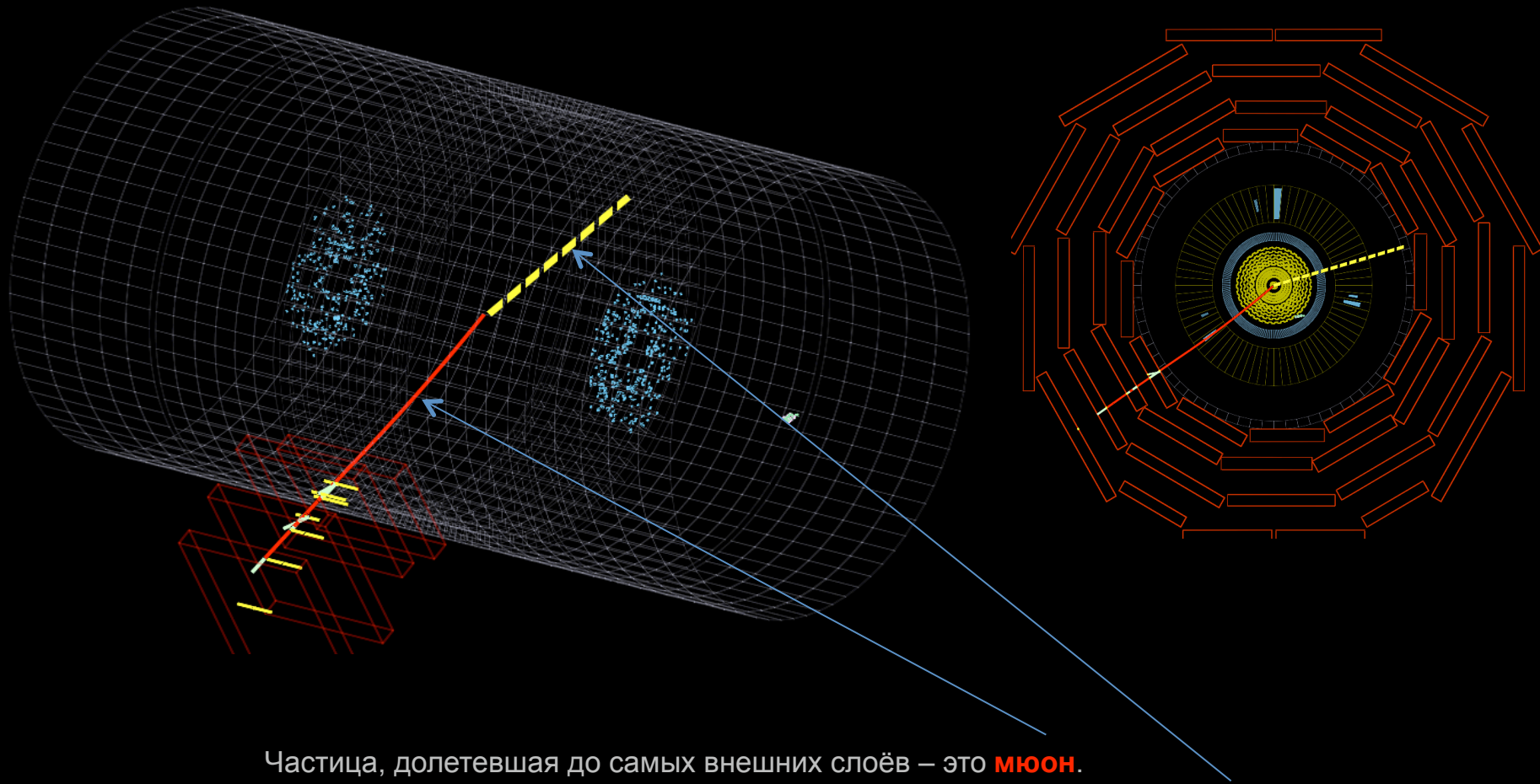
1979 г. – С. Вайнберг, А. Салам, Ш. Глэшоу, За вклад в объединённую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий между элементарными частицами, в том числе предсказание слабых нейтральных токов

Как увидеть короткоживущие W, Z и H бозоны



Распады Z, W и Хиггс-бозонов

W-бозон

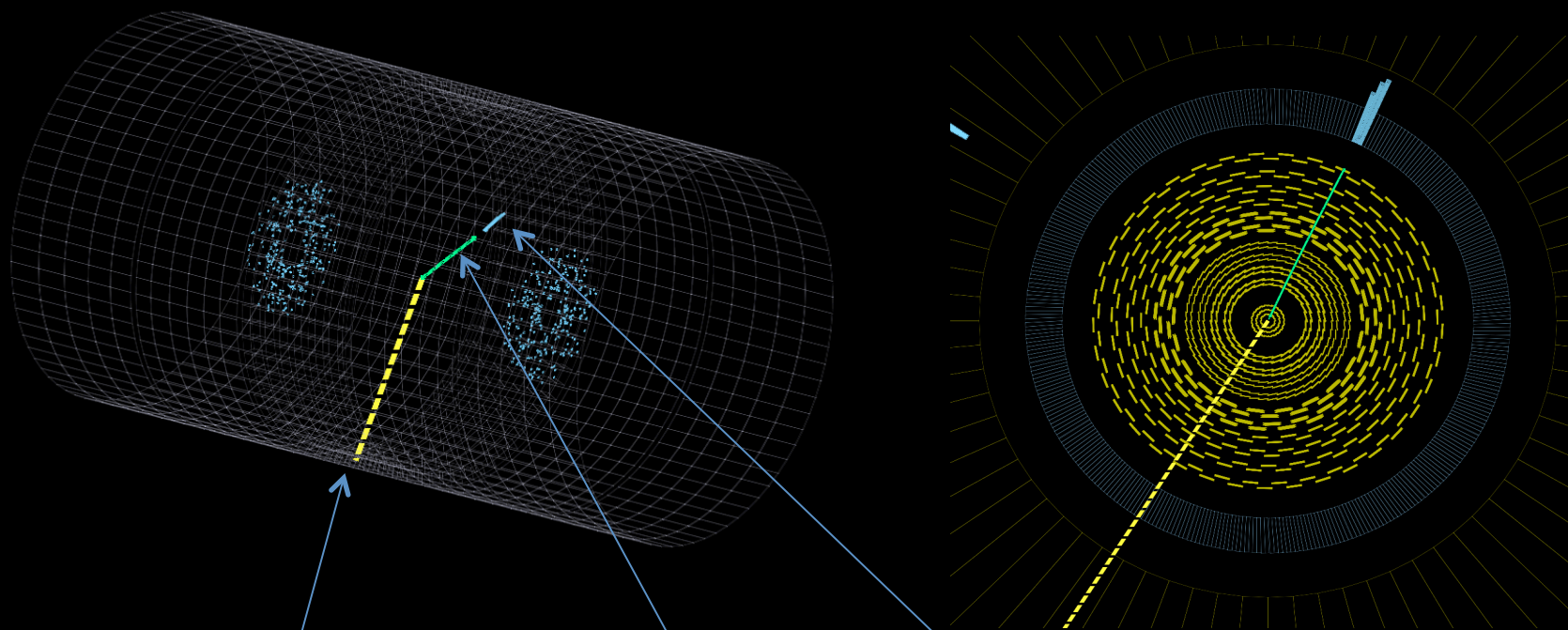


Частица, долетевшая до самых внешних слоёв – это **мюон**.

Недостающая энергия – считаем что это **нейтрино**.

Нейтрино и мюон – это, возможно, распад **W-бозона**.

W-бозон

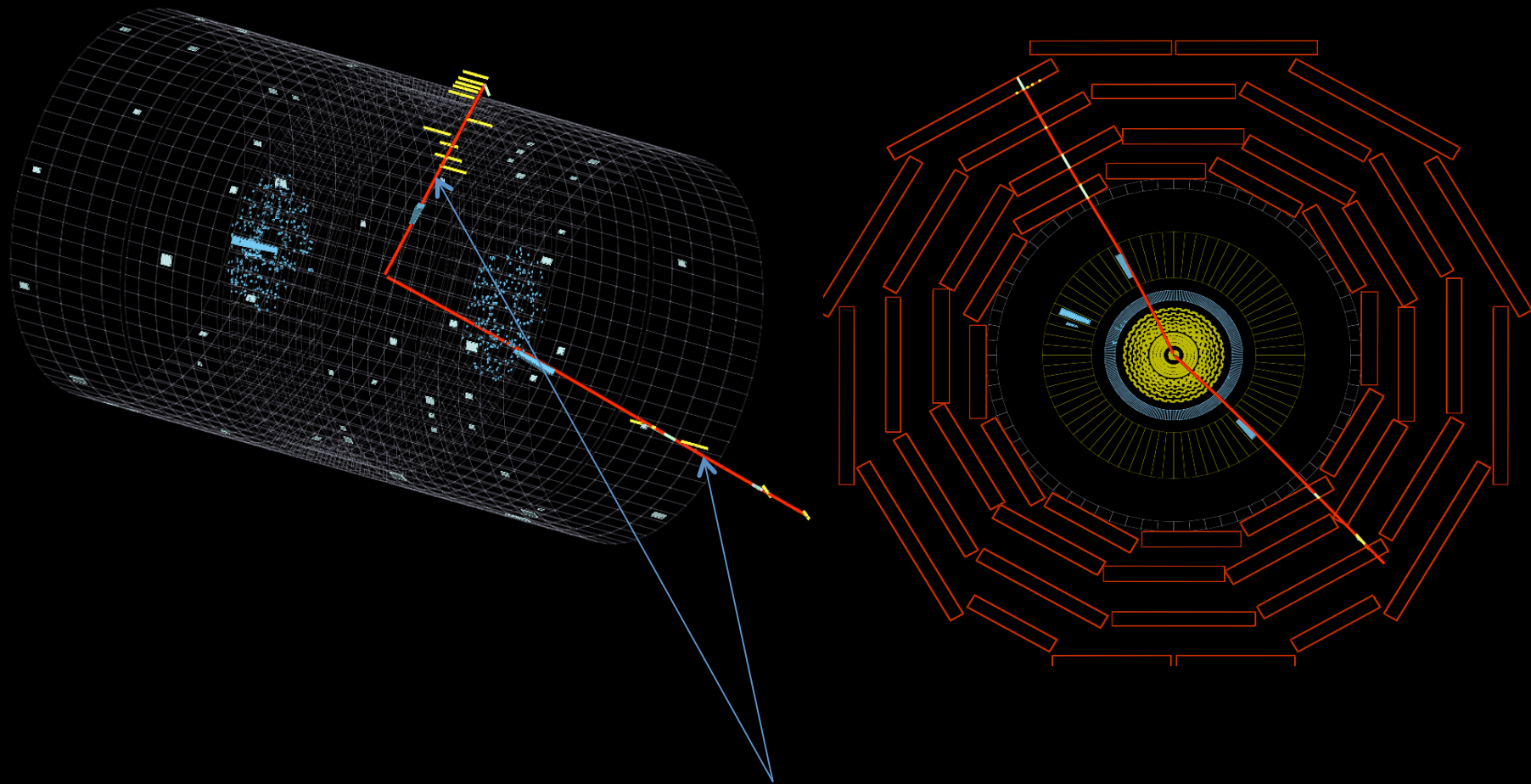


Частица, со **следом в трекаре** и застрявшая в **калориметре** – это электрон

Недостающая энергия – считаем что это **нейтрино**

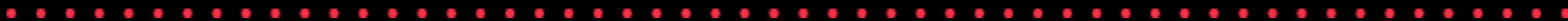
Нейтрино и электрон – это, возможно, распад **W-бозона**.

Z-бозон

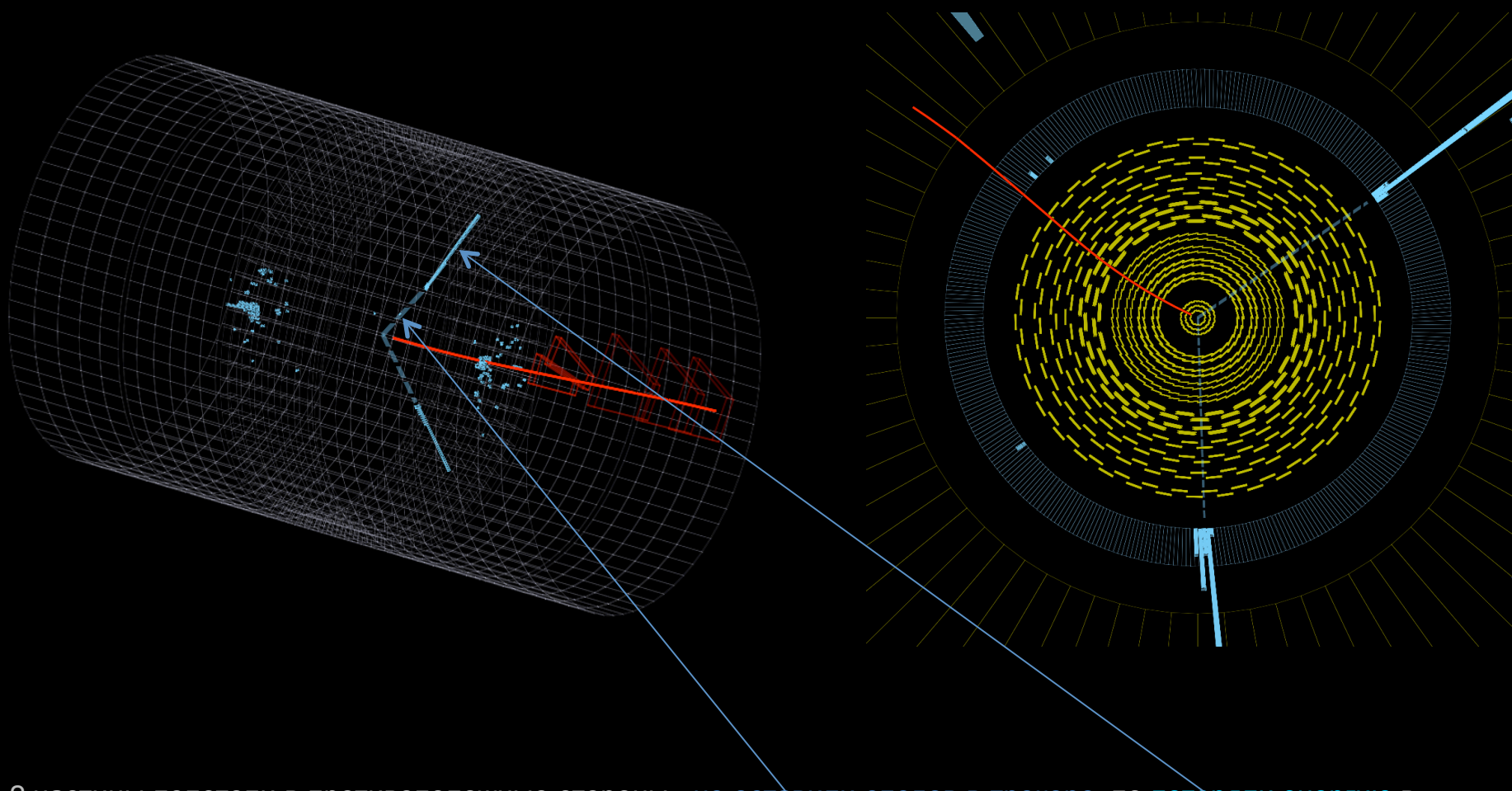


Частицы, долетевшая до самых внешних слоёв – это **мюоны**

Пара мюонов – это, возможно, распад **Z-бозона**



Бозон Хиггса (2 фотона)



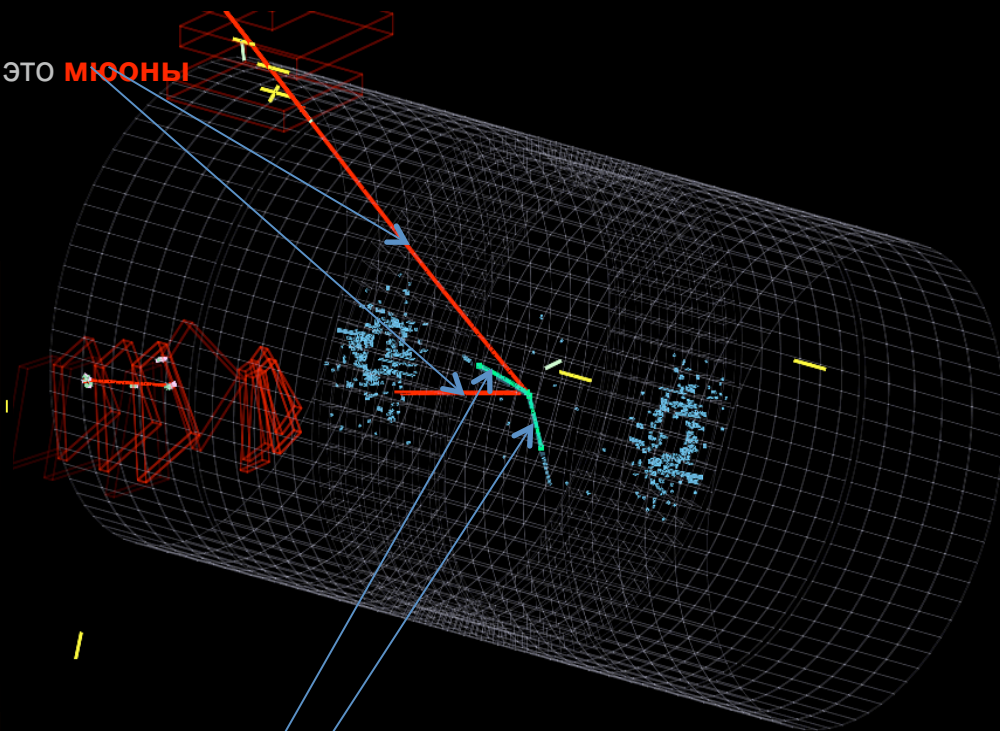
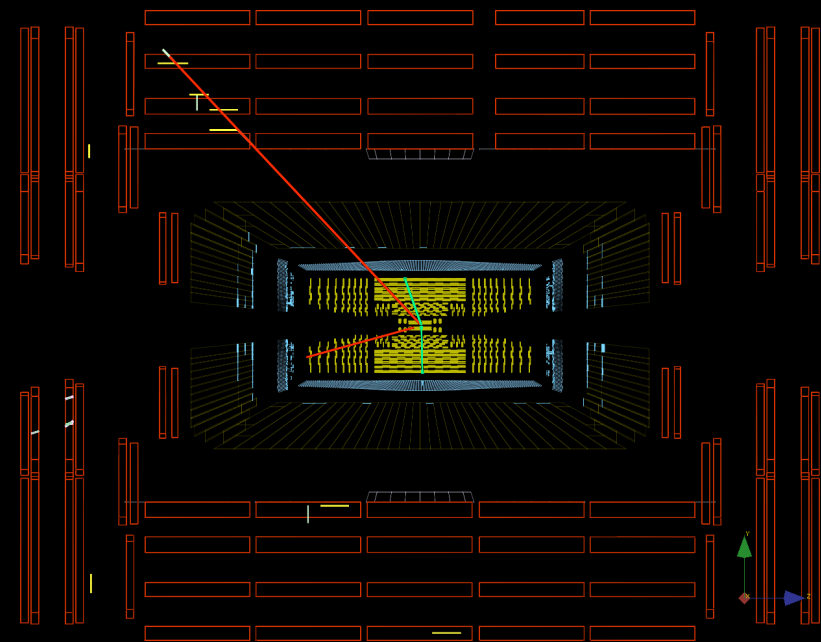
2 частицы полетели в противоположные стороны, не оставили следов в трекаре, по потеряли энергию в электромагнитном калориметре, скорее всего это фотоны. 2 фотона – это, возможно, распад бозона Хиггса.

В этом событии есть ещё мюон, но раз мы нашли там пару фотонов, на мюон можно не обращать внимание

Бозон Хиггса (2 Z)

Частицы, долетевшая до самых внешних слоёв – это **мюоны**

Пара мюонов – это, возможно, распад **Z-бозона**

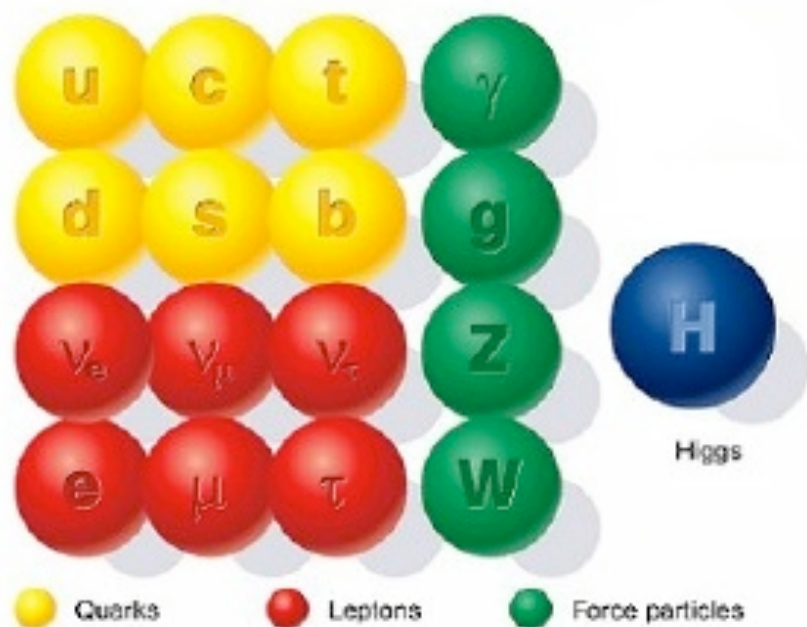


Частицы, которые оставили след только в трекаре – это, скорее всего, **электроны**

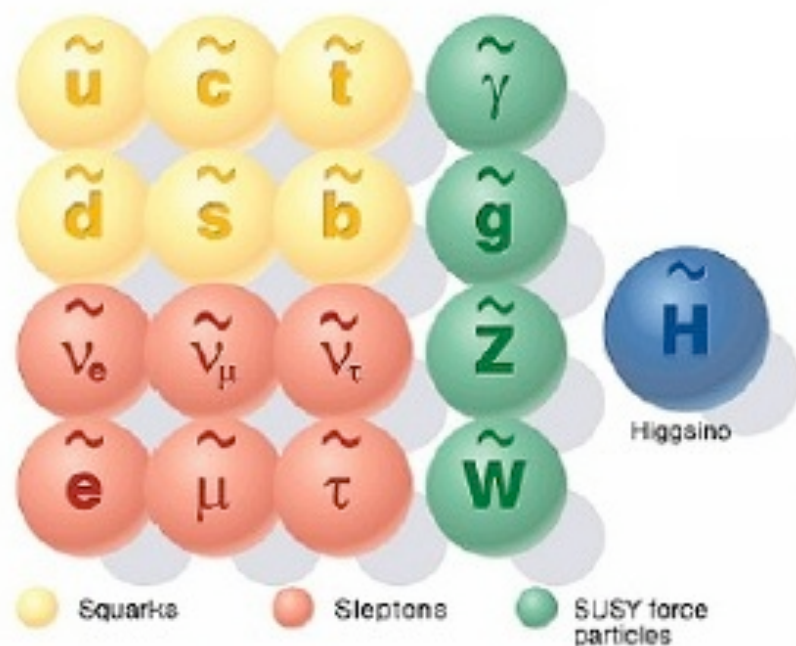
Пара электронов – это, возможно, распад **Z-бозона**

Два распада **Z-бозона** в одном событии – возможно, это **Z-бозоны** из распада **бозона Хиггса**

SUPERSYMMETRY



Standard particles



SUSY particles



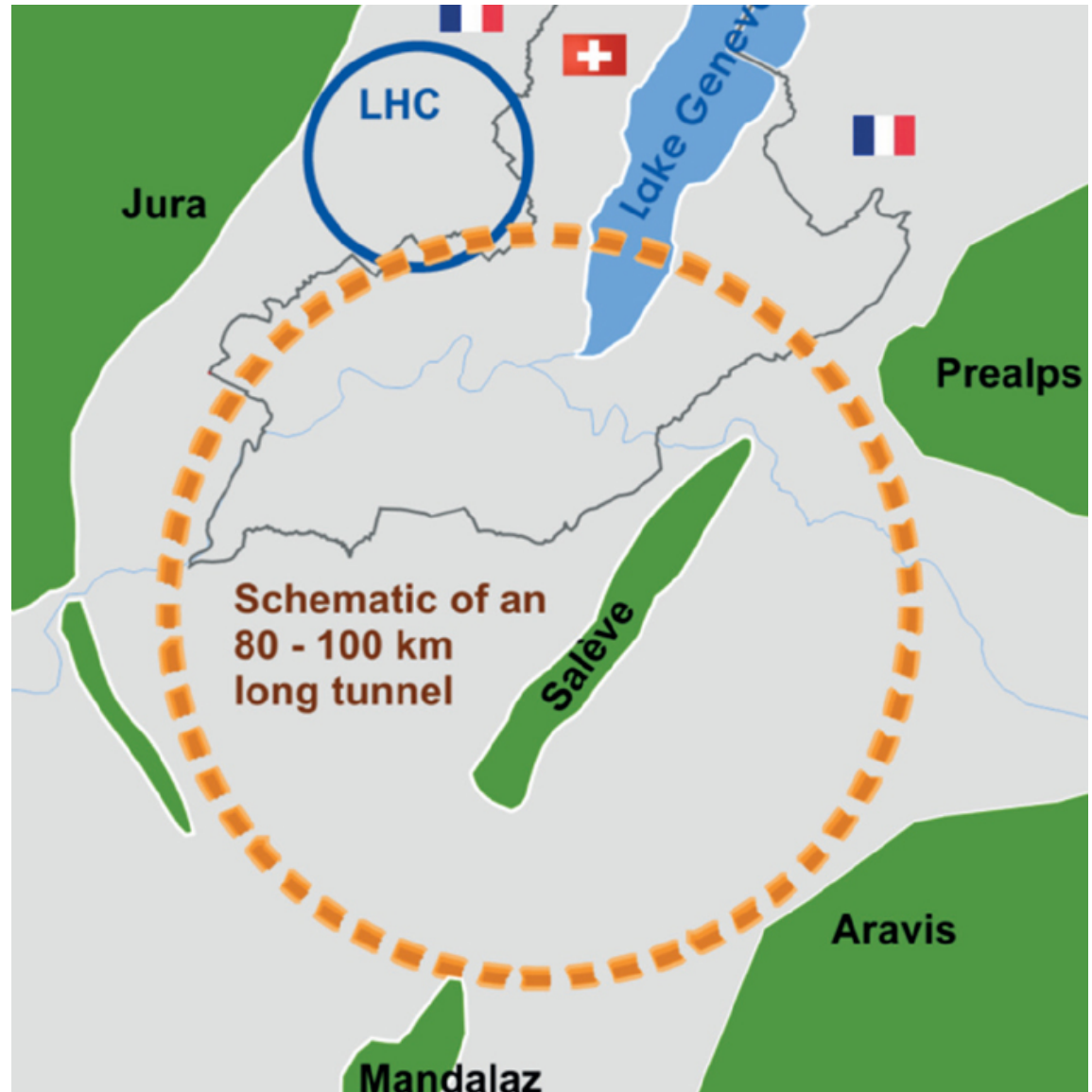
Future Circular Collider

Длина туннеля 80 – 100 км

Энергия столкновения:

pp 100 TeV

e^+e^- 90 – 350 GeV



LHC (LEP)

Длина туннеля 27 км

Энергия столкновения:

pp 14 TeV (LHC)

e^+e^- 209 GeV (LEP)