

Элементарно, Хиггс!

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт



Программа курса лекций

- Лекция I Физика элементарных частиц в предверии смены парадигм
- Лекция II Симметрии в физике элементарных частиц
- Лекция III Стандартная модель: сильные взаимодействия
- Лекция IV Стандартная модель: электрослабые взаимодействия
- Лекция V Физика за пределами Стандартной модели

Лекция IV

Стандартная модель: электрослабые взаимодействия

- Изотопическая симметрия и промежуточные векторные бозоны
- Спонтанное нарушение симметрии
- Эффект Браута-Энглера-Хиггса
- Хиггсовский бозон
- Заряженные токи и смешивание поколений
- Нарушение CP симметрии
- Распады адронов

Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force	

Bosons (Forces)

Силы
 Электромагнитные
 Сильные
 Слабые
 Юкавские

Гравитация

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

3	2	1/3
3	1	4/3
3	1	-2/3

1	2	-1
1	1	0
1	1	-2

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Q_L	3	2	1/3
U_R	3	1	4/3
D_R	3	1	-2/3

L_L	1	2	-1
N_R	1	1	0
E_R	1	1	-2

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

дублеты

3

2

1/3

3

1

4/3

3

1

-2/3

1

2

-1

1

1

0

1

1

-2

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

дублеты

3	2	1/3
3	1	4/3
3	1	-2/3

синглеты

1	2	-1
1	1	0
1	1	-2

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

V-A токи в
слаб вз-иях

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

дублеты

3	2	1/3
3	1	4/3
3	1	-2/3

синглеты

1	2	-1
1	1	0
1	1	-2

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

V-A токи в
слаб вз-иях

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

дублеты

3	2	1/3
3	1	4/3
3	1	-2/3

Слабый изоспин

синглеты

$\frac{1}{2}$	\searrow	T_3
$-\frac{1}{2}$	\swarrow	
0	\searrow	T_3
0	\swarrow	

1	2	-1
1	1	0
1	1	-2

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

V-A токи в
слаб вз-иях

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

дублеты

3	2	1/3
3	1	4/3
3	1	-2/3

Слабый изоспин

синглеты

1/2	↘	T_3
-1/2	↙	
0	↘	T_3
0	↙	

1	2	-1
1	1	0
1	1	-2

Электрический
заряд

$$Q = T_3 + Y/2$$

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z
2. Поля W и Z описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z
2. Поля W и Z описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
3. Поля W, Z тоже несут слабый заряд (изоспин) и взаимодействуют друг с другом

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z
2. Поля W и Z описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
3. Поля W, Z тоже несут слабый заряд (изоспин) и взаимодействуют друг с другом
4. Поля W, Z могут наблюдаться в свободном состоянии и обладают массой

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z
2. Поля W и Z описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
3. Поля W, Z тоже несут слабый заряд (изоспин) и взаимодействуют друг с другом
4. Поля W, Z могут наблюдаться в свободном состоянии и обладают массой
5. В слабых взаимодействиях участвуют лептоны и кварки

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

$$\mathcal{L}_{EW} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_{\mu\nu}^i + \bar{\psi}_\alpha \gamma^\mu (\partial_\mu - g_2 T_{\alpha\beta}^i W_\mu^i) \psi_\beta$$

$$i = 1, 2, 3; \alpha, \beta = 1, 2 \quad F_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z
2. Поля W и Z описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
3. Поля W, Z тоже несут слабый заряд (изоспин) и взаимодействуют друг с другом
4. Поля W, Z могут наблюдаться в свободном состоянии и обладают массой
5. В слабых взаимодействиях участвуют лептоны и кварки
6. Слабые взаимодействия - короткодействующие $R \sim \frac{1}{M_W}$

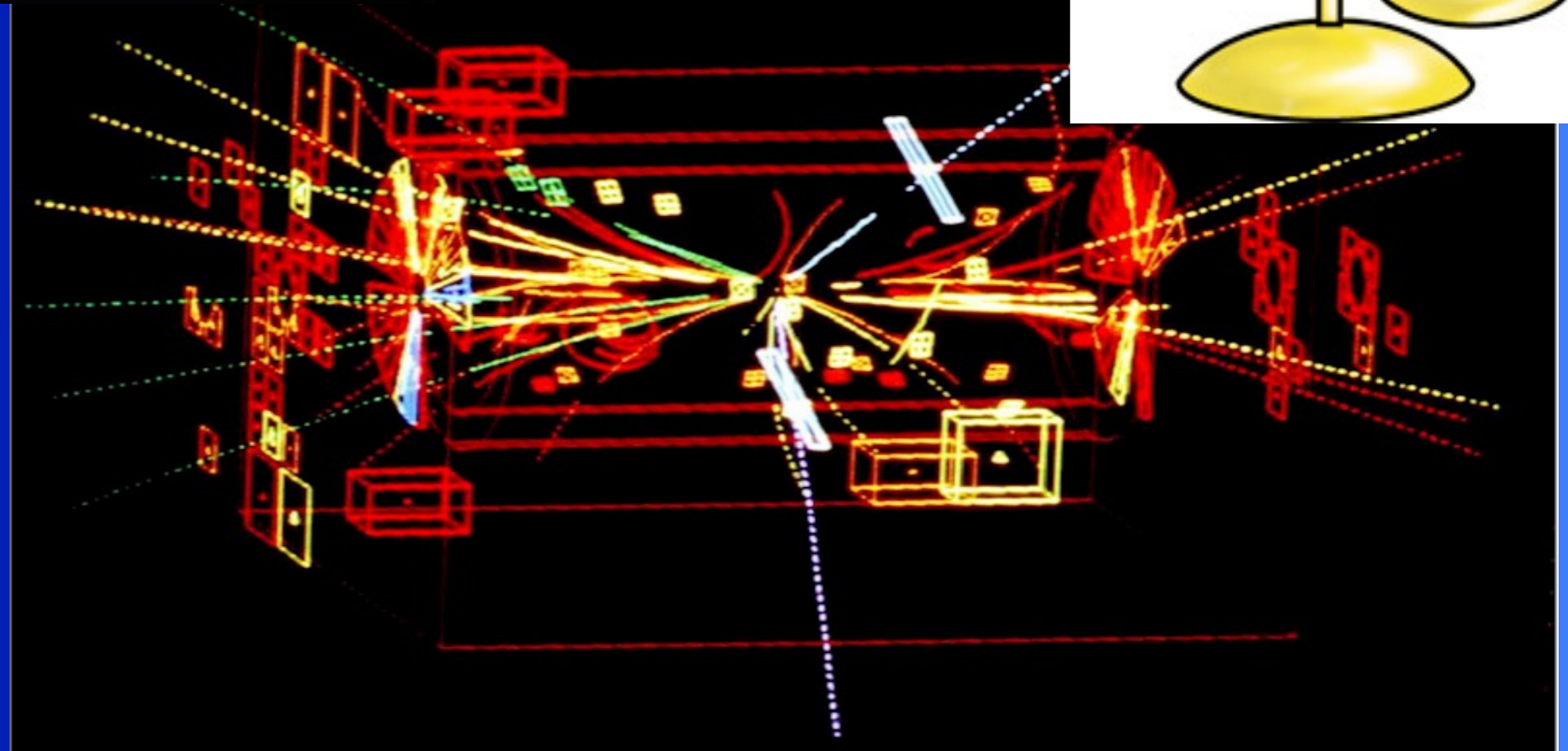
Открытие W и Z бозонов



- Открытие W и Z бозонов – переносчиков слабых взаимодействий на ускорителе SPS (CERN) в 1983 году



явилось триумфом
Стандартной модели
фундаментальных
взаимодействий



Электрослабый сектор Стандартной Модели

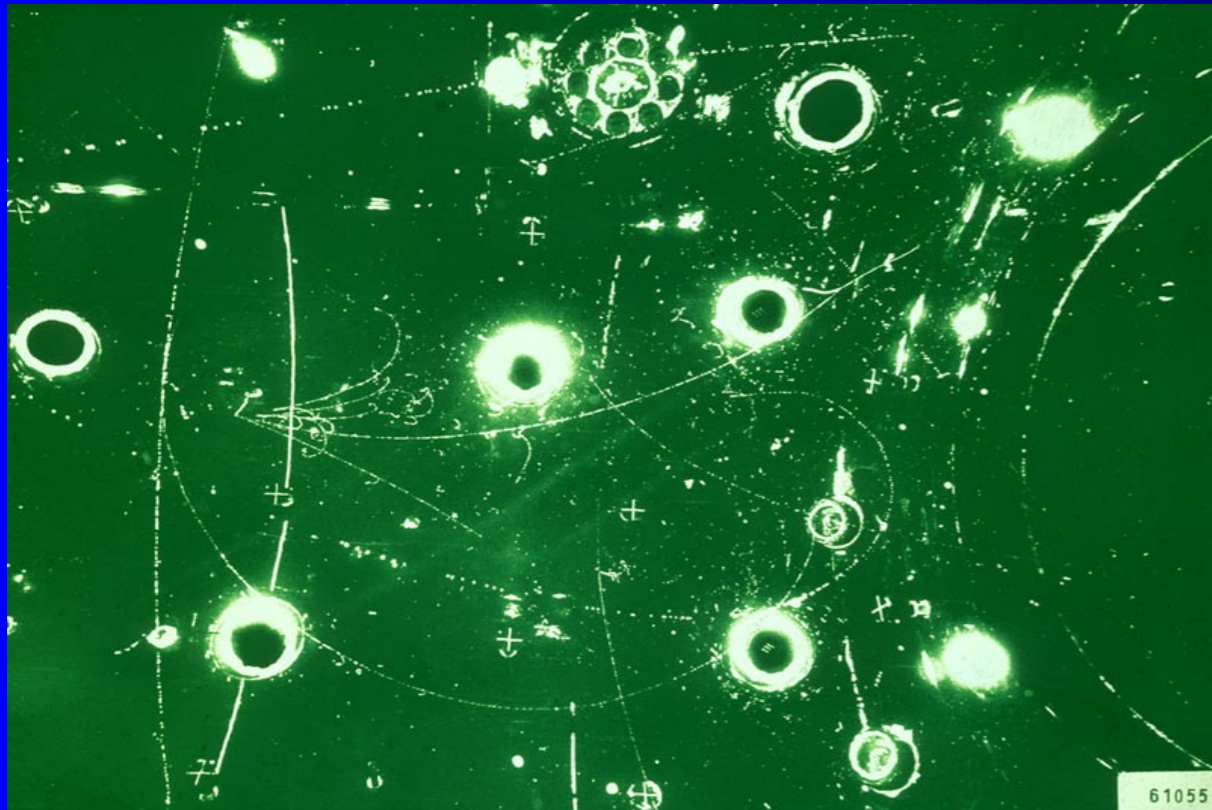
$SU(2) \times U(1)$ или $O(3)$

3 калибровочных бозона 1 калибровочный бозон 3 калибровочных бозона
После спонтанного нарушения симметрии

3 массивных калибр. бозона
(W^+ , W^- , Z^0) и 1 безмассовый (γ)



2 массивных калибр. бозона
(W^+ , W^-) and 1 безмассовый (γ)



- Открытие нейтральных токов явилось критической проверкой калибровочной модели слабых взаимодействий в ЦЕРНе в 1973 г.
- Тяжёлый фотон (Z -бозон) даёт нейтральный ток без наращивания ароматов

Зачем нужна нарушенная симметрия?

Инвариантность относительно фазовых преобразований

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\alpha(x)}\psi(x)$$

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) + \partial_\mu\alpha(x)$$

Массовый член A_μ^2 не инвариантен и запрещён \rightarrow фотон имеет нулевую массу!

То же самое справедливо и для глюона - глюон имеет нулевую массу, если группа SU(3) не нарушена

Но W и Z бозоны массивны \rightarrow группа SU(2) должна быть нарушена!

Прямое нарушение группы SU(2) приводит к росту сечений рассеяния W бозонов и противоречит эксперименту

Выход из тупика \rightarrow спонтанное нарушение симметрии

Спонтанное нарушение симметрии

Спонтанное нарушение симметрии: Симметричная система уравнений с несимметричными начальными или краевыми условиями

Скалярное поле

$$H(x)$$

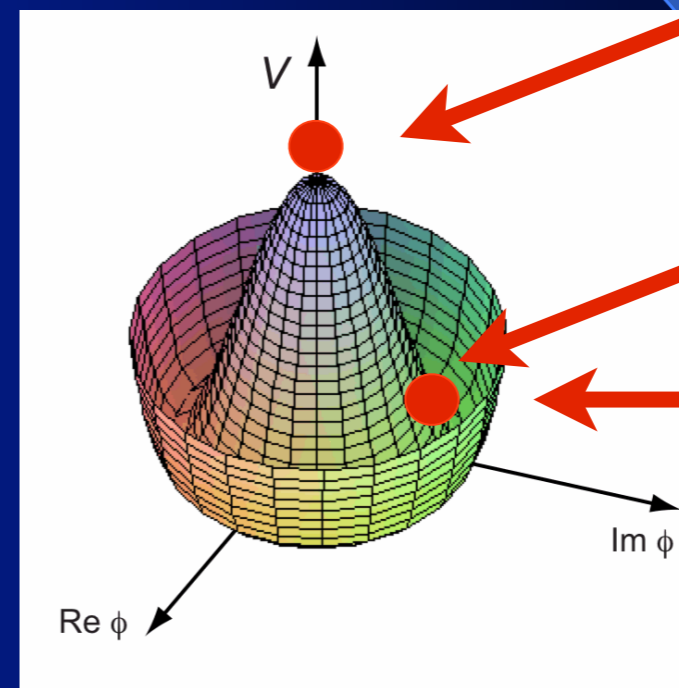
$$\langle H(x) \rangle = v$$

среднее значение поля

$$\begin{aligned} g^2 W_\mu^2 H^2 &\rightarrow g^2 W_\mu^2 (H + v)^2 \\ &\rightarrow g^2 W_\mu^2 (v^2 + \dots) \rightarrow M_W^2 W_\mu^2 \end{aligned}$$

$$M_W^2 = g^2 v^2$$

Потенциал



Неустойчивое состояние

Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

Проблема: безмассовые поля! -> механизм Брута-Энглера-Хиггса: безмассовые скалярные поля превращаются в продольные степени свободы массивных W и Z бозонов и исчезают из спектра

Эффект Браута-Энглера-Хиггса

- Безмассовое векторное поле (как например фотон) имеет две степени свободы - поперечные колебания
- Массивное векторное поле (как например W-бозон) имеет три степени свободы - поперечные плюс продольные колебания
- При спонтанном нарушении симметрии возникают безмассовые скалярные поля по числу спонтанно нарушенных симметрий - теорем Голдстоуна
- При спонтанном нарушении группы SU(2) нарушаются три симметрии и возникают три безмассовых поля
- Эти три поля не являются наблюдаемыми полями, а превращаются в продольные компоненты калибровочных полей W, так что поля W становятся массивными, а безмассовые поля пропадают из физического спектра!

Голдстоуновские поля

$$H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 + iH_2 \\ S + iP \end{pmatrix}$$

Хиггсовский дублет

Хиггсовский бозон

Спонтанное нарушение симметрии в СМ

$$SU(2)_W \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$$

Группа слабого изоспина

Группа гиперзаряда

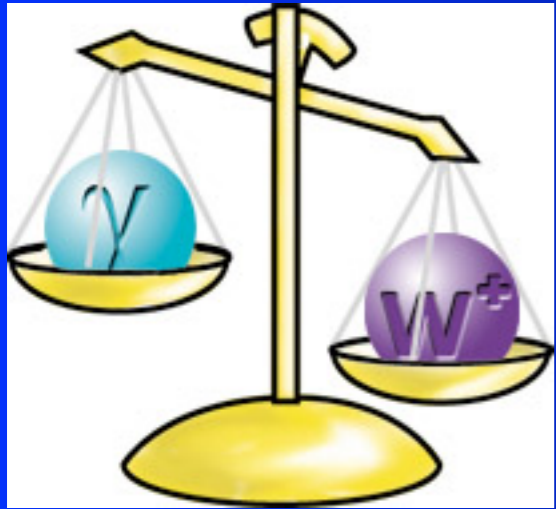
Эл-маг Группа

$$Q = T_3 + Y/2$$

$$W_\mu^i, B_\mu \implies W_\mu^\pm = \frac{W_\mu^1 \mp W_\mu^2}{\sqrt{2}},$$
$$Z_\mu = \cos \theta_W W_\mu^3 - \sin \theta_W B_\mu, A_\mu = \sin \theta_W W_\mu^3 + \cos \theta_W B_\mu$$

Безмассовый фотон

- При спонтанном нарушении симметрии СМ возникают три массивных векторных бозон и один безмассовый, переносчики слабых и электромагнитных взаимодействий



ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН

$$H(x) = v + h(x) \leftarrow \text{ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН}$$

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

$$m_{quark} = y_{quark} \cdot v$$

$$m_{lepton} = y_{lepton} \cdot v$$

$$m_W = g \cdot v$$

$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

$$m_H = \sqrt{\lambda} \cdot v$$

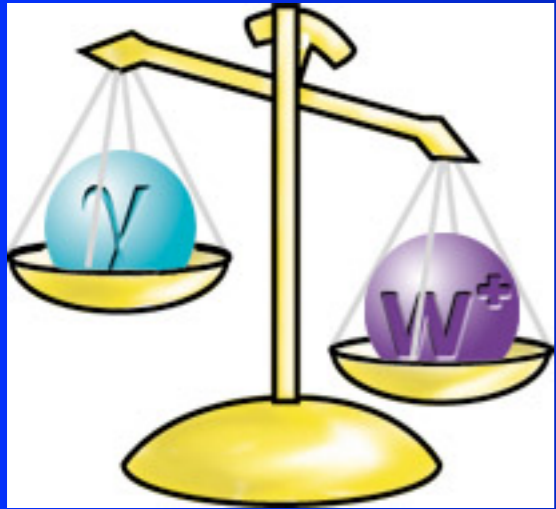
$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Массы всех частиц в СМ возникают из взаимодействия с полем БЭХ за счет вакуумного среднего последнего!

Все массы пропорциональны константе взаимодействия частиц с ХИГГСОВСКИМ (полем) бозоном

Хиггсовский бозон - квантовое возбуждение поля Браута-Энглера-Хиггса,
безспиновая нейтральная частица - переносчик «пятой силы»



ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН

$$H(x) = v + h(x) \leftarrow \text{ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН}$$

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

$$m_{quark} = y_{quark} \cdot v$$

$$m_{lepton} = y_{lepton} \cdot v$$

$$m_W = g \cdot v$$

$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

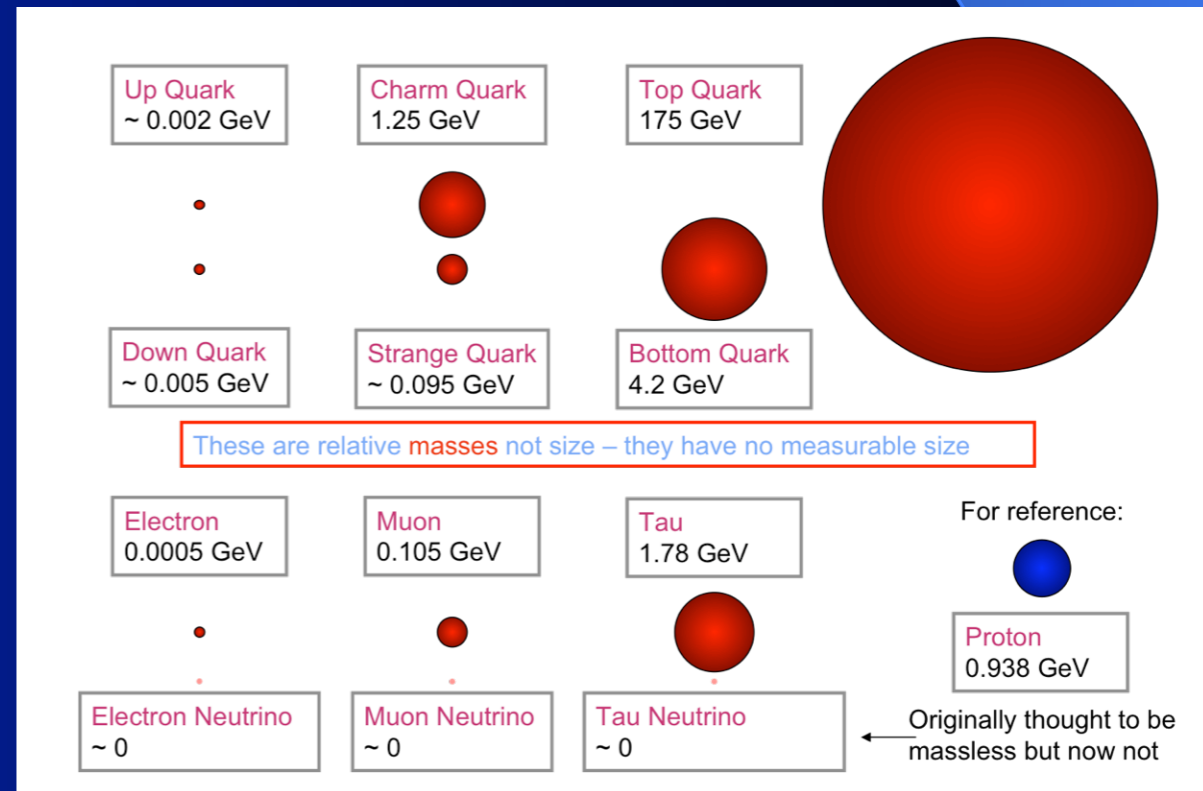
$$m_H = \sqrt{\lambda} \cdot v$$

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Массы всех частиц в СМ возникают из взаимодействия с полем БЭХ за счет вакуумного среднего последнего!

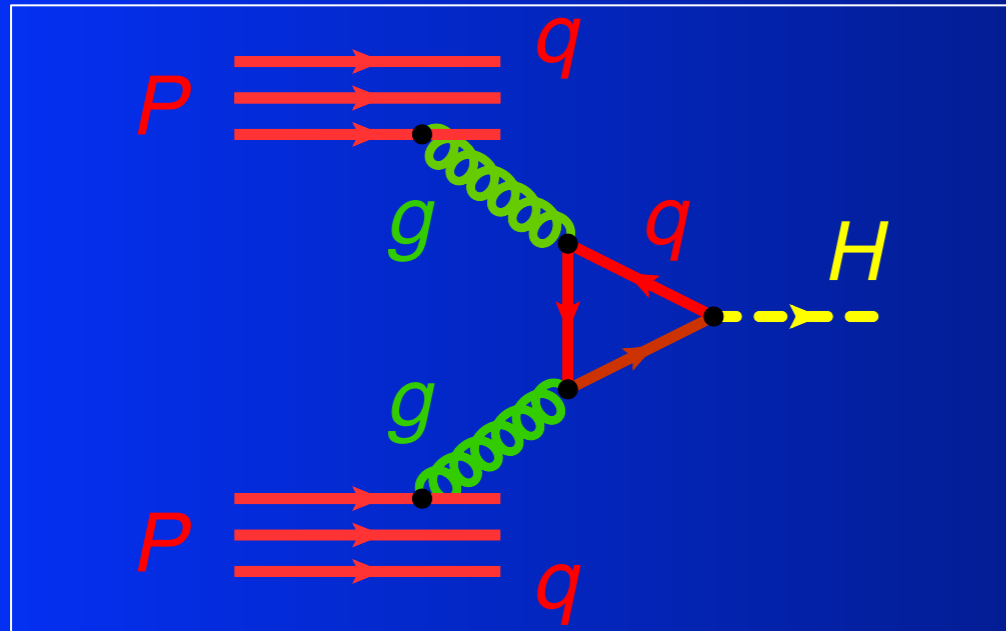
Все массы пропорциональны константе взаимодействия частиц с ХИГГСОВСКИМ (полем) бозоном



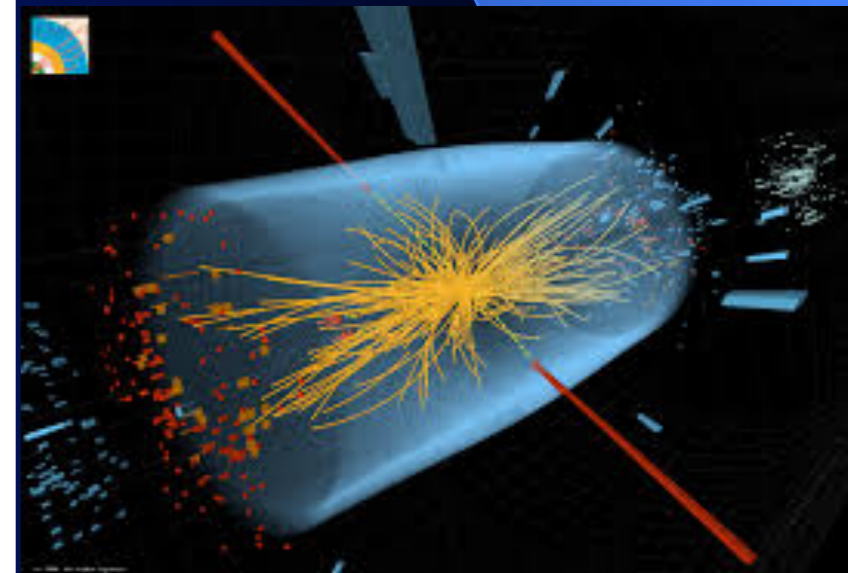
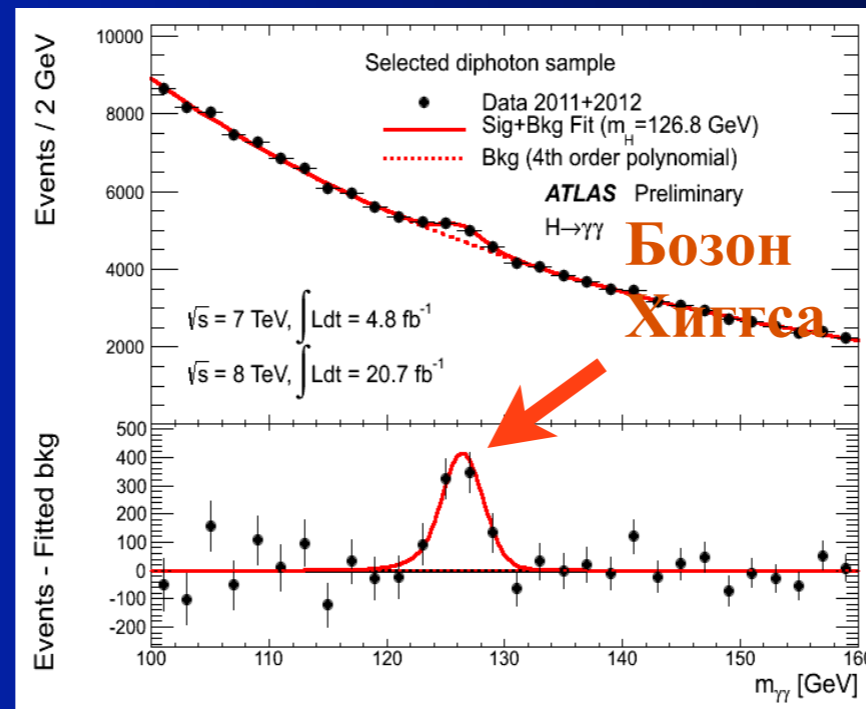
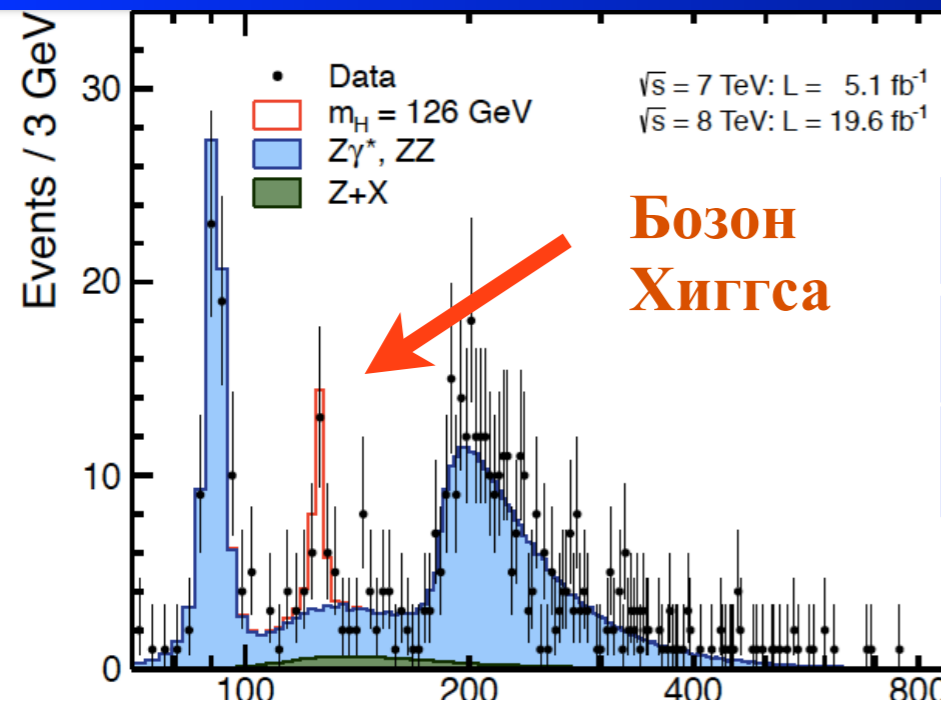
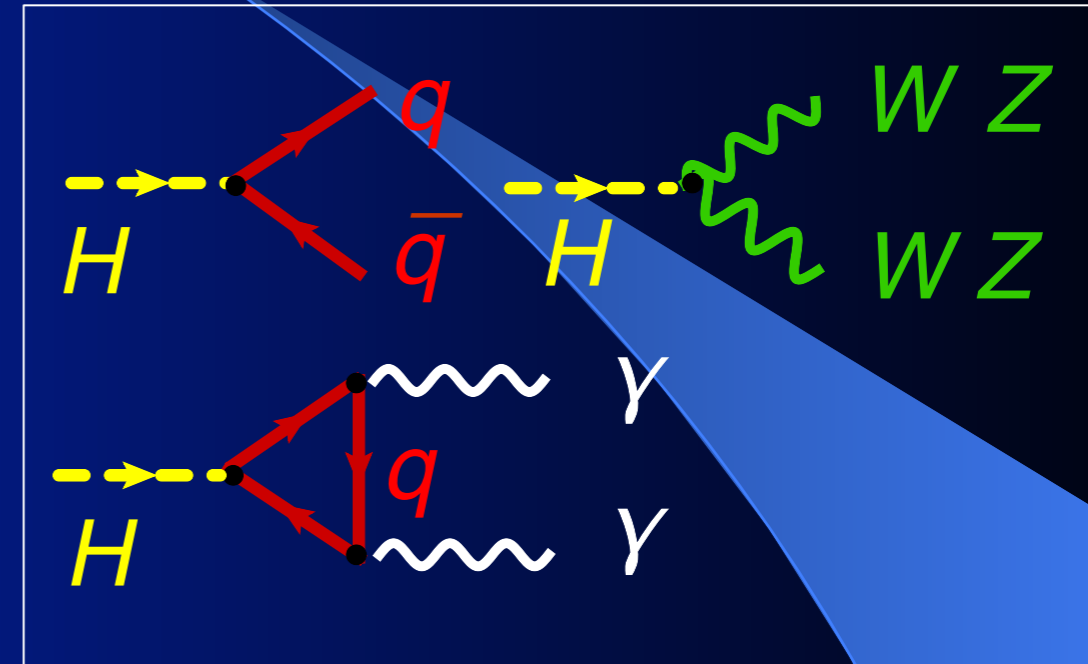
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

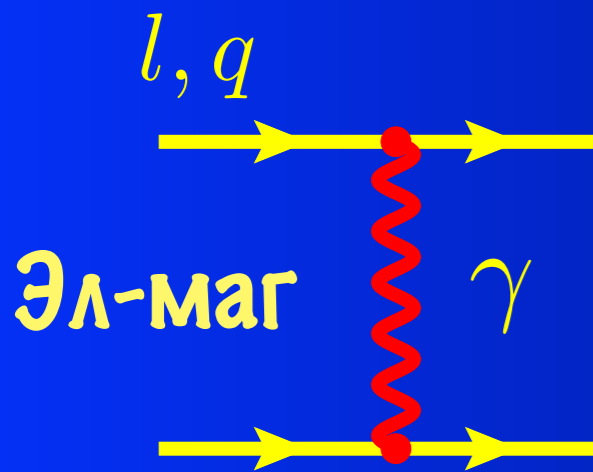
Рождение на протонном коллайдере



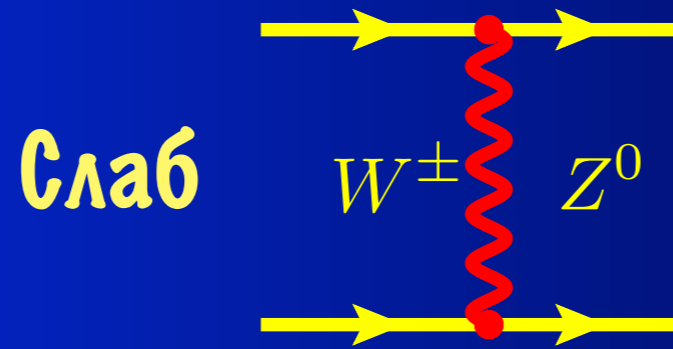
Процессы распада



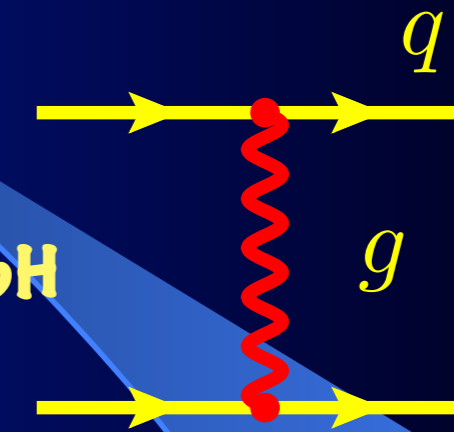
Пять фундаментальных сил Природы



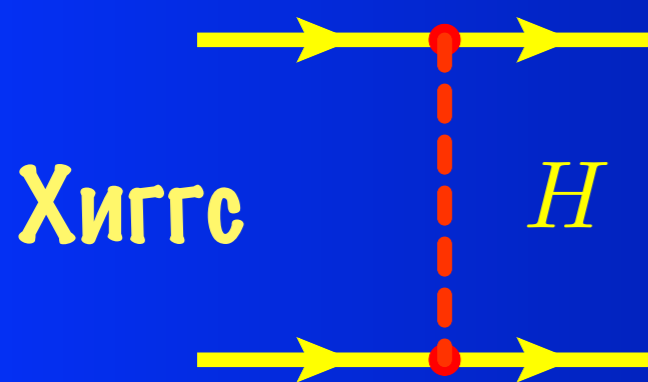
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



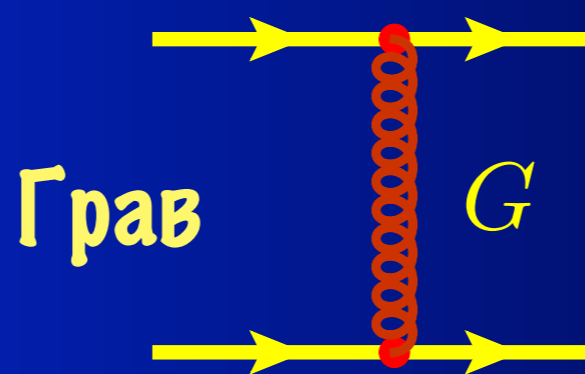
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$



$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{v_H^2 r} e^{-M_H r}$$



$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Смешивание поколений и CP нарушение

Источник CP нарушения в СМ - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W -бозоном

Смешивание поколений и CP нарушение

Источник CP нарушения в СМ - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W-бозоном

Два поколения

$$(\bar{u} \ \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} W \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

матрица смешивания

Смешивание поколений и CP нарушение

Источник CP нарушения в СМ - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W-бозоном

Два поколения

$$(\bar{u} \ \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} W \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

матрица смешивания

Три поколения

$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Смешивание поколений и CP нарушение

Источник CP нарушения в СМ - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W-бозоном

Два поколения

$$(\bar{u} \ \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} W \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

матрица смешивания

фаза - источник ~~CP~~

Три поколения

$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Смешивание поколений и CP нарушение

Источник CP нарушения в СМ - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W-бозоном

Два поколения

$$(\bar{u} \ \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} W \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

матрица смешивания

фаза - источник ~~CP~~

Три поколения

$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Требует как минимум 3 поколений частиц в СМ

Смешивание поколений и CP нарушение

Источник CP нарушения в СМ - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W-бозоном

Два поколения

$$(\bar{u} \ \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} W \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

матрица смешивания

фаза - источник ~~CP~~

Три поколения

$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

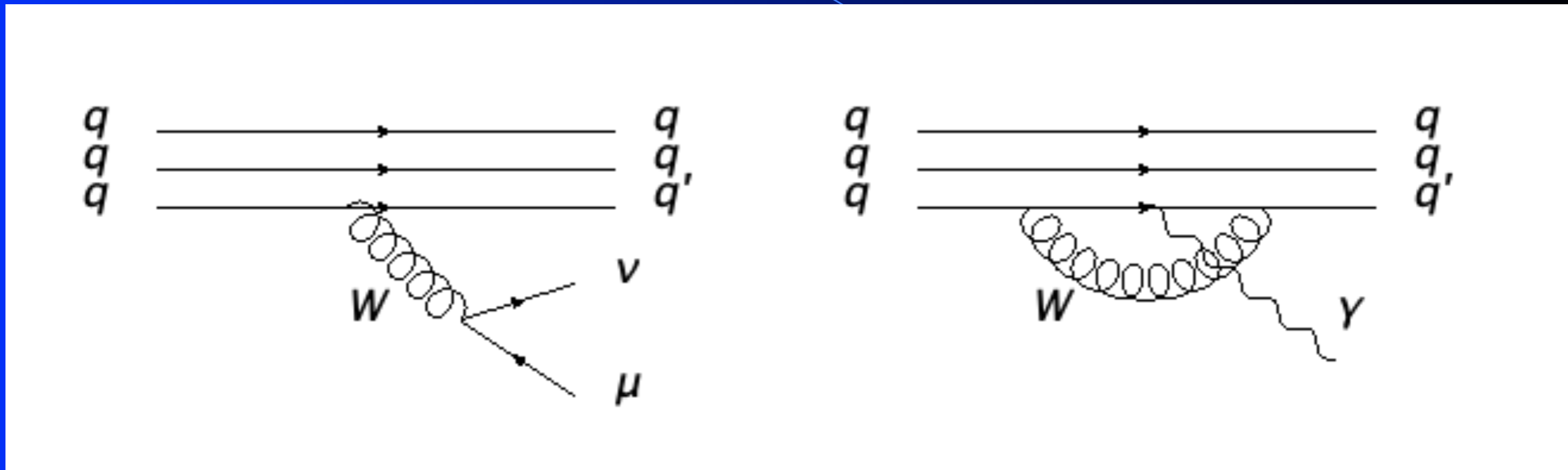
матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Точно также и в лептонном секторе

Возможно источником является CP-нарушение в лептонном секторе

Требует как минимум 3 поколений частиц в СМ

Распады адронов



Распады адронов за счёт слабого взаимодействия с образованием адронов другого поколения