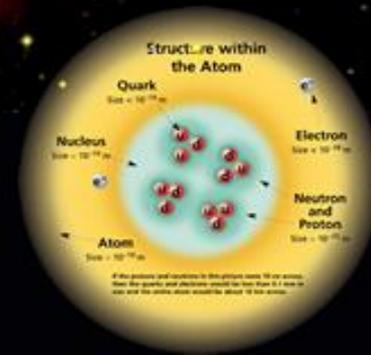




Микромир и Вселенная



Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

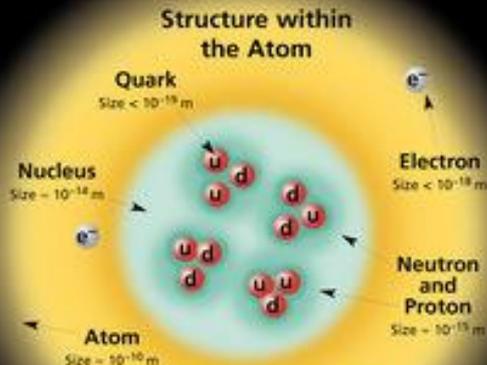
Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and **W** and **Z** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** (q \bar{q}) and **baryons** (qqq).

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 2.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 100 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Matter and Antimatter

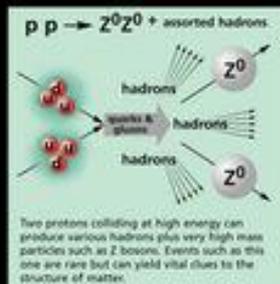
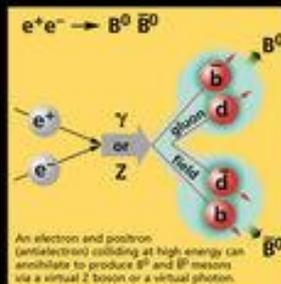
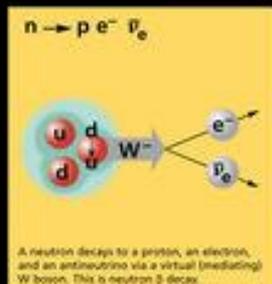
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically bosons (e.g., Z^0 , γ , and η_c or ϕ , but not K^0 or $d\bar{d}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

Property	Interaction	Fundamental		Residual	
		Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Gluons
Strength relative to electromag. for two u quarks at:		10^{-41}	0.8	1	25
	10^{-18} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60
	$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons
	for two protons in nucleus				20

Mesons q \bar{q}					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

Фундаментальные частицы СМ

ФЕРМИОНЫ ($J=1/2$)

<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>
<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>
ν_e	ν_μ	ν_τ
<i>e</i>	μ	τ

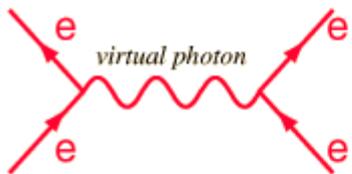
I

II

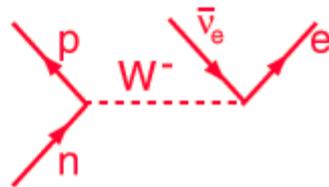
III

БОЗОНЫ ($J=1$)

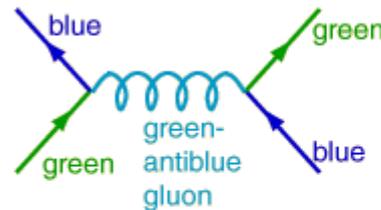
Кварки	<i>g</i>	Сильное
	γ	
Лептоны	W^\pm	Слабое
	Z^0	



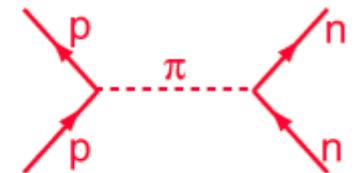
Electromagnetic



Weak



between quarks



between nucleons

Strong Interaction

Ароматы кварков

Кварк		Аромат		Значение
<i>u</i>	up	I_3	изоспин	+1/2
<i>d</i>	down	I_3	изоспин	- 1/2
<i>c</i>	charm	<i>c</i>	очарование	+1
<i>s</i>	strange	<i>s</i>	странность	- 1
<i>t</i>	top	<i>t</i>	истинность	+1
<i>b</i>	bottom	<i>b</i>	прелесть	- 1

Правило Накано – Нишиджимы – Гелл-Манна

$$Q = I_3 + \frac{B + s + c + b + t}{2}$$

Фундаментальные фермионы ($J=1/2$)

ЛЕПТОНЫ ($L_l = 1$)

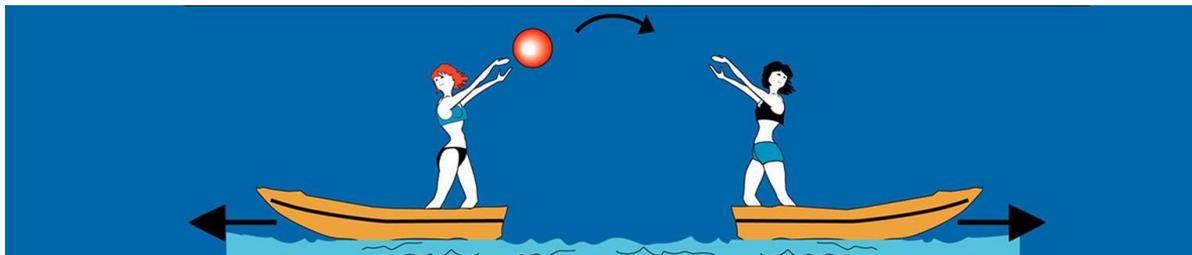
КВАРКИ ($B = 1/3$)

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

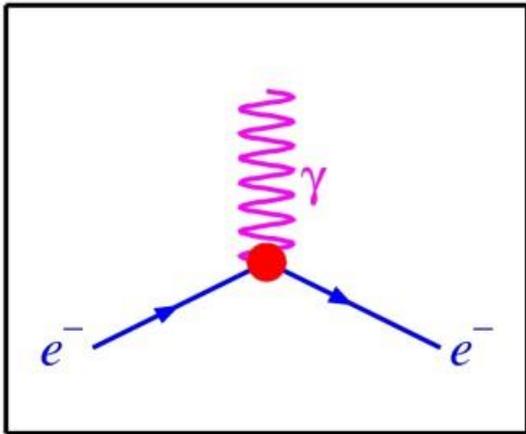
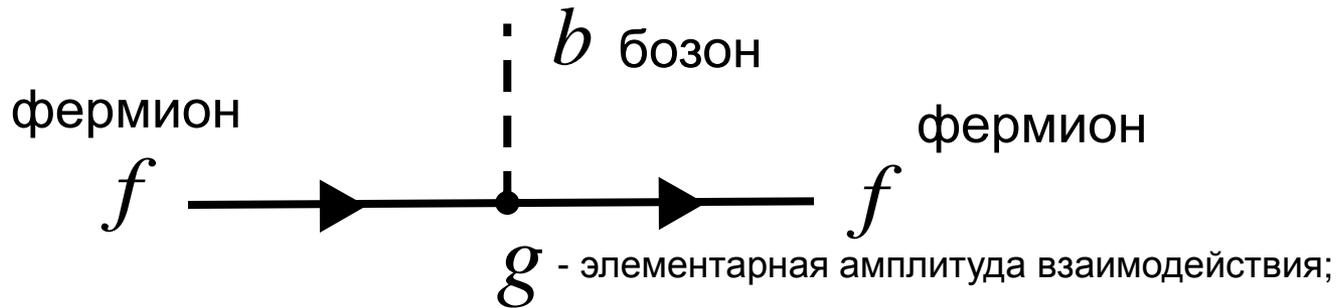
Частица A	m	τ	J	Q	B	L_l	s	c	b	t	I	I_3
Античастица A	m	τ	J	$-Q$	$-B$	$-L_l$	$-s$	$-c$	$-b$	$-t$	I	$-I_3$

Взаимодействия частиц

	Гравитация	Слабое	Электро-магнитное	Сильное	
		Электрослабое		фундаментальное	остаточное
Действует на:	M, 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	

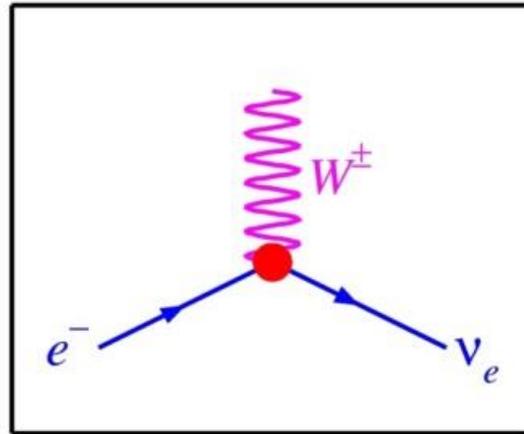


Взаимодействия частиц

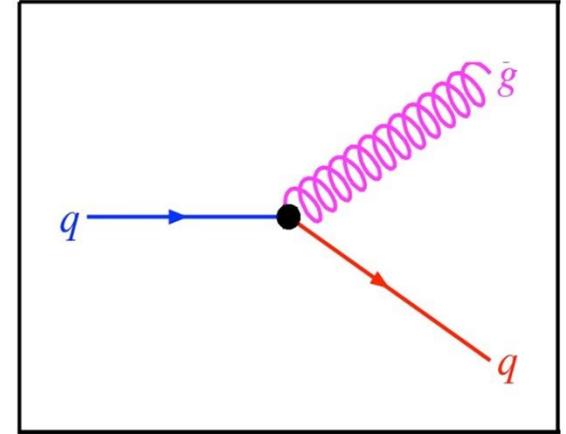


$$g_{\text{эл}} = \sqrt{\alpha_e}$$

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



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



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

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

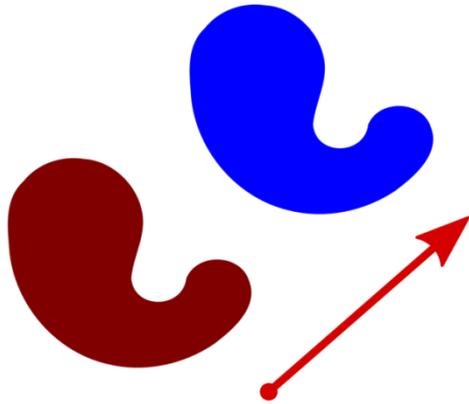


Каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует некоторый закон сохранения

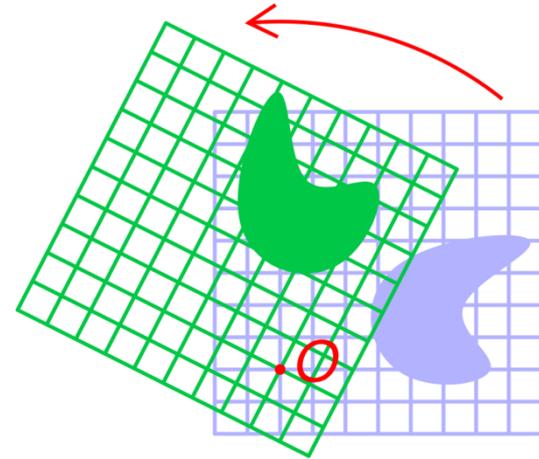
Эмми Нётер, 1918 год

Симметрия (др.-греч. $\sigma\upsilon\mu\mu\epsilon\tau\rho\acute{\iota}\alpha$ «соразмерность», от $\mu\epsilon\tau\rho\acute{\epsilon}\omega$ — «меряю»), в широком смысле — соответствие, неизменность (инвариантность), проявляемые при каких-либо изменениях, преобразованиях (например: положения, энергии, другого)

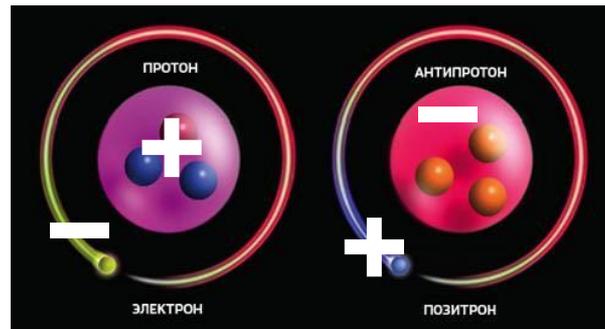
Симметрии



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

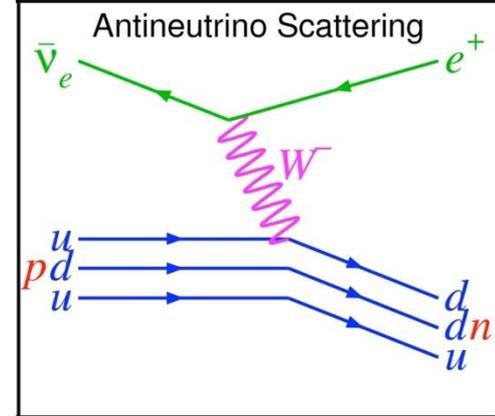
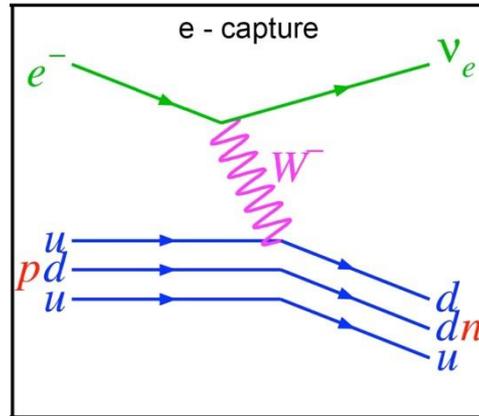
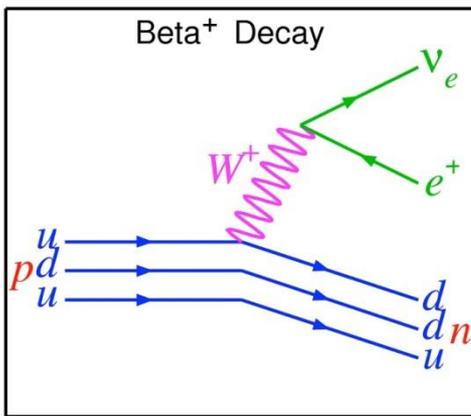
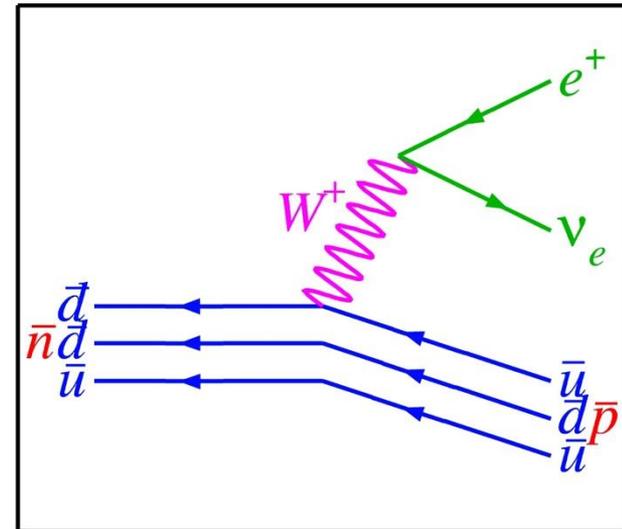
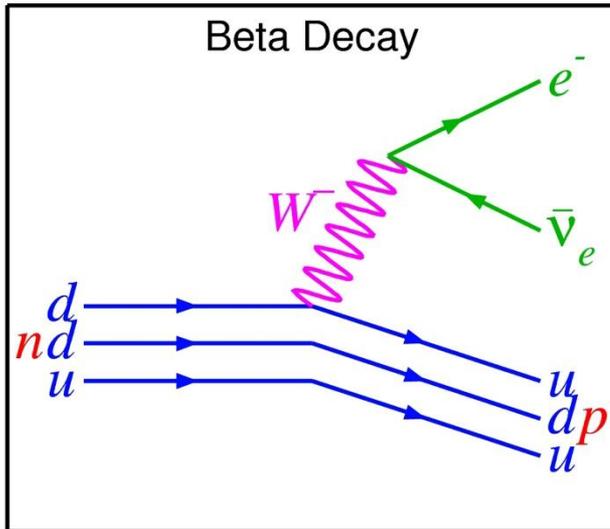


Поворот (изотропность пространства)
закон сохранения момента
импульса J

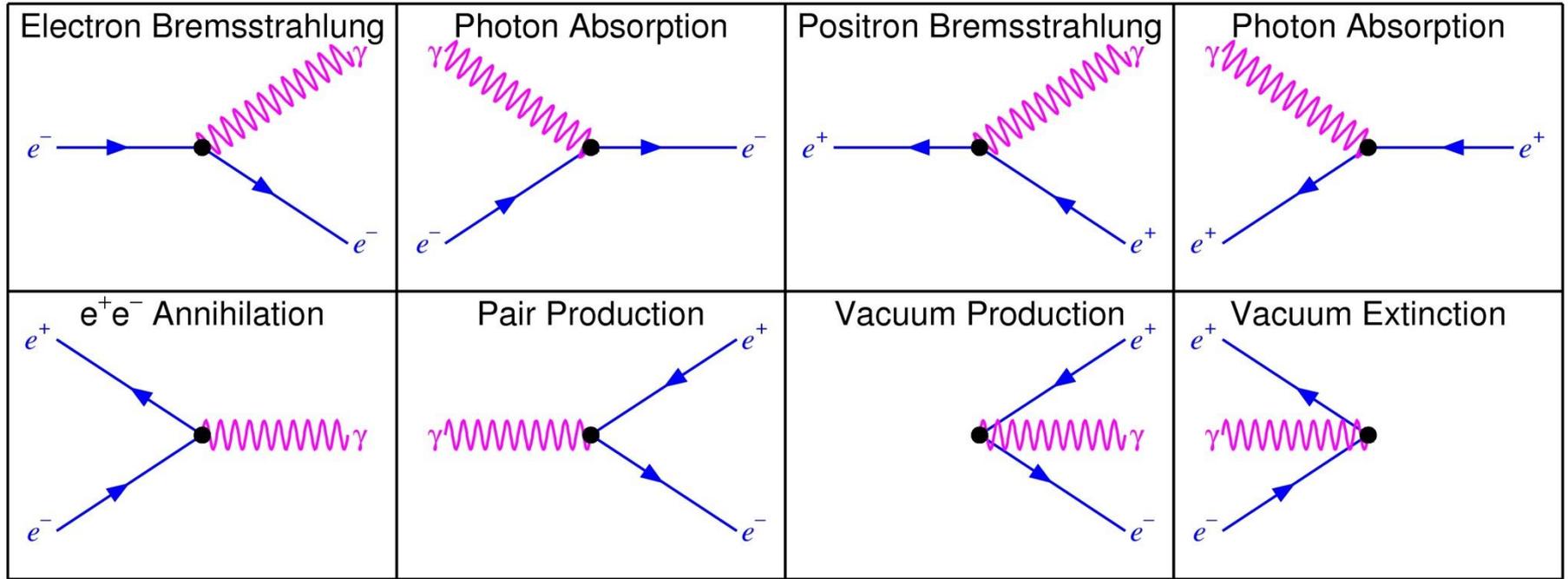


Зарядовая симметрия

Диаграммы Фейнмана



Электромагнитное взаимодействие



→ Time

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

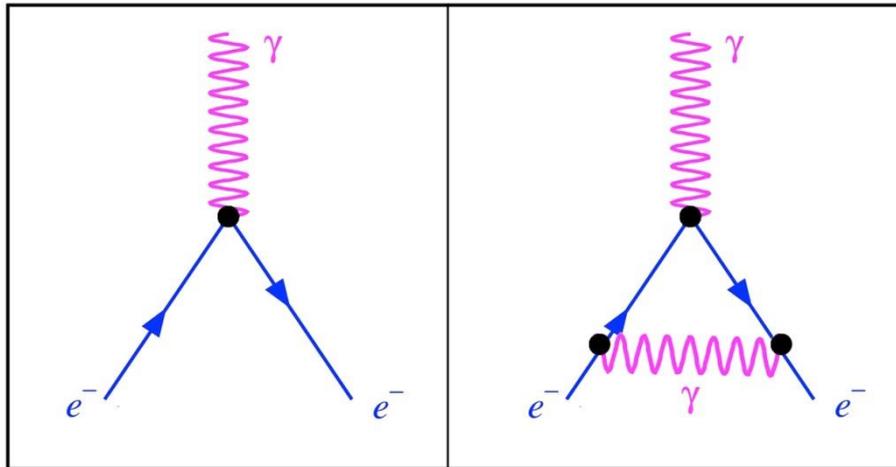
Аномальный магнитный момент

В теории Дирака магнитный момент электрона:

$$\mu = (e\hbar/mc)S.$$

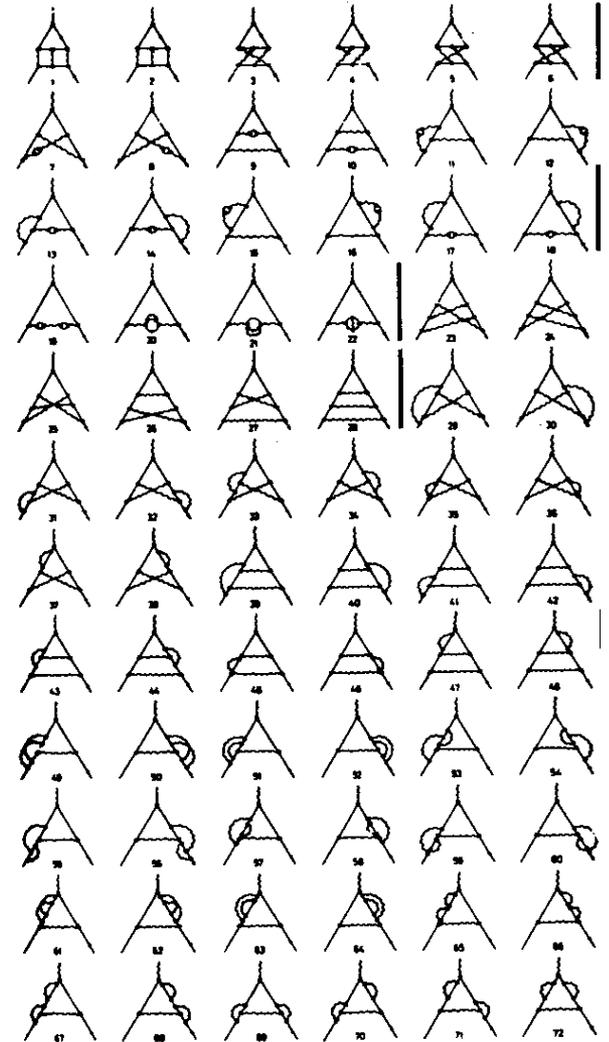
1948 Швингер. Радиационные поправки I порядка.

$$\mu = (e\hbar/mc)S (1 + \alpha/2\pi)$$



Взаимодействие с фотоном магнитного поля

Поправка первого порядка



Поправки 3 порядка

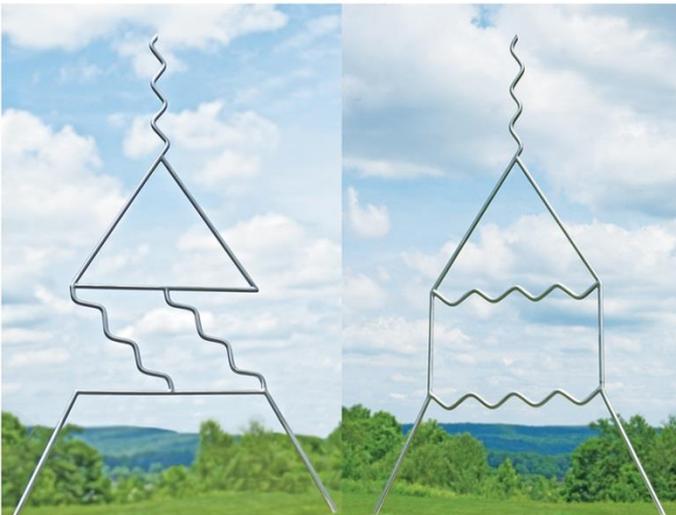
Аномальный магнитный момент

$$\mu(\text{эксп}) = 1,00115965218076 \pm 0.000000000000027$$

J. Beringer *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012)

$$\mu(\text{теор}) = 1,00115965218279 \pm 0.0000000000000771$$

T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, and M. Nio Phys. Rev. D **77**, 053012 –2008



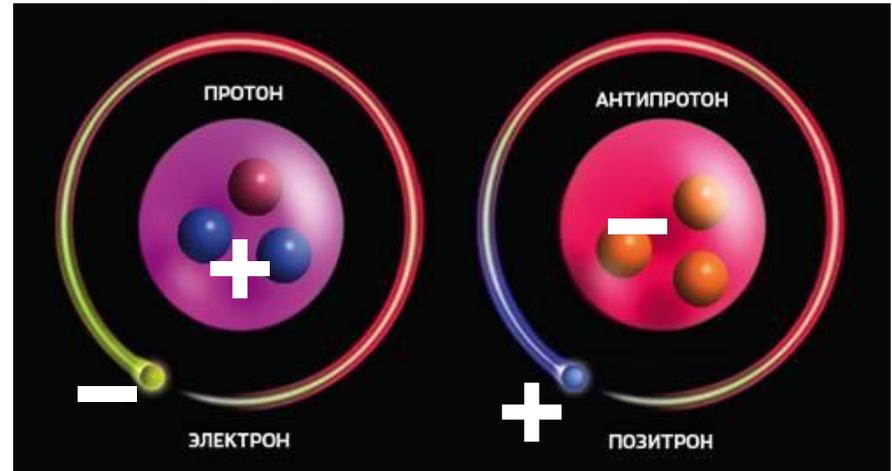
2 Space-Time Feynman Diagrams (Aztec) 2012 stainless steel 30.5 x 49 x 3.5 in or .8 x 1.2 x .1 m



Зарядовое сопряжение (C - четность)

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

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

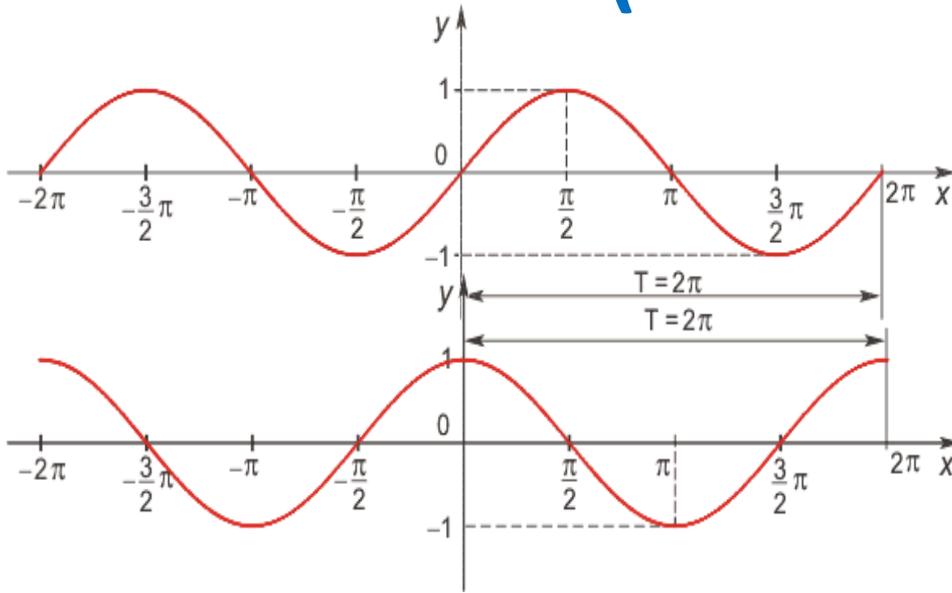


$$A = \bar{A}$$

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

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

Пространственная инверсия (P - четность)



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

$$P = -1$$

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

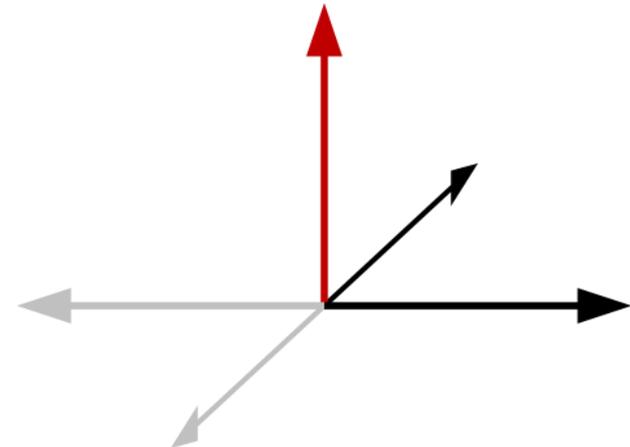
$$P = +1$$

V – полярный вектор:

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

A – аксиальный вектор:

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



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

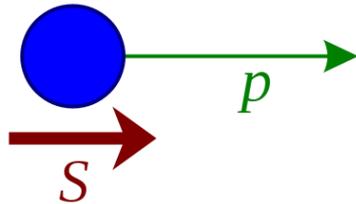
1954 г. Г. Людерс, В. Паули
Доказательство CPT-теоремы

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

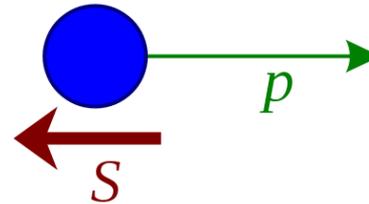
Киральная симметрия



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



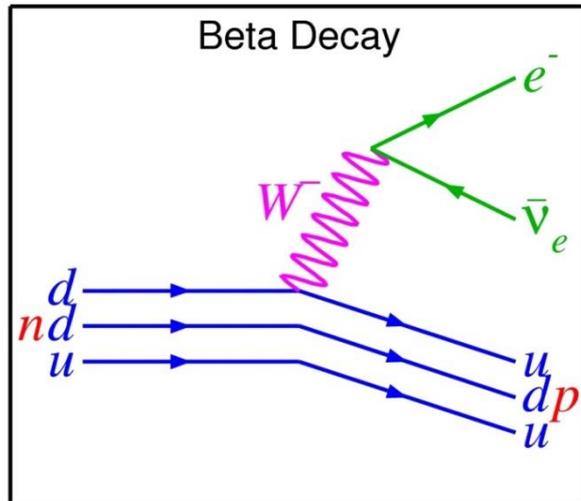
антинейтрино $\bar{\nu} =$
ПРАВЫЕ



нейтрино $\nu =$
ЛЕВЫЕ

Нарушение P - четности

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



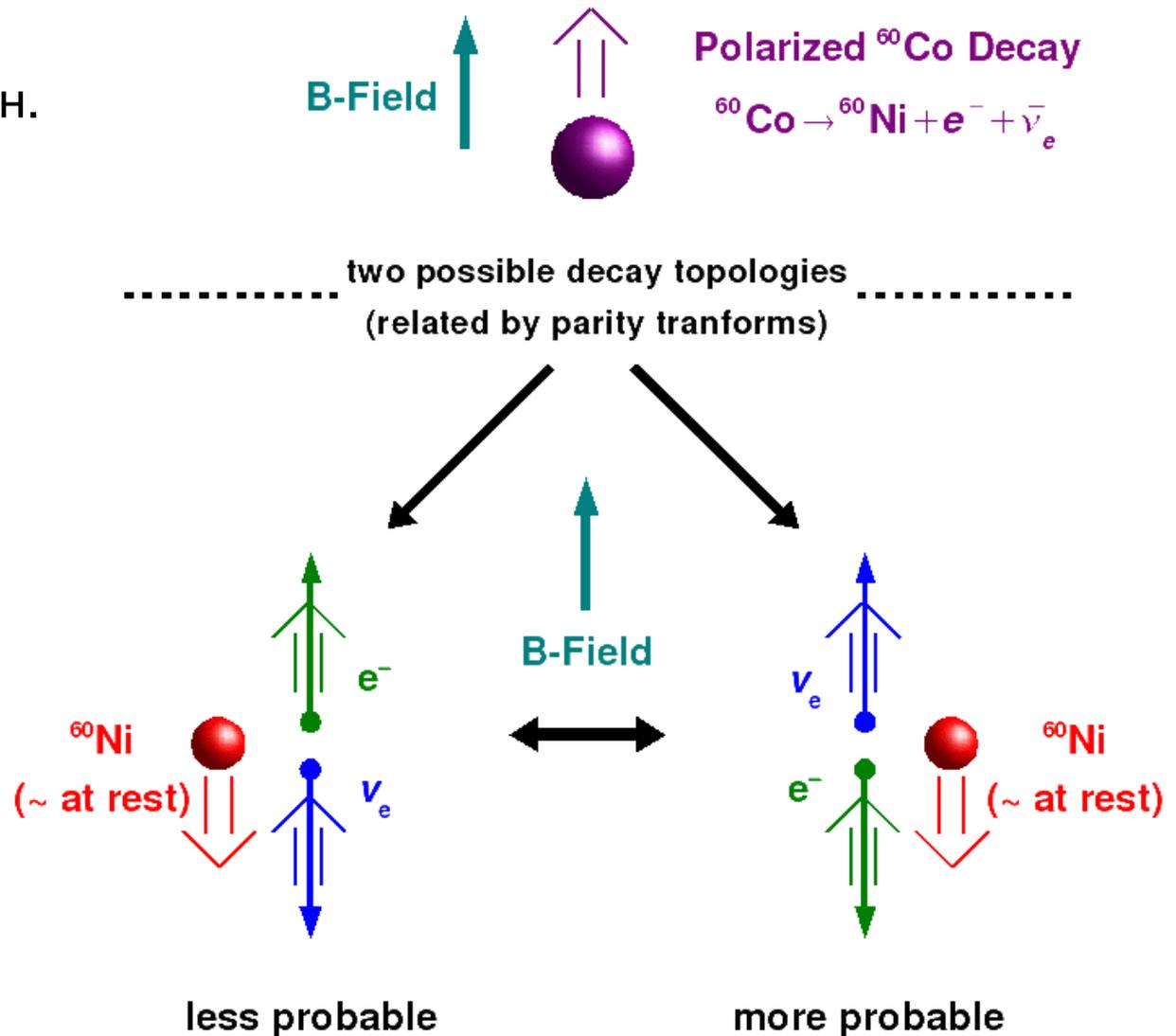
Вейль

Нобелевская премия по физике

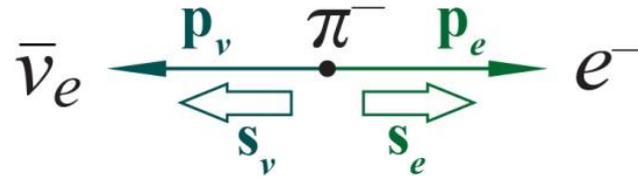
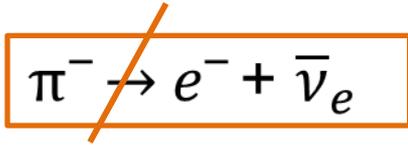
1957 г. – Ли, Янг За проницательное исследование так называемых законов чётности, которое привело к важным открытиям в физике элементарных частиц

Нарушение P - четности

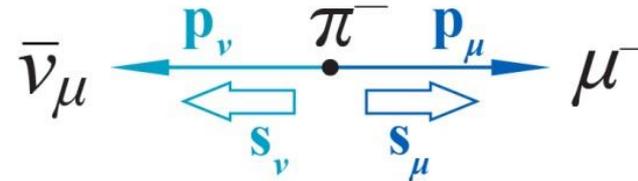
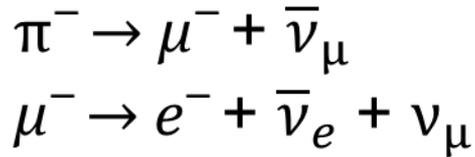
1957 г. Ву, Амблер,
Хайард, Хоппес, Хадсон.
Экспериментальное
подтверждение
нарушения P-четности



Распад пиона



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

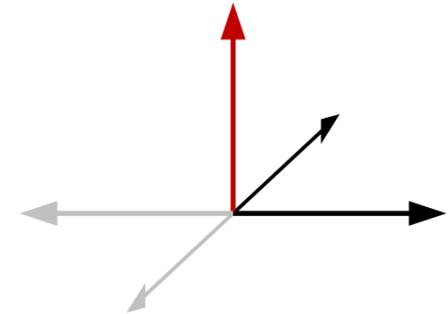


$$T_\mu \approx 4 \text{ МэВ} \ll m_\mu$$

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

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

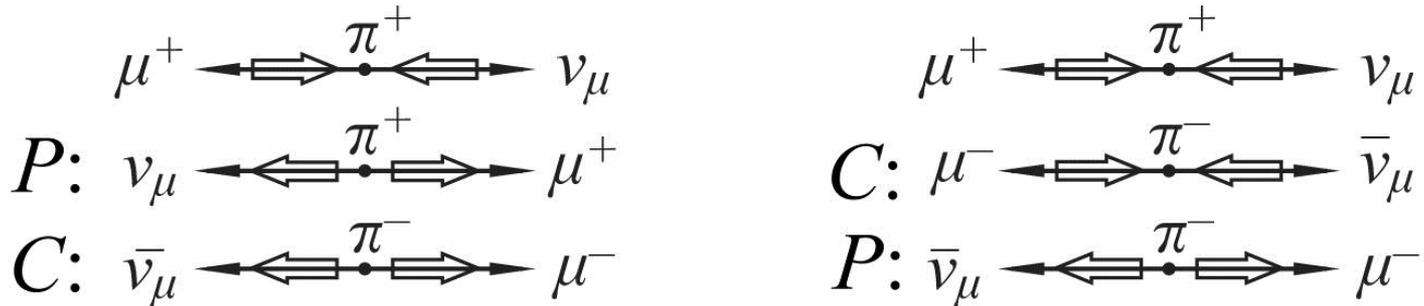
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$



CP - симметрия

1957 г. Л. Ландау Сохранение CP-четности

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



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

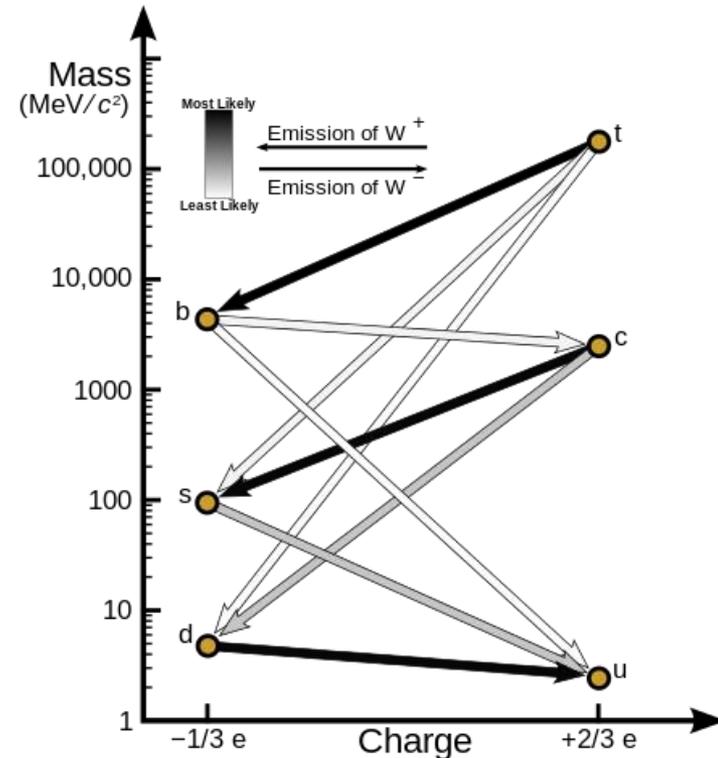
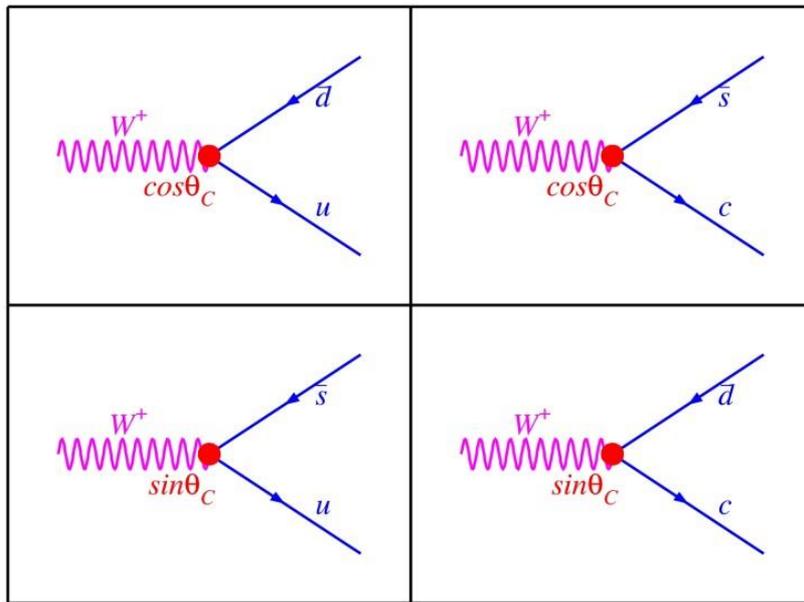
1964 г. Д. Кронин, В. Фитч Экспериментальное обнаружение нарушения CP-четности в распадах K-мезонов

1967 г. А. Д. Сахаров Условия Сахарова уничтожения антивещества в ранней Вселенной (в тч CP-нарушение)

Ароматы и поколения

1973 г. М. Кобаяши, Т. Маскава Введение матрицы смешивания кварков

Угол Каббиро



Нобелевская премия по физике

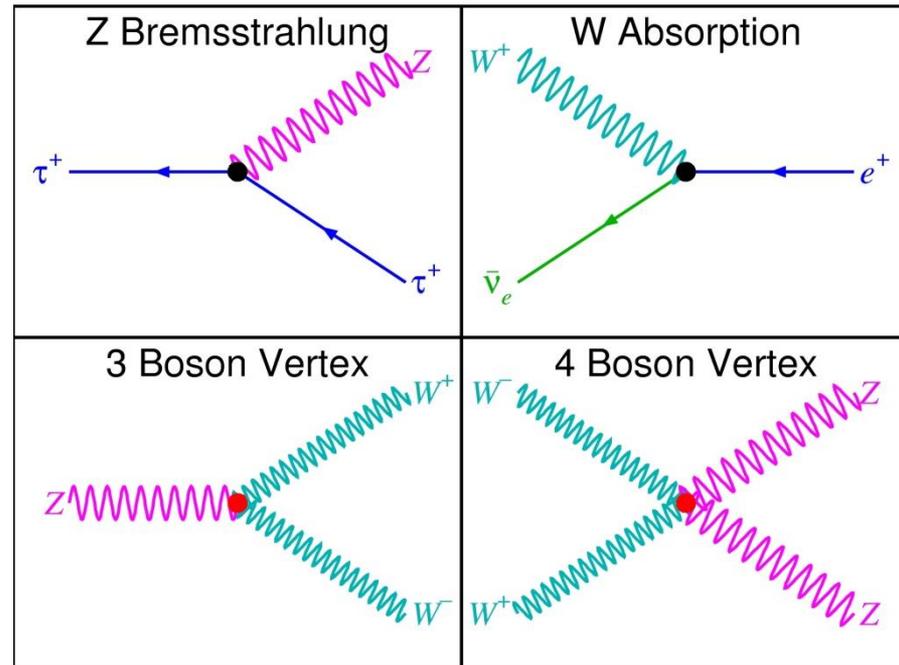
2008 г. – Кобаяши, Маскава За открытие природы симметрии, которое предсказывает существование в природе по крайней мере 3 поколений кварков



С. Дали. Лебеди, отраженные в слонах. 1937

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

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

Сильное взаимодействие

КВАРКИ ($B = 1/3$)

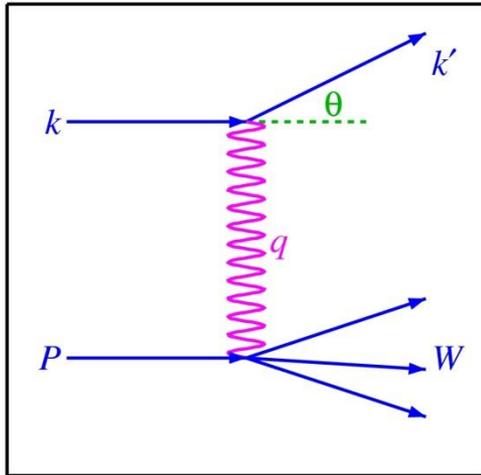
Аромат	Масса ГэВ/ c^2	Электр. заряд Q
<i>u</i>	0,003	+2/3
<i>d</i>	0,006	-1/3
<i>c</i>	1,3	+2/3
<i>s</i>	0,1	-1/3
<i>t</i>	175	+2/3
<i>b</i>	4,3	-1/3

Протон $p = uud$

Нейтрон $n = ddu$

Как увидеть кварки

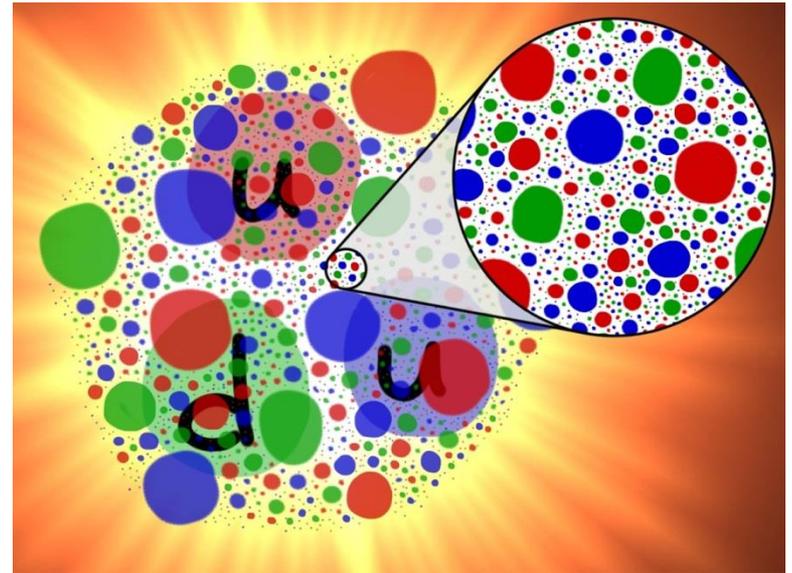
$$e + p \rightarrow e + X$$



$W = M \rightarrow$ упругое рассеяние

$2 < W < 1 \text{ GeV} \rightarrow$ неупругое рассеяние
(возбуждение резонансов)

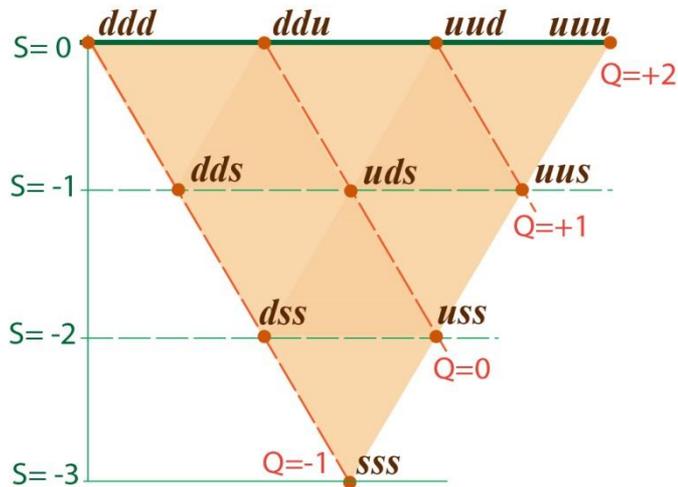
$W > 2 \text{ GeV} \rightarrow$ глубоко неупругое рассеяние



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

Сильное взаимодействие. Цвет

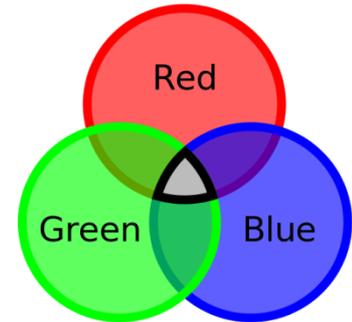


$$\vec{J} = \frac{3}{2} : \uparrow\uparrow\uparrow$$

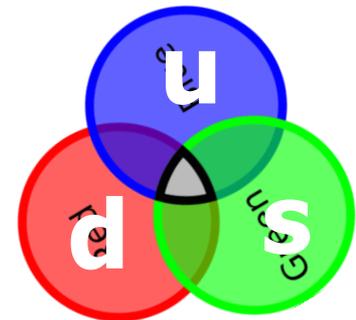
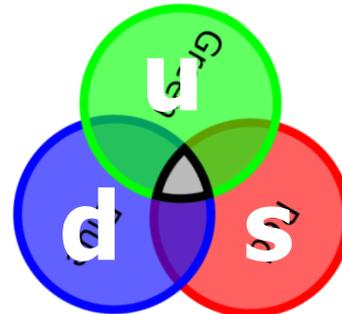
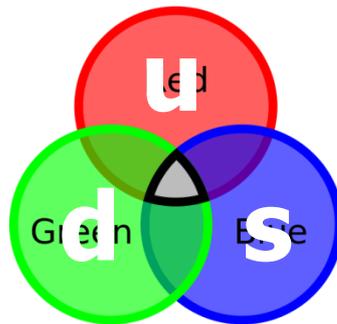
$$\Omega^- : sss$$

$$\Delta^- : ddd$$

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



$\Lambda (uds)$

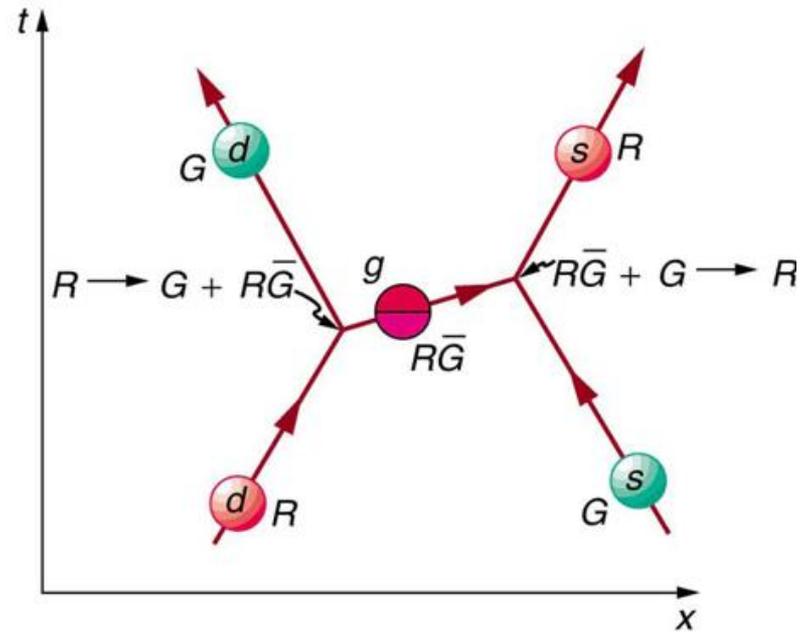


Глюоны



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

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



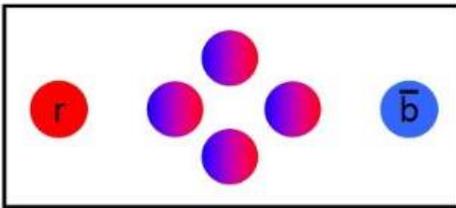
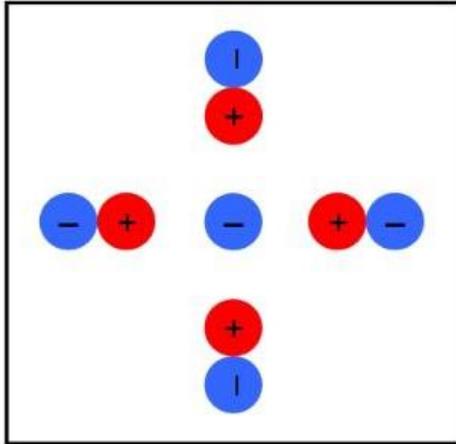
Глюоны – безмассовые электрически нейтральные частицы со спином $J = 1$, четностью $P = -1$, переносят сильное, т. е. цветное взаимодействие между кварками.

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.

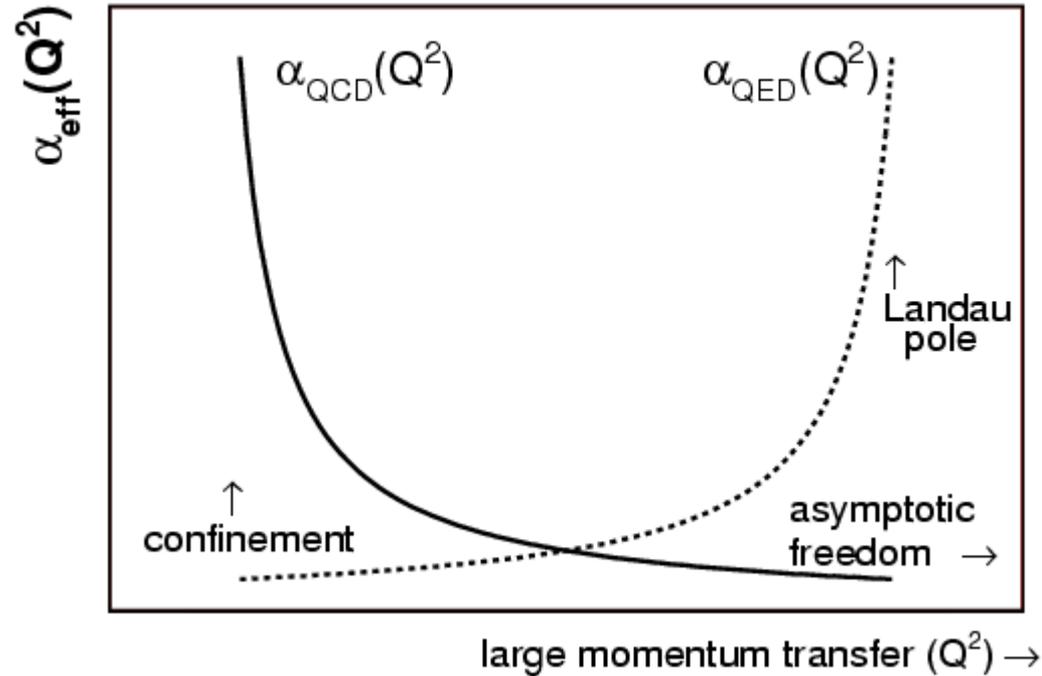
Сильное взаимодействие

Экранировка (γ)



Антиэкранировка (g)

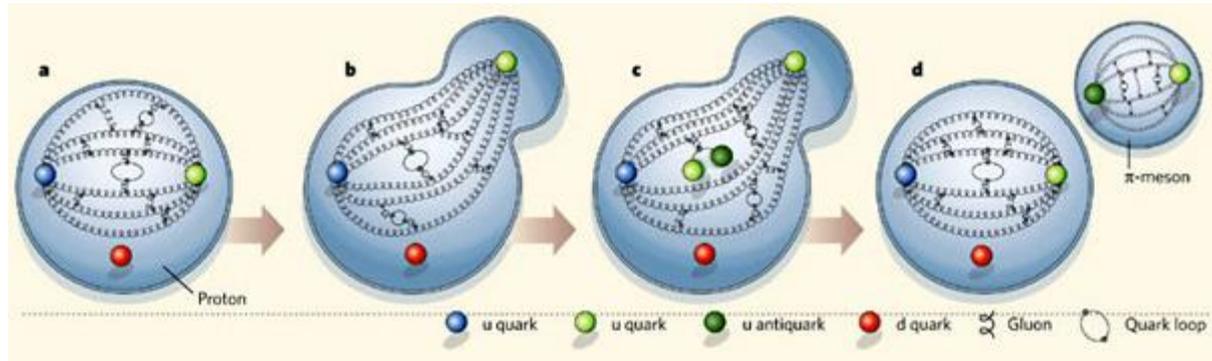
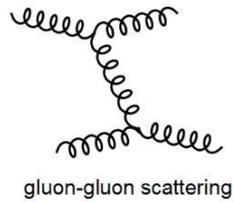
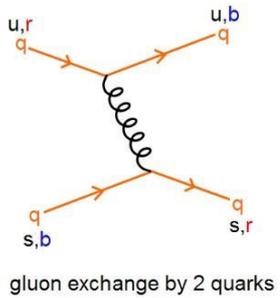
probing small distance scales (x) \rightarrow



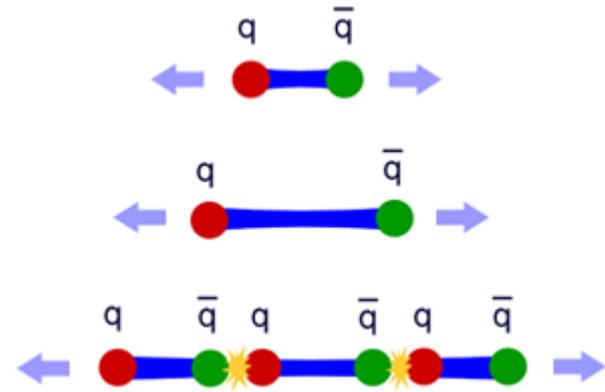
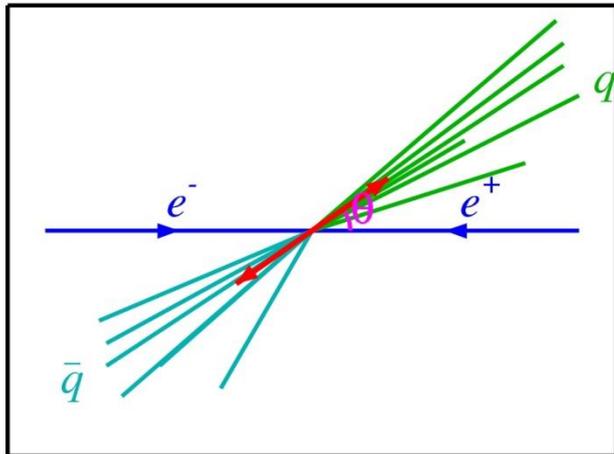
Нобелевская премия по физике

2004 г. – Д. Гросс, Д. Политцер, Ф. Вильчек За открытие асимптотической свободы в теории сильных взаимодействий

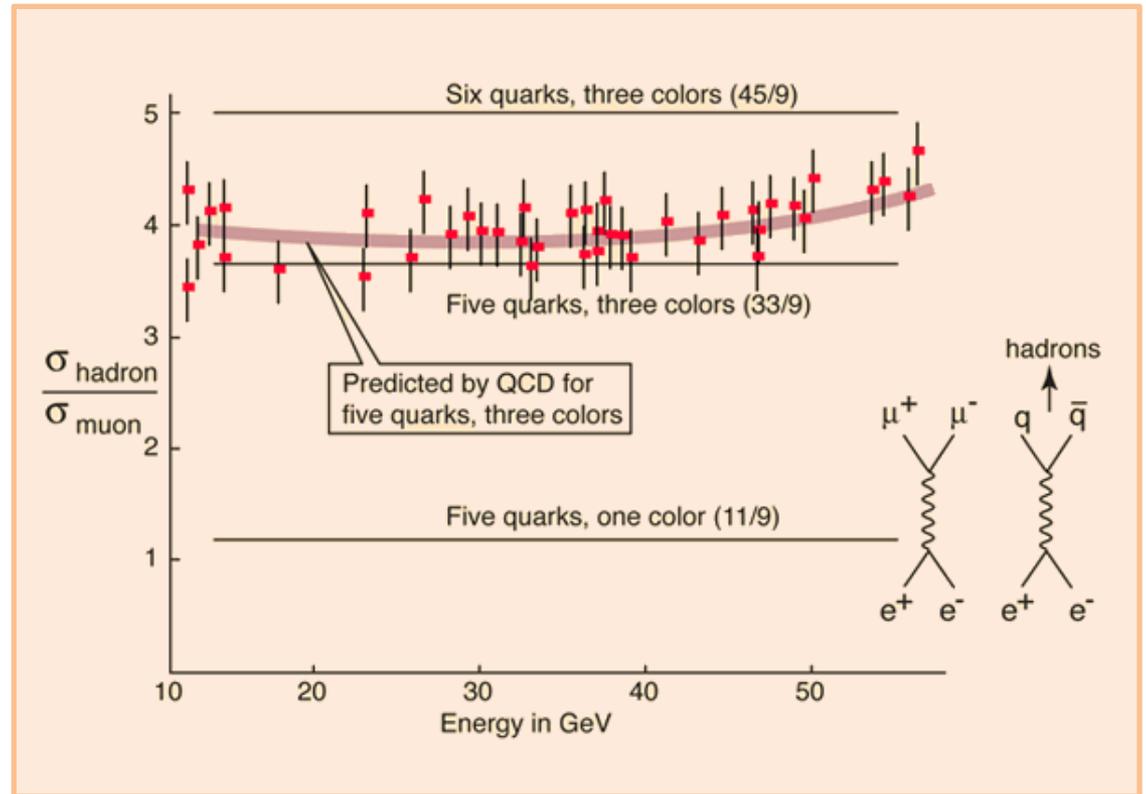
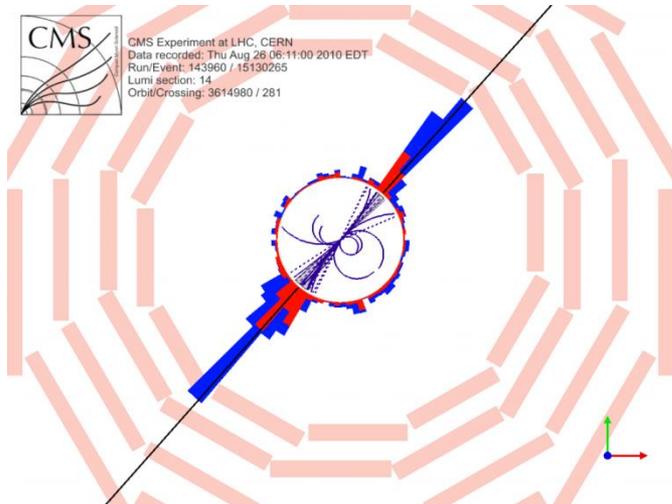
Адронизация



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



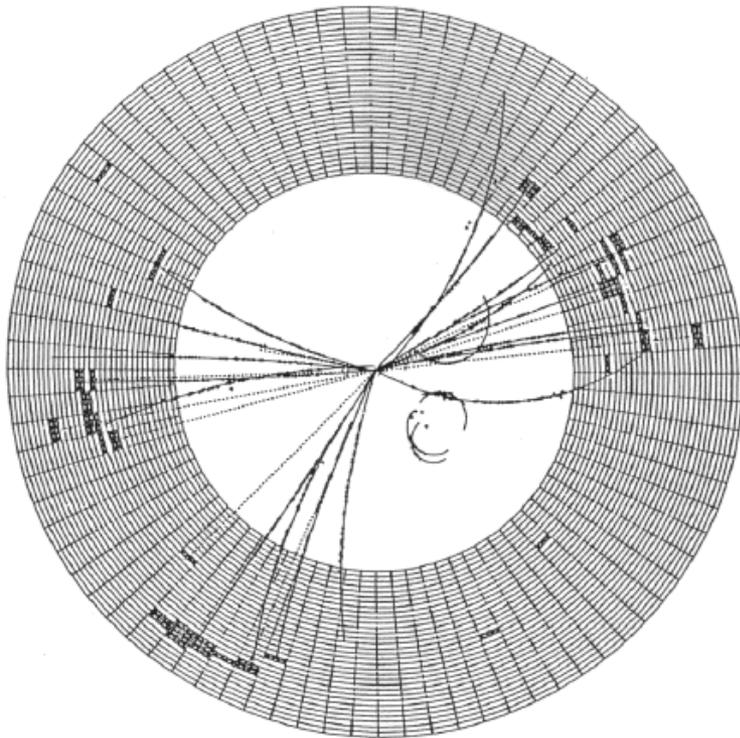
Как увидеть кварки



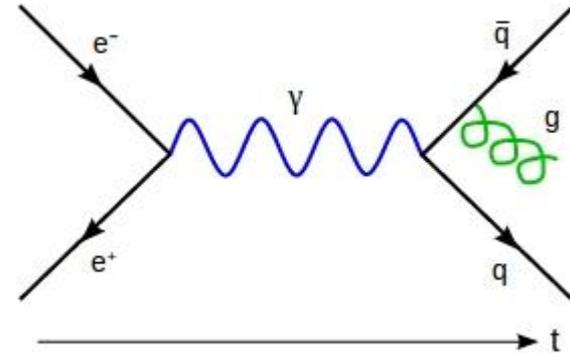
Particle Data Group, "Review of Particle Properties", Phys. Rev. D45, 1 (1992)

Как увидеть глюоны

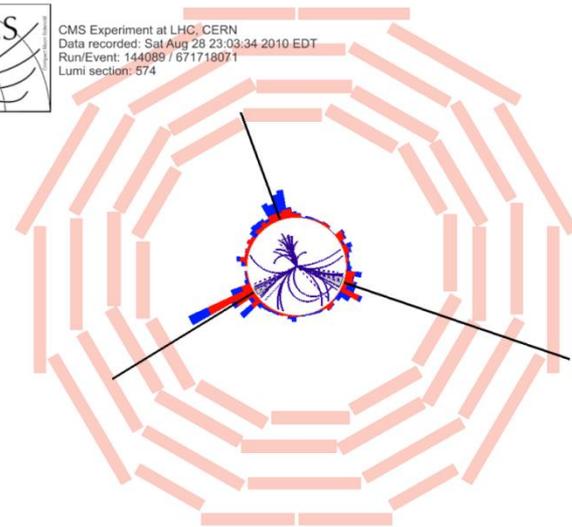
1979 г. Экспериментальное подтверждение существования глюона (DESY, Гамбург)



*** SUMS (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



Взаимодействия частиц

	Слабое	Электро-магнитное	Сильное
Действует на:	Аромат	Q	color
Частицы	q, l, ν	q, l	Кварки (q)
Переносчик	W^+, W^-, Z^0	γ	глюоны
Радиус	$\sim 10^{-2}$ фм	∞	~ 1 фм
Симметрия	$SU(2)_L$	U(1)	$SU_C(3)$
Сила между кварками (10^{-2} фм)	10^{-4}	1	60

Остается множество вопросов

- Что такое поколение? Почему поколений только 3?
- Какова природа кварк-лептоной аналогии? Как соотносятся друг другу лептоны и кварки?
- Элементарны ли кварки и лептоны?
- Существуют ли новые кварки и лептоны?
- Что определяет калибровочные симметрии? Почему квантуются заряды частиц?
- Существуют ли новые взаимодействия?
- Почему гравитация столь слаба? Как ее включить в общую схему?
- Насколько точна СРТ-симметрия?
- Существуют ли новые симметрии в природе?
- Существуют ли дополнительные измерения пространства-времени
- Что такое темная энергия и темная материя?
-