



Рождение и жизнь атомных ядер

Взаимодействие частиц

Сезон бозонов

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

Лептоны

<i>g</i>
γ
W^\pm
Z^0

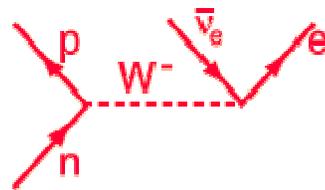
Сильное

Электро-магнитное

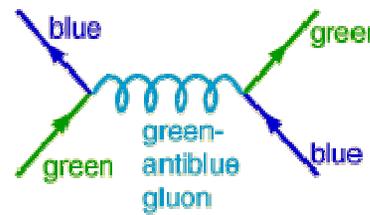
Слабое



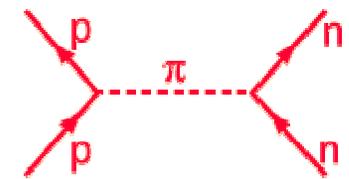
Electromagnetic



Weak



between quarks

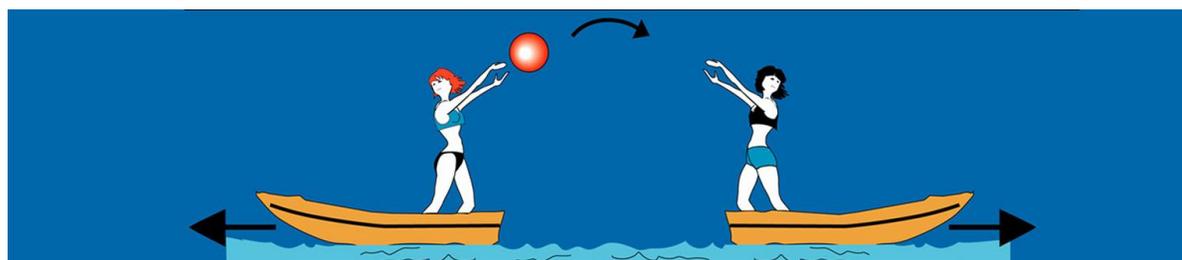


between nucleons

Strong Interaction

Взаимодействия частиц

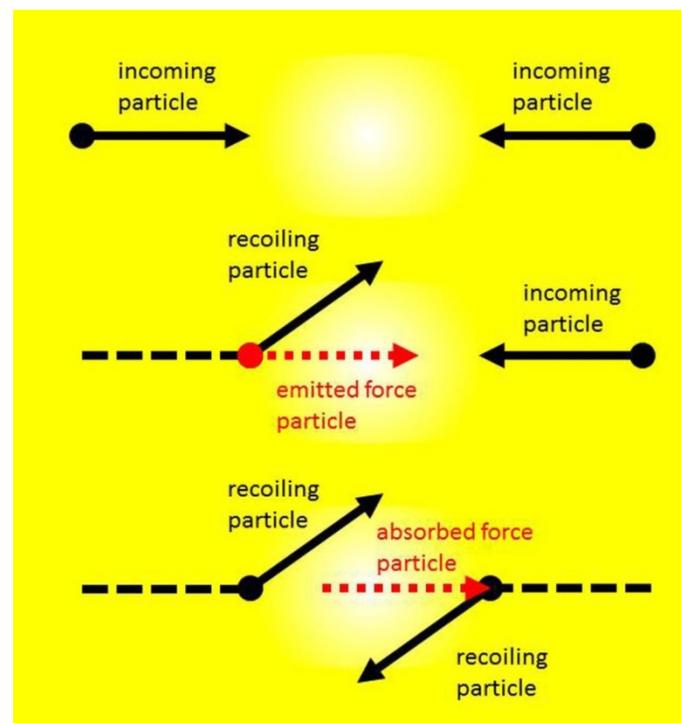
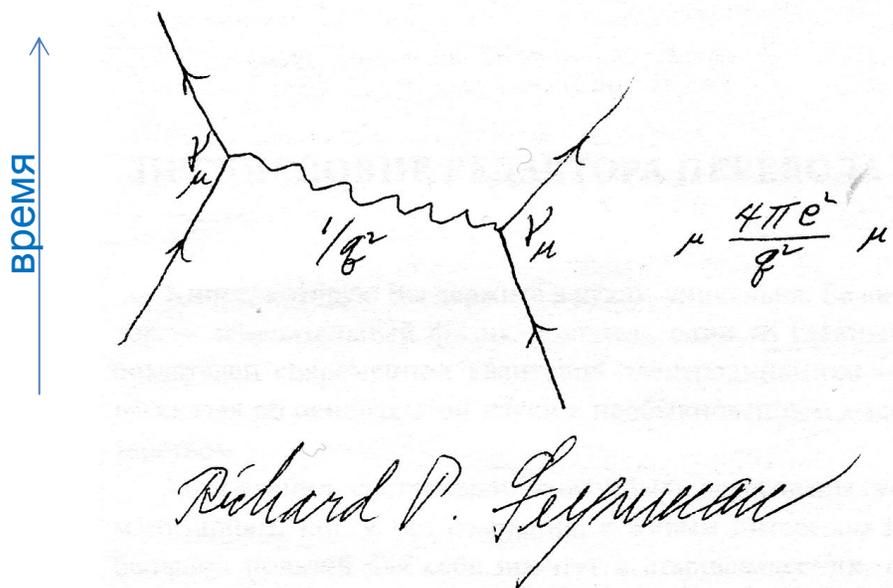
	Гравитация	Слабое	Электро-магнитное	Сильное	
		Электрослабое		фундаментально	остаточное
Действует на:	M, E	Аромат	Q	color	
Частицы	Все	q, l, ν	q, l	Кварки (q)	адроны
Переносчик	Гравитон ?	W^+, W^-, Z^0	γ	глюоны	мезоны
Радиус	∞	$\sim 10^{-2}$ фм	∞	~ 1 фм	
Сила между протонами в ядре	10^{-36}	10^{-7}	1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



Рождение и жизнь атомных ядер. Взаимодействия

Взаимодействия частиц

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

Механизм взаимодействия частиц

Из соотношений неопределенности

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar, \quad \Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$$

следует, что если частица существует в течение короткого промежутка времени Δt , то ее энергия может флюктуировать на величину $\hbar / \Delta t$, а если она находится в области размером Δx , то ее импульс флюктуирует на величину $\hbar / \Delta x$. В течение малых промежутков времени Δt и на малых расстояниях Δx может нарушаться соотношение между импульсом и энергией частицы.

$$E = (p^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2}$$

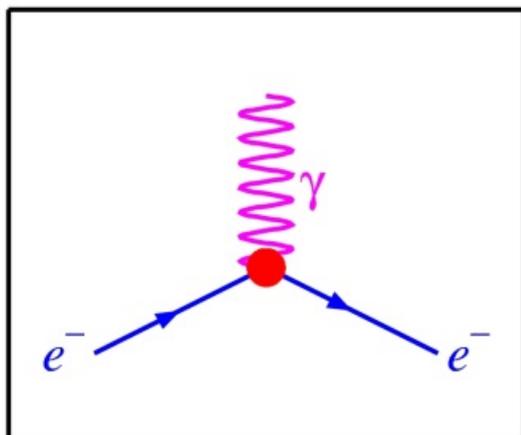
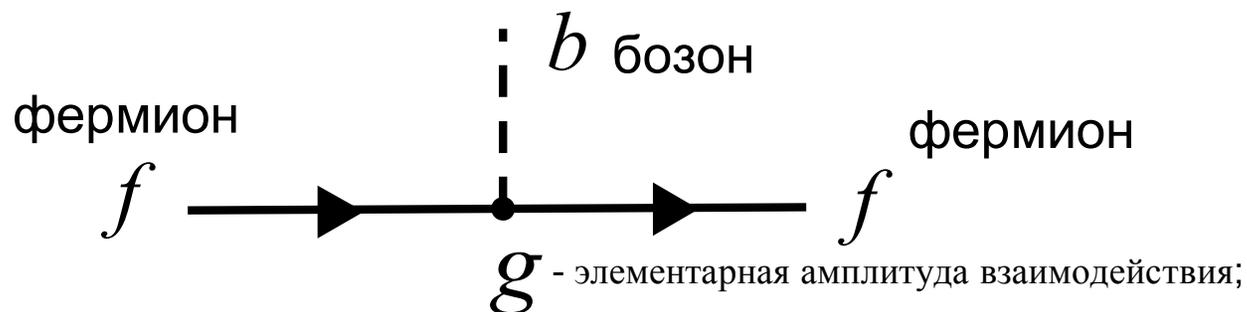
Такие частицы называются виртуальными. Говорят, что они находятся вне массовой поверхности. В виртуальных процессах действуют законы сохранения зарядов — электрического, барионного, лептонных.

В квантовой теории взаимодействия происходят в результате обмена виртуальными частицами — переносчиками этих взаимодействий. Масса виртуальной частицы m и расстояние R , на которое она переносит взаимодействие связаны соотношением

$$R = \hbar / mc.$$

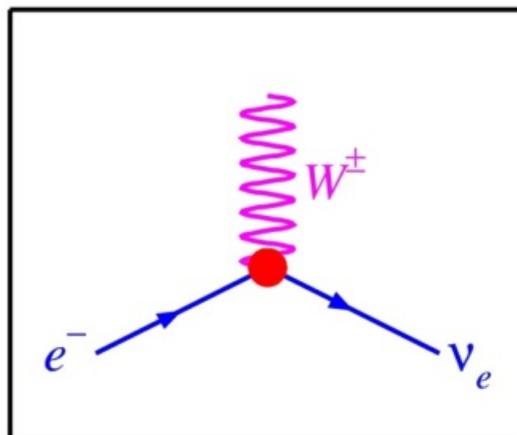
Чем больше масса виртуальной частицы, тем меньше радиус действия сил, обусловленных обменом этой частицей. Электромагнитное взаимодействие происходит с помощью обмена фотонами. Радиус электромагнитного взаимодействия бесконечен.

Взаимодействия частиц

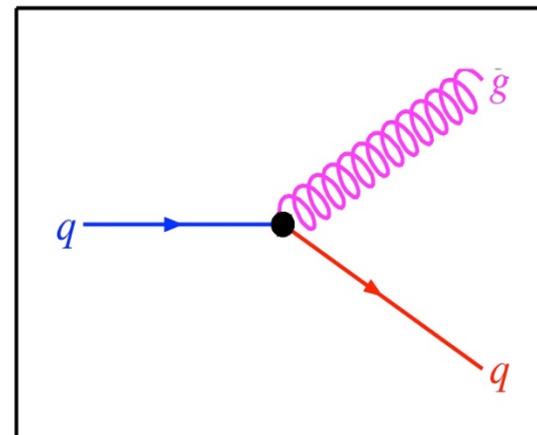


$$g_{\text{эл}} = \sqrt{\alpha_e}$$

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



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



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

Законы сохранения

Характеристика		Сильное	Электромагнитное	Слабое
Энергия, импульс	E, p	+	+	+
Момент	J	+	+	+
Электрический	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

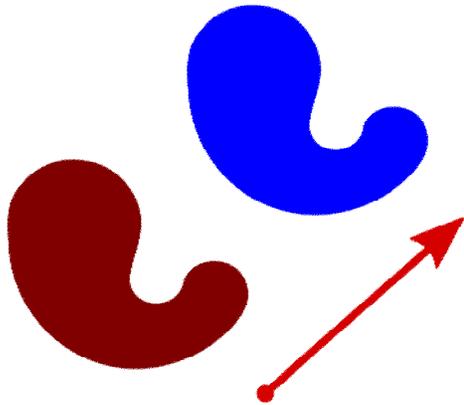


Каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует некоторый закон сохранения

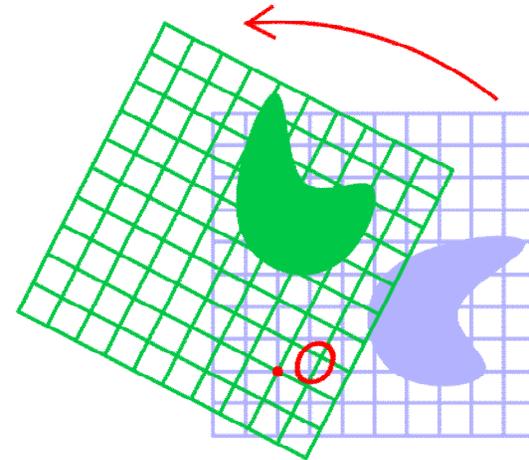
Эмми Нётер, 1918 год

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

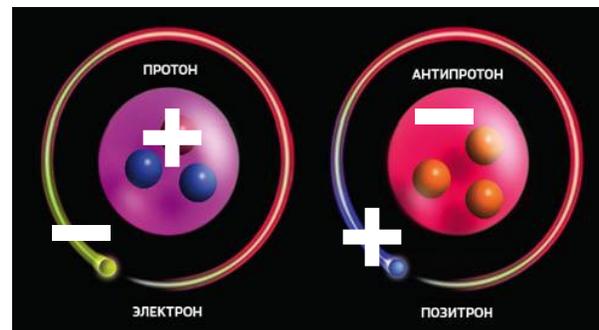
Симметрии



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



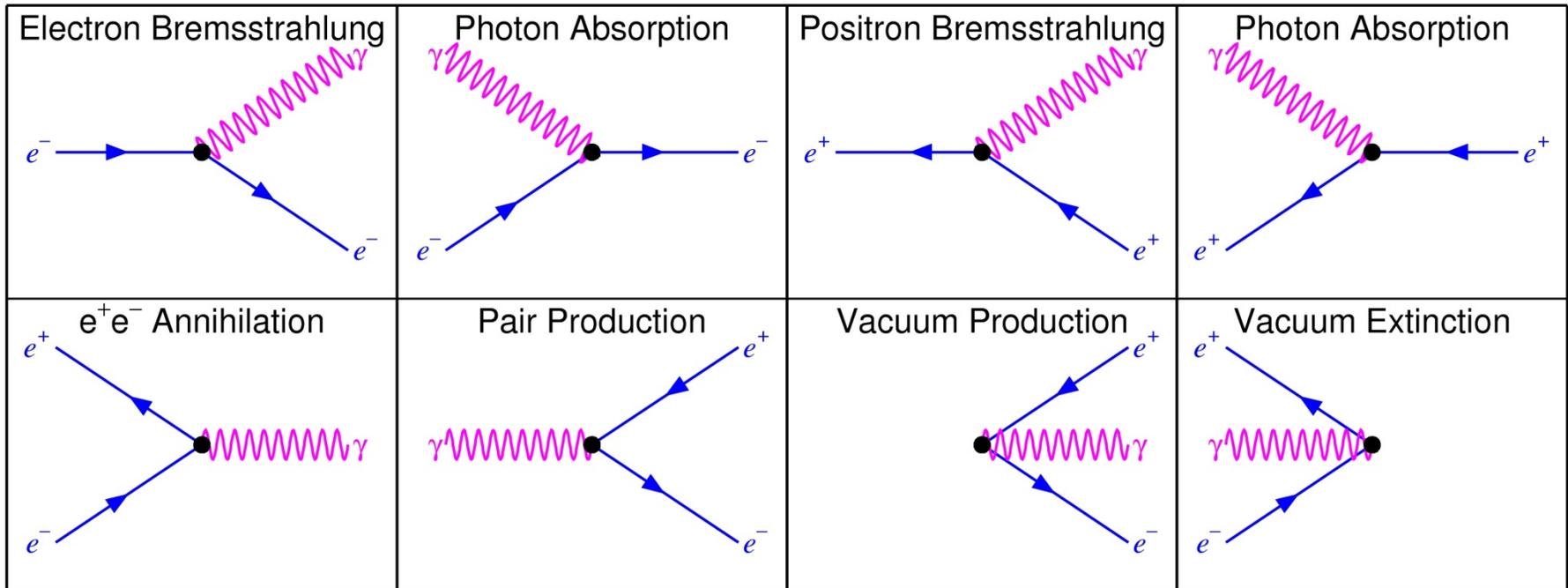
Поворот (изотропность пространства)
закон сохранения момента
импульса J



Зарядовая симметрия

Рождение и жизнь атомных ядер. Взаимодействия

Электромагнитное взаимодействие



→ Time

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

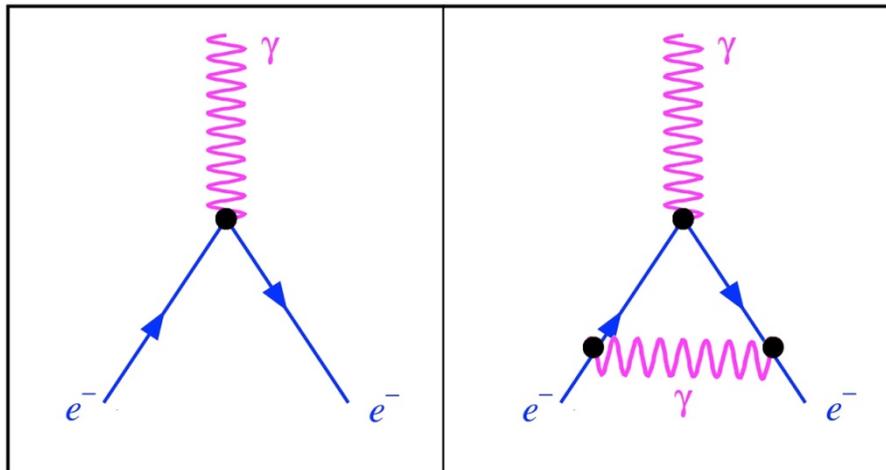
Аномальный магнитный момент

В теории Дирака магнитный момент электрона:

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

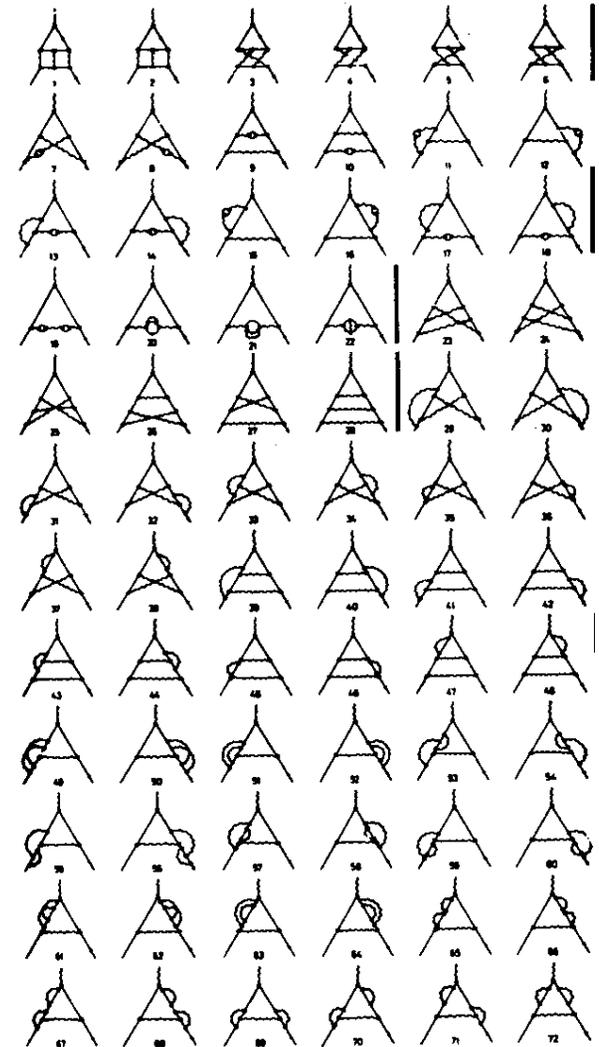
1948 Швингер. Радиационные поправки I порядка.

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



Взаимодействие с фотоном магнитного поля

Поправка первого порядка



Поправки 3 порядка

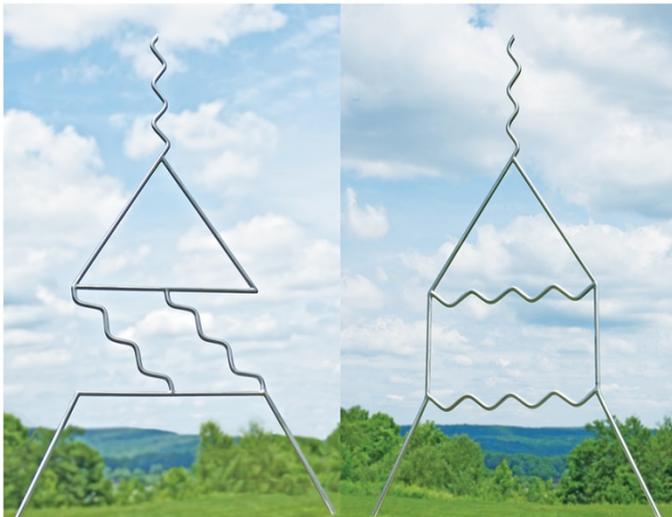
Аномальный магнитный момент

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

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



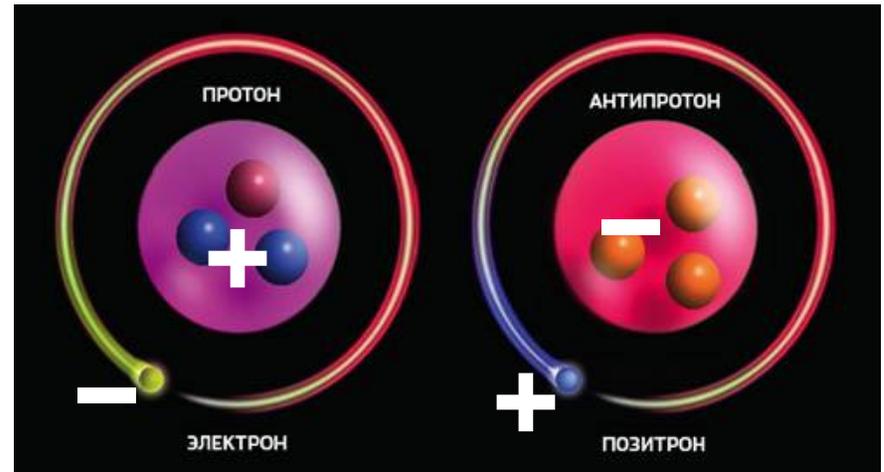
2 Space-Time Feynman Diagrams (Aztec) 2012 stainless steel 30.5 x 49 x 3.5 in or .8 x 1.2 x .1 m



Зарядовое сопряжение (C - четность)

$$Q, B, L_1, I_3, s, c, b, t \xrightarrow{C} -Q, -B, -L_1, -I_3, -s, -c, -b, -t$$

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

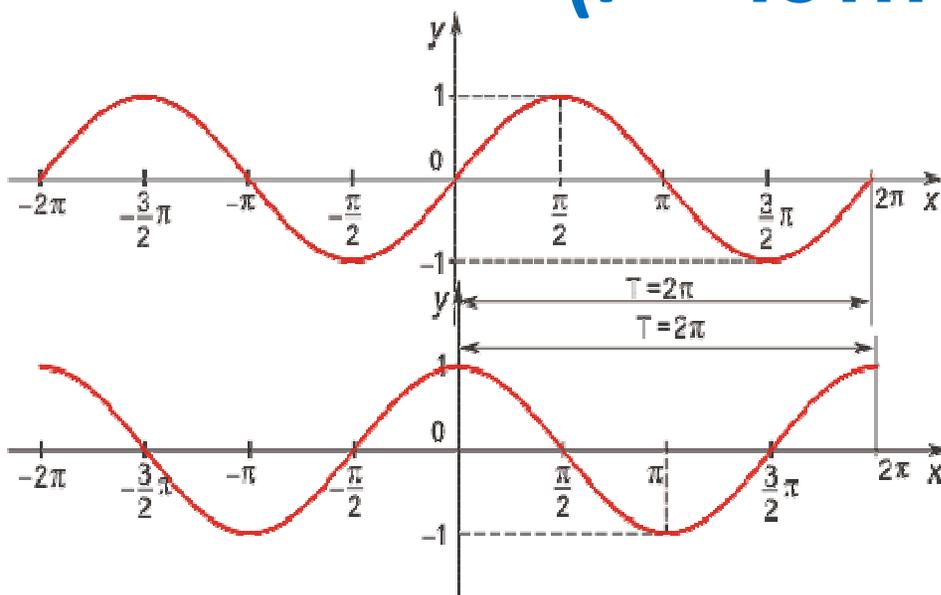


$$A = \bar{A}$$

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

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

Пространственная инверсия (P - четность)



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

$$P = -1$$

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

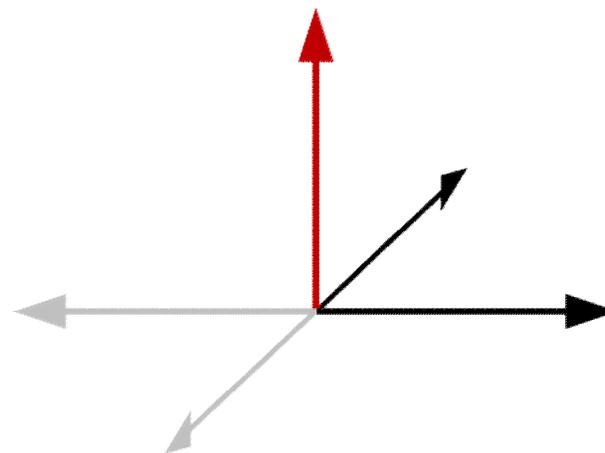
$$P = +1$$

\vec{V} – полярный вектор:

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

\vec{A} – аксиальный вектор:

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



Обращение времени (Т – 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)
Т-инвариантны

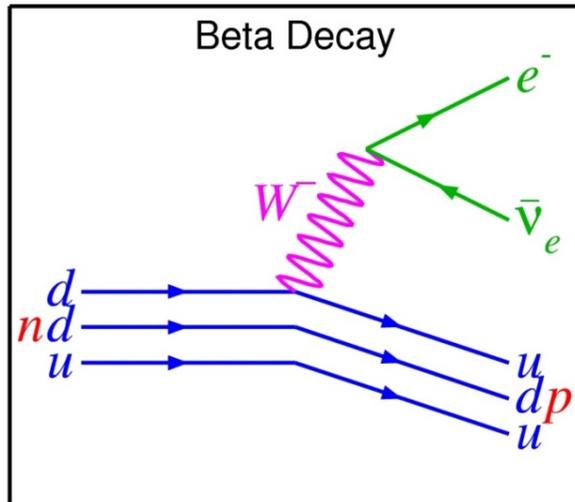
CPT - теорема

1954 г. Г. Людере, 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

Нарушение P - четности

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



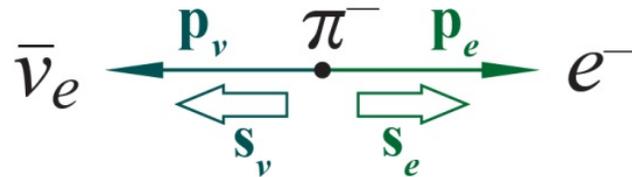
Вейль

Нобелевская премия по физике

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

Распад пиона

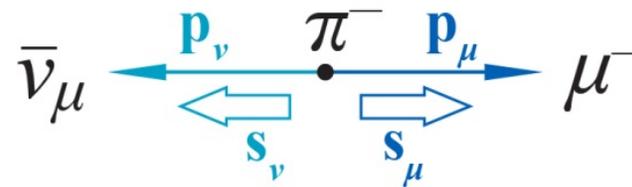
$$\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$



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

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

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

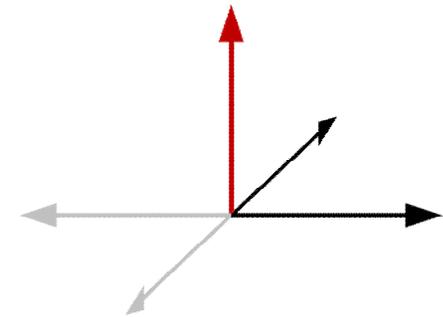


$$T_\mu \approx 4 \text{ МэВ} \ll m_\mu$$

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

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

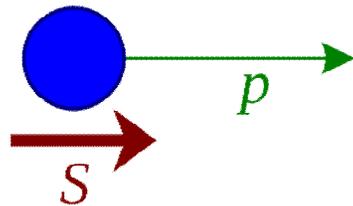
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$$



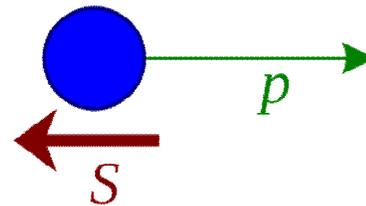
Киральная симметрия



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



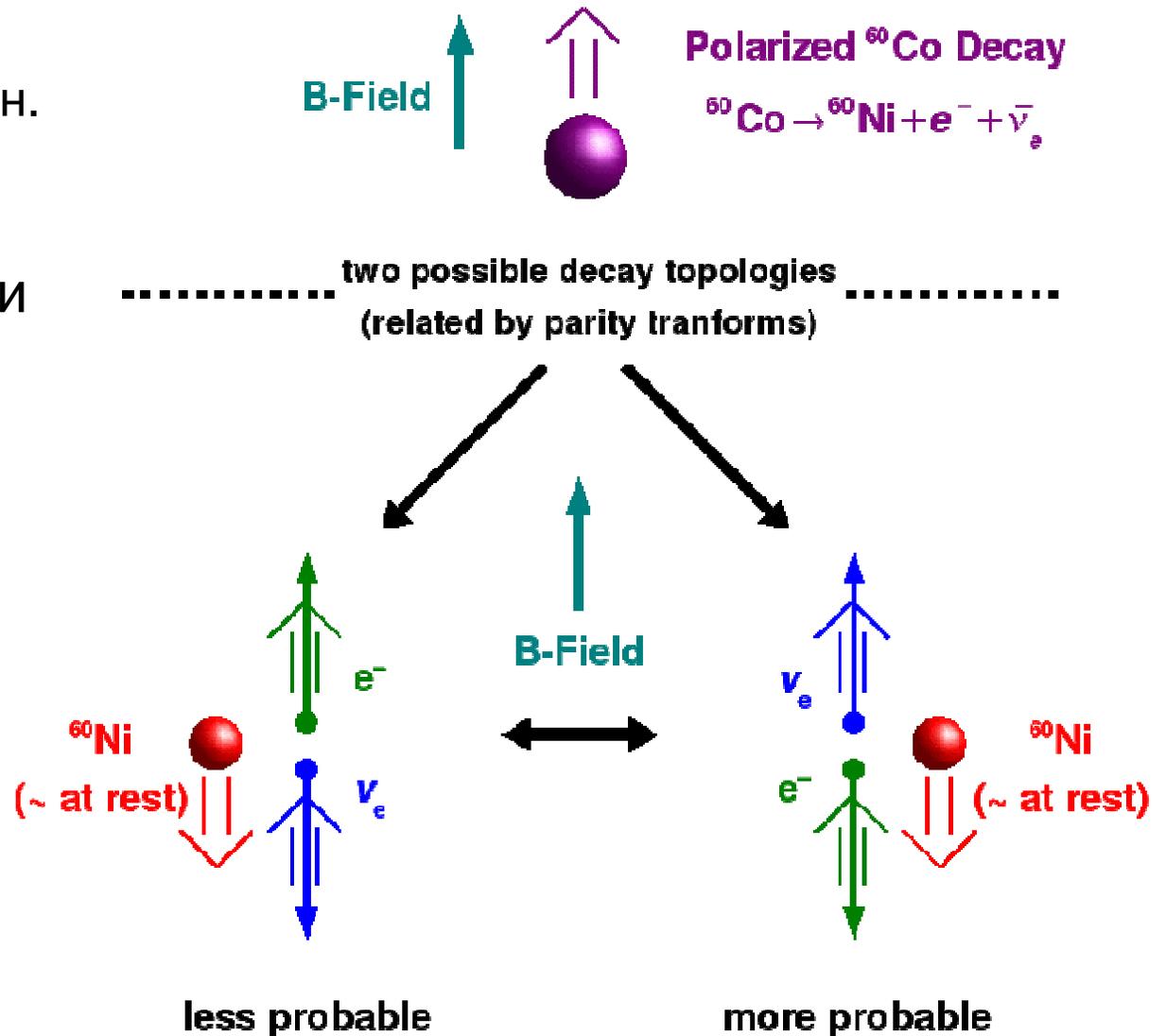
антинейтрино $\bar{\nu} =$
ПРАВЫЕ



нейтрино $\nu =$
ЛЕВЫЕ

Нарушение P - четности

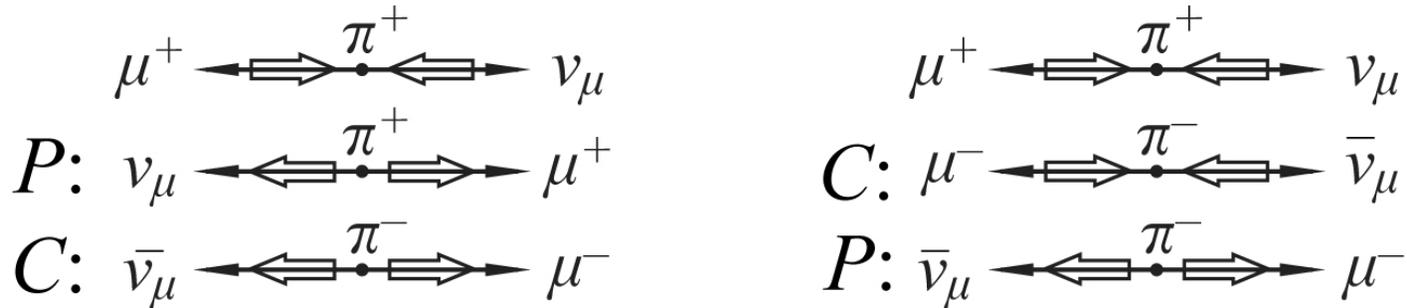
1957 г. Ву, Амблер,
Хайард, Хоппес, Хадсон.
Экспериментальное
подтверждение
нарушения P-четности



CP - симметрия

1957 г. Л. Ландау Сохранение CP-четности

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



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

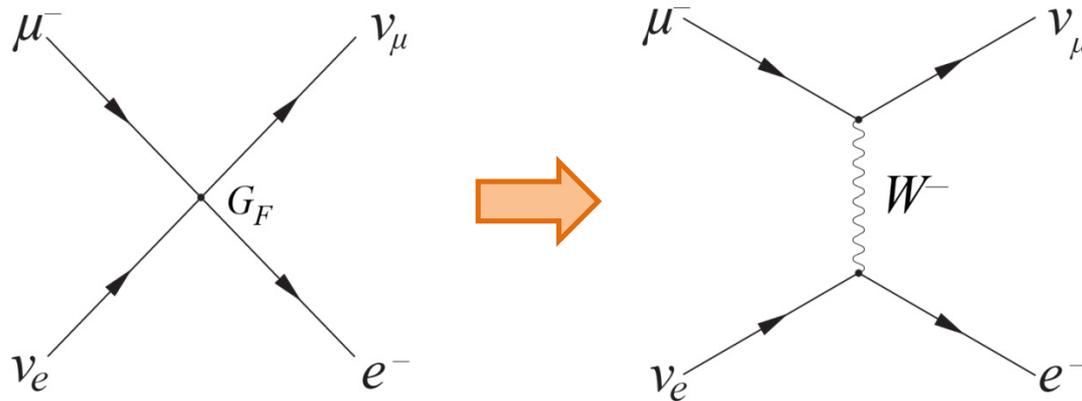
1964 г. Д. Кронин, В. Фитч Экспериментальное обнаружение нарушения CP-четности в распадах K-мезонов

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

Электрослабое взаимодействие

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

Теория электрослабого взаимодействия



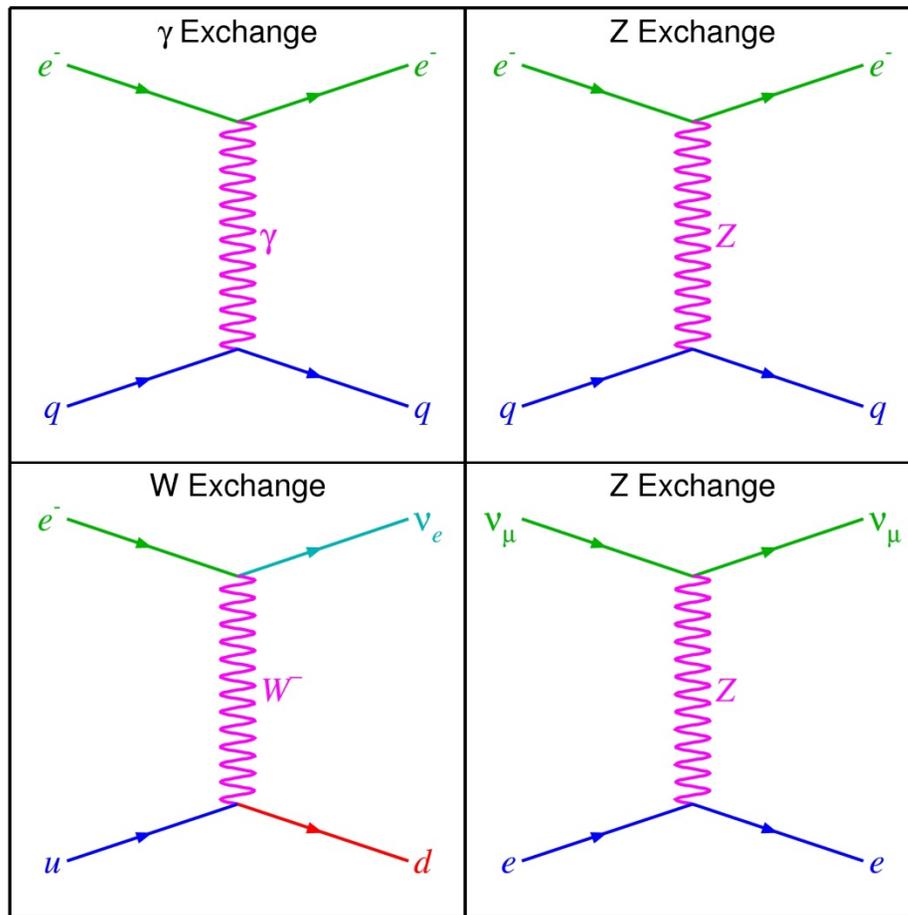
W^+, W^-, Z^0

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

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

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

g – «слабый» заряд
 θ_W – угол Вайнберга



Нейтральные токи

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

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

(из экспериментов)

$$M_W \approx 80 \text{ ГэВ}$$

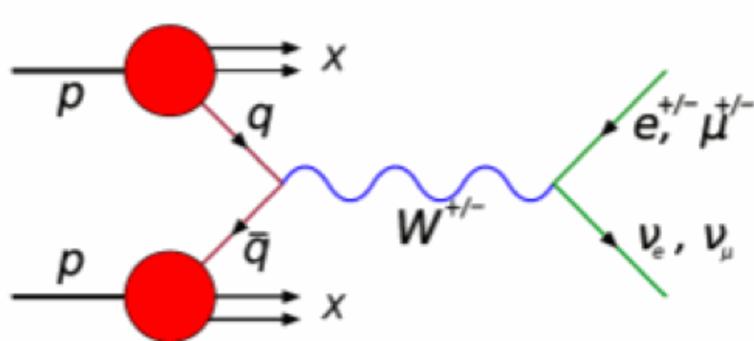
$$M_Z \approx 90 \text{ ГэВ}$$

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

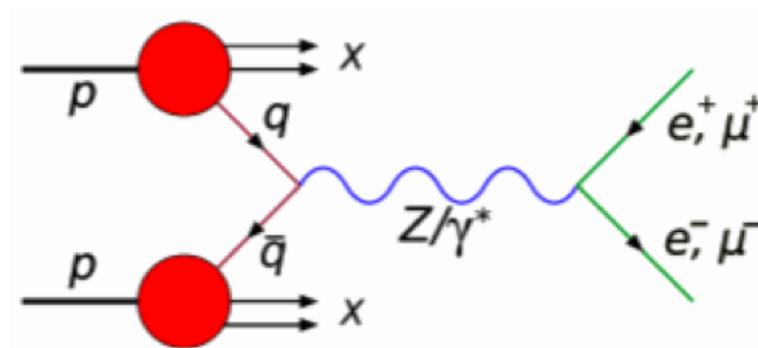
Промежуточные бозоны W^\pm, Z

1983 г. UA1, UA2 (SPS, CERN)



$$m_W c^2 \approx 80 \text{ ГэВ}, W^- \rightarrow e + \bar{\nu}_e.$$

$$E(e) \approx E(\bar{\nu}_e) \approx \frac{m_W c^2}{2} \approx 40 \text{ ГэВ}.$$



$$E_p = E_{\bar{p}} = 270 \text{ ГэВ}$$

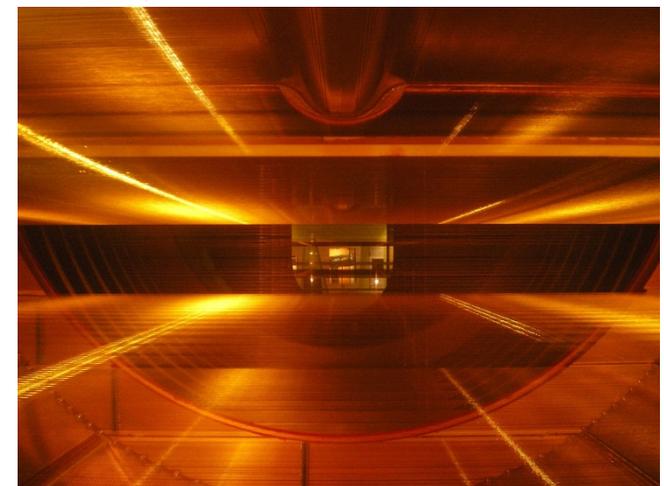
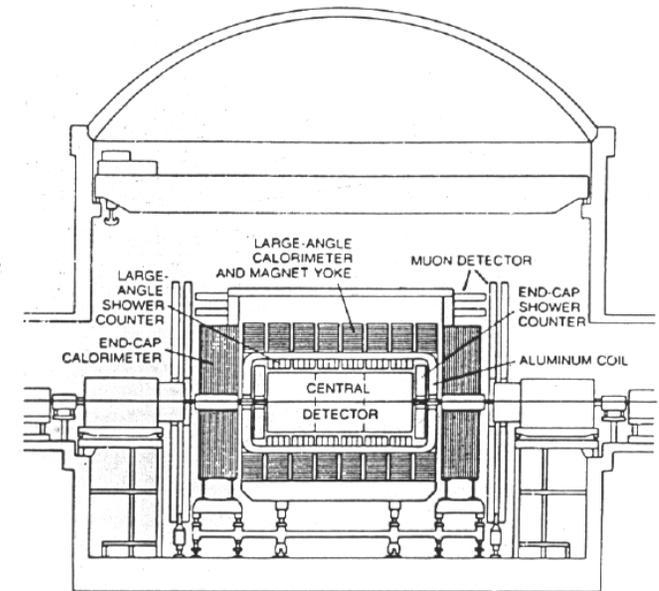
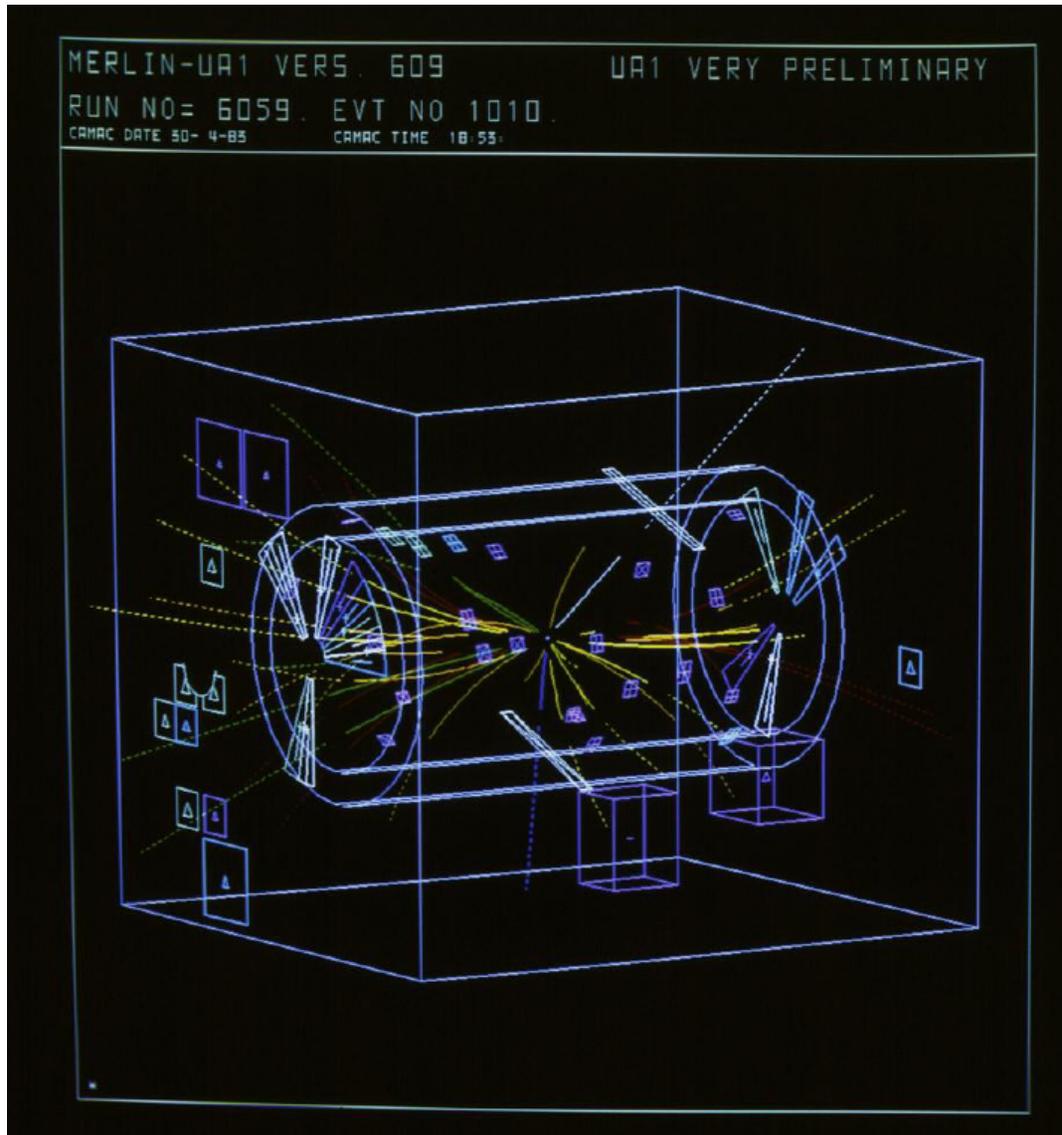
$$\sigma(W^\pm) = 10^{-33} \text{ см}^2$$

10^9 $p\bar{p}$ столкновений $\rightarrow 6W^\pm$

Нобелевская премия по физике

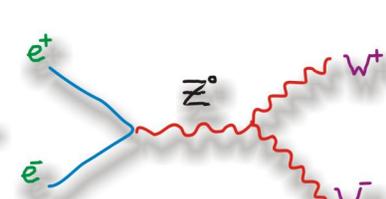
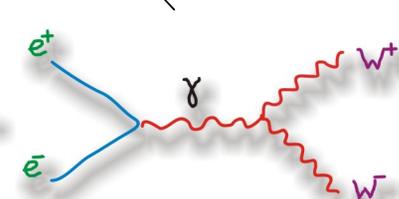
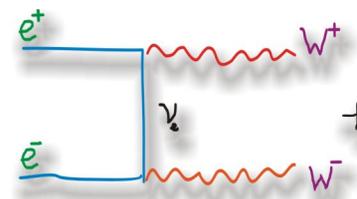
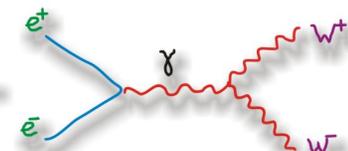
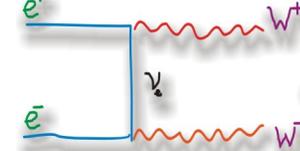
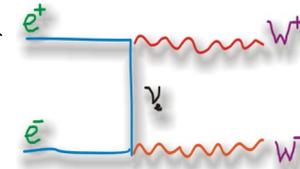
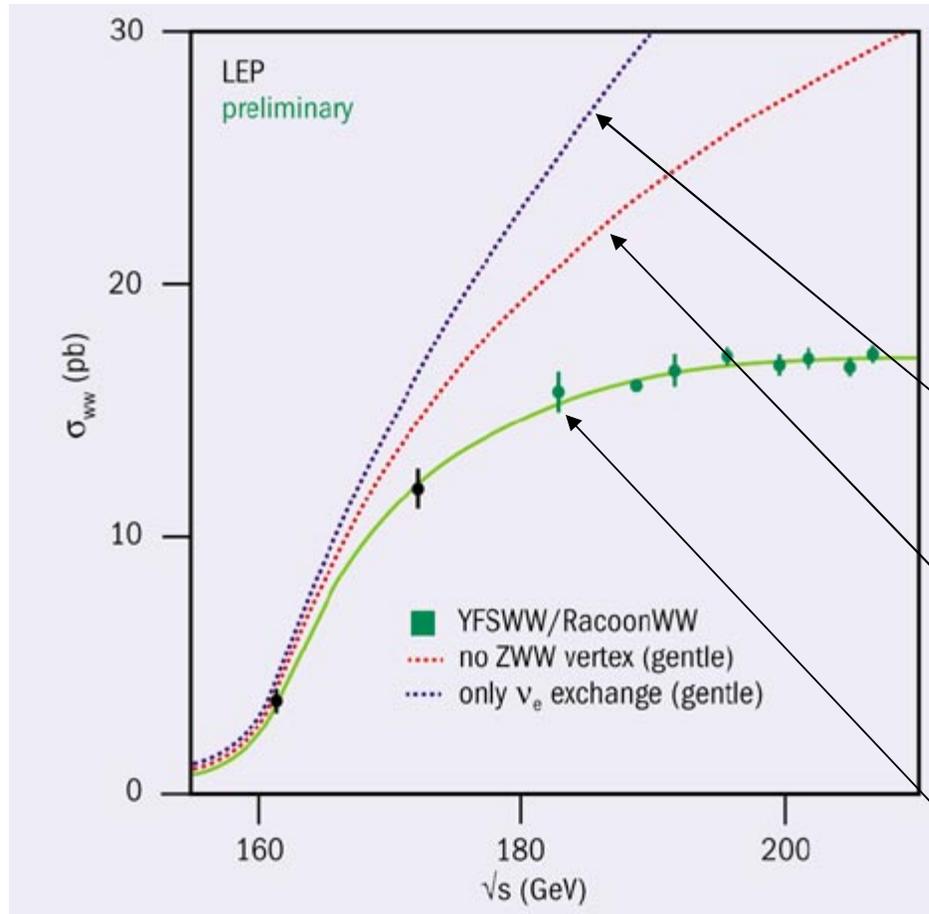
1984 г. – К. Руббиа, С. Ван дер Меер, За решающий вклад в большой проект, осуществление которого привело к открытию квантов поля W и Z — переносчиков слабого взаимодействия

Промежуточные бозоны



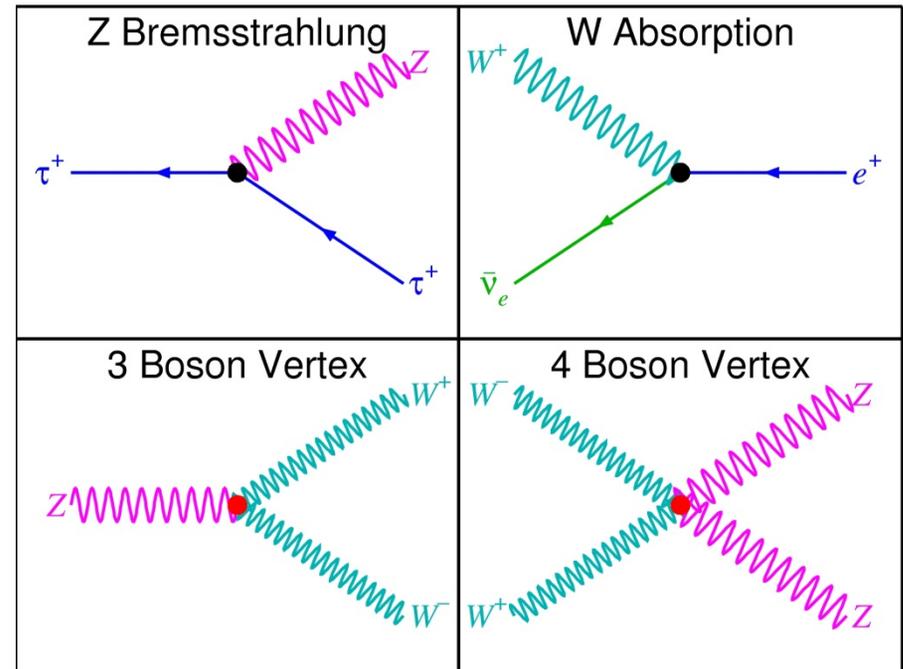
UA1 дрейфовая камера L=5,8 м, D = 2,3 м

Подтверждение структуры взаимодействия электрослабых бозонов



Электрослабое взаимодействие

	Слабое	Электромагнитно
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

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

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

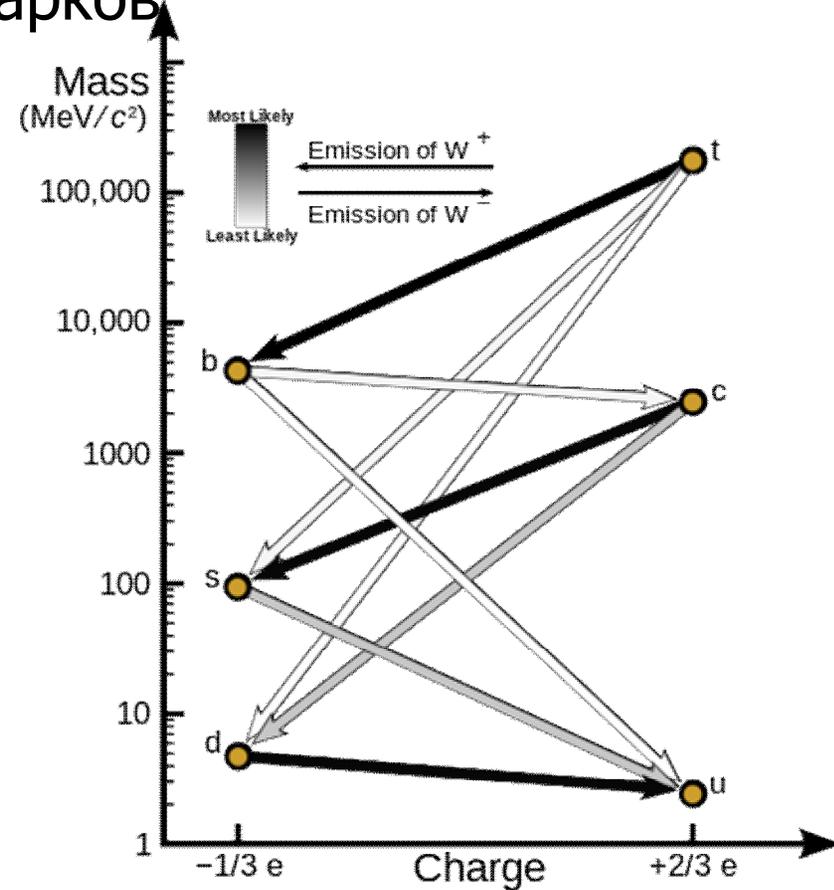
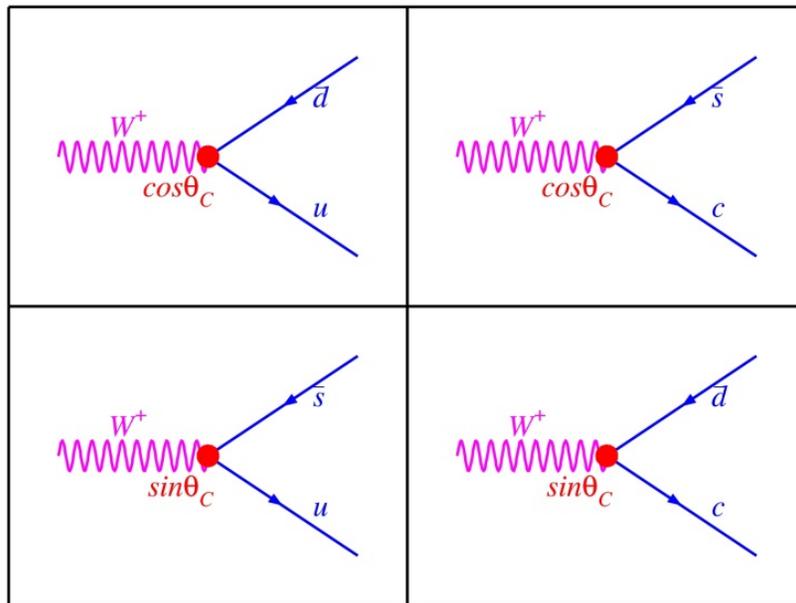
$$Q = I_3 + \frac{B + s + c + b + t}{2}$$

Ароматы и поколения

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

Введение матрицы

Угол Каббибо



Нобелевская премия по физике

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

Как взаимодействуют кварки

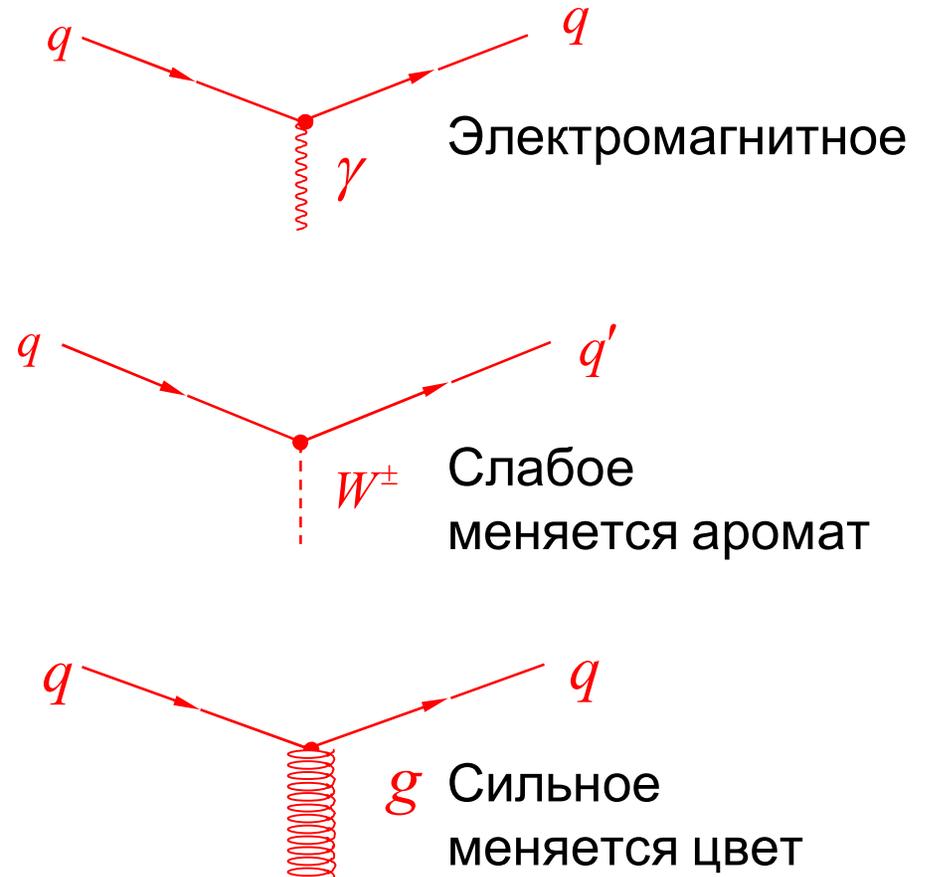
КВАРКИ ($B = 1/3$)

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

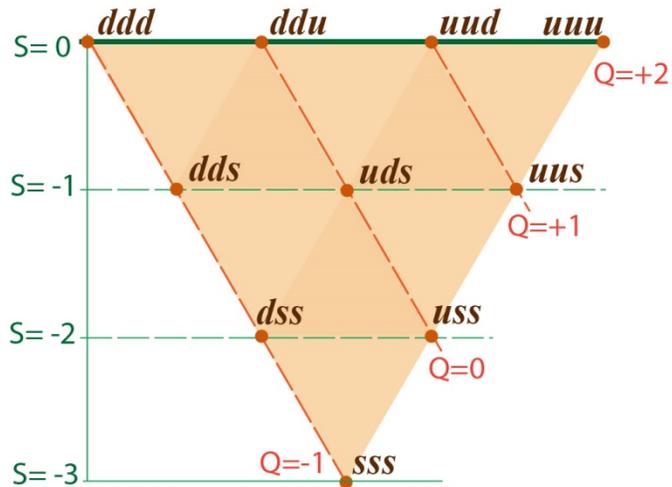


Протон $p = uud$

Нейтрон $n = ddu$



Сильное взаимодействие. Цвет

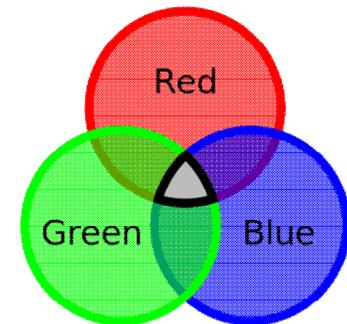


$$\vec{J} = \frac{3}{2} : \uparrow\uparrow\uparrow$$

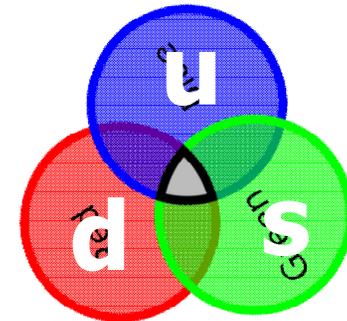
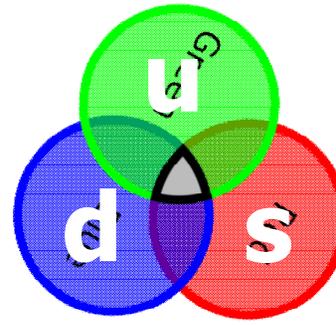
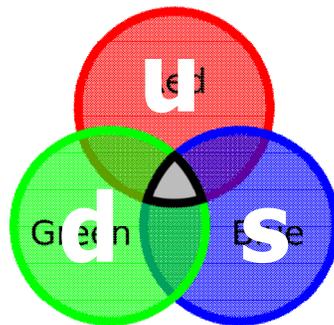
$$\Omega^- : sss$$

$$\Delta^- : ddd$$

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



$\Lambda (uds)$

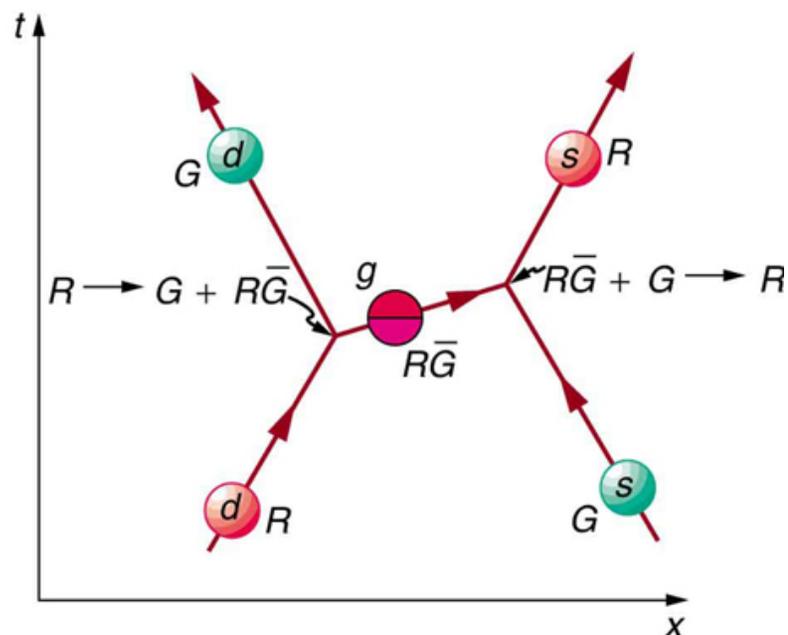


Глюоны



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

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

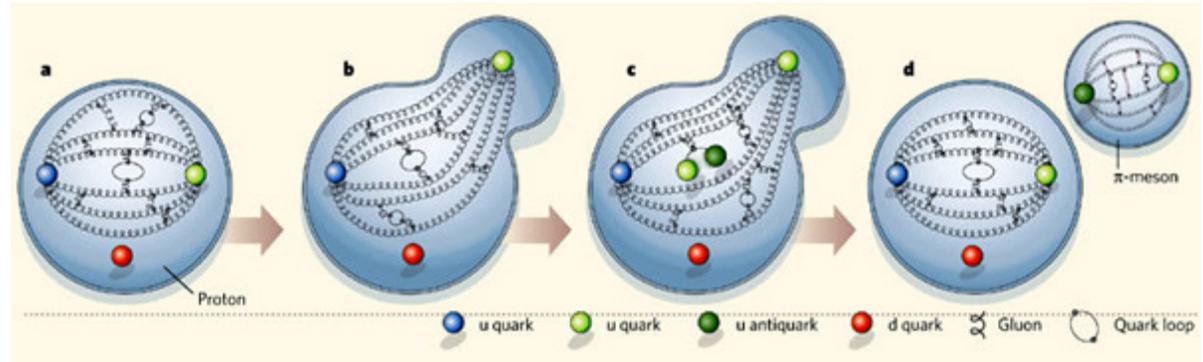
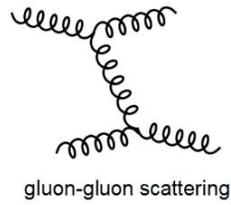
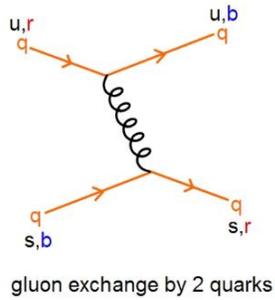


Глюоны – безмассовые электрически нейтральные частицы со спином $J = 1$, четностью $P = -1$, переносят сильное, т. е. цветное взаимодействие между кварками.

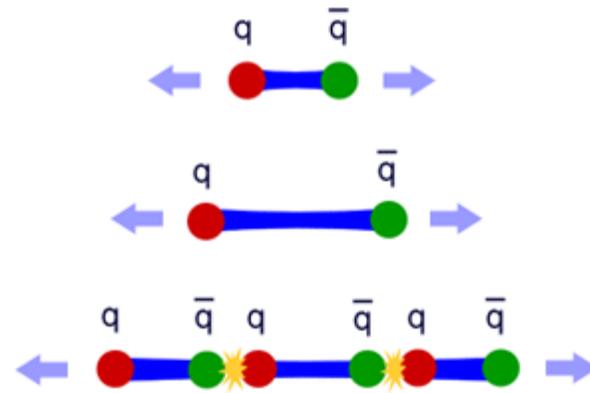
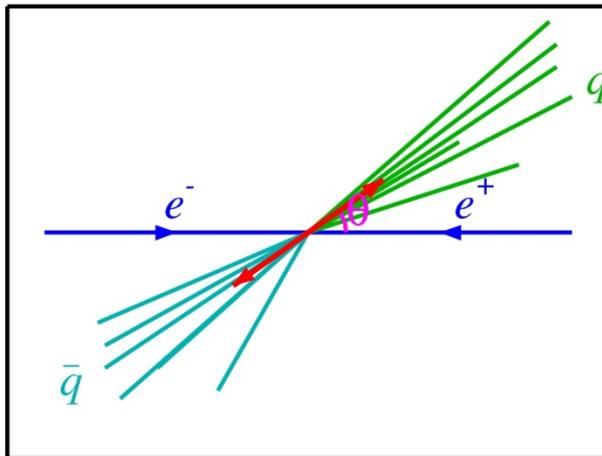
При испускании или поглощении глюона кварки изменяют цвет. При этом остальные квантовые числа кварка и его аромат не изменяются.

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

Адронизация

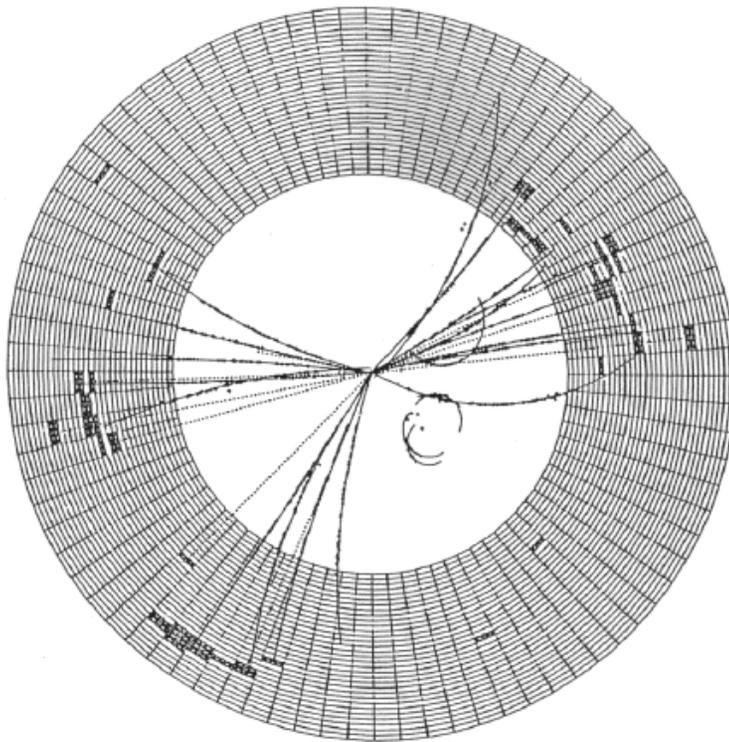
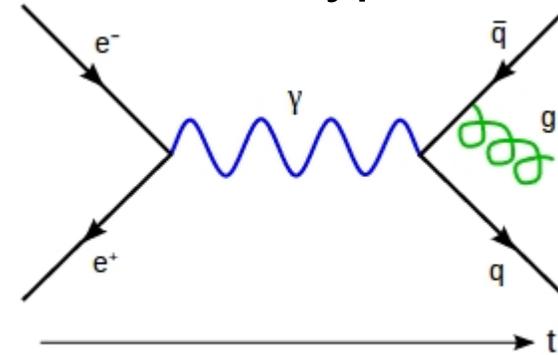


$$e^+e^- \rightarrow \text{Hadrons}$$



Как увидеть глюоны

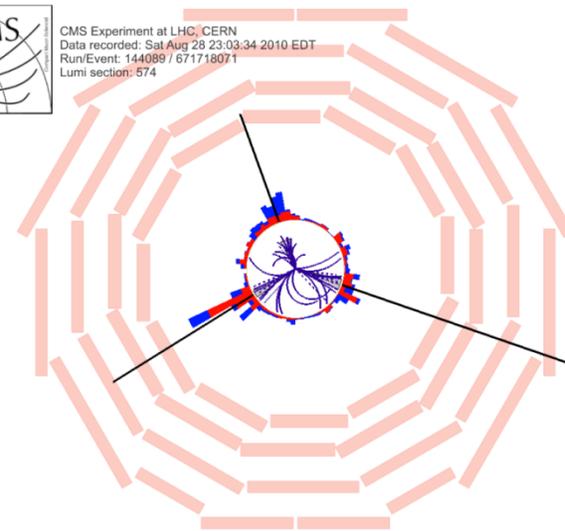
1979 г. Экспериментальное подтверждение существования глюона (DESY, Гамбург)



*** SUHS (GEV) *** PLOT 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



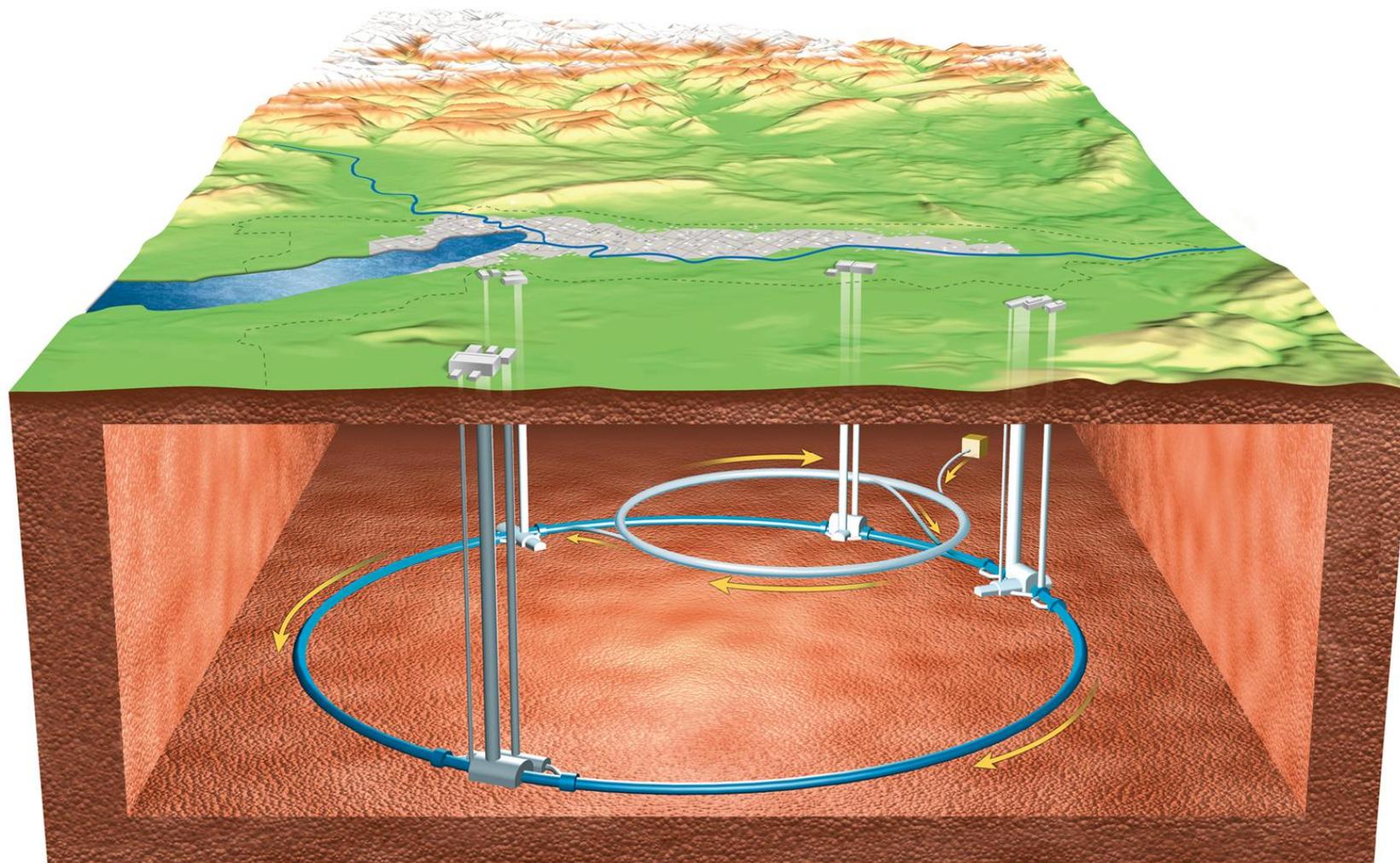


CERN - ЦЕРН

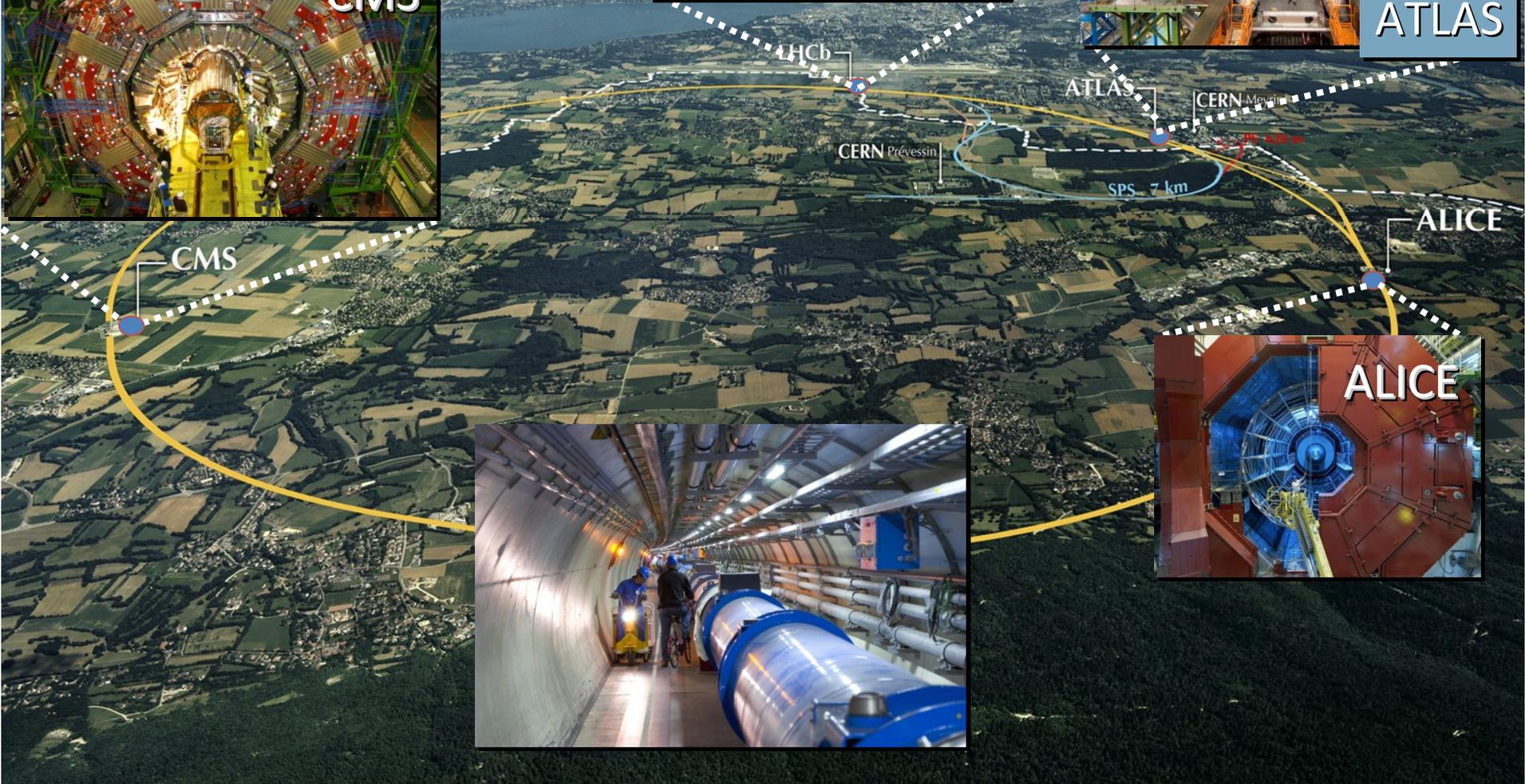
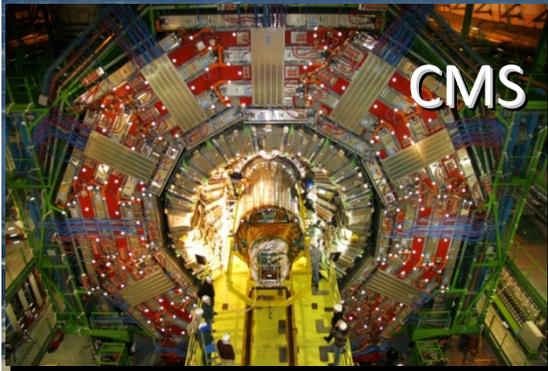
Европейская организация ядерных исследований

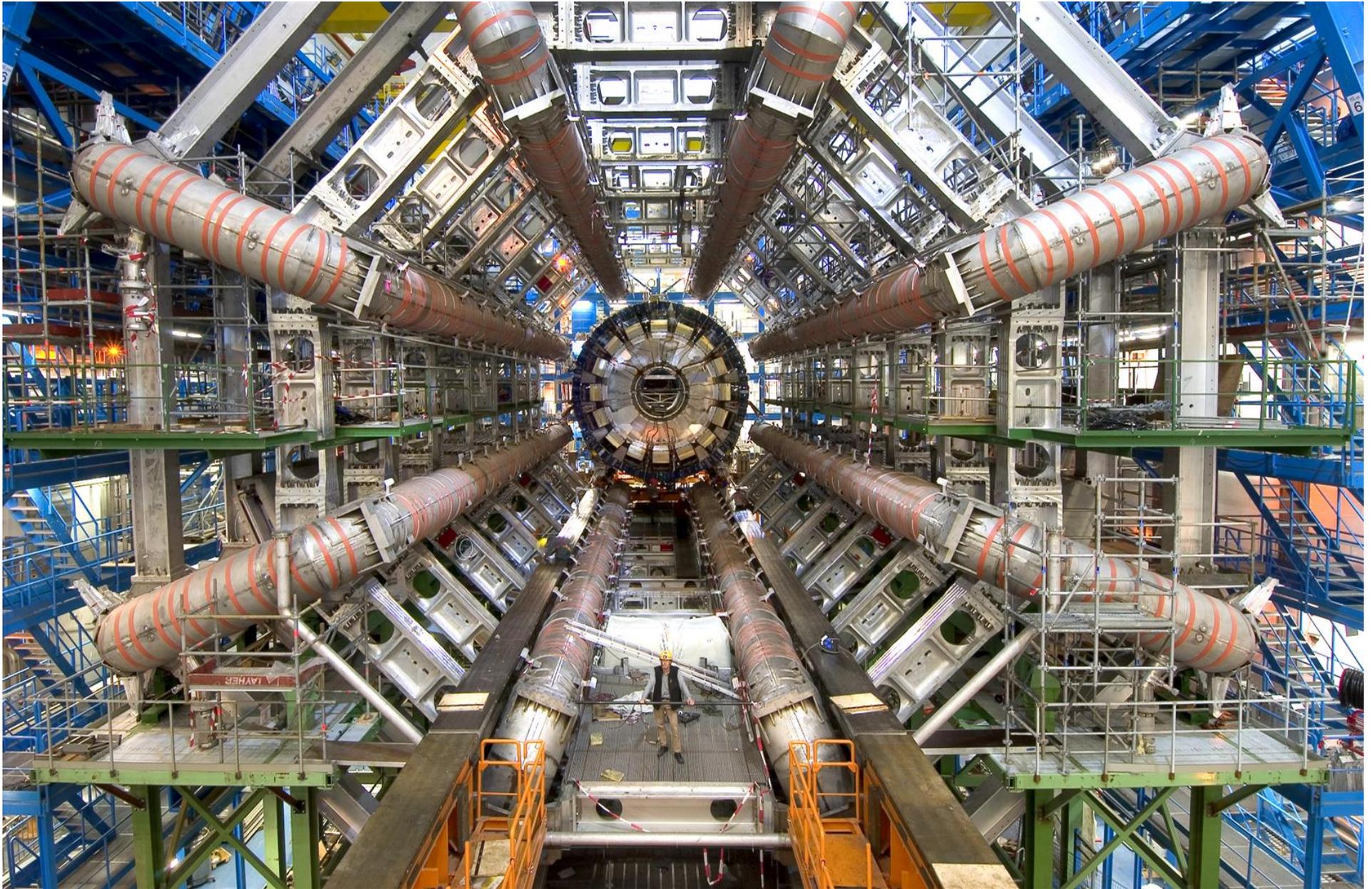


Основное кольцо (27 км) и детекторы LHC на глубине примерно 70-100 м.
Энергия столкновений 14 ТэВ, интегральная светимость до 100 фб⁻¹

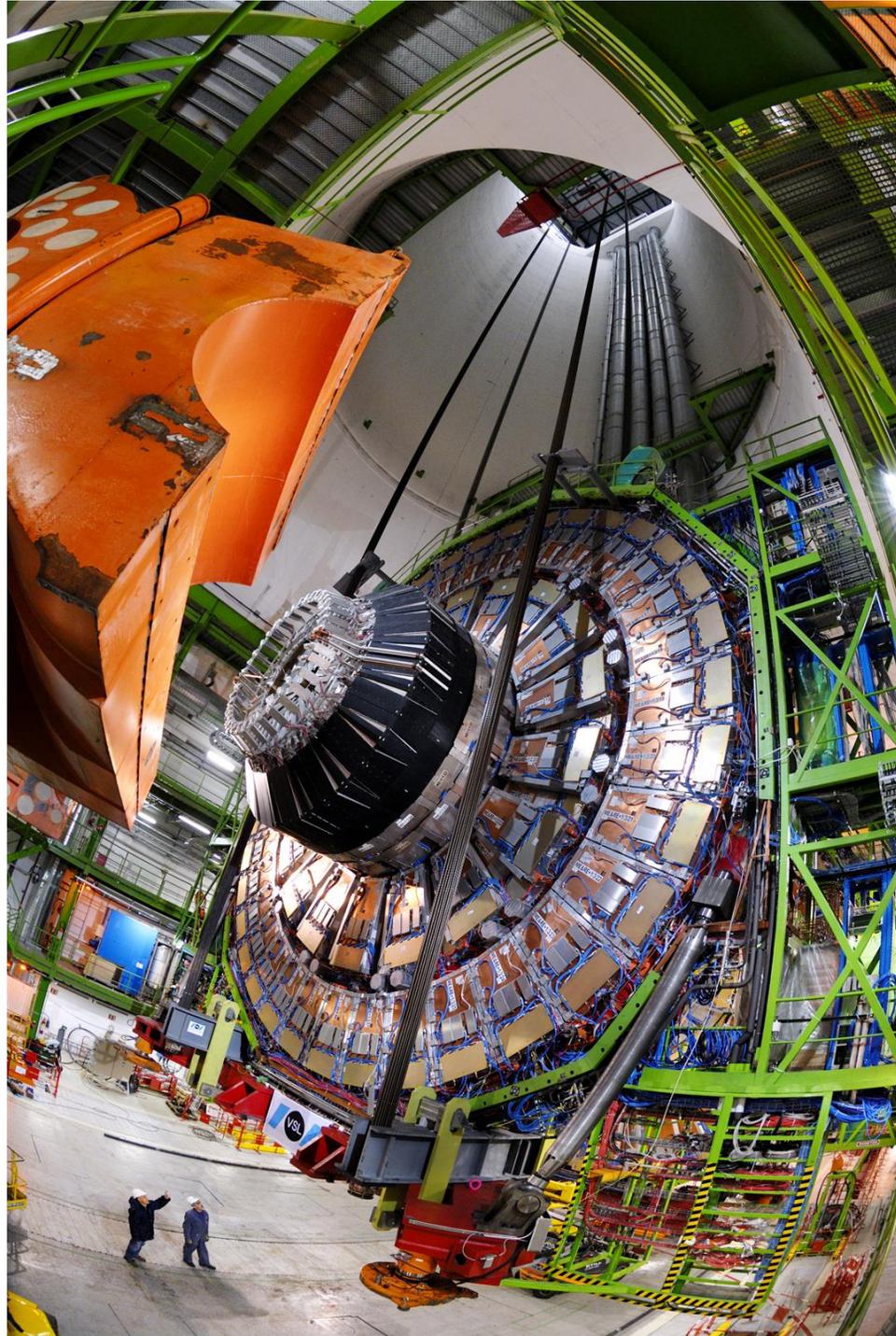


Большой адронный коллайдер (детекторы: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE)



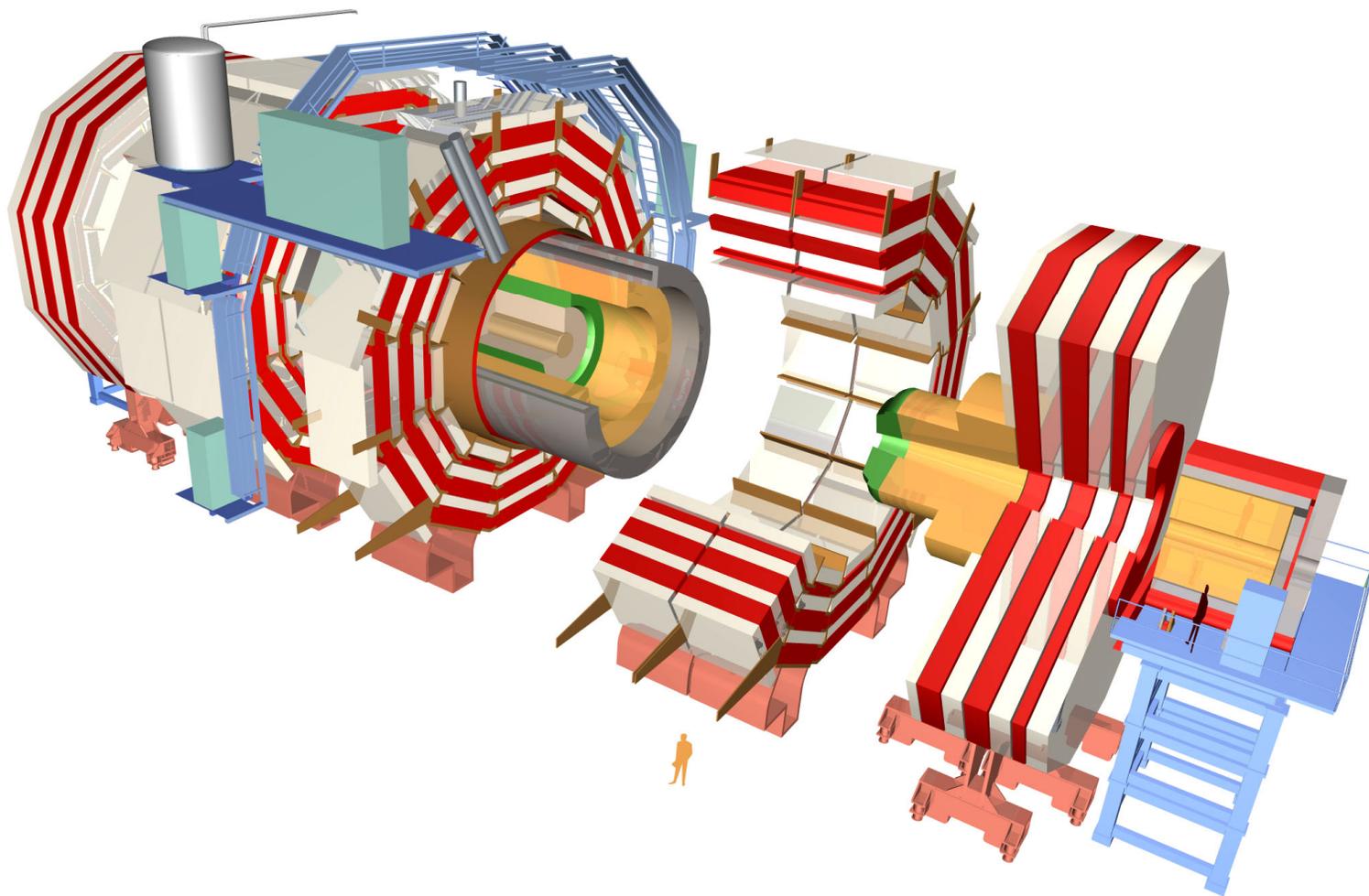


Рождение и жизнь атомных ядер. Взаимодействия

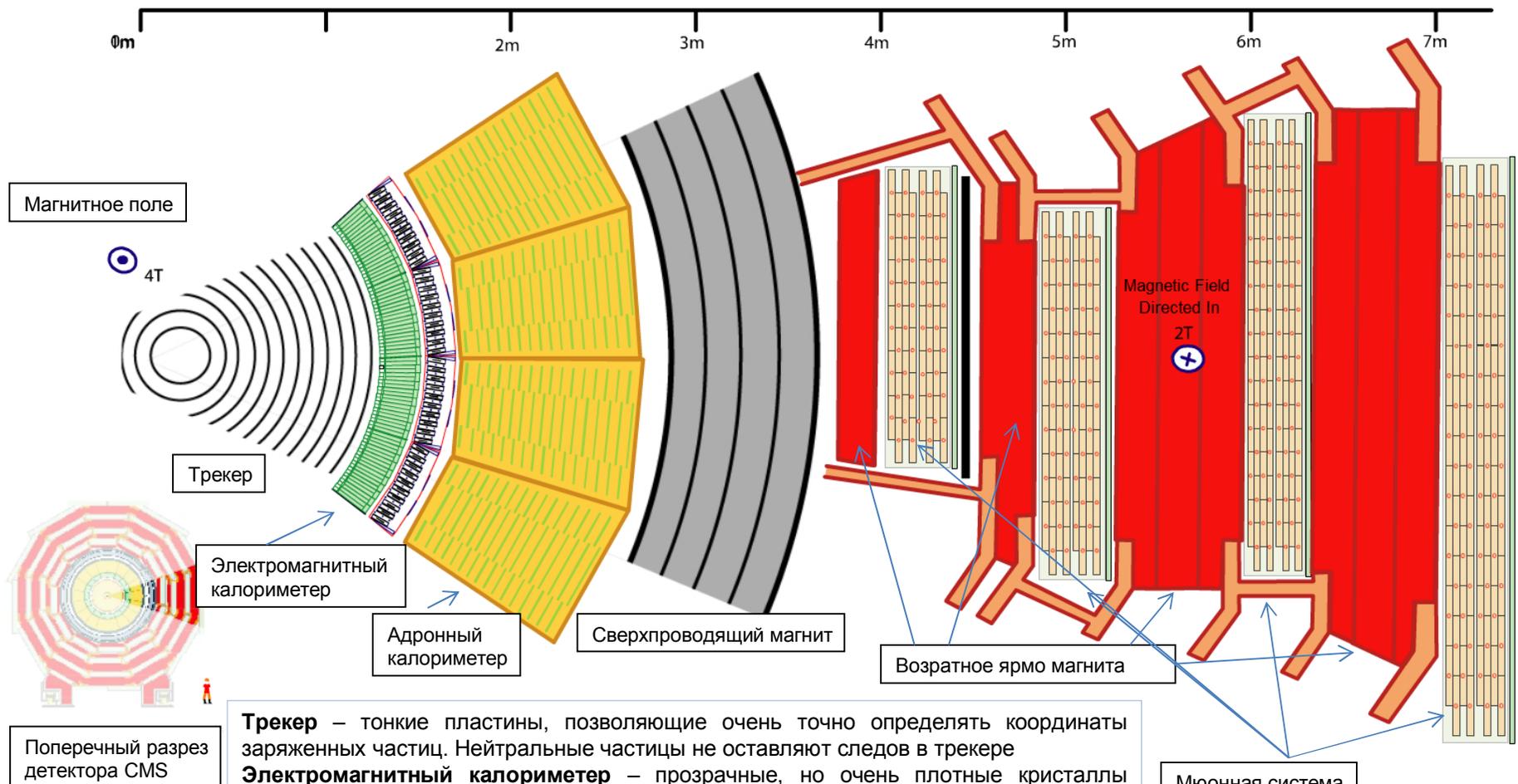




Детектор на коллайдере



Детектор



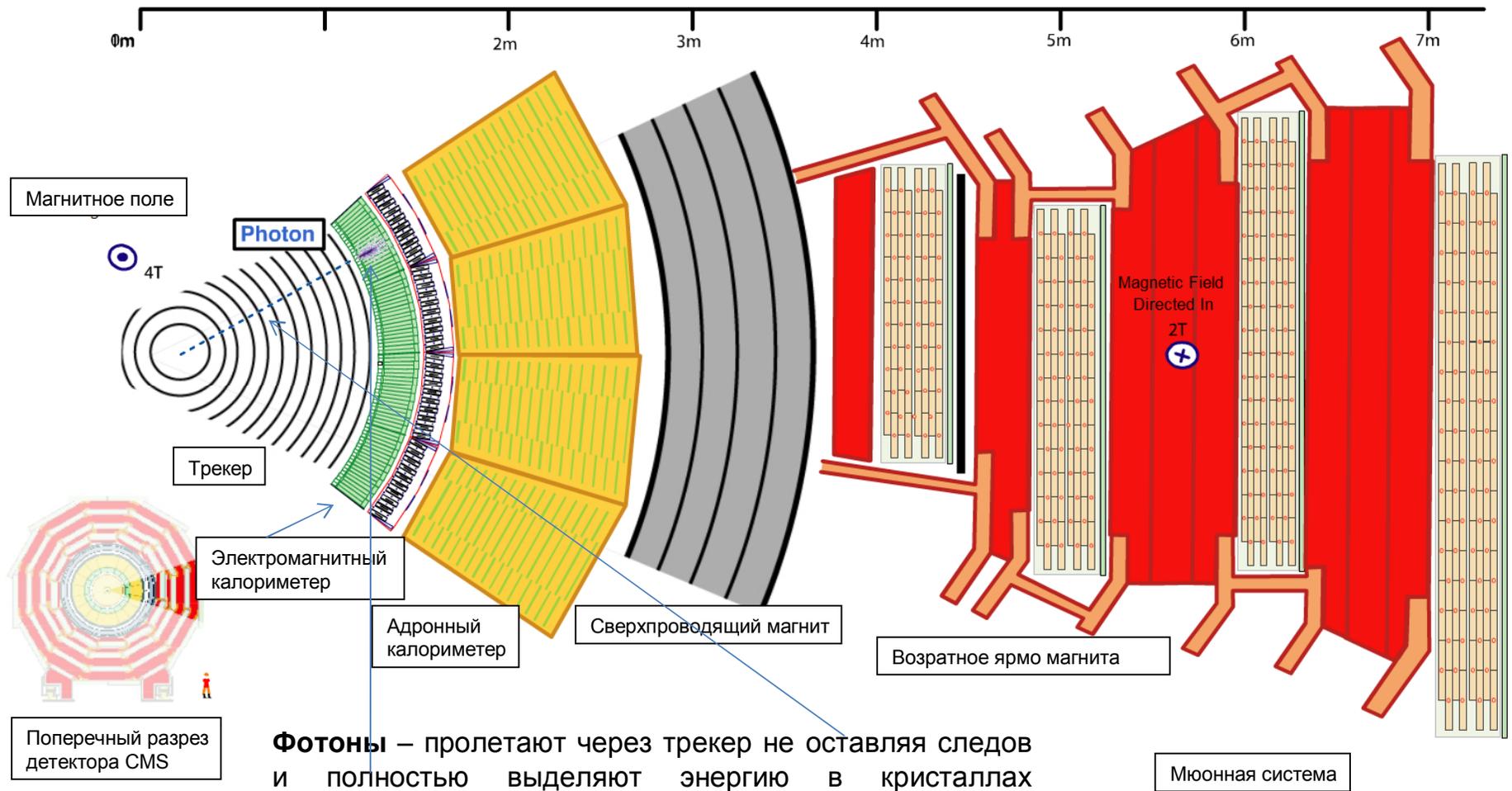
Трекер – тонкие пластины, позволяющие очень точно определять координаты заряженных частиц. Нейтральные частицы не оставляют следов в трекаре

Электромагнитный калориметр – прозрачные, но очень плотные кристаллы (тяжелее железа!). Электроны (e) и фотоны (γ) полностью застревают в них, оставляя всю энергию. Остальные частицы пролетают насквозь не оставляя следа

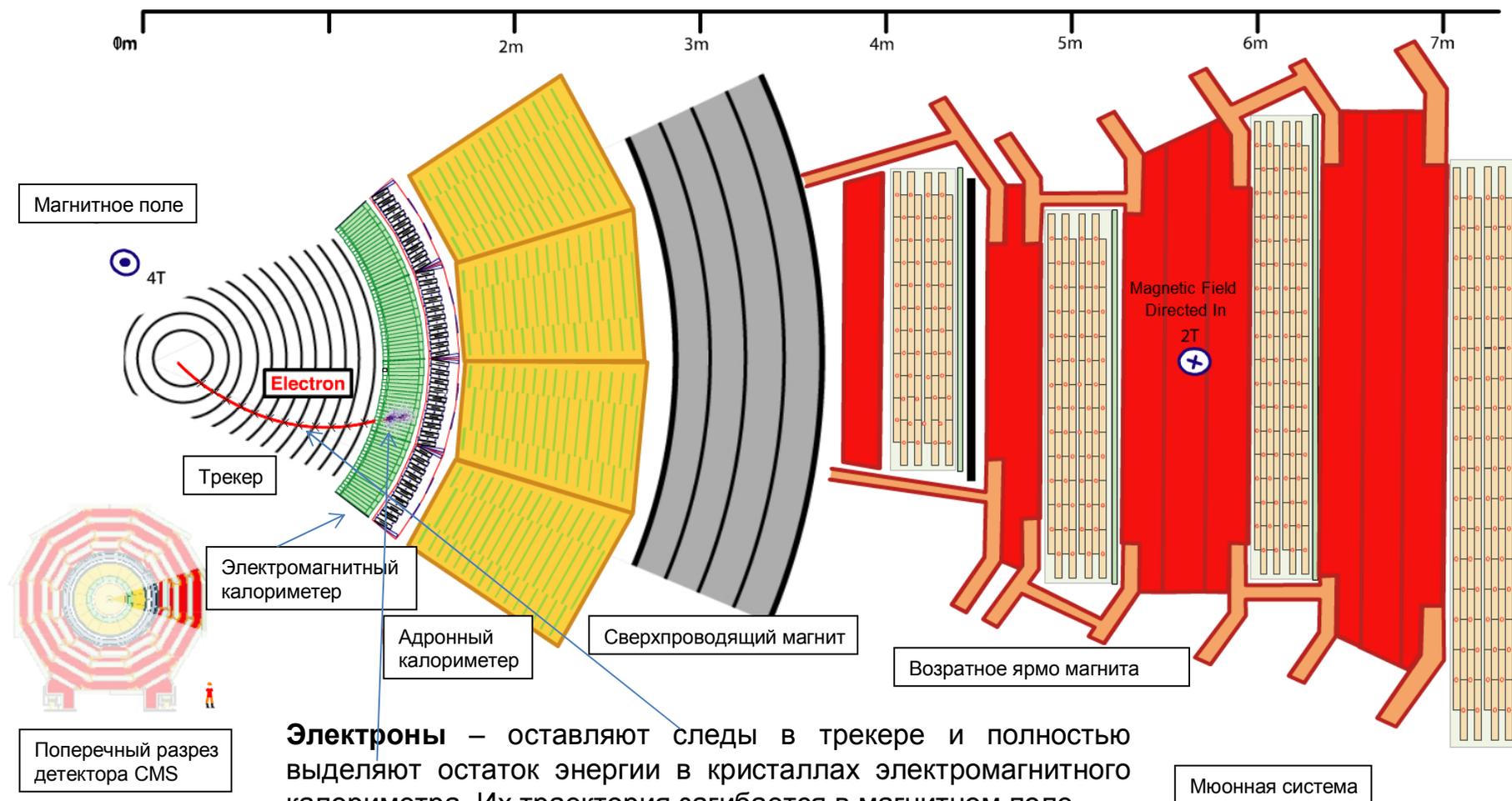
Адронный калориметр – толстый слой латуни, все тяжёлые частицы кроме мюонов застревают тут

Мюонная система – самый внешний слой детектора, сюда долетают и оставляют след только мюоны (μ)

Фотон в детекторе



Электроны (e^- и e^+) в детекторе

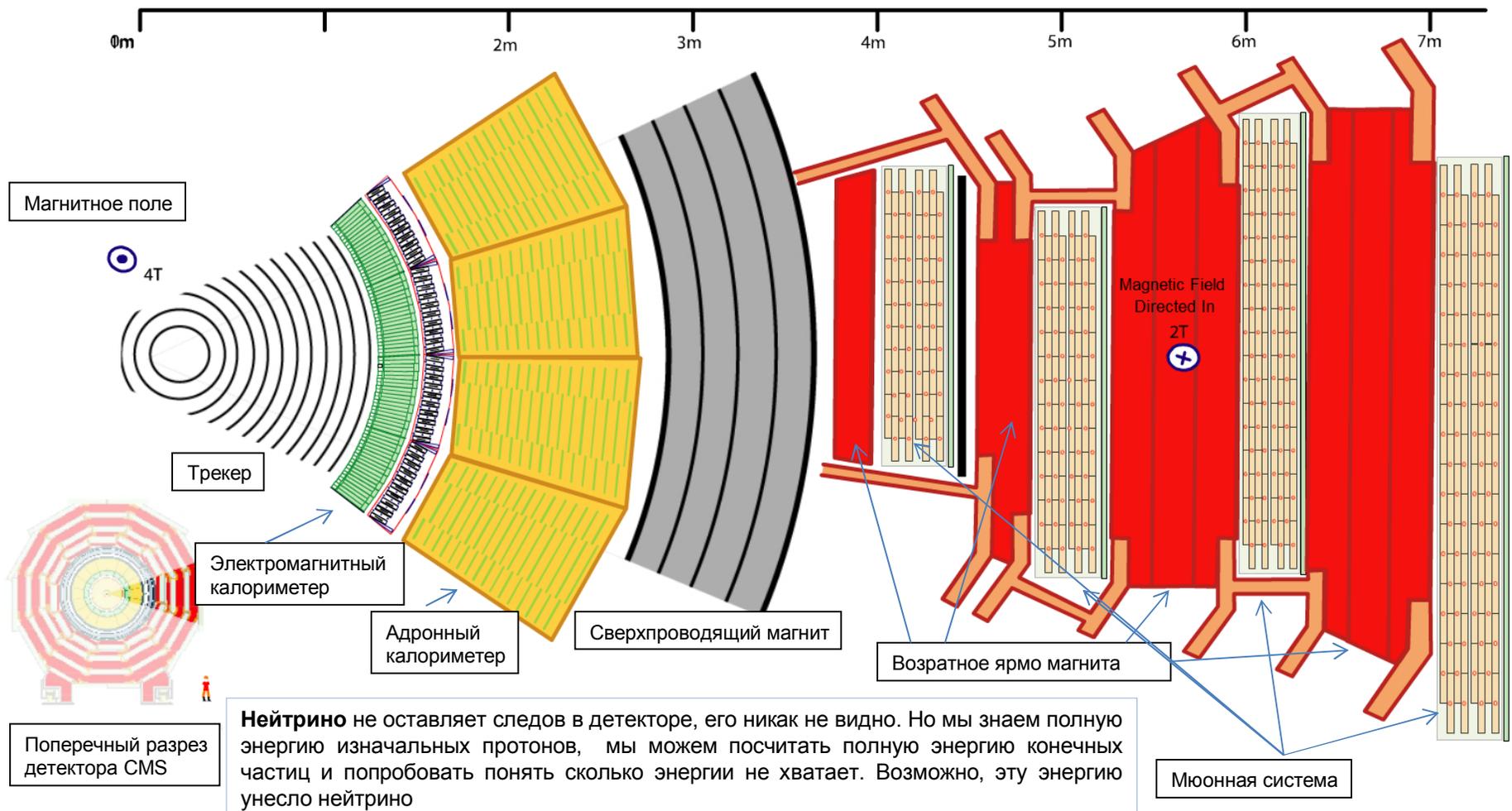


Электроны – оставляют следы в треке и полностью выделяют остаток энергии в кристаллах электромагнитного калориметра. Их траектория загибается в магнитном поле.

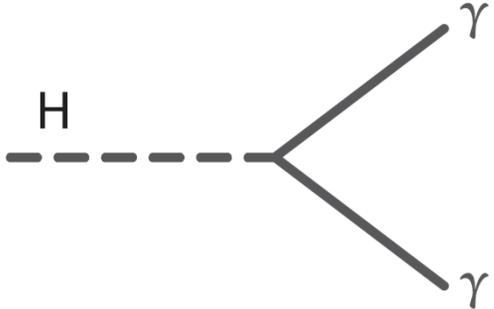
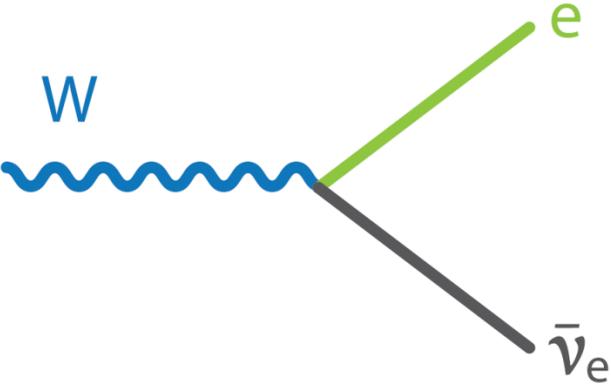
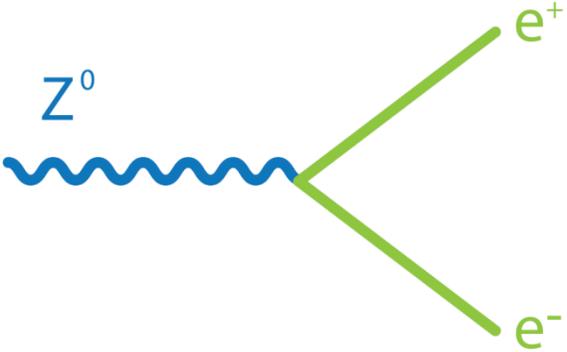
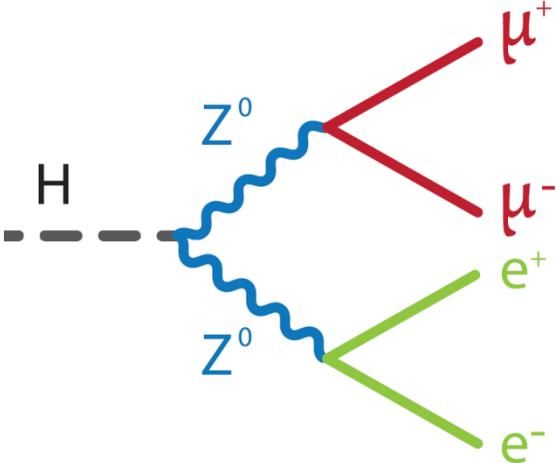
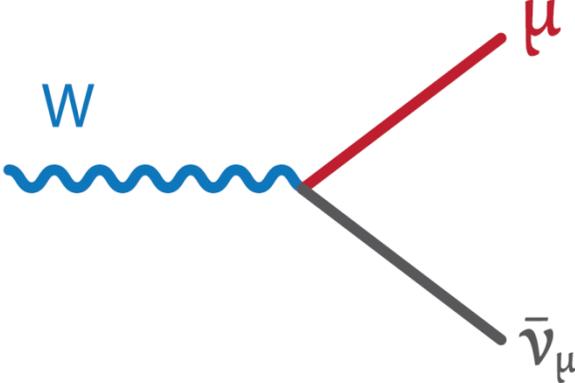
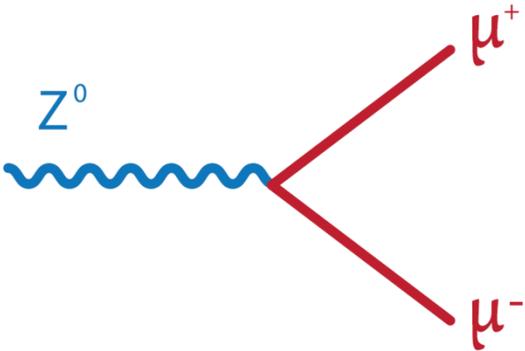
Мюоны (μ) в детекторе



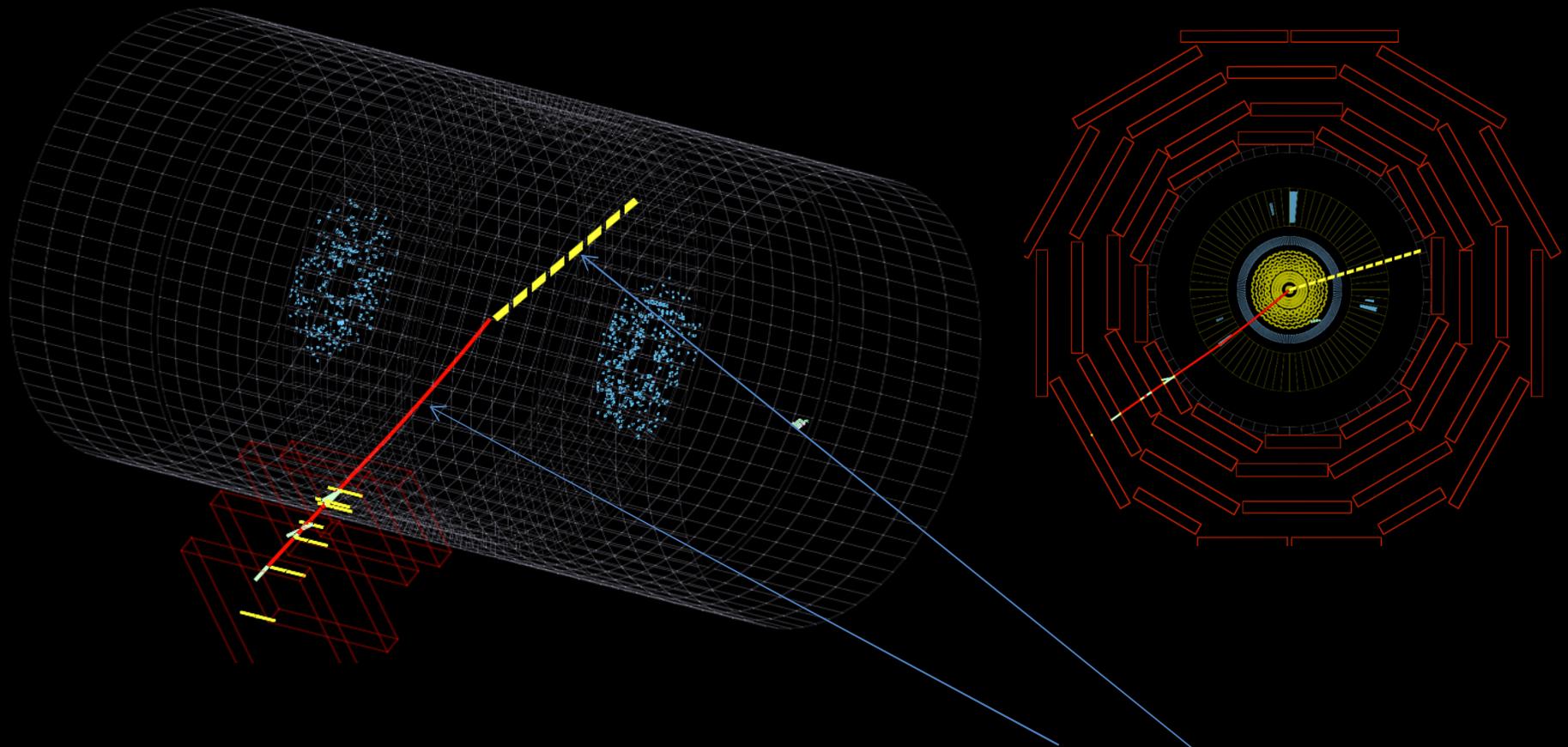
Нейтрино



Распады Z, W и Хиггс-бозонов

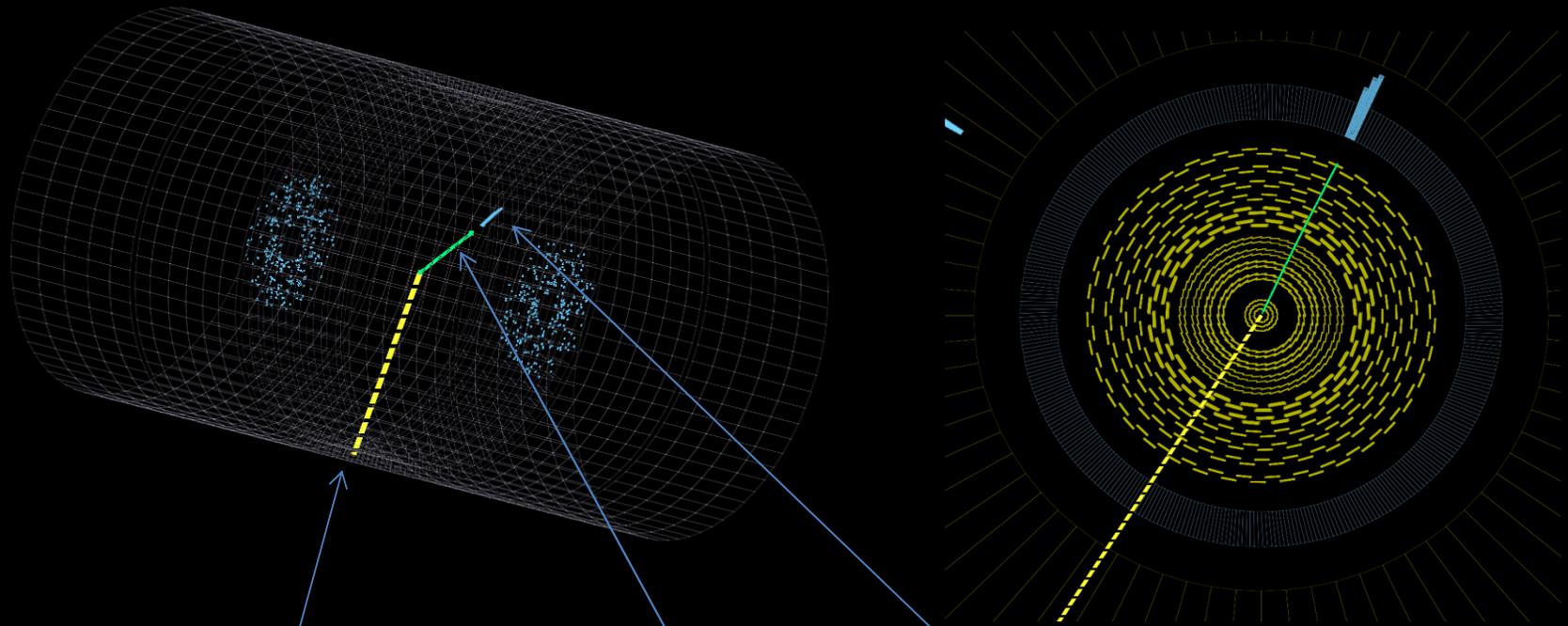


W-бозон



Частица, долетевшая до самых внешних слоёв – это **мюон**.
Недостающая энергия – считаем что это **нейтрино**.
Нейтрино и мюон – это, возможно, распад **W-бозона**.

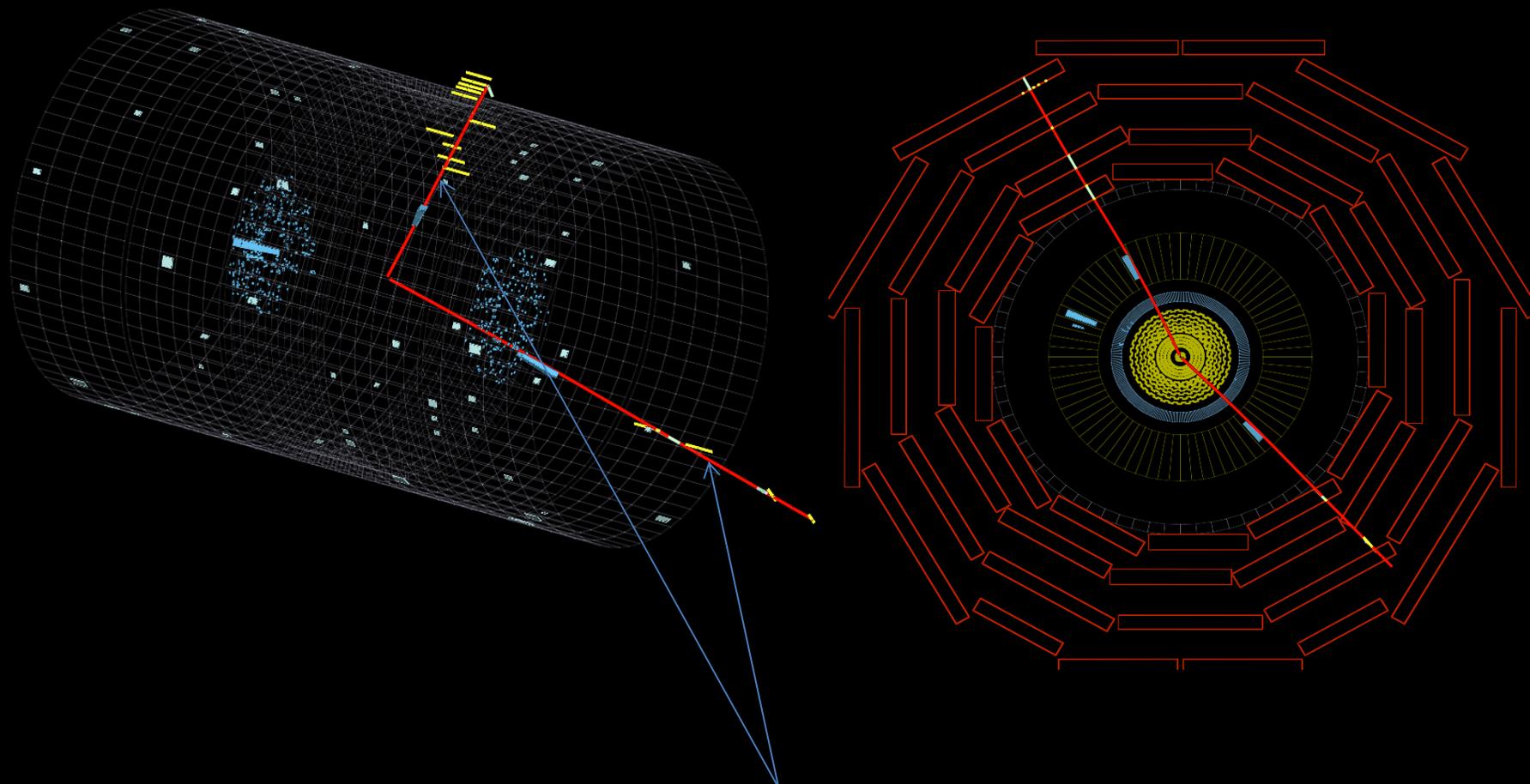
W-бозон



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**.

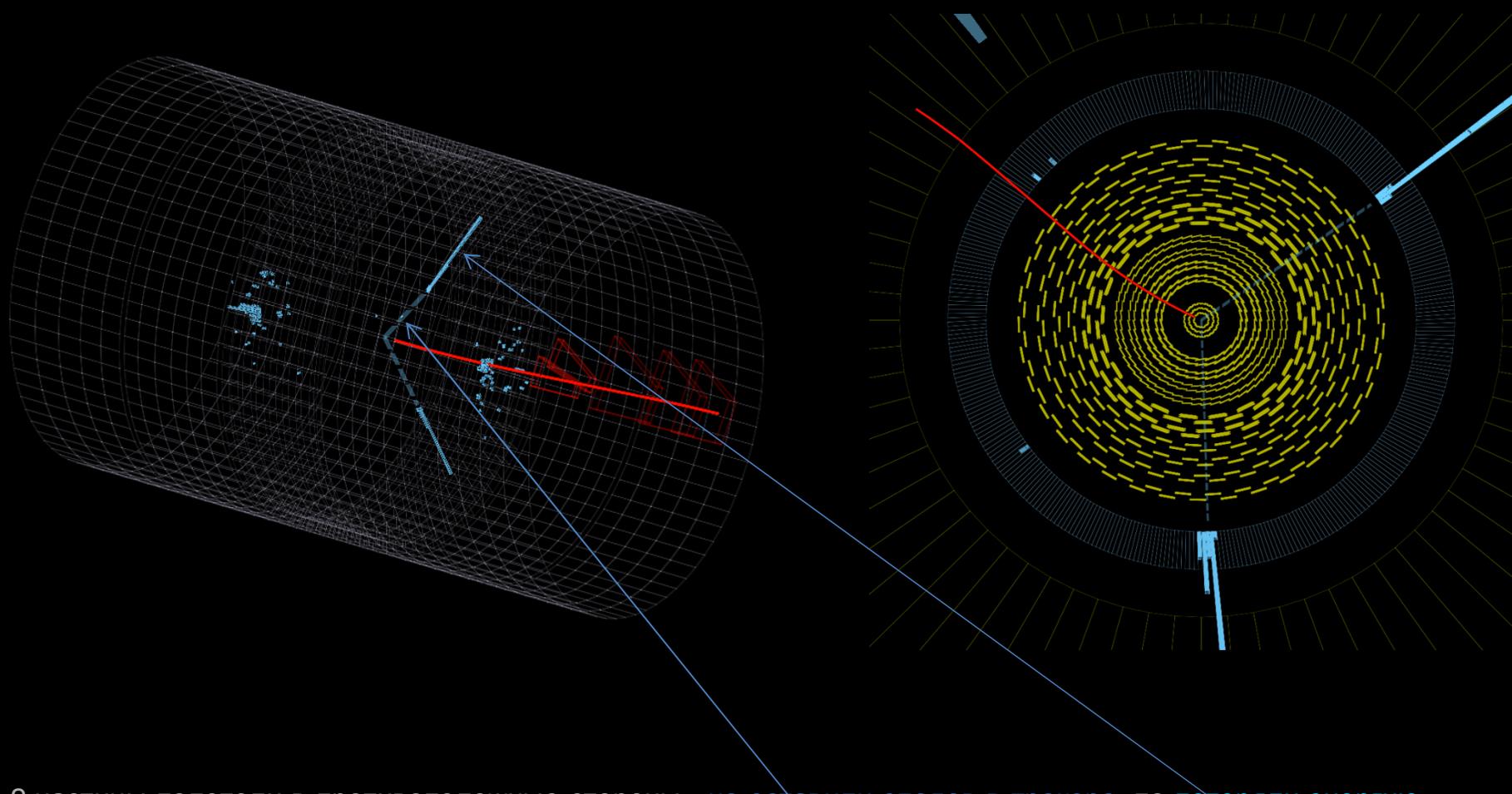
Z-бозон



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

Пара мюонов – это, возможно, распад Z-бозона

Бозон Хиггса (2 фотона)



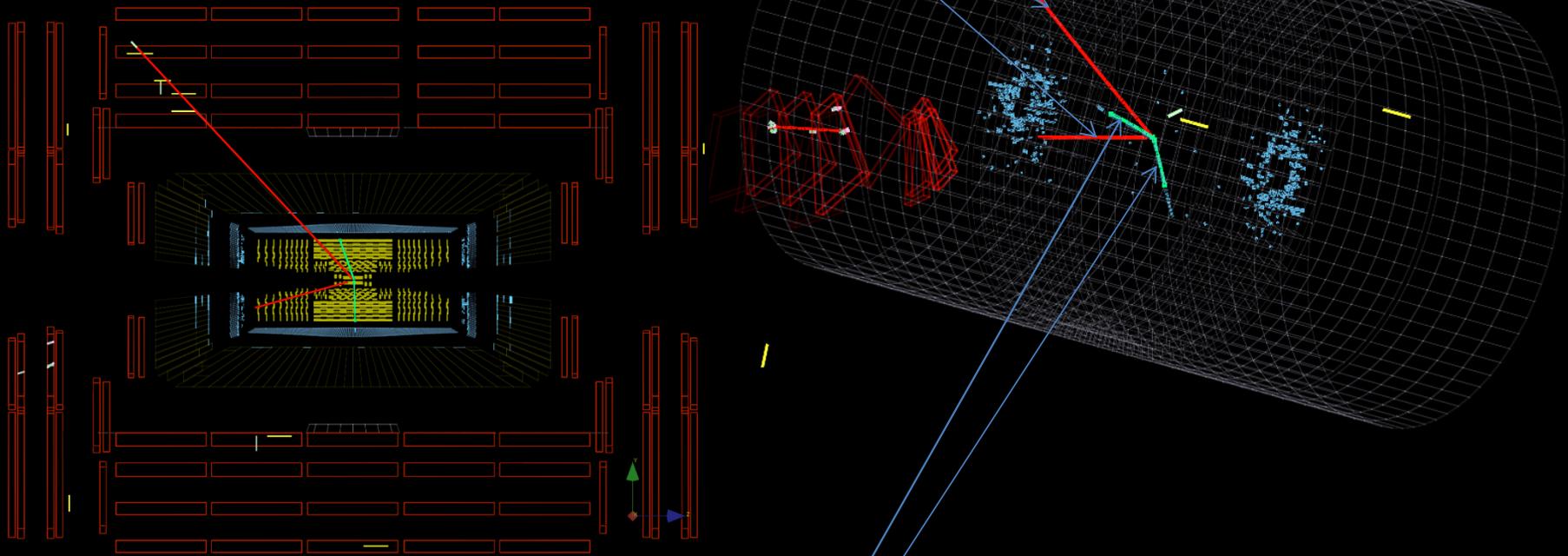
2 частицы полетели в противоположные стороны, не оставили следов в трекаре, по потеряли энергию в электромагнитном калориметре, скорее всего это фотоны. 2 фотона – это, возможно, распад бозона Хиггса.

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**

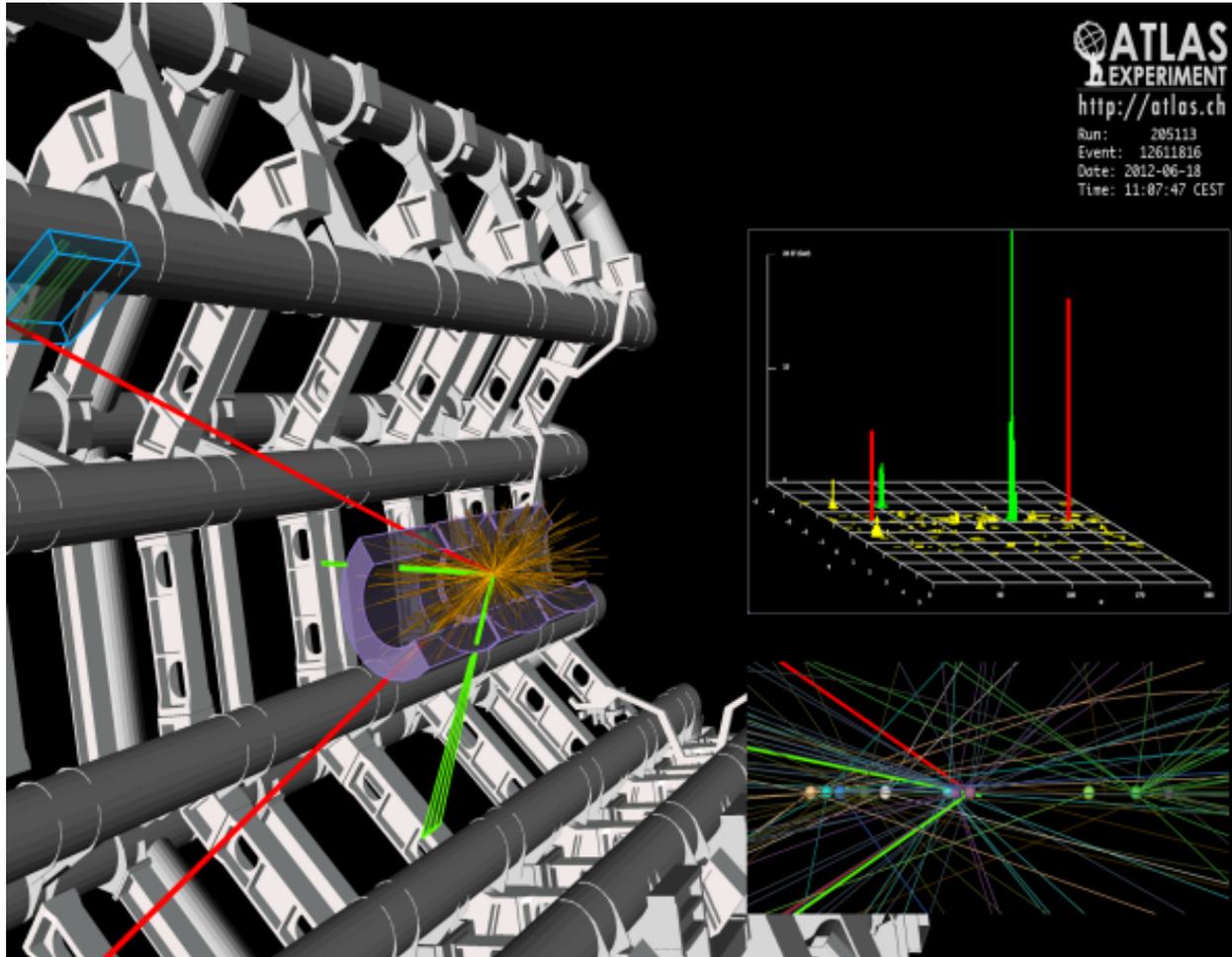


Частицы, которые оставили след только в трекаре – это, скорее всего, **электроны**

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

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

Событие $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2e 2\mu$



Green tracks:

$e_1 : P_T = 18.7 \text{ GeV}$,

$e_2 : P_T = 76.0 \text{ GeV}$

2e invariant mass

$M(ee) = 87.9 \text{ GeV}$

Red tracks:

$\mu_1 : P_T = 19.6 \text{ GeV}$

$\mu_2 : P_T = 7.9 \text{ GeV}$

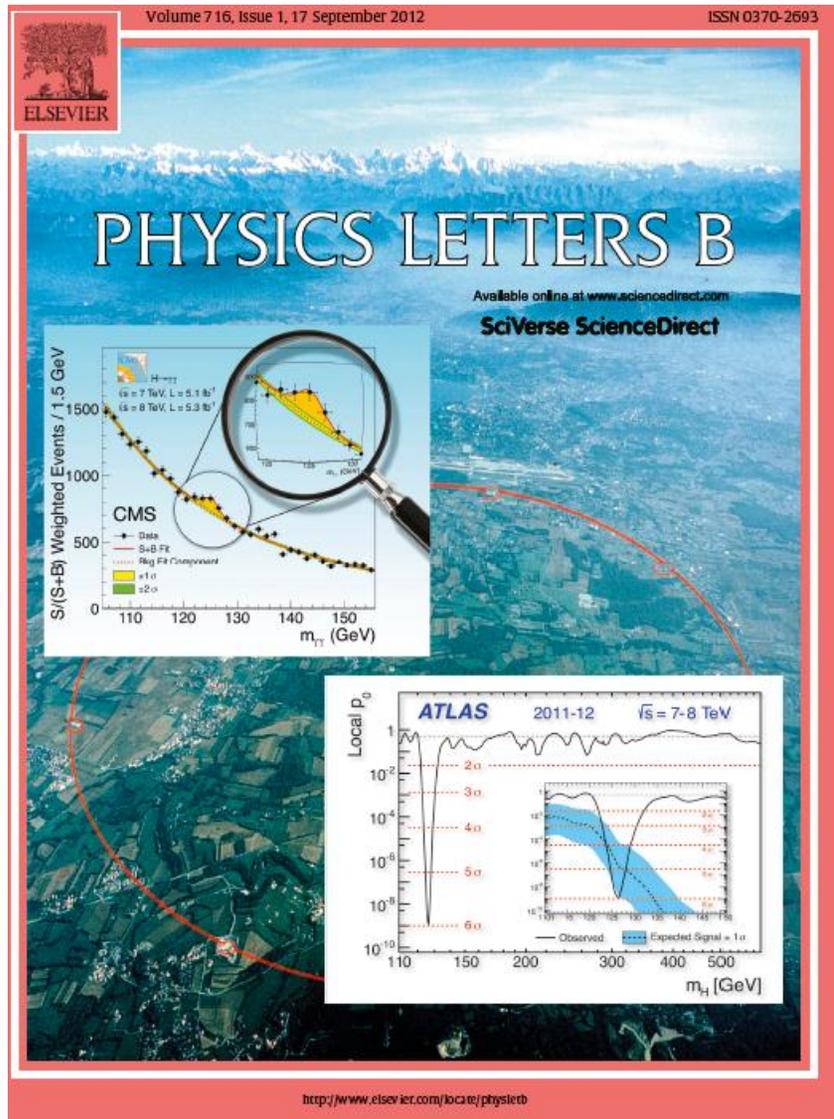
2 μ invariant mass

$M(\mu\mu) = 19.6 \text{ GeV}$.

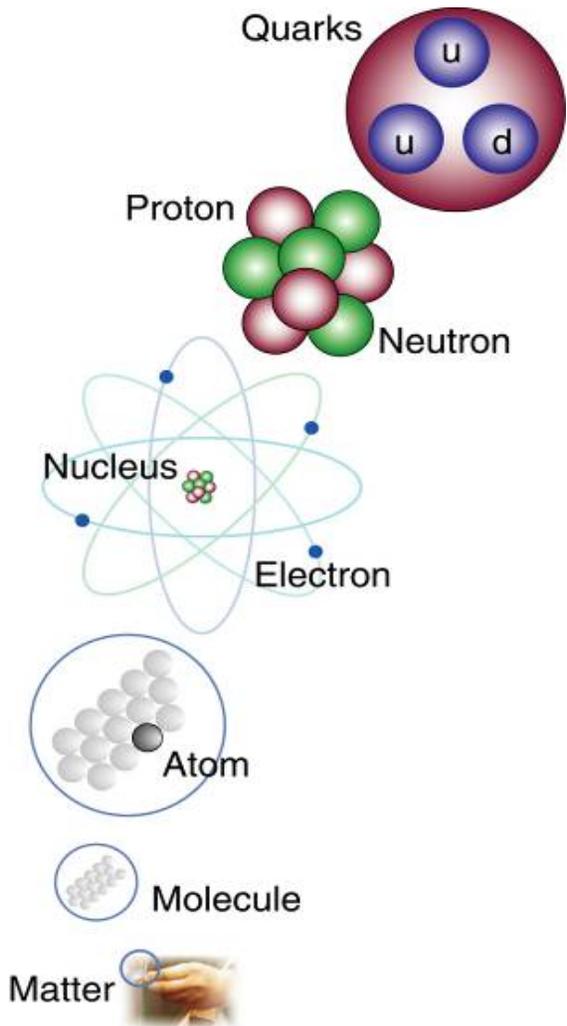
2e2 μ invariant-
mass:

$M(4\ell) = 123.9 \text{ GeV}$.

Бозон Хиггса



Нобелевская премия по физике 2013 г. – П. Хиггс, Ф. Энглер, За теоретическое обнаружение механизма, который помогает нам понять происхождение массы субатомных частиц, подтверждённого в последнее время обнаружением предсказанной элементарной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН



	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

Рождение и жизнь атомных ядер. Взаимодействия