

Путешествие в микромир с физиком-теоретиком

Часть III



Стандартная Модель



УДК 517.511.01

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	Z⁰ 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[±] weak force	

Bosons (Forces)

Силы

Электромагнитные

Сильные

Слабые

Юкавские

Гравитация

История открытий

p
1919

n
1932

u

c
1974

t
1995

ν_e
1956

ν_μ
1963

ν_τ
2000

d

s
1947

b
1977

e
1895

μ
1936

τ
1975

шесть кварков

шесть лептонов

γ

g
1979

W, Z
1983

H
2012

G

Теперь у нас есть замечательная картина из трёх пар кварков и трёх пар лептонов и пяти переносчиков фундаментальных взаимодействий. Здесь показана также история их открытия.

Ароматы (сорта) частиц СМ



Задача № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

Стандартна кванто

Лагранжиан

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \dots$$

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^2 + \dots$$

$$+ i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + \dots$$

$$+ i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + \dots$$

$$+ i\bar{N}_\alpha \gamma^\mu \partial_\mu N_\alpha + \dots$$

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = -y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + \dots$$

$$+ y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha I_\beta + \dots$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V(H) + \dots$$

Все эти параметры НЕ предсказываются СМ, а определяются экспериментально

Три калибровочные константы

Три (или четыре) Юкавских матрицы

Два параметра

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\nu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)) - \\ & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\nu (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\ & W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\ & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\ & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) + \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g M (W_\mu^+ \phi^0 \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) + \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) + W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\ & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\partial_\nu H) + M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+)) - ig \frac{1-2c_w^2}{c_w} (W_\mu^+ \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu W_\mu^+) + ig (W_\mu^- \partial_\nu \phi^+ - \phi^+ \partial_\nu W_\mu^-) - \\ & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 A_\nu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 A_\nu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\ & m_e^\lambda \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + \\ & ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) \\ & + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (-m_e^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa)) + \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \\ & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma^5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa)) - \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g m_\lambda^2}{2M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) + \frac{ig m_\lambda^2}{2M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\ & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 Y - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\ & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} M (\bar{X}^0 X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^- \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^0 \phi^+ - \bar{X}^0 X^0 \phi^-) + igMs_w (X^0 X^0 \phi^+ - X^0 X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

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

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

триплеты

V-A токи в
слаб вз-иях

	SU(3) _c	SU(2) _L	U _Y (1)	дублеты
Q_L	3	2	1/3	дублеты
U_R	3	1	4/3	
D_R	3	1	-2/3	

➤ Лептоны

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

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

T_3
1/2
-1/2
0
0

Слабый изоспин

синглеты

	SU(3) _c	SU(2) _L	U _Y (1)
L_L	1	2	-1
N_R	1	1	0
E_R	1	1	-2

Электрический
заряд

$$Q = T_3 + Y/2$$



Спектр масс части СМ

Массы всех частиц в СМ возникают из взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса за счет вакуумного среднего последнего!

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

Массы элементарных частиц в Стандартной Модели

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

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

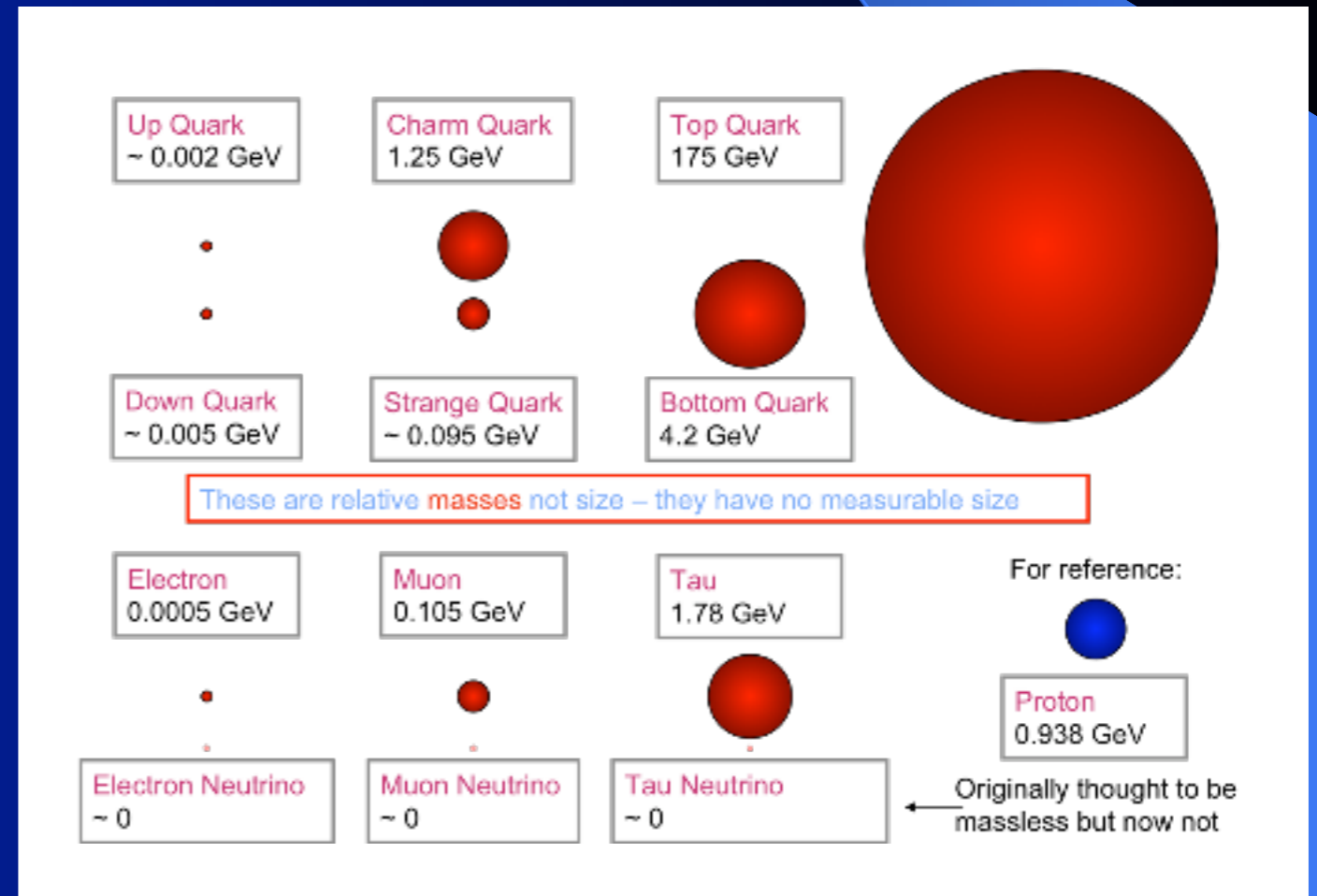
$$m_W = g \cdot v$$

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

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

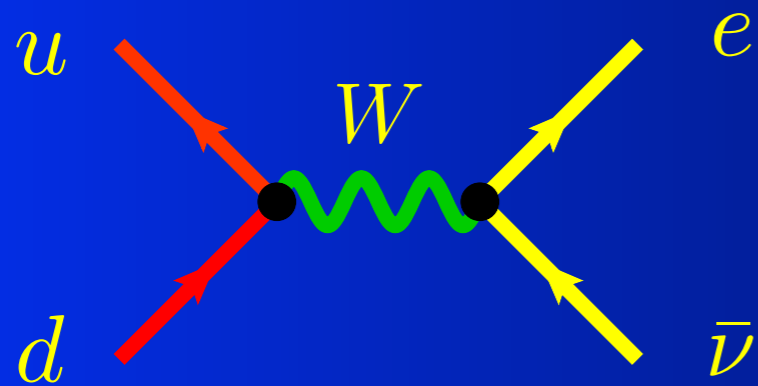
$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$



Нейтрино-загадочная частица

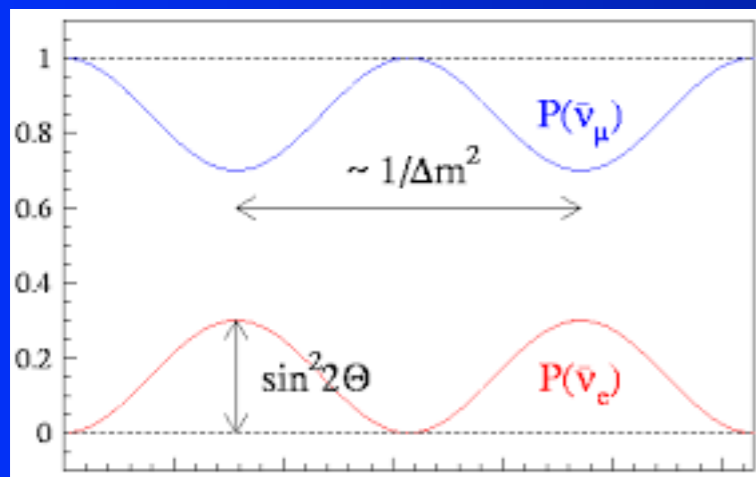
Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов



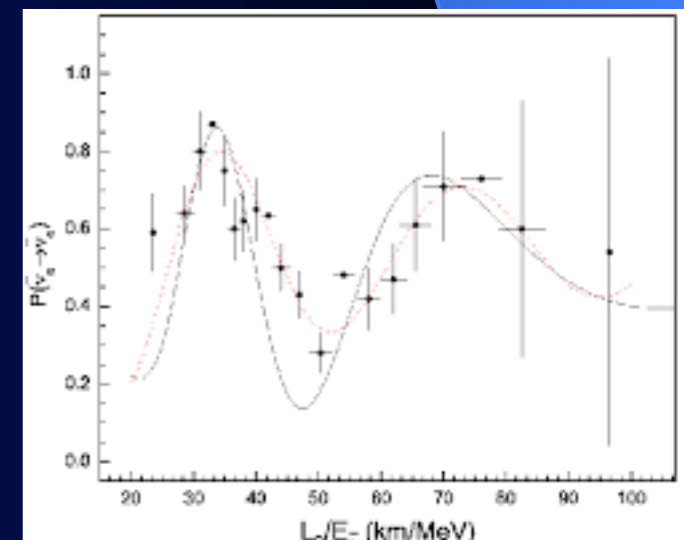
Нейтрино

- не имеют электрического заряда
- не участвуют в эл-маг вз-иях
- не участвуют в сильных вз-иях
- участвуют в слабых вз-иях
- возможно взаимодействуют с полем Хиггса
- имеют очень малую (< 1 eV) массу

Наличия массы у нейтрино следует из наблюдения нейтринных осцилляций



$$P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} = \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\alpha\beta}^2 L}{4E} \right)$$



Нейтрино-загадочная частица

Нейтринные массы



Planck

$$m_{\nu_e} < 2 eV$$



$$m_{\nu_e} < 0.2 eV$$

$$0.06 eV < \sum m_\nu < 0.12 eV$$

β -распад

KATRIN

Нейтринные осцилляции

Спектр реликтового микроволнового фона

Троицк-Майнц

Смешивание поколений в СМ

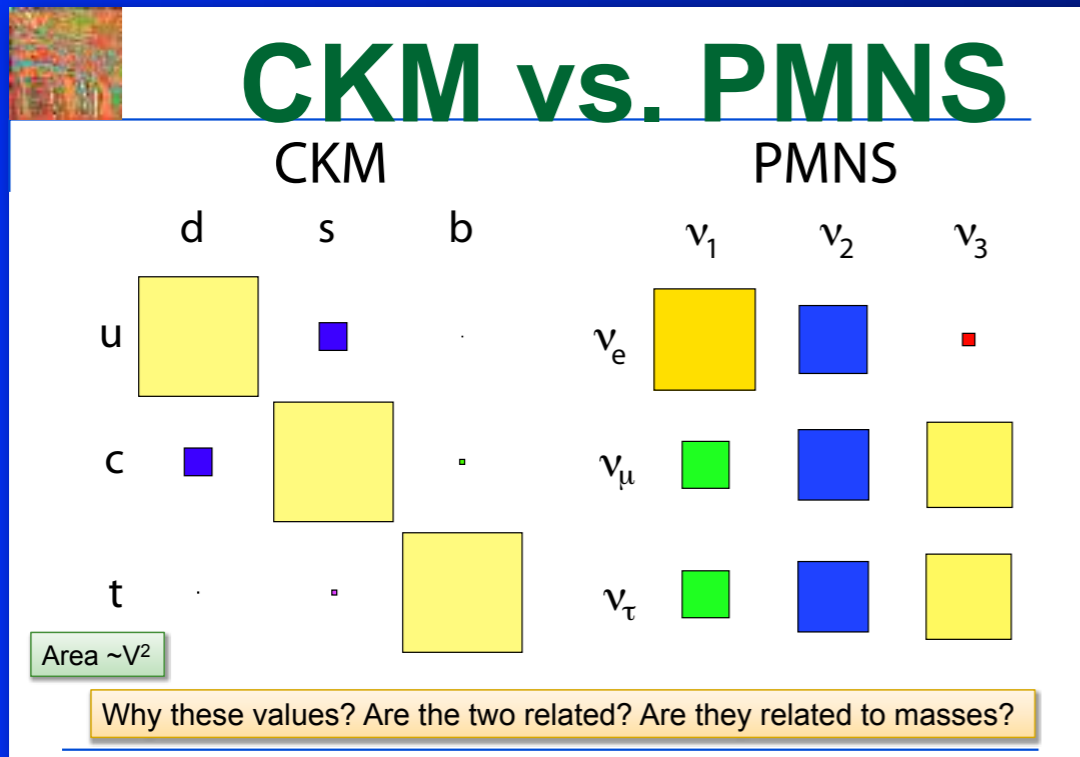
Смешивание поколений в СМ происходит только во взаимодействии с W -бозоном



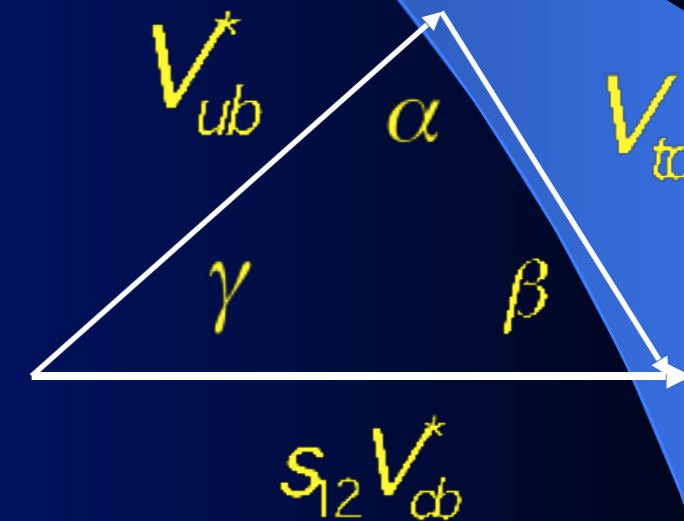
$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23}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

4 параметра в каждой из матриц: 3 угла и 1 фаза.
Фаза δ – источник CP нарушения в Стандартной модели

Смешивание поколений в СМ



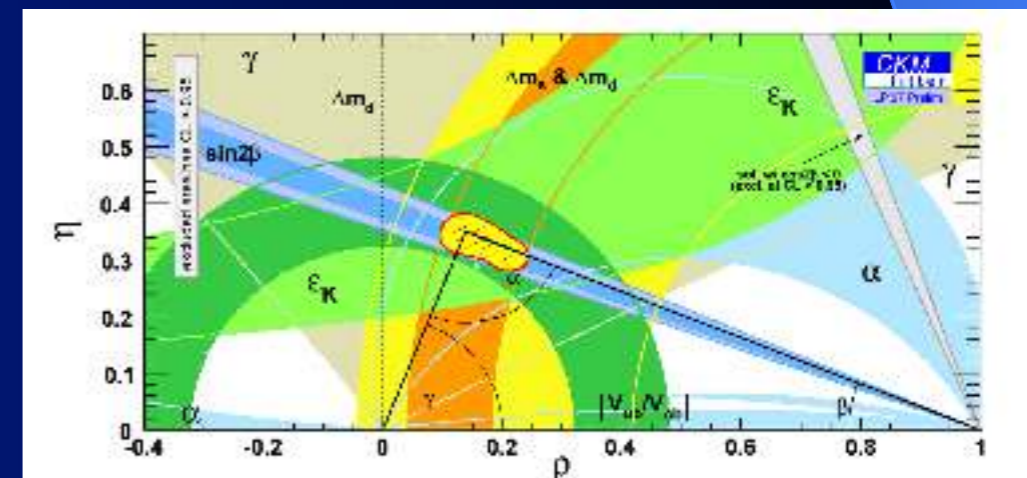
- Углы смешивания в кварковом и лептонном секторе найдены экспериментально
- Они сильно отличаются друг от друга



Условие унитарности матрицы смешивания - треугольник унитарности:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

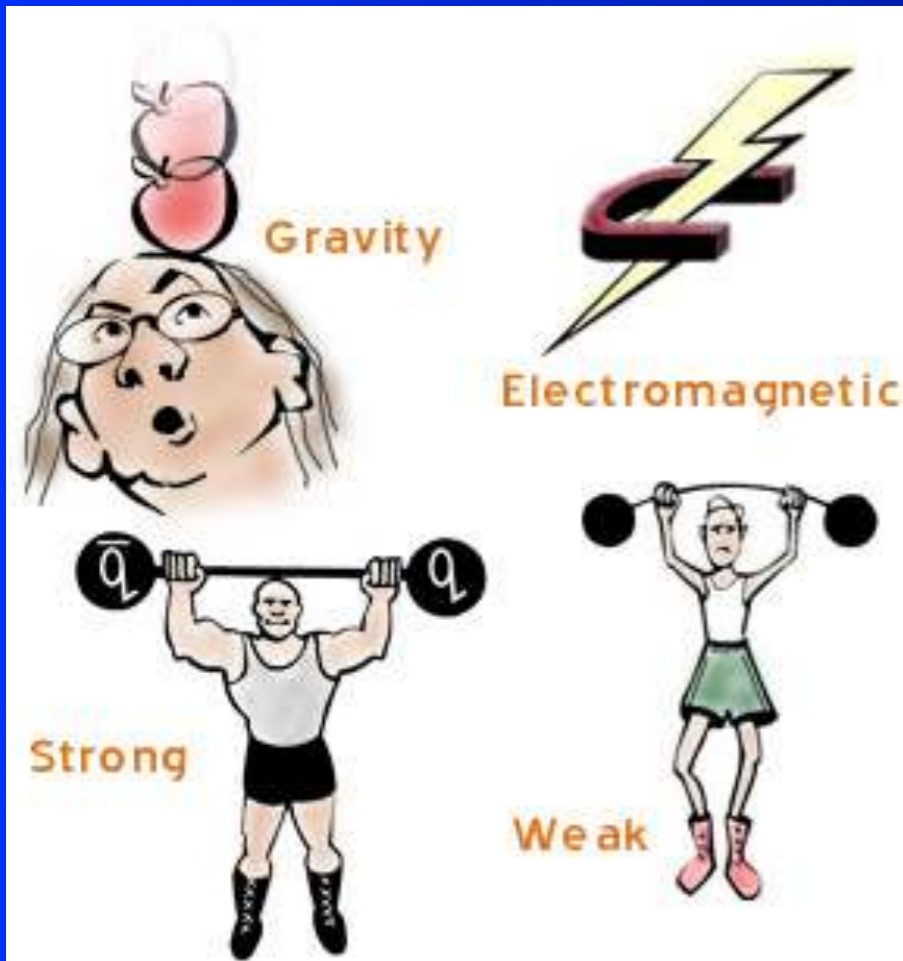
$$\Rightarrow V_{ub}^* + V_{td} = s_{12}V_{cb}^*$$



Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе

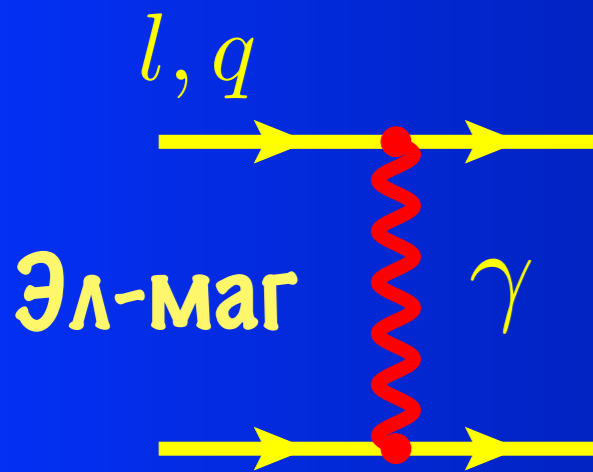


Пятая сила - обмен хиггсовским бозоном

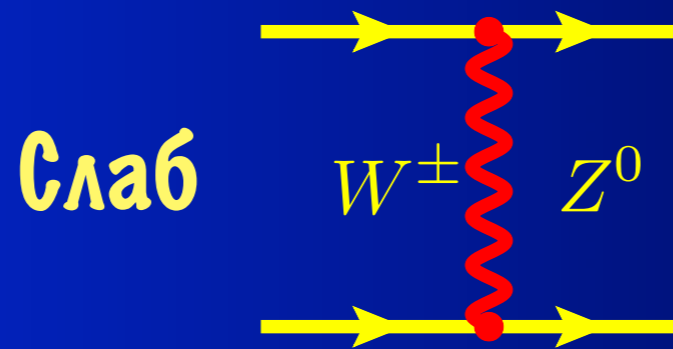


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

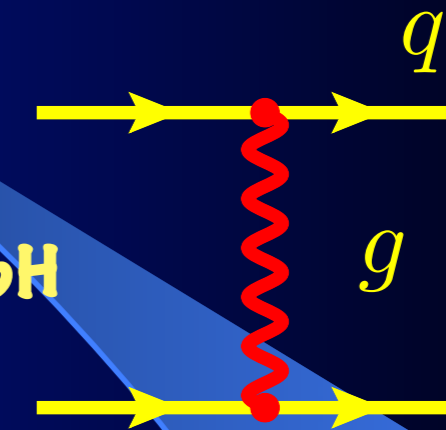
Пять фундаментальных сил Природы



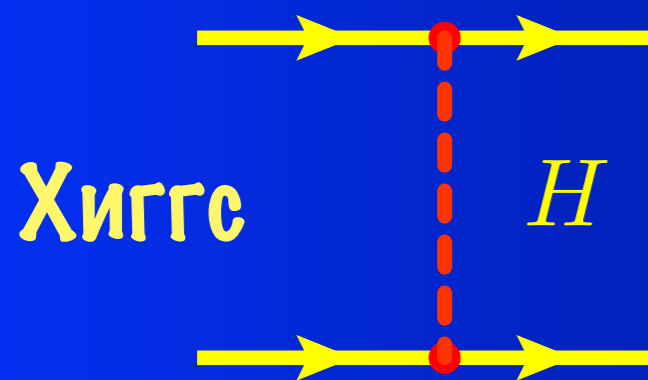
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



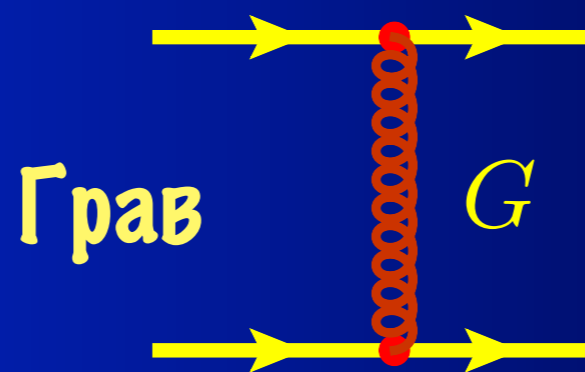
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



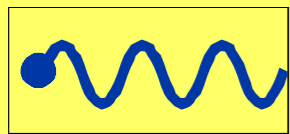
$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

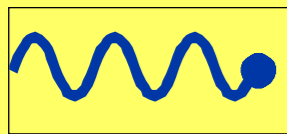
Feynman Rules

Emitted photon



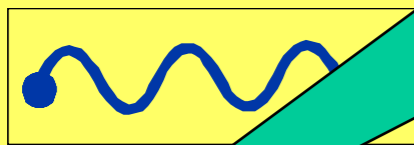
ϵ^μ

Absorbed photon



ϵ^μ

Flying photon



$$-i \frac{g^{\mu\nu}}{p^2}$$

Emitted electron (absorbed positron)

“I took the observation that positrons could simply be represented as electrons going from the future to the past in a back section of their world lines”

R.Feynman, Nobel Lecture

Flying Electron



$$i \frac{\hat{p} + m}{p^2 - m^2 + i\epsilon}$$

Flying Positron

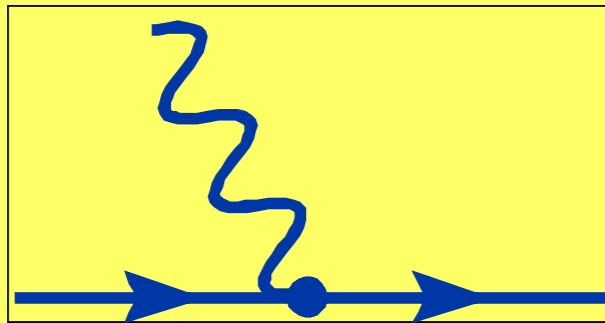


$$i \frac{\hat{p} + m}{p^2 - m^2 + i\epsilon}$$

Feynman Rules

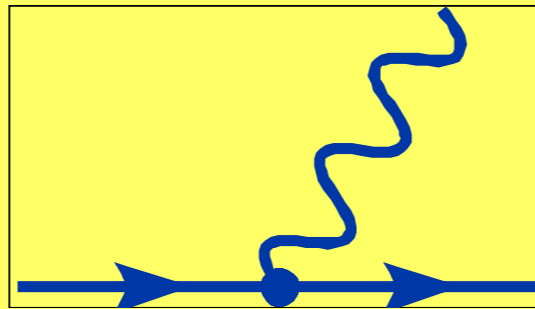
Interaction between electron, positrons and photons

Absorption of a photon
by an electron



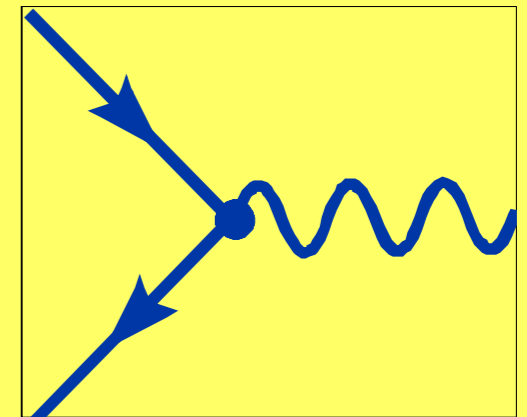
$$e\gamma^\mu$$

Emission of a photon
by an electron



$$e\gamma^\mu$$

e^+e^- Annihilation



$$e\gamma^\mu$$

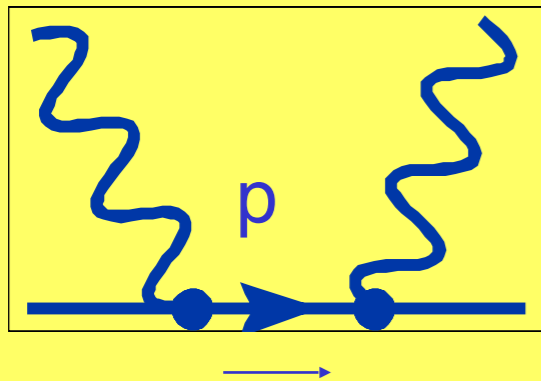
All physical processes in Quantum Electrodynamics can be constructed from these elements like LEGO structures

Feynman Diagrams

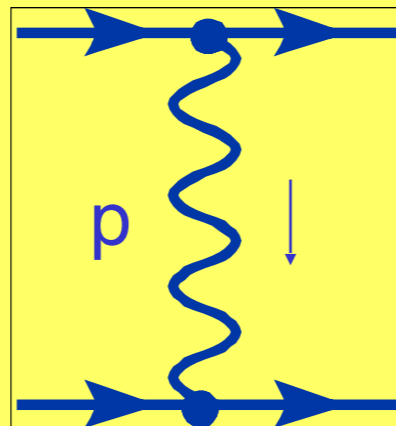
Amplitudes of probability = M

Probability = |M|²

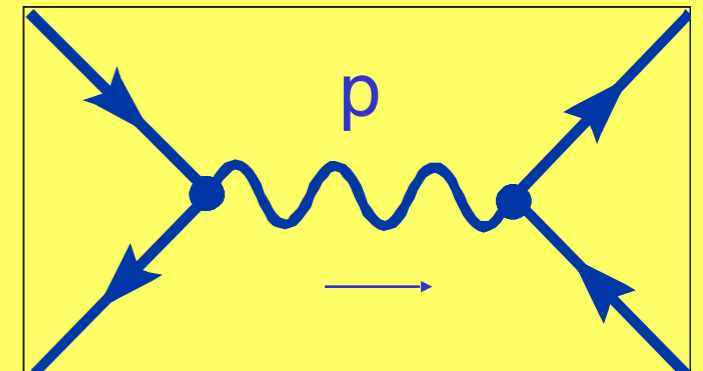
Compton Scattering



Mueller Scattering



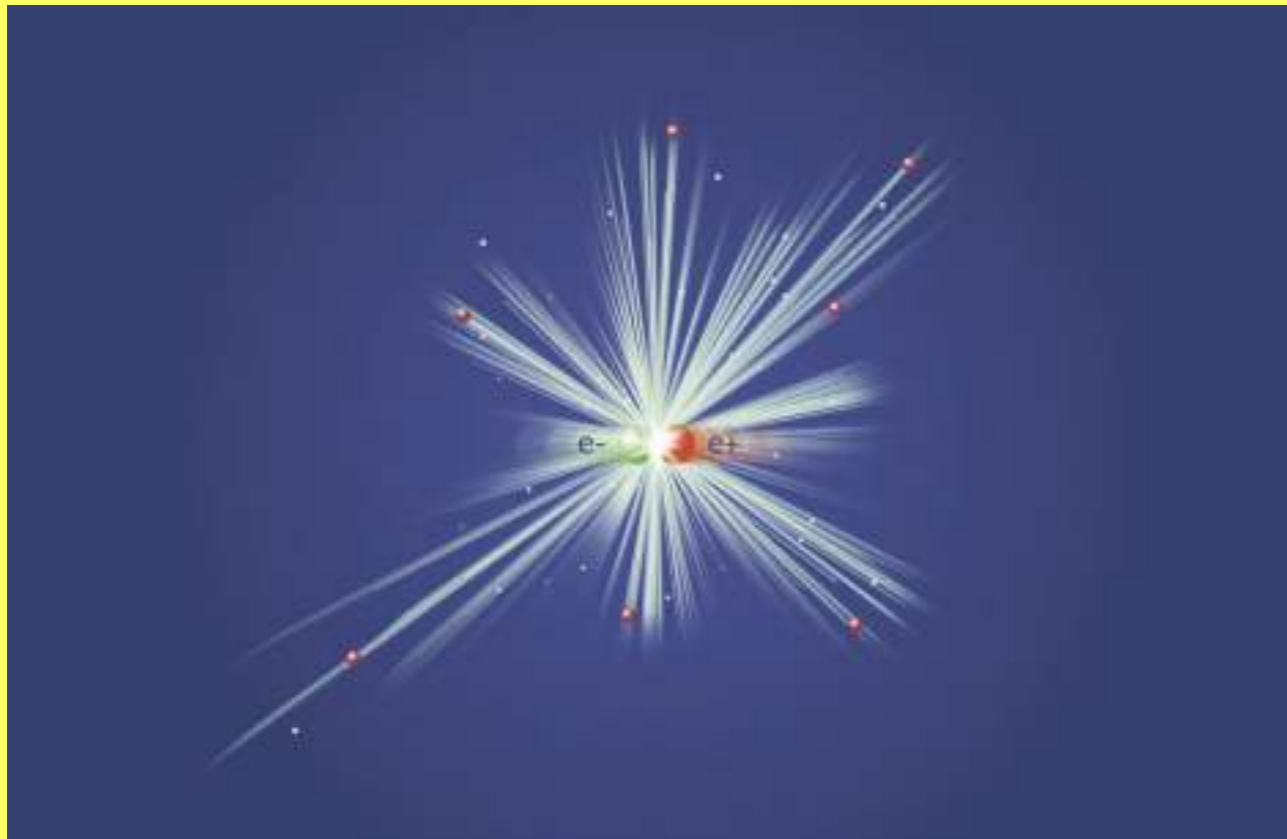
Annihilation



$$\frac{\bar{v}_\alpha \gamma_{\alpha\beta}^\mu (\hat{p} + m)_{\beta\rho} \gamma_{\rho\sigma}^\nu v_\sigma \epsilon^\mu \epsilon^\nu}{p^2 - m^2}$$

$$\bar{v}_\alpha \gamma_{\alpha\beta}^\mu v_\beta \left(-i \frac{g^{\mu\nu}}{p^2} \right) \bar{v}_\rho \gamma_{\rho\sigma}^\nu v_\sigma$$

From Feynman Rules to Formulas



Electrons (e^-) and positrons (e^+) collide at accelerators at very high energy and produce a pair of muons ($\mu^+ \mu^-$)

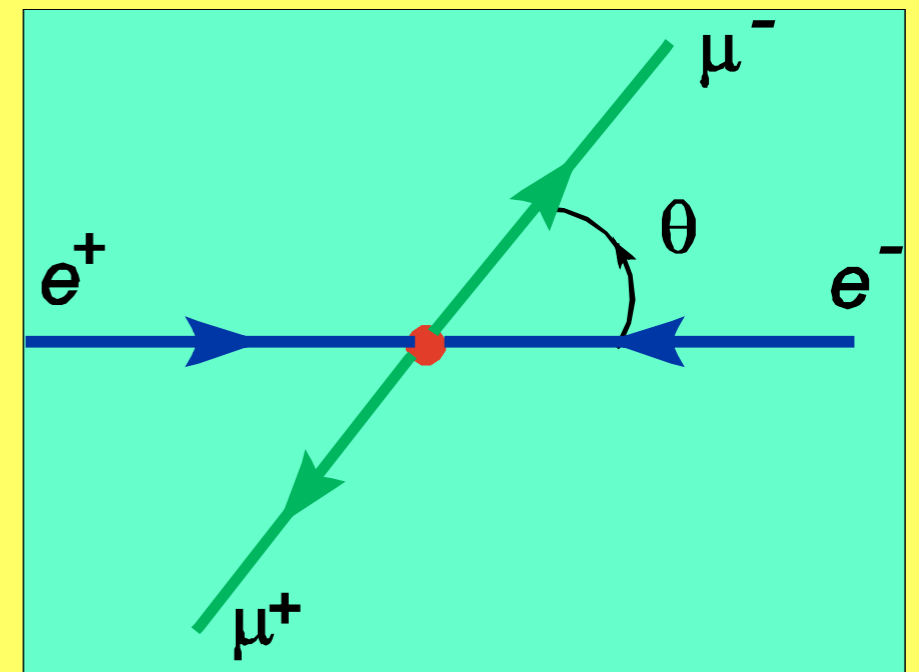
LEP Accelerator

$v=0.999\,999\,999\,987\,c$

$$N = Flux \otimes \sigma$$

↑
Number of events

↑
Cross-section



Calculation of the cross-section by Feynman rules

Cross-section →

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2E^2} \frac{|\vec{k}|}{16\pi^2 E} \frac{1}{4} \sum_{spin} |\mathcal{M}|^2$$

E=Energy
Ω = Angle

Matrix element

Angular Deps

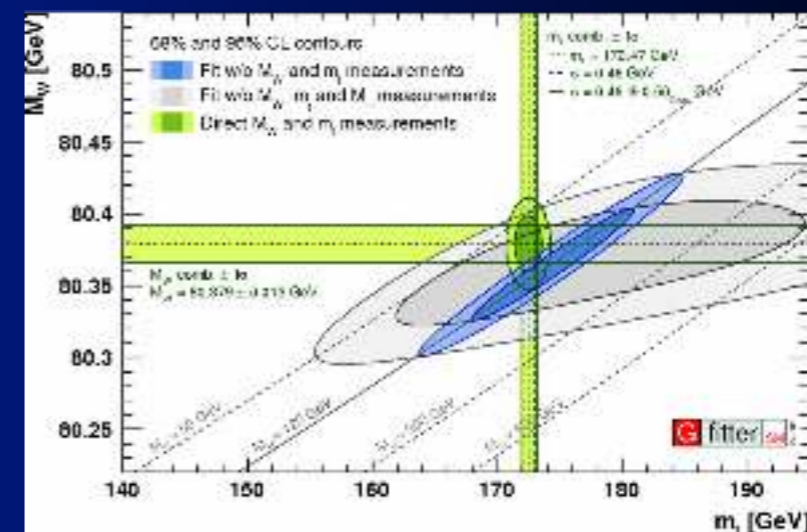
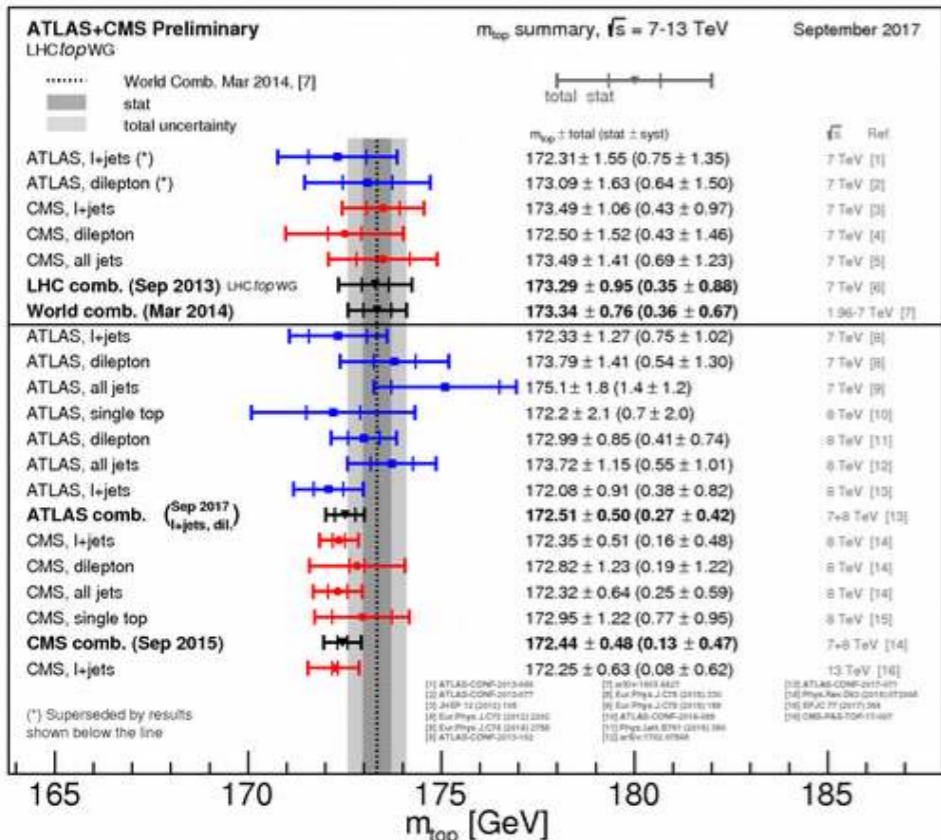
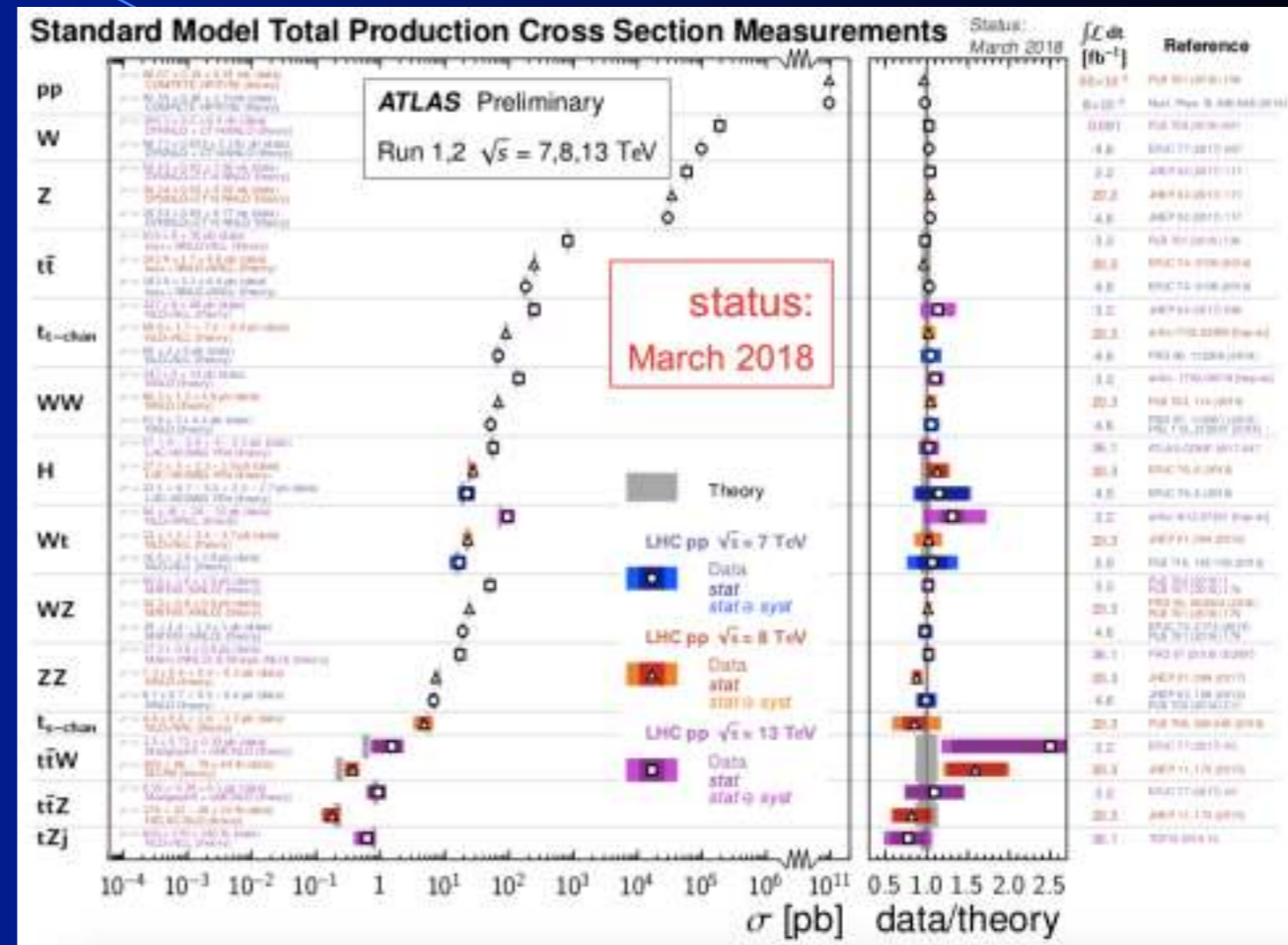
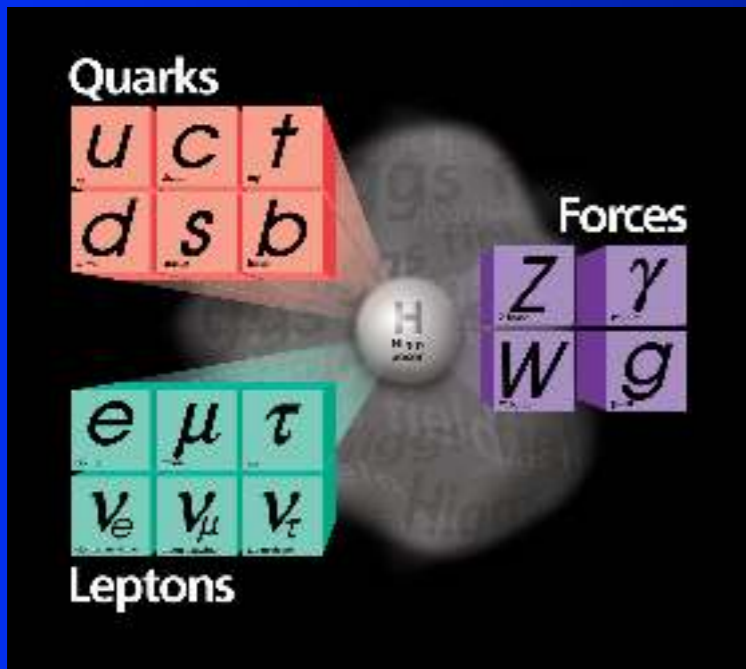
$$|\mathcal{M}|^2 = \left| \bar{v}_\alpha \gamma_{\alpha\beta}^\mu v_\beta \left(-i \frac{g^{\mu\nu}}{p^2} \right) \bar{v}_\rho \gamma_{\rho\sigma}^\nu v_\sigma \right|^2$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4E^2} \sqrt{1 - \frac{m_\mu^2}{E^2}} \left[\left(1 + \frac{m_\mu^2}{E^2} \right) + \left(1 - \frac{m_\mu^2}{E^2} \right) \cos^2 \theta \right]$$

$$\sigma = \frac{4\pi\alpha^2}{3E^2} \sqrt{1 - \frac{m_\mu^2}{E^2}} \left[1 + \frac{m_\mu^2}{2E^2} \right]$$

Total x-section

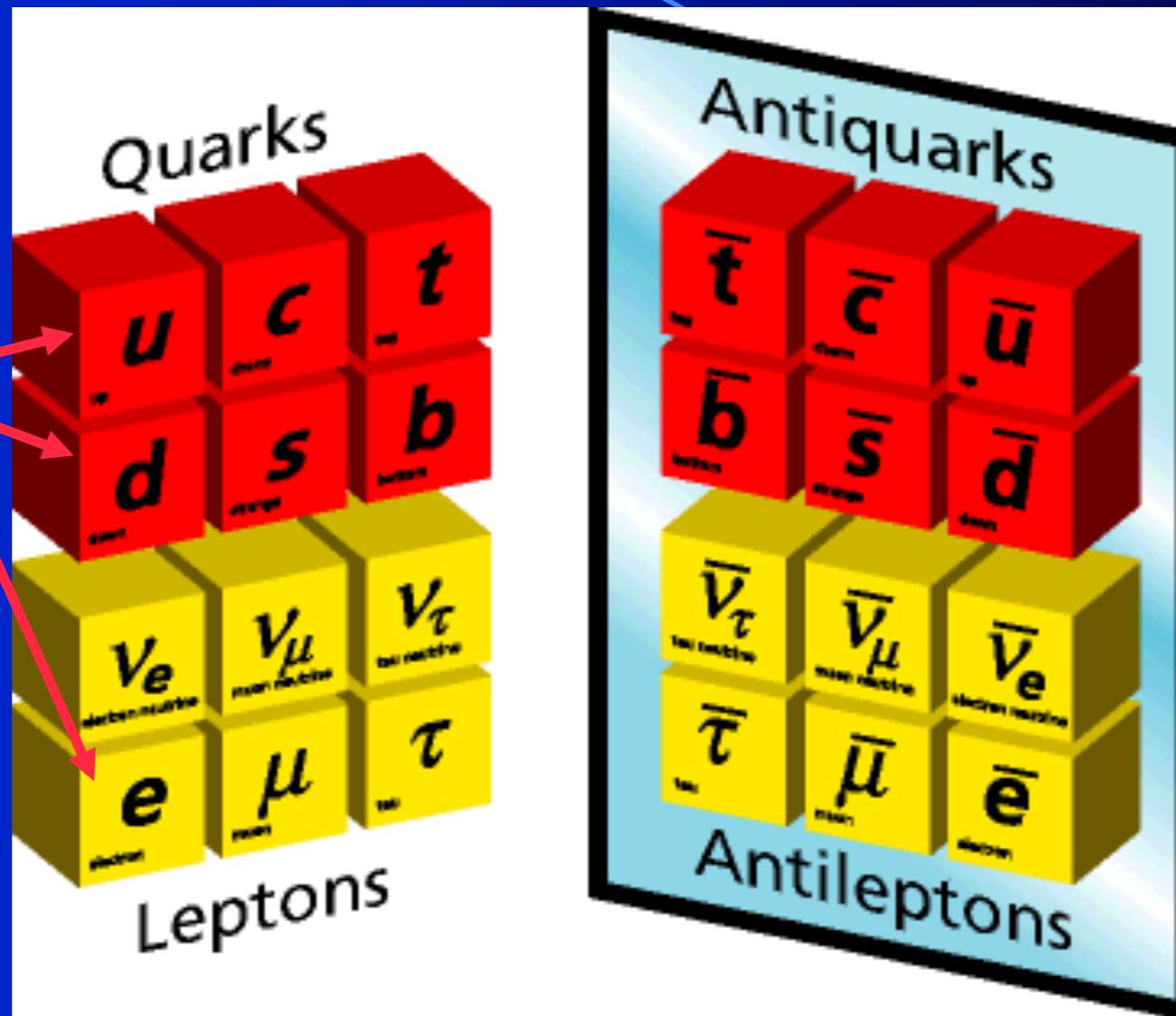
СМ: Сравнение с экспериментом



Замечательное согласие экспериментальных данных с предсказаниями Стандартной модели!

Материя и Антиматерия

Первое поколение - это то из чего мы состоим



Антиматерия родилась вместе с материей во время «Большого взрыва»

Античастицы рождаются вместе с частицами на ускорителях, но мир вокруг нас не содержит антивещества

Загадка № 2:

Как объяснить отсутствие антиматерии во Вселенной?

Барионная асимметрия Вселенной



- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами

среднее число фотонов в единице объёма

$$n_{\gamma} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_{\gamma}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Остаток после взаимной аннигиляции

- Что является источником барионной асимметрии?
- Где нарушается симметрия между частицами и античастицами?

Всё ещё не разгаданная загадка!

Источник БАВ

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение сохранения барионного числа

$$B = \frac{N_q - N_{\bar{q}}}{3}$$

Барионное число B сохраняется в СМ (с экспоненциальной точностью), но нарушается в теориях Великого объединения

2. Нарушение CP-симметрии (инвариантности по отношению к отражению пространства и замене частицы на античастицу)



3. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Вполне возможный сценарий в ранней Вселенной, когда частицы «выпадают» из теплового равновесия

нарушение T- инвариантности



CPT - точная симметрия Природы

Тёмная материя

Энергетический баланс Вселенной



Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 90% (50%) элементарных частиц

Загадка № 3:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

Какие новые загадки или
разгадки ждут нас за
пределами Стандартной
теории?

СТ