

МОСКВА
2030

6 СЕНТЯБРЯ 19.00

Дмитрий Казаков
Объединённый институт ядерных исследований
Дубна

Вот такая Вселенная!

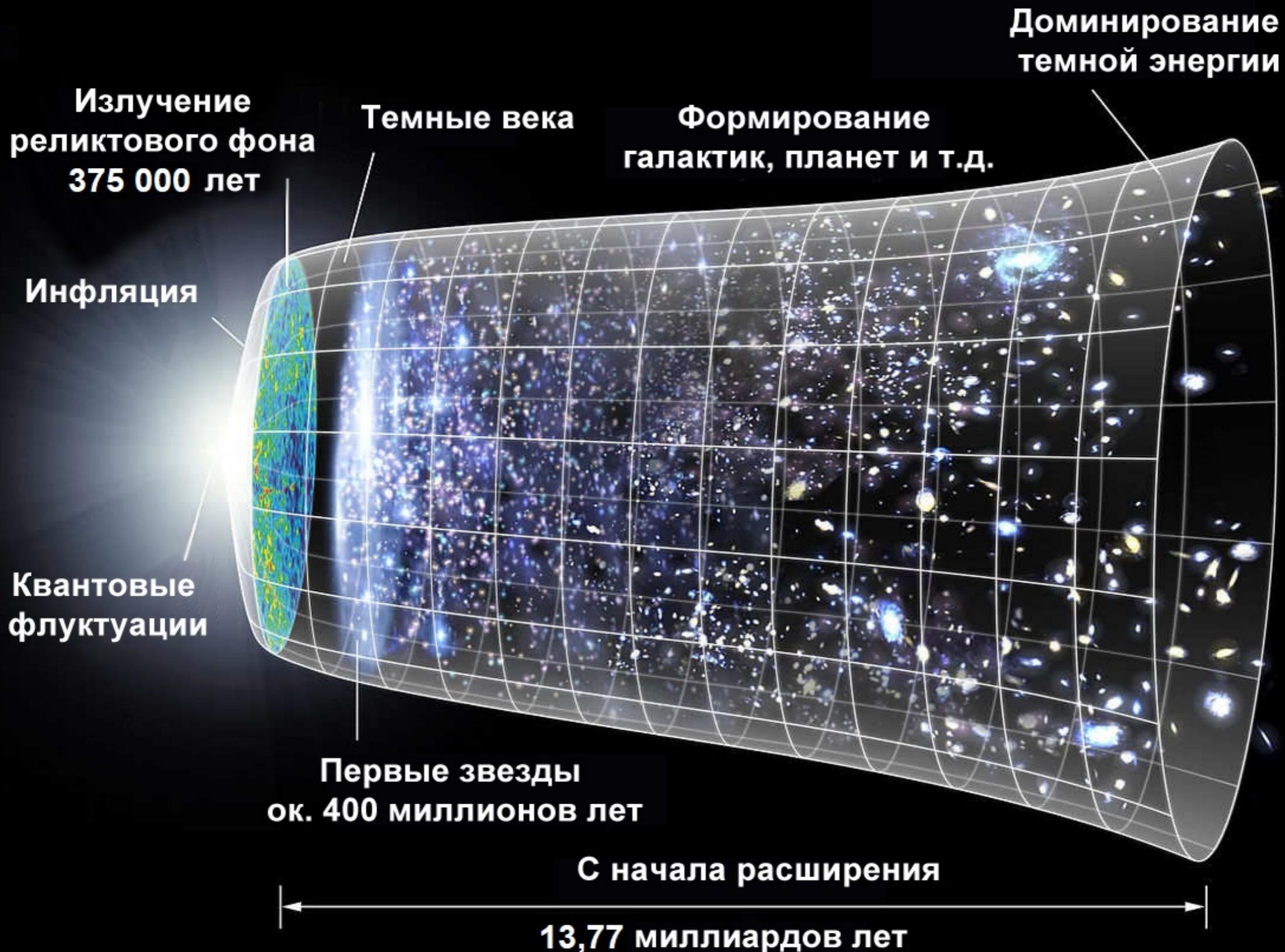
14 миллиардов лет в одной лекции

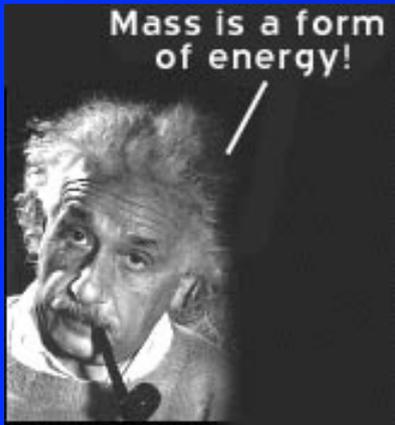


ФОРУМ-ФЕСТИВАЛЬ
ТЕРРИТОРИЯ БУДУЩЕГО
МОСКВА
2030



Эволюция Вселенной





Общая теория относительности

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$

↑
тензор Риччи



скалярная кривизна

↑
тензор энергии-импульса материи

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}T_{\mu\nu}$$



↑
Космологическая постоянная

Космологическая постоянная есть вакуумная энергия = Λ^4

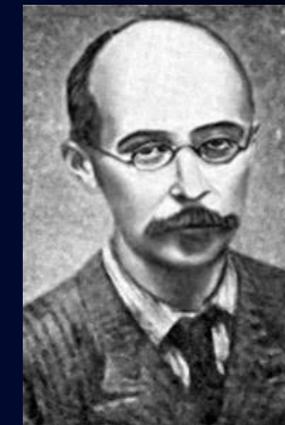
Приводит к антигравитации, что порождает ускоренное расширение Вселенной

Чтобы получить ~ 70 % вклада в энергетический баланс Вселенной Λ должна быть порядка 10^{-33} эв.

«Естественное» значение космологической постоянной $\sim M_{\text{Planck}}$ привело бы к вакуумной энергии в 10^{123} раз большей

?!

Уравнения эволюции Фридмана



1921 г.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \left(\frac{kc^2}{a^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Уравнение сохранения энергии

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Уравнение движения

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H \left(\rho + \frac{P}{c^2}\right)$$

Уравнение непрерывности

$$k = 0, 1, -1$$

G Константа Ньютона

$a(t)$ Масштабный фактор

H Параметр Хаббла

P Плотность

Λ Космологическая постоянная

ρ Давление

Загадка № 1:

Что вызывает ускоренное
расширение Вселенной?

Почему космологическая
постоянная такая
маленькая?

Стандартная Модель фундаментальных взаимодействий

Квантовая механика + специальная теория относительности = квантовая
теория поля

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

- Три локальных симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- Три семейства кварков и лептонов ($\underline{3} \times \underline{2}$, $\underline{3} \times \underline{1}$, $\underline{1} \times \underline{2}$, $\underline{1} \times \underline{1}$)
- Спонтанное нарушение электрослабой симметрии →
Хиггсовский бозон
- Смешивания ароматов в заряженных токах (матрицы CKM и PMNS)
- CP нарушение за счёт фазовых факторов
- Удержание кварков и глюонов внутри адронов
- Сохранение барионного и лептонного чисел
- CPT инвариантность → существование антиматерии

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
	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
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
	<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	
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force	

Bosons (Forces)

Силы

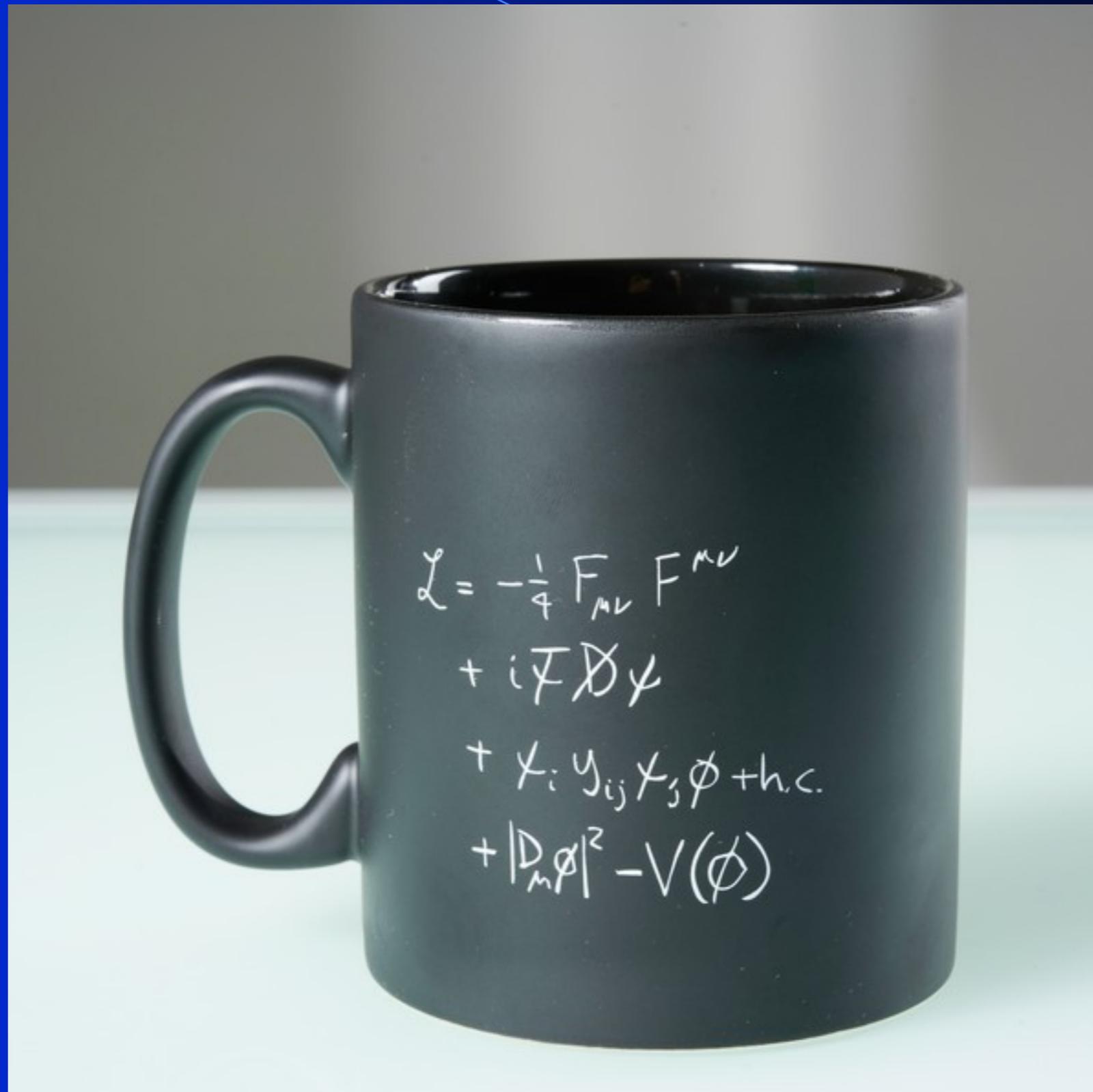
Электромагнитные

Сильные

Слабые

Гравитация

Стандартная Модель



Стандартная Модель

ЛАГРАНЖИАН

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Yukawa} + \mathcal{L}_{Higgs},$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{gauge} = & -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_{\mu\nu}^i - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B_{\mu\nu} \\ & + i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{Q}_\alpha \gamma^\mu D_\mu Q_\alpha + i\bar{E}_\alpha \gamma^\mu D_\mu E_\alpha \\ & + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{D}_\alpha \gamma^\mu D_\mu D_\alpha + (D_\mu H)^\dagger (D_\mu H), \\ & + i\bar{N}_\alpha \gamma^\mu \partial_\mu N_\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{Yukawa} = & y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^D \bar{Q}_\alpha D_\beta H + y_{\alpha\beta}^U \bar{Q}_\alpha U_\beta \tilde{H} + h.c., \\ & + y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha N_\beta \tilde{H} \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V = m^2 H^\dagger H - \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

Станда

ЛАГРАНЖИАН

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

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

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

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

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

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

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

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V$$

$$\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_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\ & 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_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \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^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\ & \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 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (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^- - \\ & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2} ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\ & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + 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}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\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) e^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g m_\nu^\lambda}{2M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g m_\nu^\lambda}{2M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig m_\nu^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig m_\nu^\lambda}{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{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma^5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_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^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g m_u^\lambda}{2M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g m_u^\lambda}{2M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig m_u^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig m_u^\lambda}{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 X^- - \\ & \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} g M (\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} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2} ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$

Стандартная

ЛАГРАНЖИАНА

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{fermion} + \mathcal{L}_{Higgs}$$

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^i G^{\mu\nu i} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^j G^{\mu\nu j}$$

$$+ i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{N}_\alpha \gamma^\mu \partial_\mu N_\alpha$$

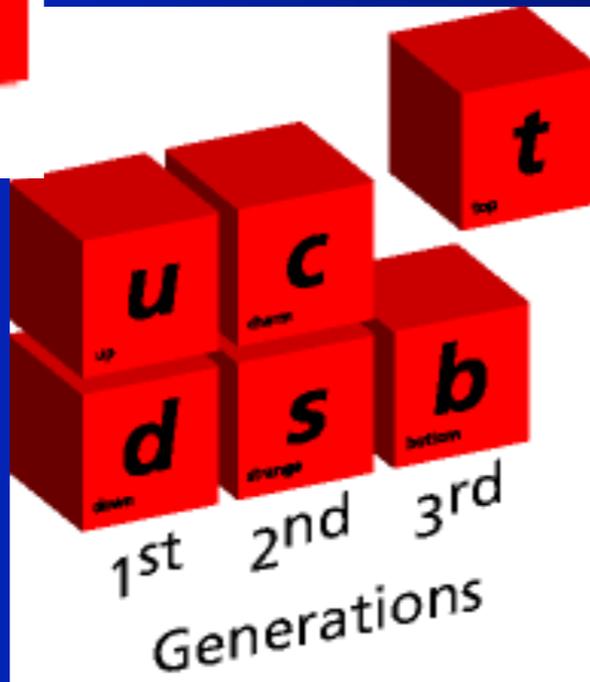
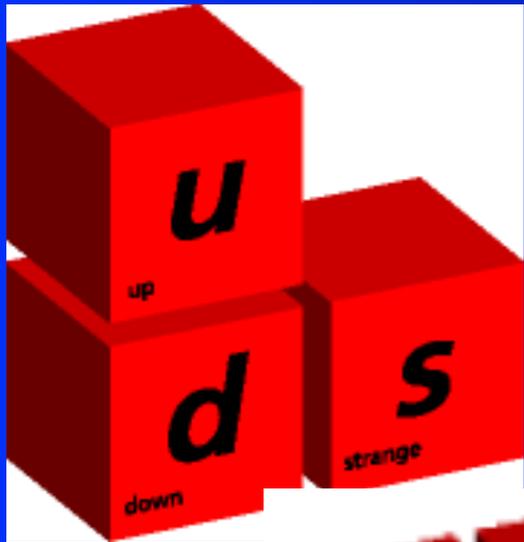
$$\mathcal{L}_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha \Lambda_\beta$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V$$

$$\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_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\ & 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_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \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^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\ & \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 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} g^2 s_w (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu (\phi^+ \phi^-) + \\ & g^2 s_w^2 A_\mu (\phi^+ \phi^-) + \frac{1}{2} ig \frac{1-2c_w^2}{c_w} A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} g^2 s_w (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu (\phi^+ \phi^-) + \\ & \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) + (d_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{2}{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}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\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) e^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \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{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_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^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \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 X^- - \\ & \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} g M (\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} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2} ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$

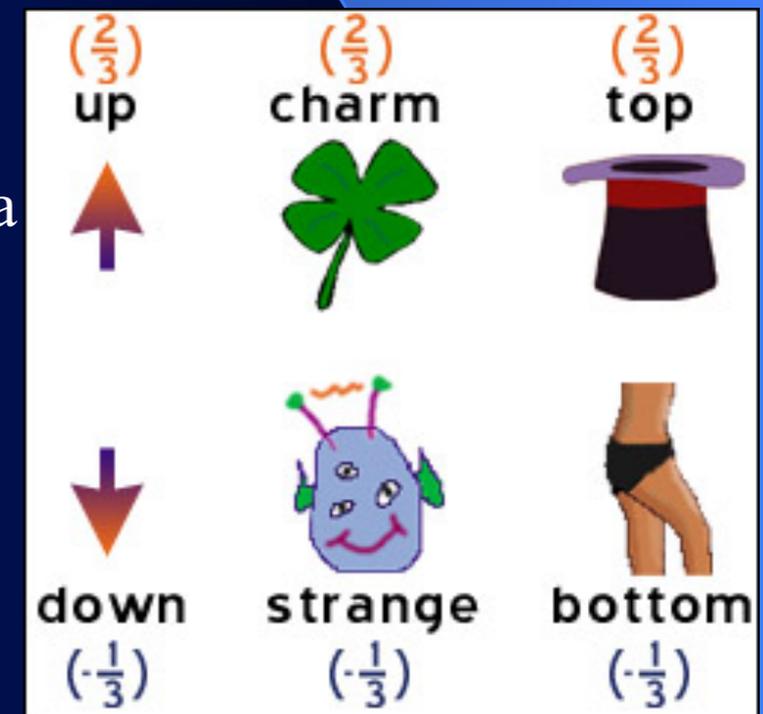
25 свободных параметров!

Кварки — “кирпичики мироздания”

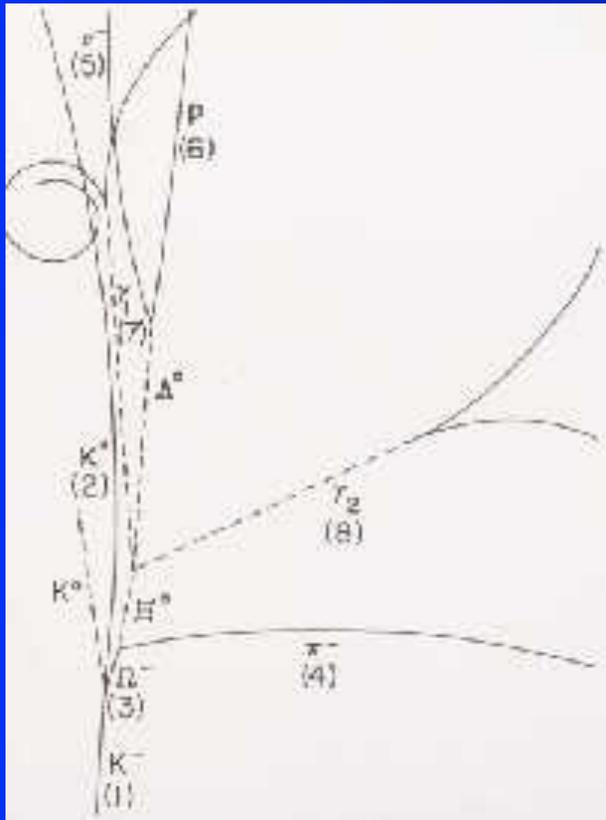


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

По непонятной причине природа создала 3 копии (поколения) кварков и лептонов



Кварковая Модель



- Открытие «омега-минус» в Брукхэйвене в 1964 г. было последним элементом субатомной мозаики.

- Оно явилось подтверждением угадываемой связи между частицами, которая была вскоре понята на языке их внутренней структуры в форме кварков.

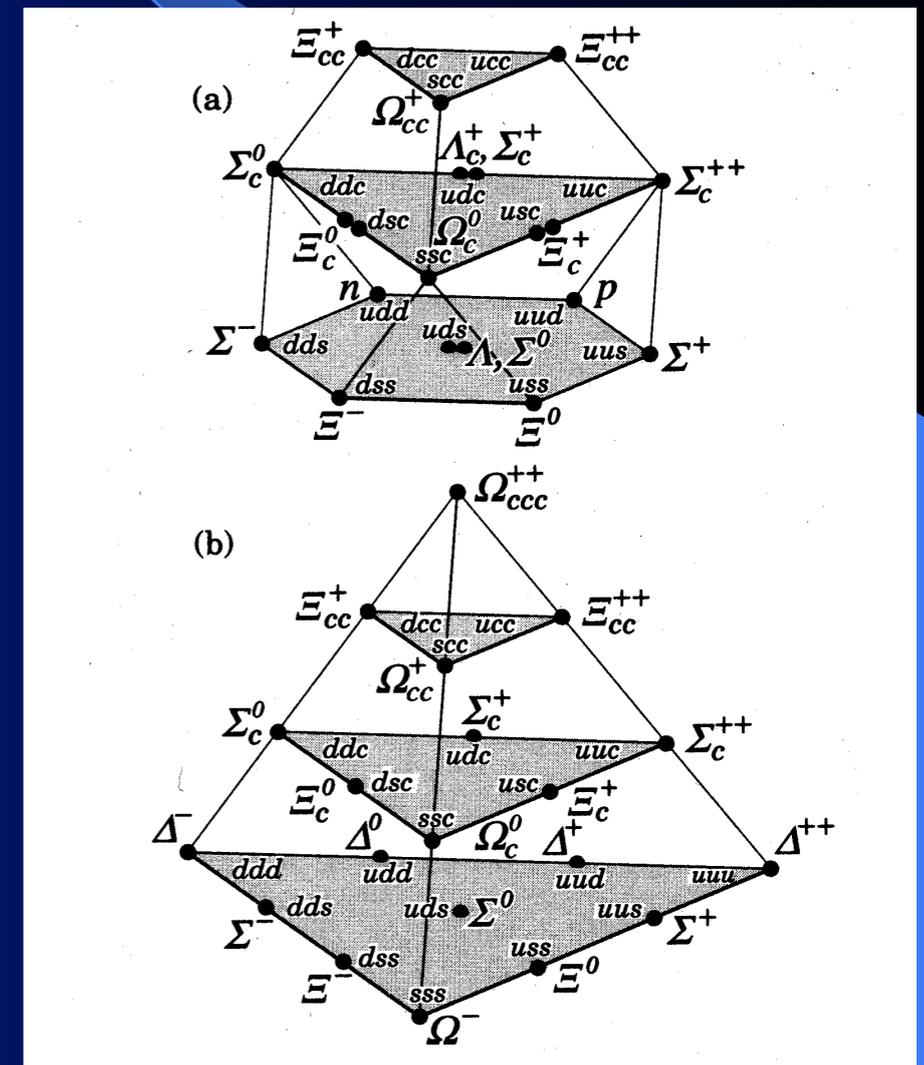
$$\Sigma^0 (d \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

$$\Xi^+ (d \uparrow c \uparrow c \downarrow)$$

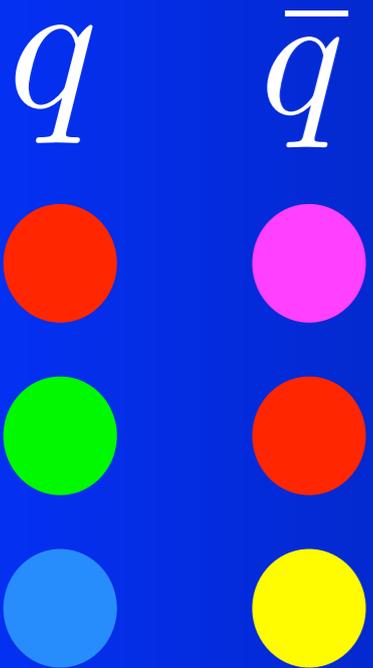
$$\Lambda^+ (u \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

$$\Delta^- = \varepsilon^{ijk} (d_i \uparrow d_j \uparrow d_k \uparrow)$$

Для преодоления принципа запрета Паули была введена антисимметризация по «цвету»



Цветные кварки



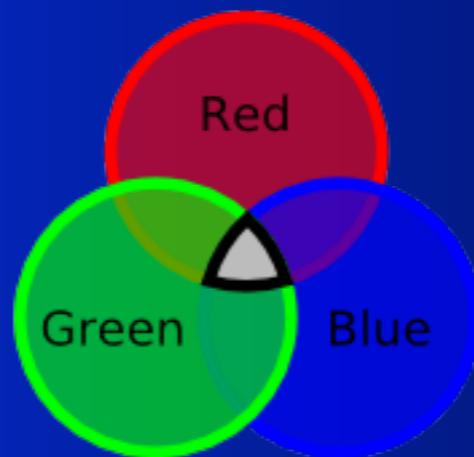
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

Антикварки имеют антицвета: анти**красный** - **фиолетовый**, анти**зелёный** - **красный**, анти**синий** - **жёлтый**

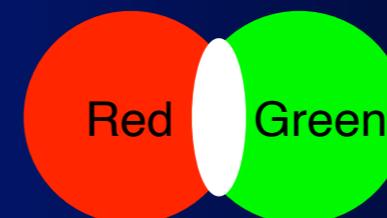
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !



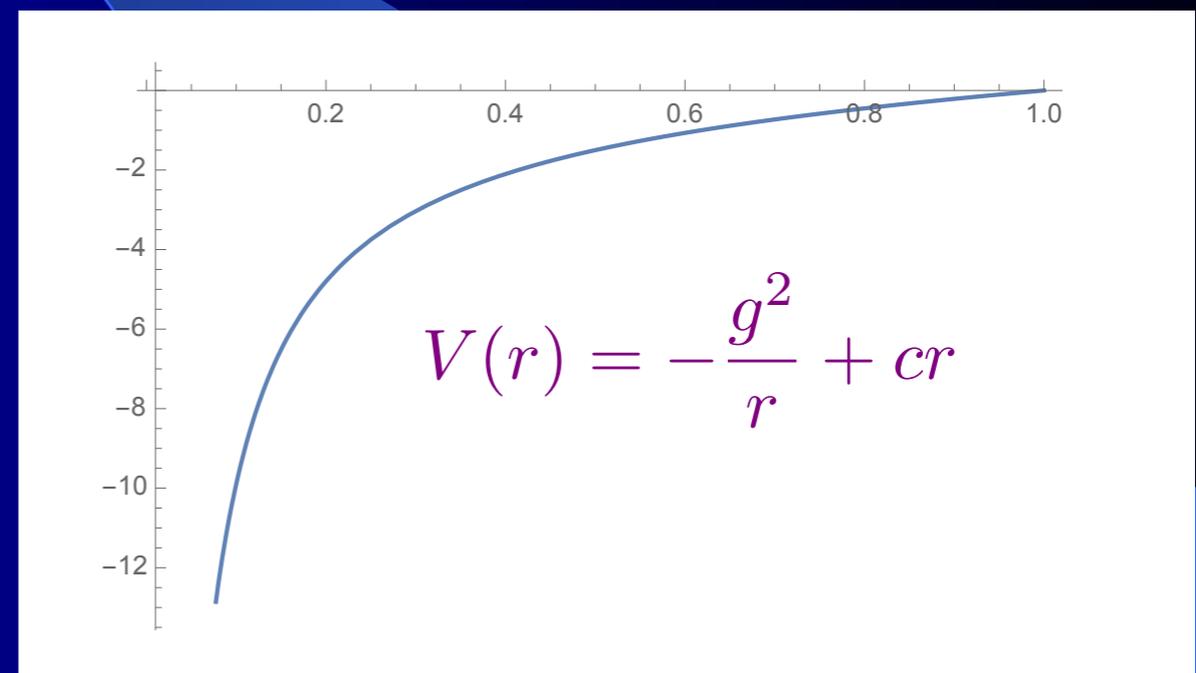
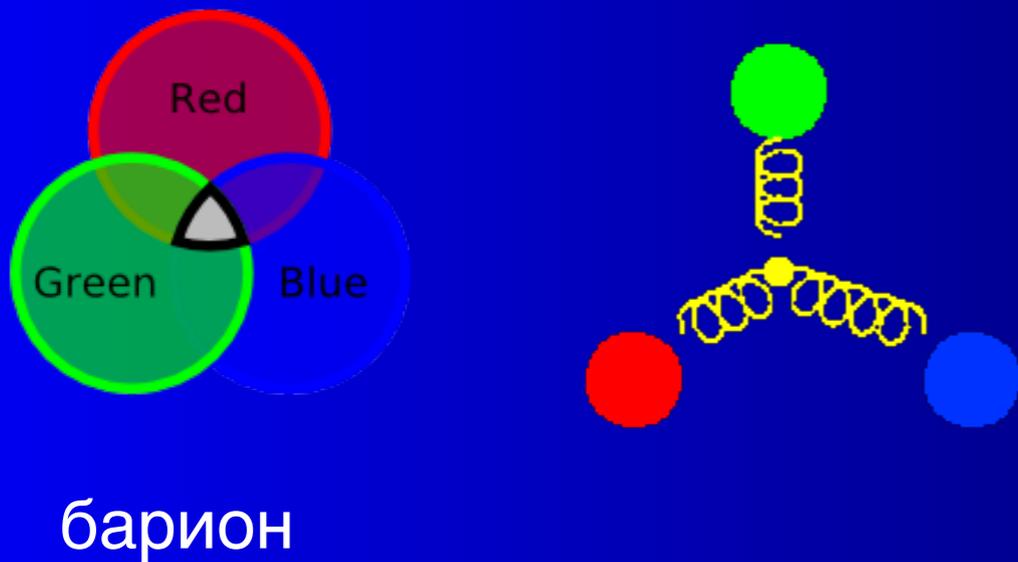
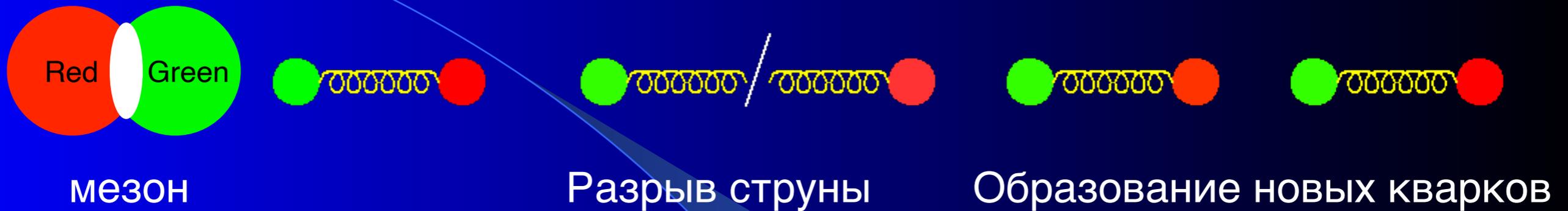
барион



МЕЗОН

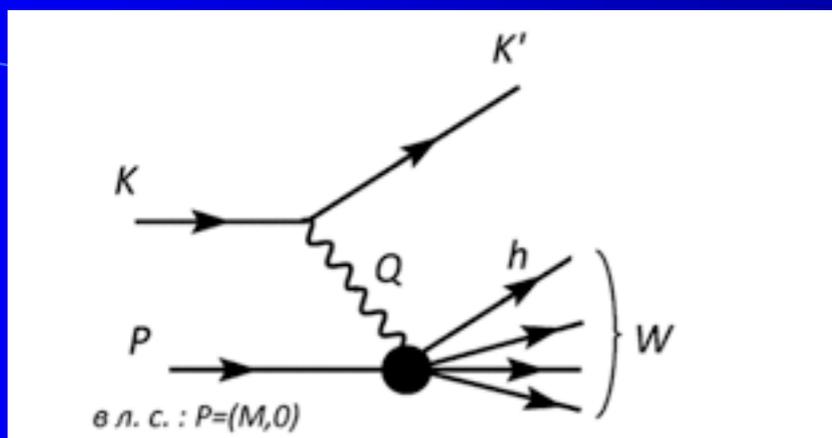
Гипотеза невылетания кварков

Кварки удерживаются внутри адронов за счёт глюонов, образующих струны натянутые между кварками

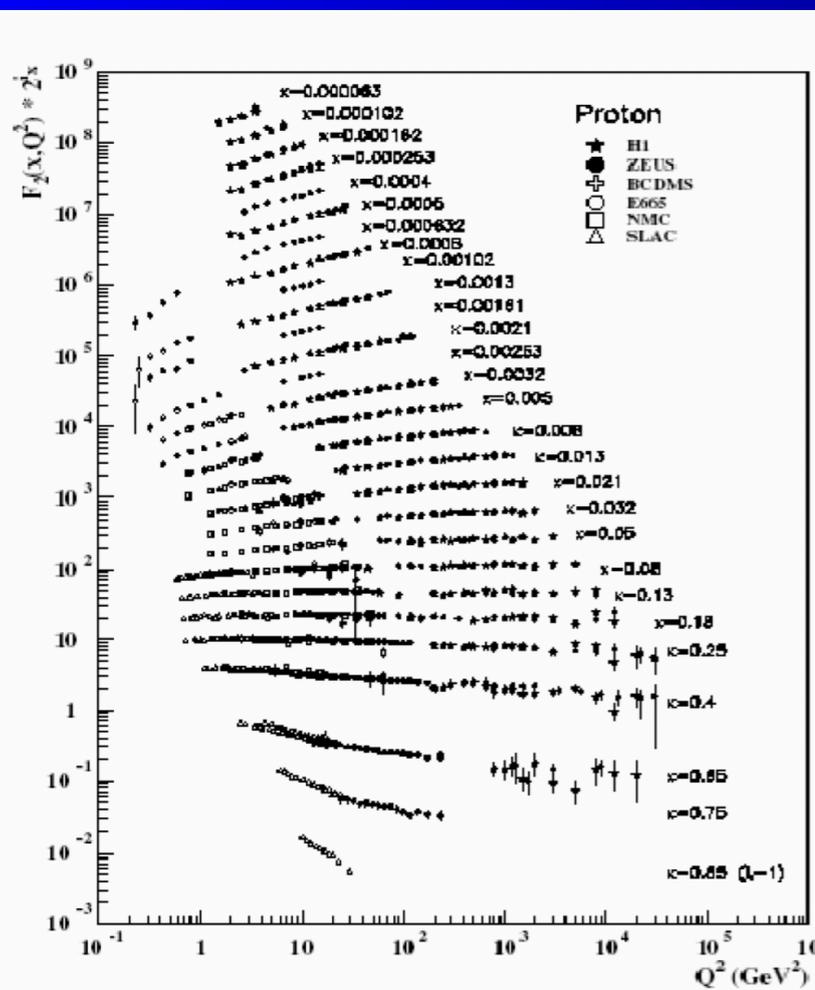
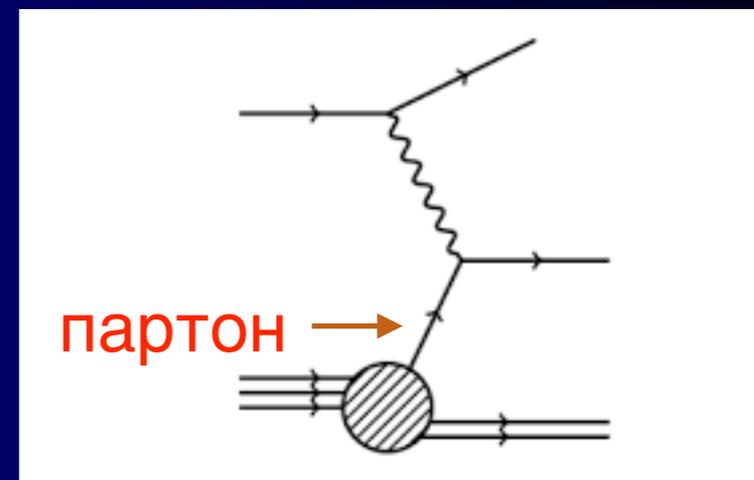


Рассеяние электронов на протонах

Партонная модель



Q - импульс переданный от электрона протону

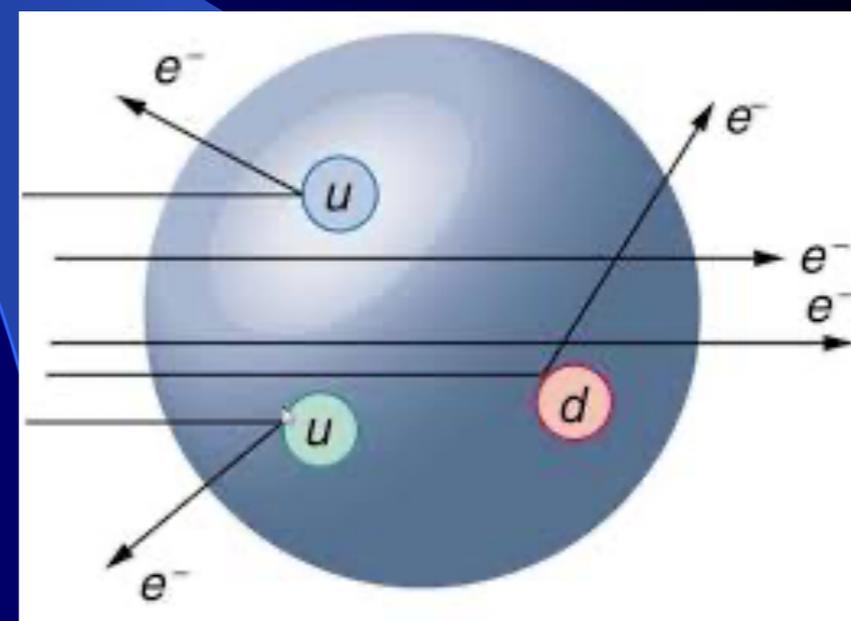


W - полная энергия рождённых адронов

Отждествление партон с кварками

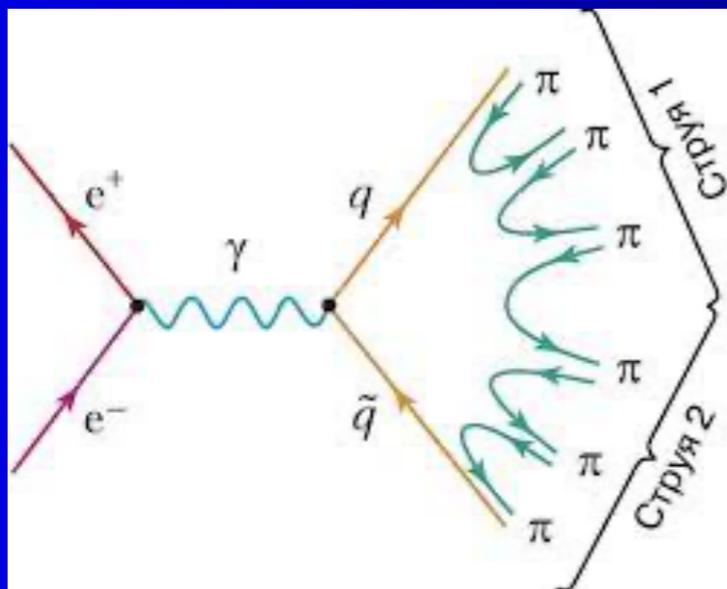
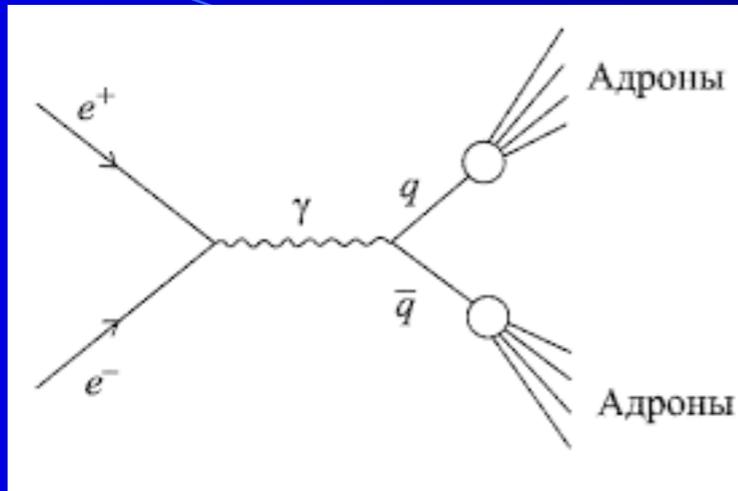
$$x = \frac{Q^2}{W^2}$$

скейлинг



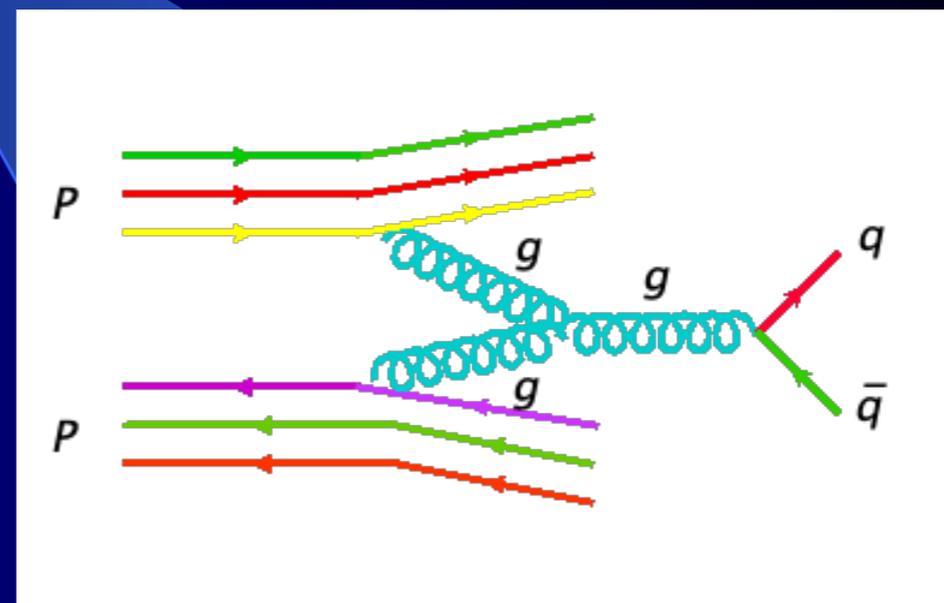
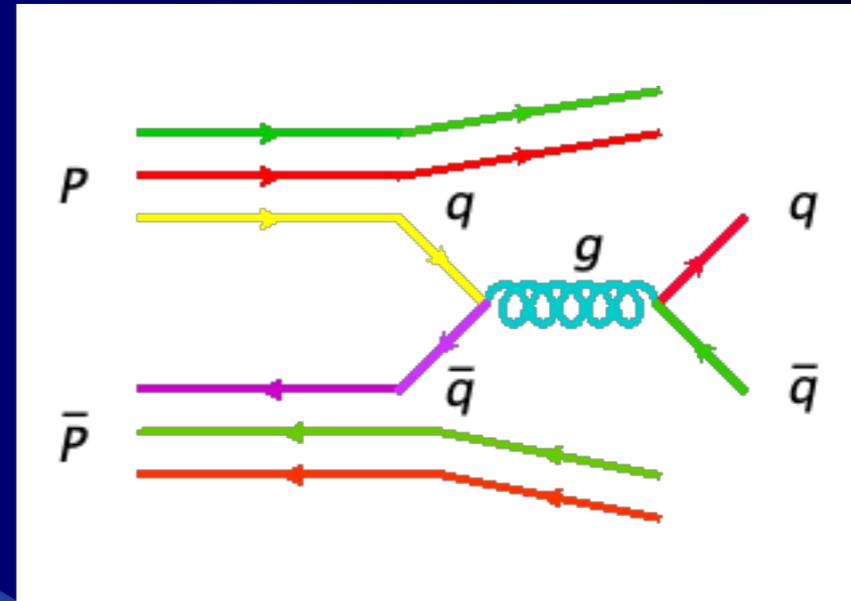
Рождение адронов на коллайдерах

Электрон-позитронный коллайдер



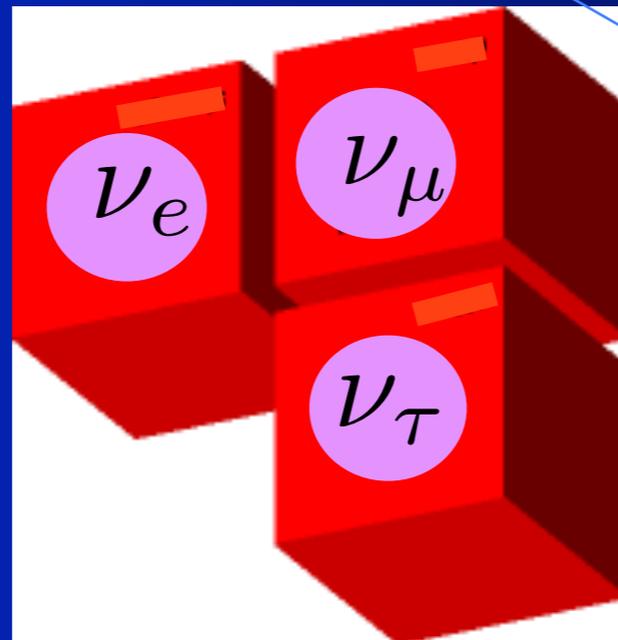
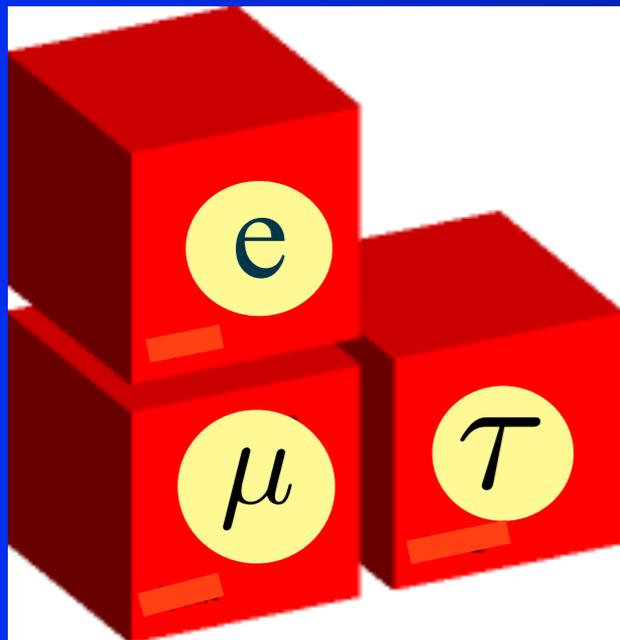
Адроны образуют струи вдоль направлений рождённых кварков

Протонный коллайдер



Кварковые подпроцессы

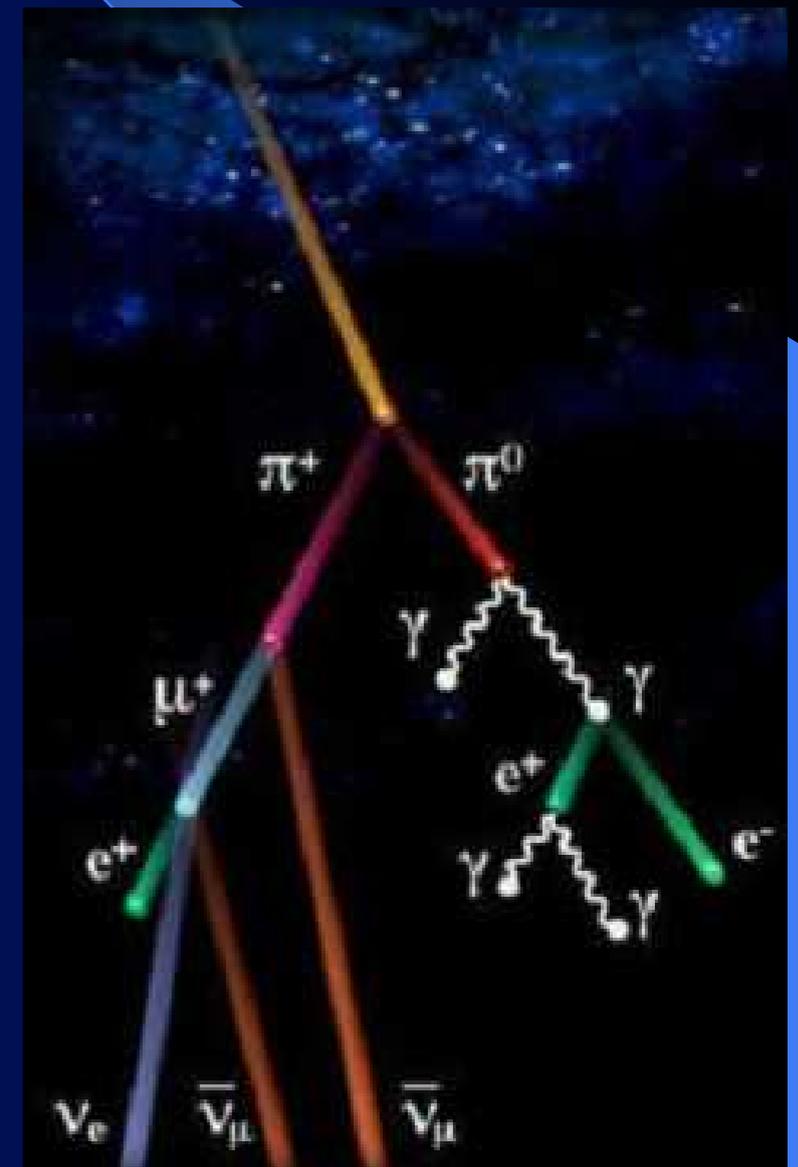
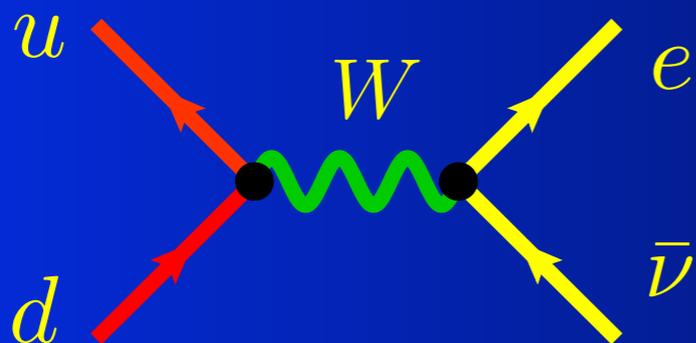
Лептоны от слова ΛΕΤΤΌΣ



Мюоны рождаются от распада π -мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

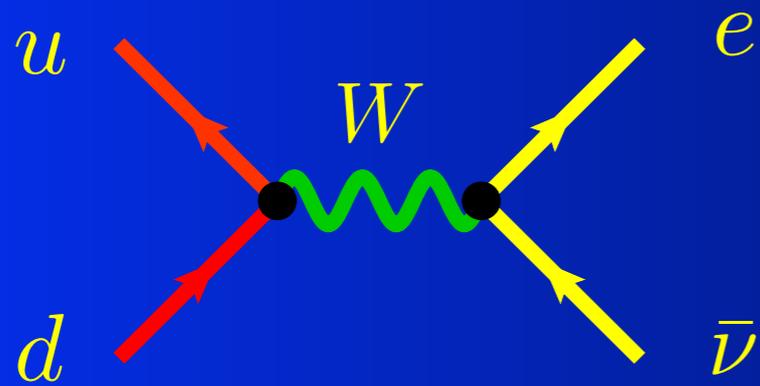
Электроны образуют оболочки атомов и определяют всю химию неживой и живой природы

Нейтрино рождаются в процессах распада адронов



Нейтрино-загадочная частица

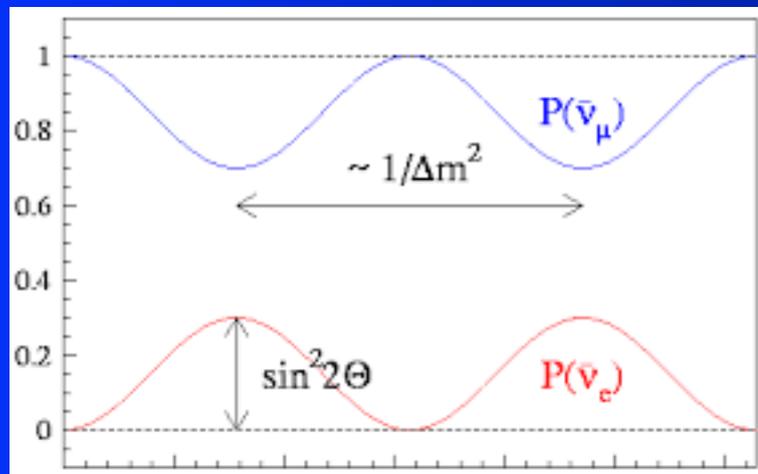
Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов



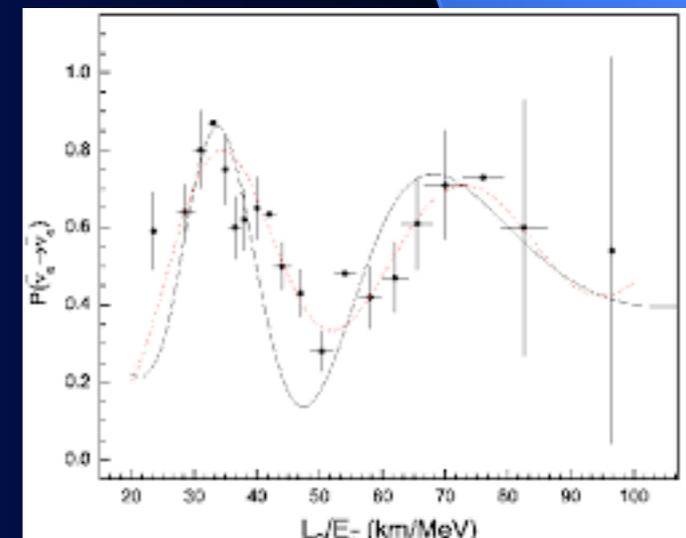
Нейтрино

- не имеют электрического заряда
- не участвуют в эл-маг вз-иях
- не участвуют в сильных вз-иях
- участвуют в слабых вз-иях
- 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

Античастица ли нейтрино самой себе?

$$\nu_D = \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad \nu_{M_1} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_1^* \end{pmatrix}, \quad \nu_{M_2} = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \xi_2^* \end{pmatrix}$$

$$\nu_D \neq \nu_D^*$$

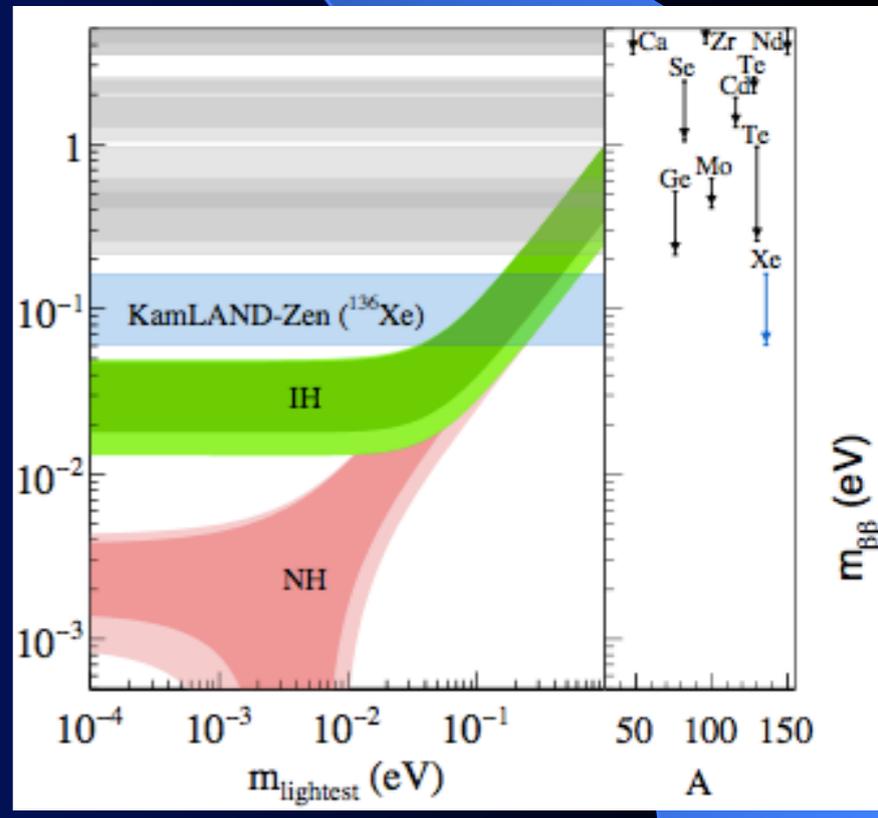
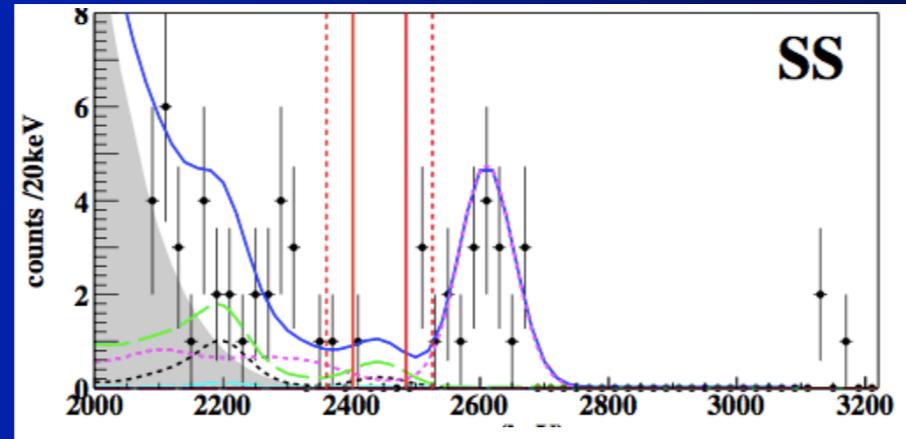
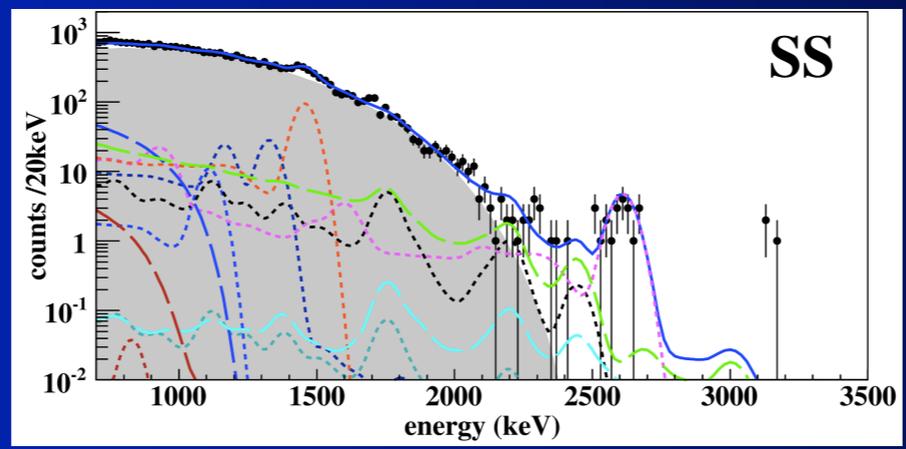
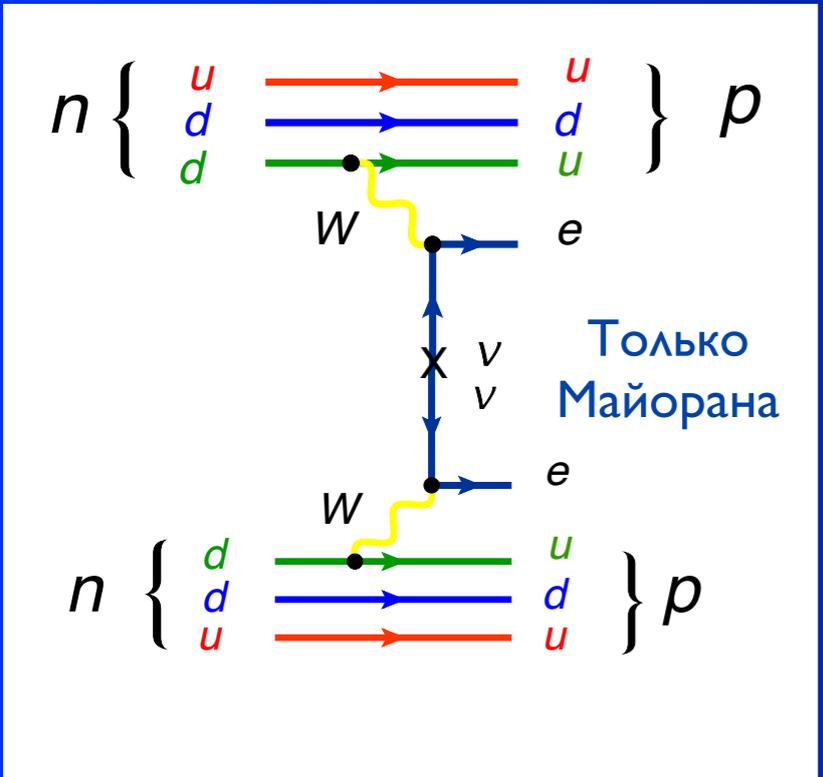
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

$$m_{\nu_{M_1}} \neq m_{\nu_{M_2}}$$

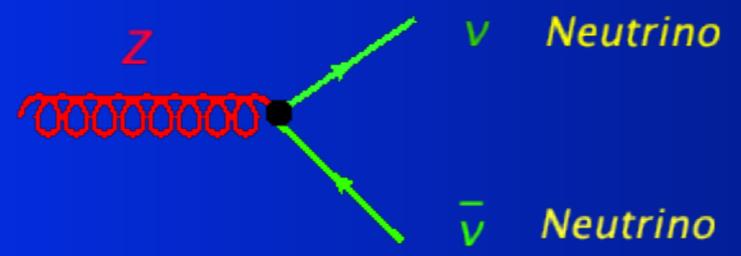
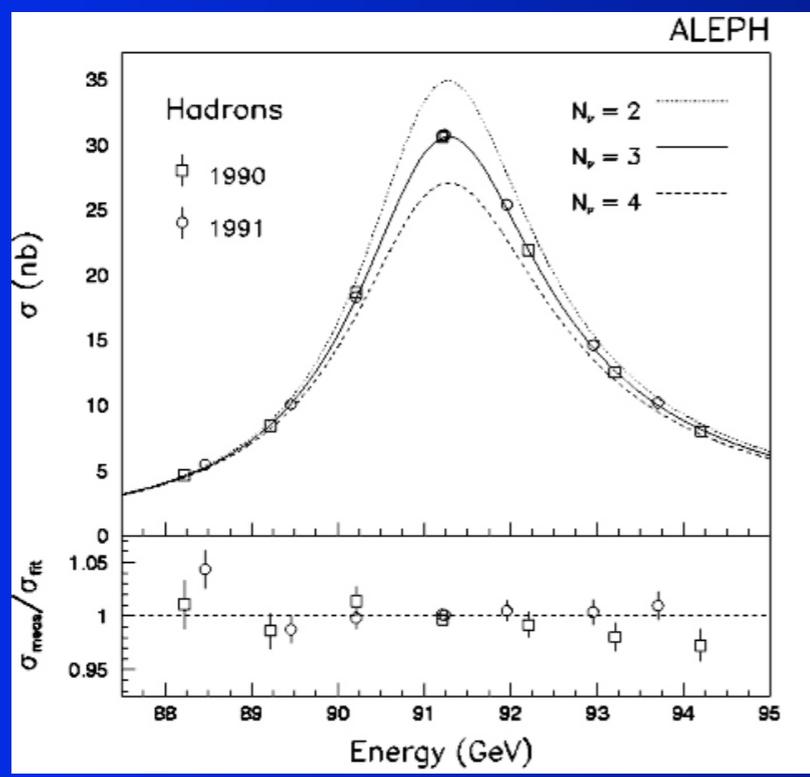
$0\nu\beta\beta$ decay



$T_{1/2} 0\nu\beta\beta (^{136}\text{Xe}) \times 10^{25} \text{ yr} > 1.6 \text{ (90\% CL)}$

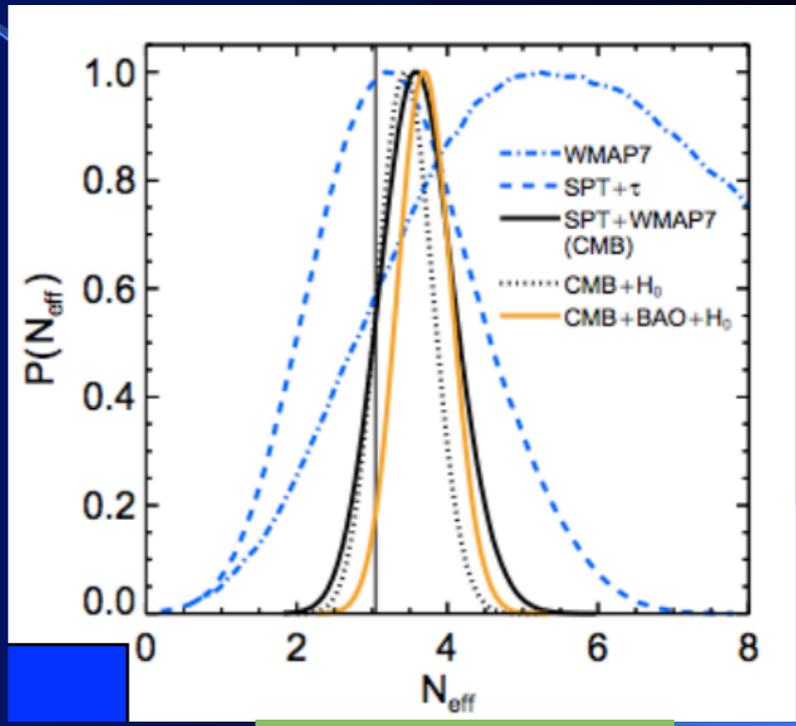
Число поколений частиц материи

- Ширина линии Z-бозона (LEP)



Форма и ширина линии Z-бозона полученные на электрон-позитронном коллайдере ЛЭП зависит от числа поколений и даёт для числа сортов лёгких нейтрино (числа поколений)

- Спектр реликтового излучения (Planck)



$$N_{\nu}^{eff} < 3.30 \pm 0.27$$

➤ Форма спектра температурных флуктуаций КМФ определяется количеством активных поколений нейтрино Стандартной модели, предполагая кварк-лептонную симметрию

$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

Задача № 2:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН

Хиггсовский бозон

$$H(x) = v + h(x) \quad \leftarrow$$

$$\langle H(x) \rangle = v \quad \text{среднее значение поля}$$

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

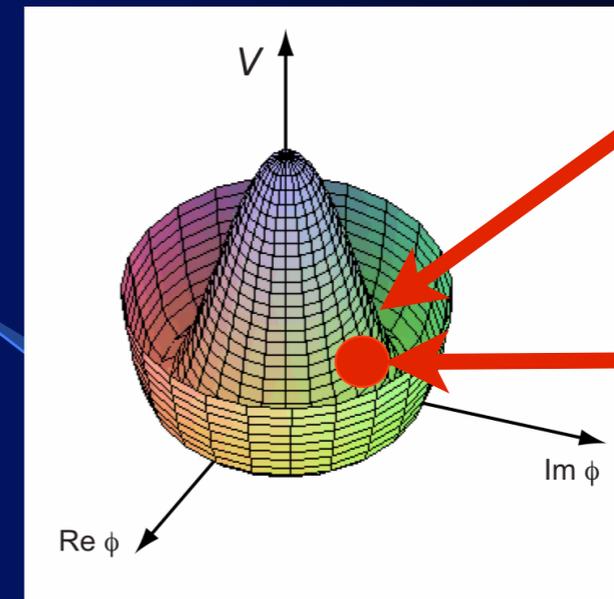
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Потенциал



Основное
состояние

Спонтанное
нарушение
симметрии

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

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

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

ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН

Хиггсовский бозон

$$H(x) = v + h(x)$$

$$\langle H(x) \rangle = v \quad \text{среднее значение поля}$$

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

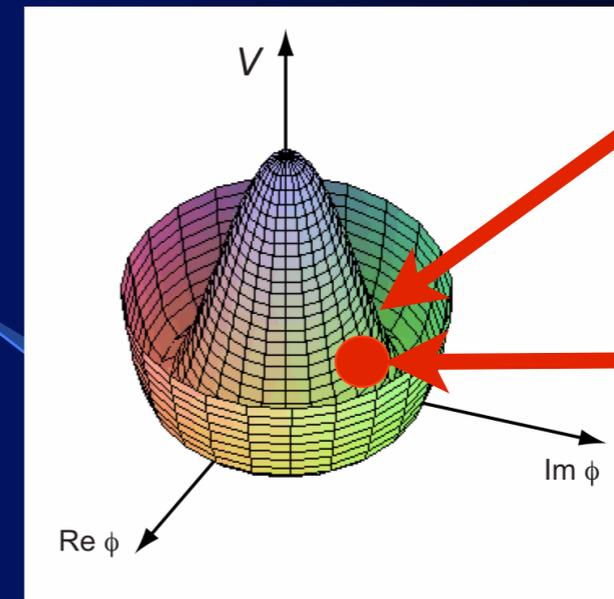
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Потенциал

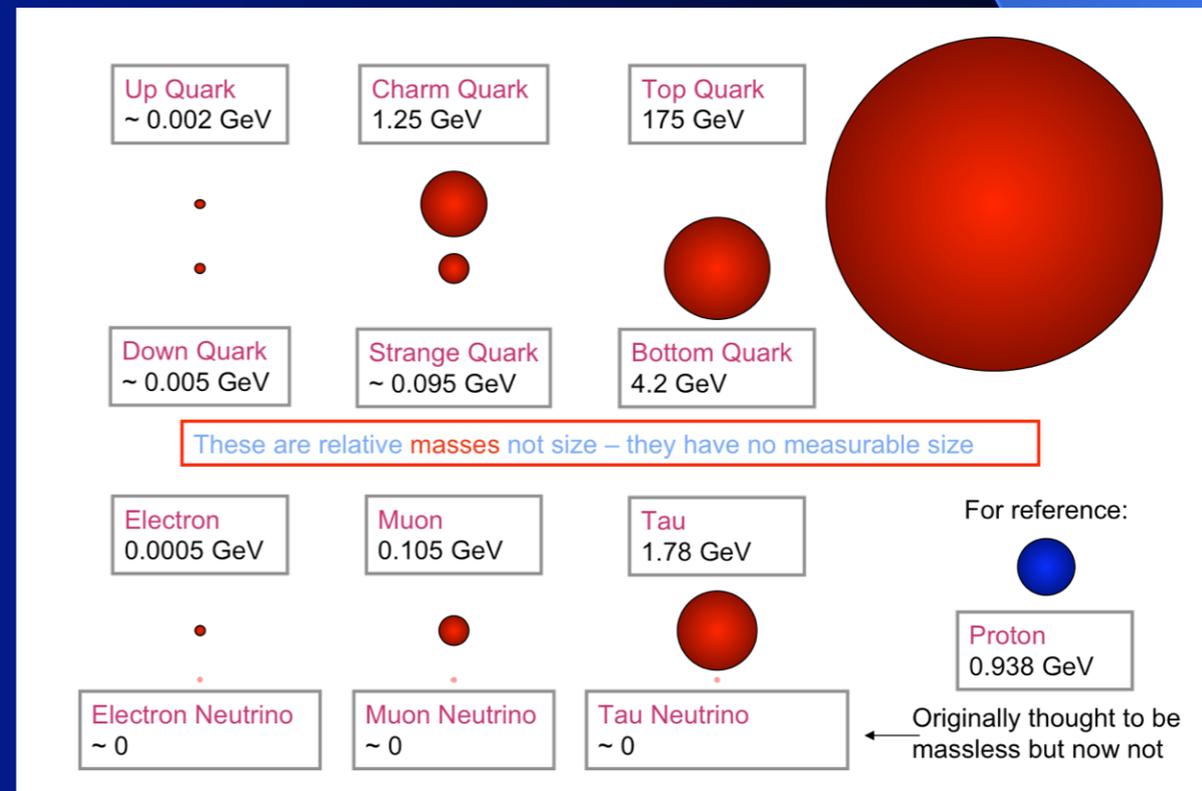


Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

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

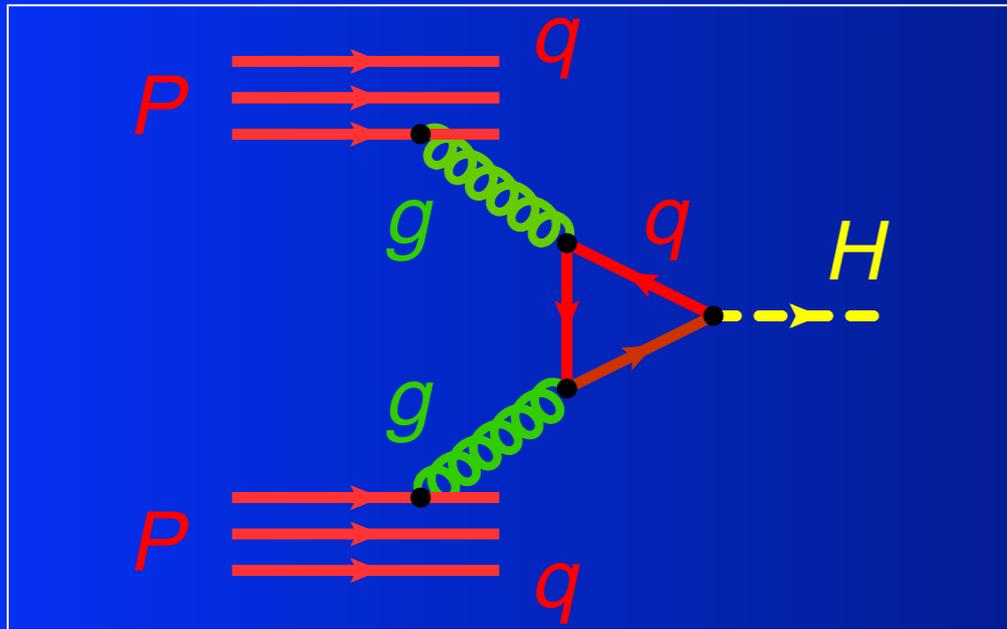
Все массы частиц пропорциональны константе взаимодействия частиц с хиггсовским (полем) бозоном



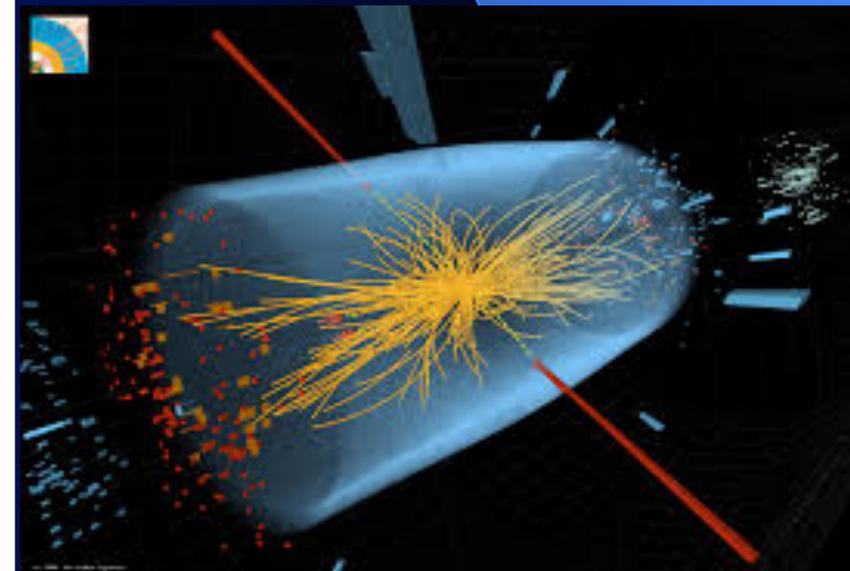
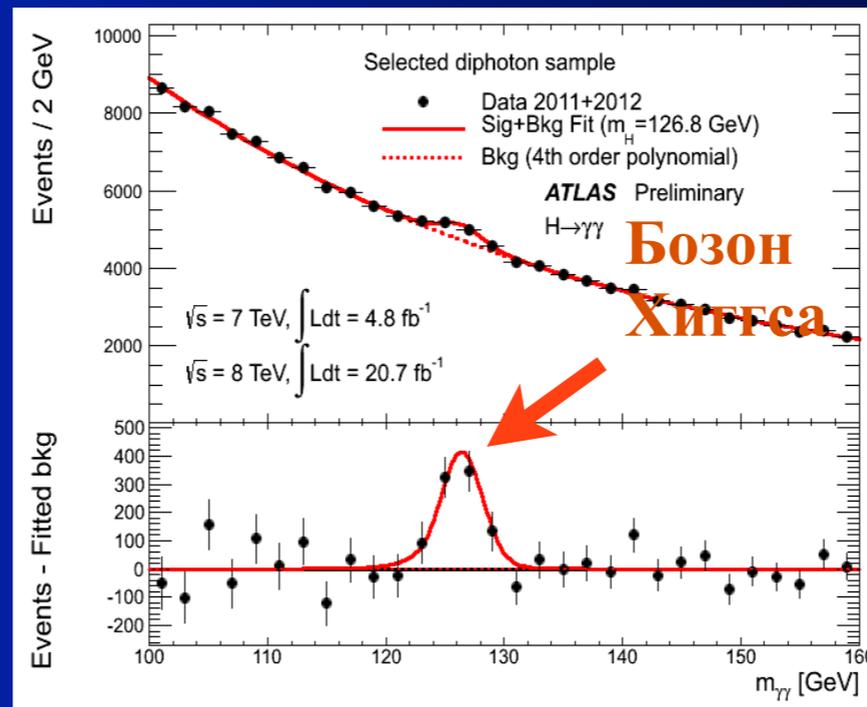
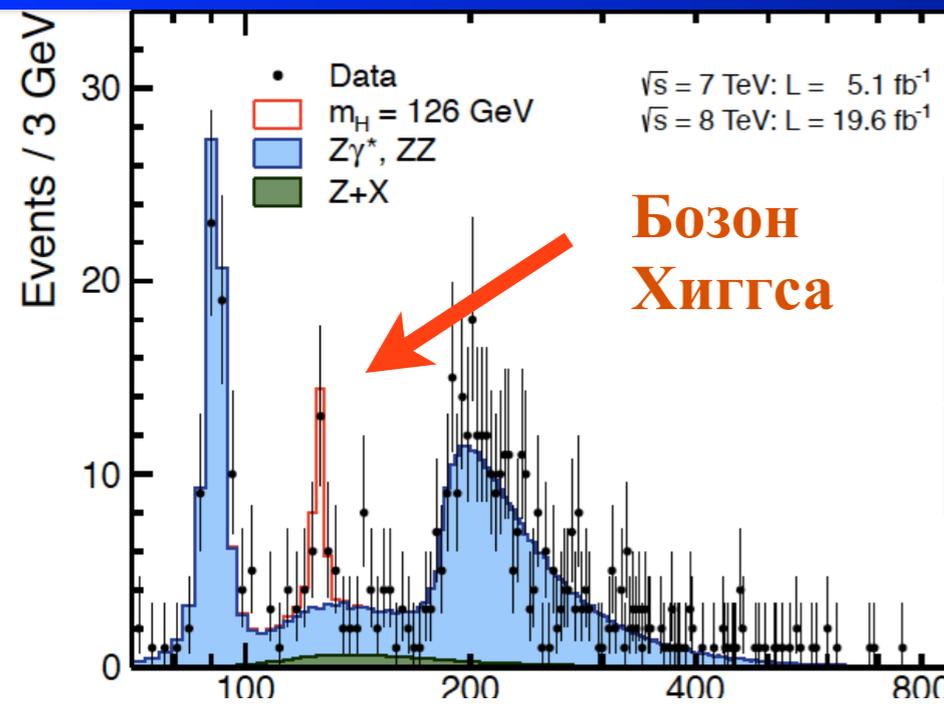
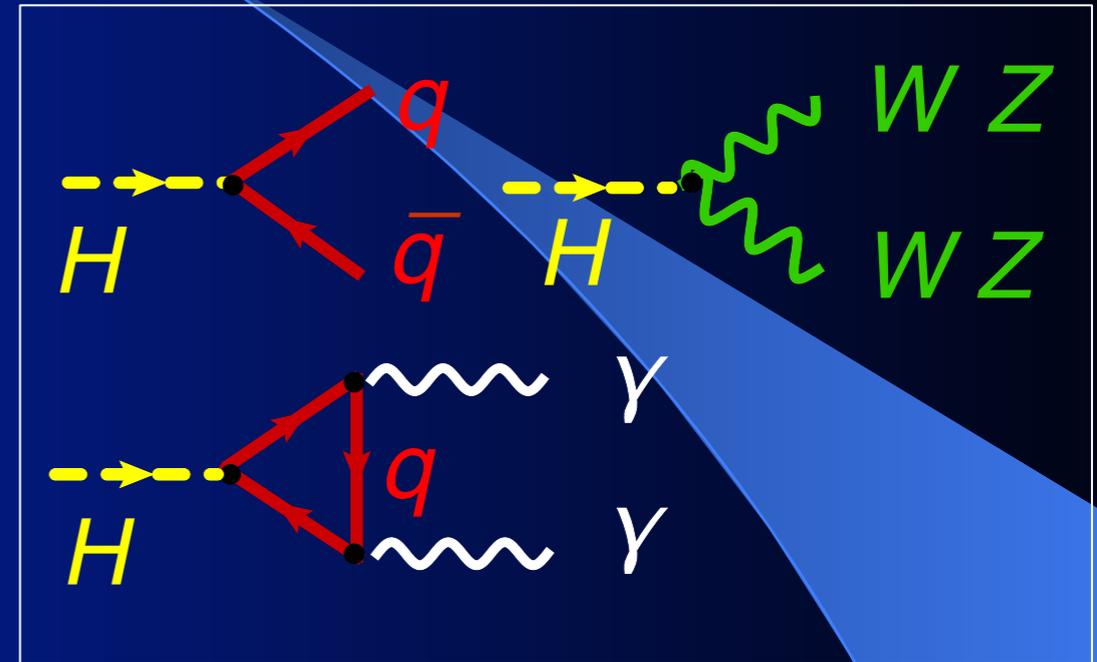
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

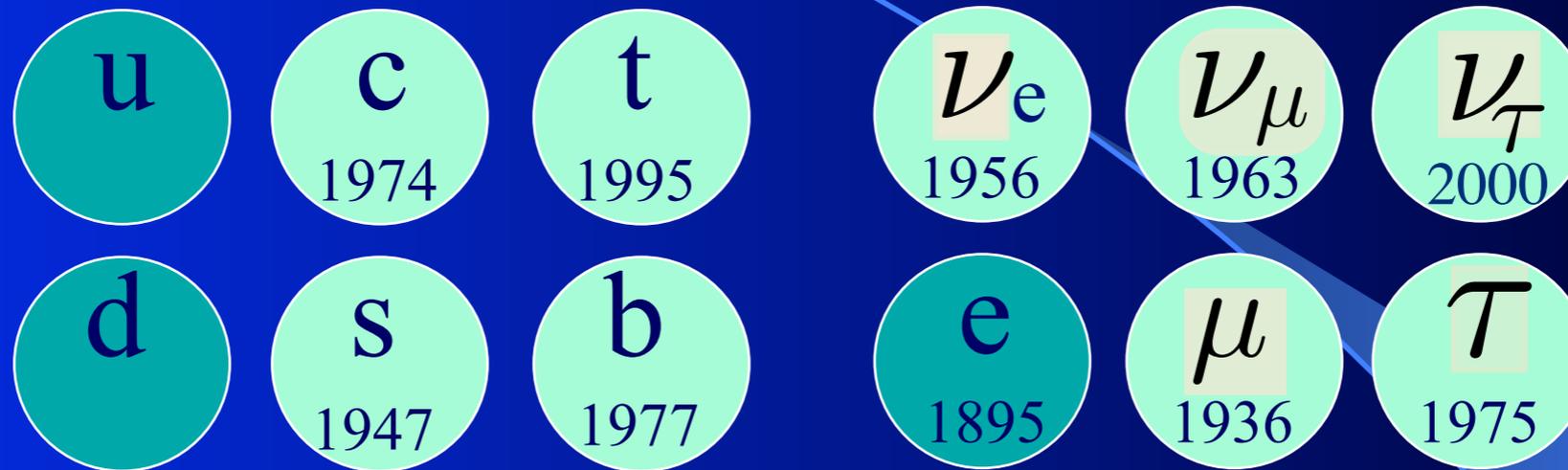
Рождение на протонном коллайдере



Процессы распада



История открытий



шесть кварков

шесть лептонов



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 (сорты) частиц СМ



Смешивание поколений в СМ

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

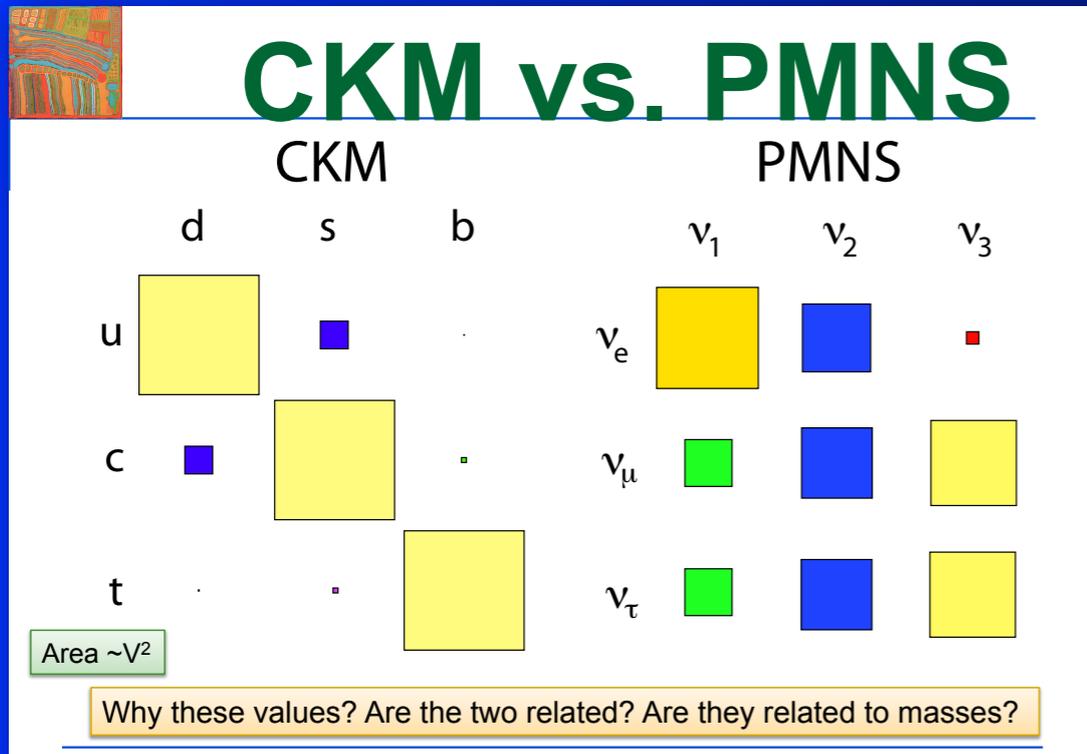


$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23}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

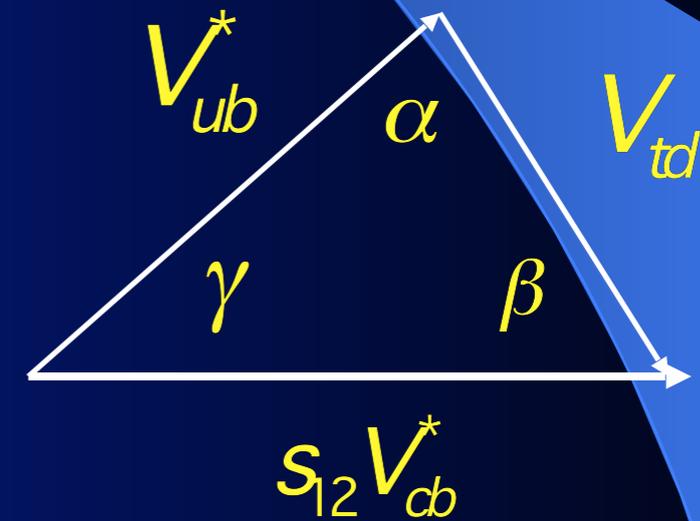
4 параметра в каждой из матриц: 3 угла и 1 фаза.

Фаза δ - источник CP нарушения в Стандартной модели

Смешивание поколений в СМ



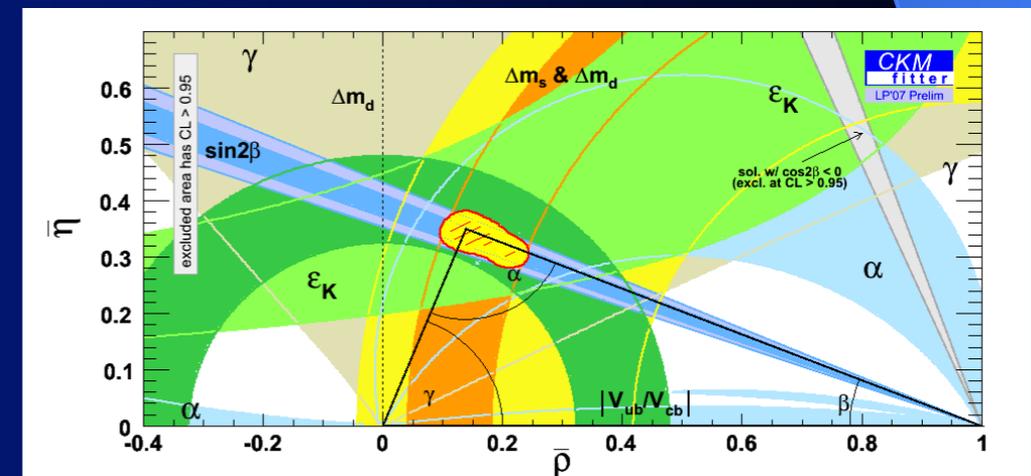
- Углы смешивания в кварковом и лептонном секторе найдены экспериментально
- Они сильно отличаются друг от друга



Условие унитарности матрицы смешивания - треугольник унитарности:

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

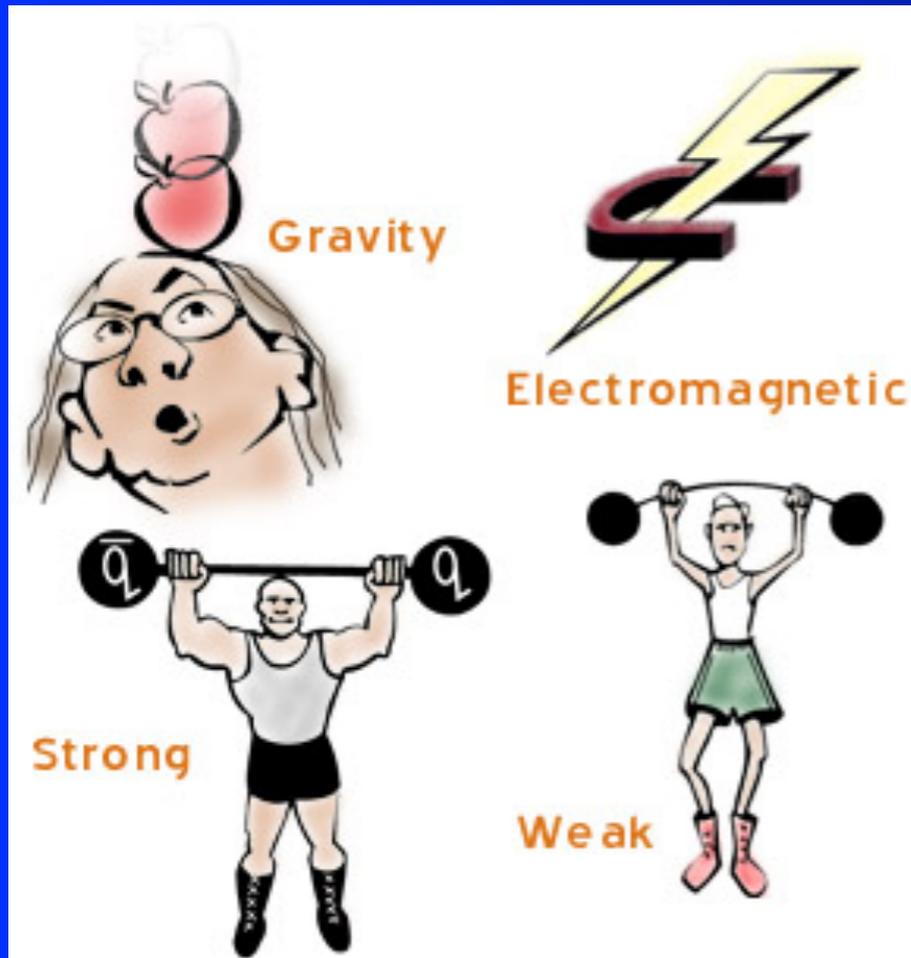
$$\Rightarrow V_{ub}^* + V_{td} = s_{12}V_{cb}^*$$



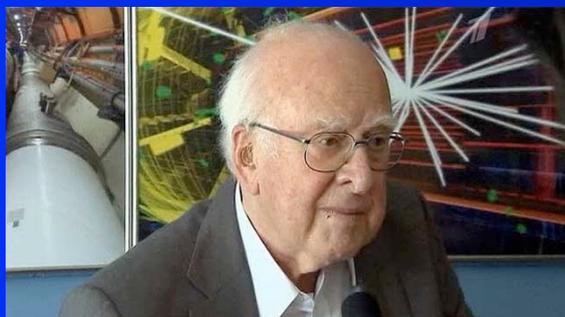
Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе



Пятая сила - обмен ХИГГСОВСКИМ БОЗОНОМ

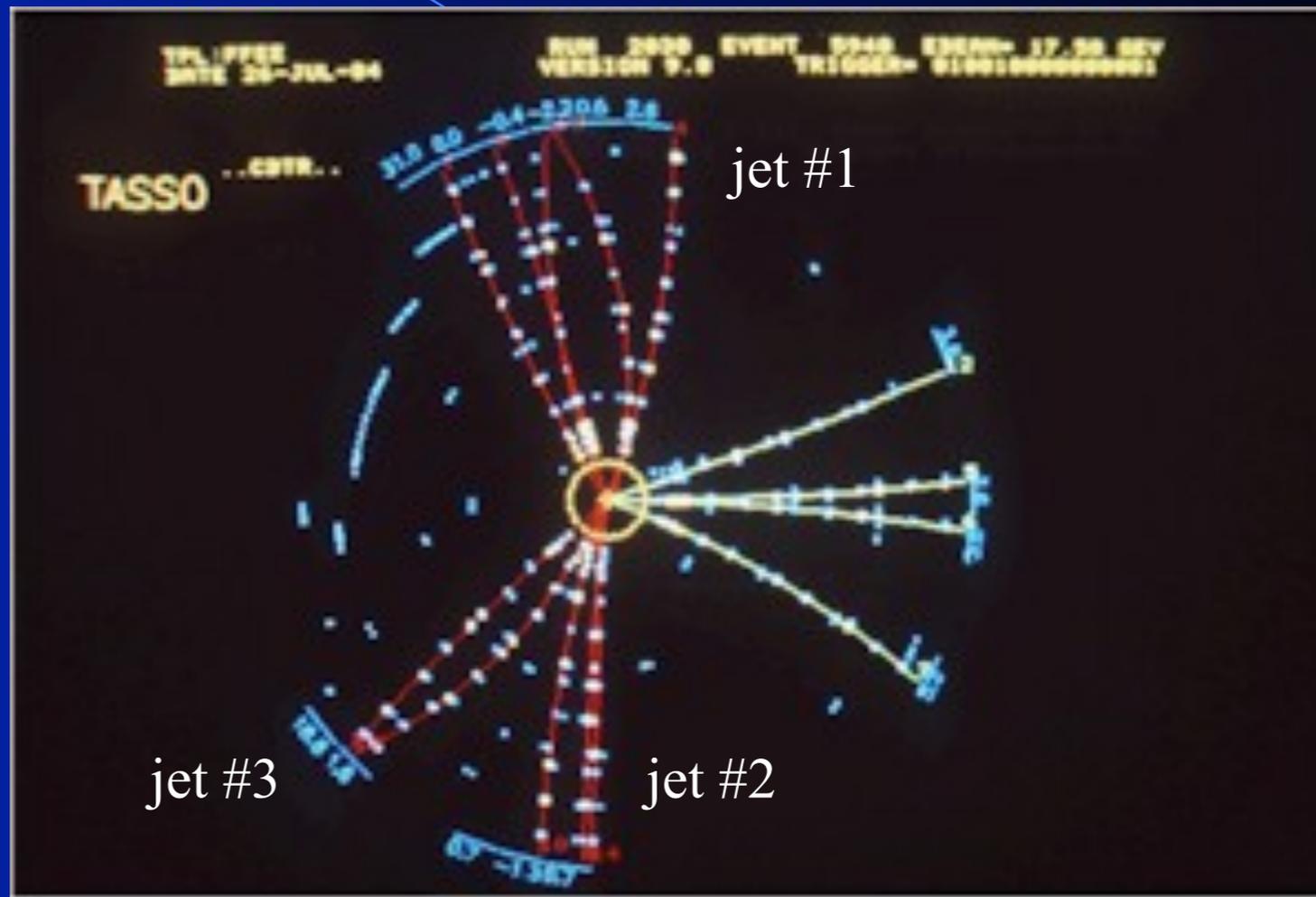


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

Открытие глюона



- Глюон – переносчик сильных взаимодействий был открыт в 1979 году на ускорителе PETRA (DESY)
- Свидетельством открытия глюона явилось наличие трёх-струйного события в рассеянии адронов



$$g_{ij}^a$$

$$a = 1, \dots, 8$$

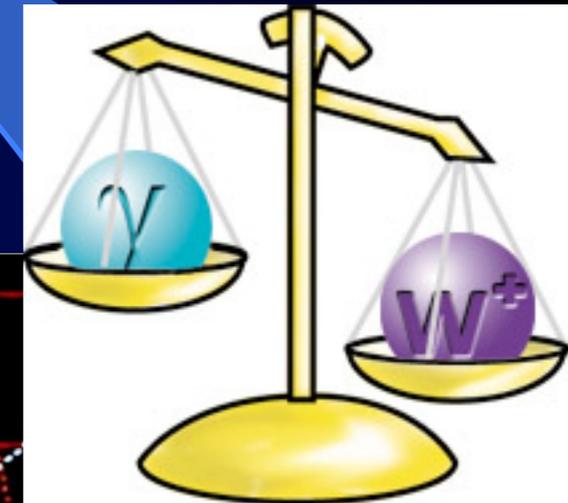
$$i, j = 1, 2, 3 \quad \leftarrow \text{«ЦВЕТ»}$$

Color			Color
Red	Green	Blue	Quarks
Anti-Red	Anti-Green	Anti-Blue	Anti-Quarks
			Anti-Color

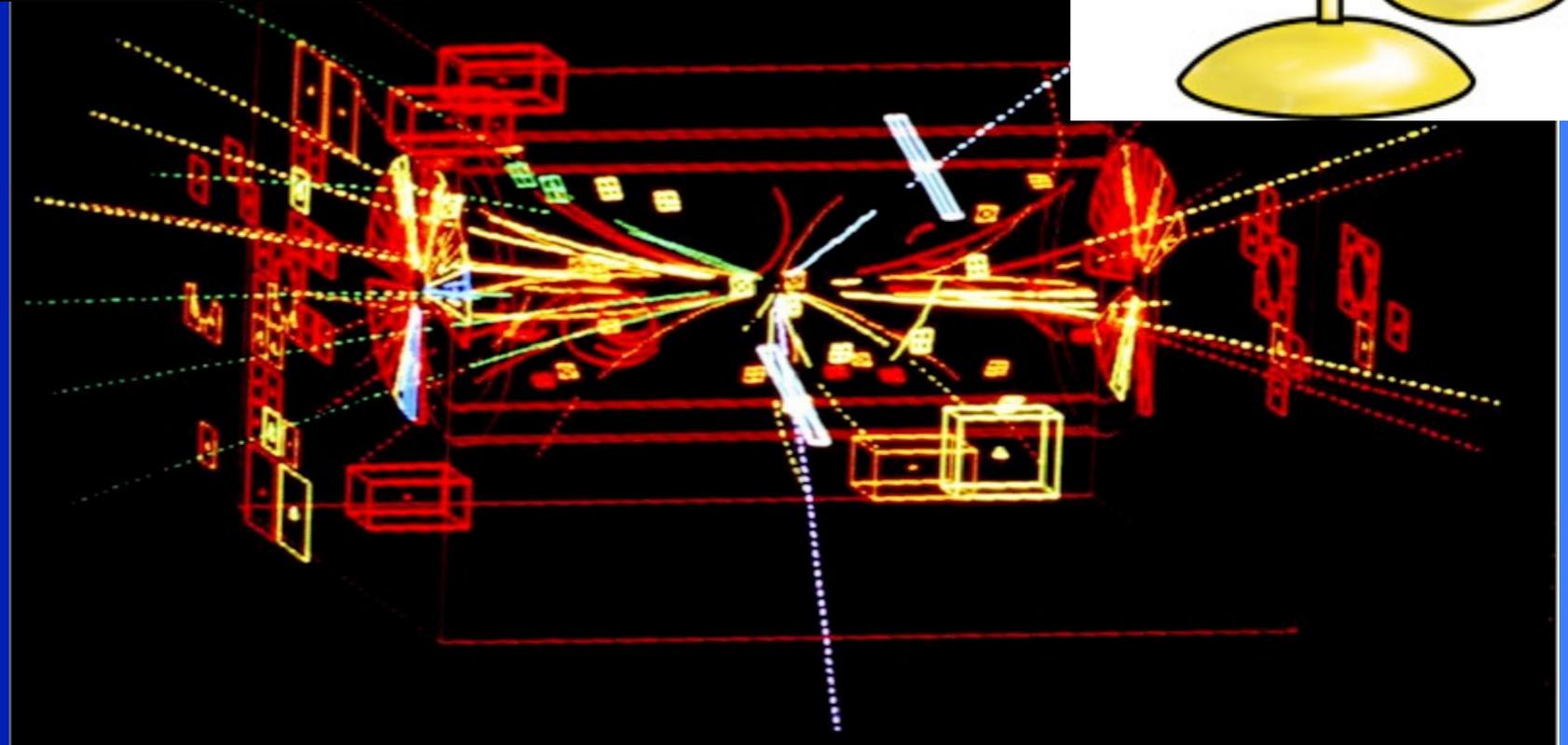
Открытие W и Z бозонов



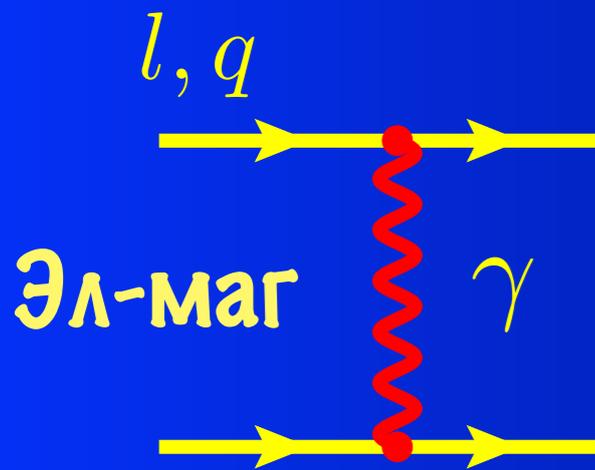
- Открытие W и Z бозонов – переносчиков слабых взаимодействий на ускорителе SPS (CERN) в 1983 году



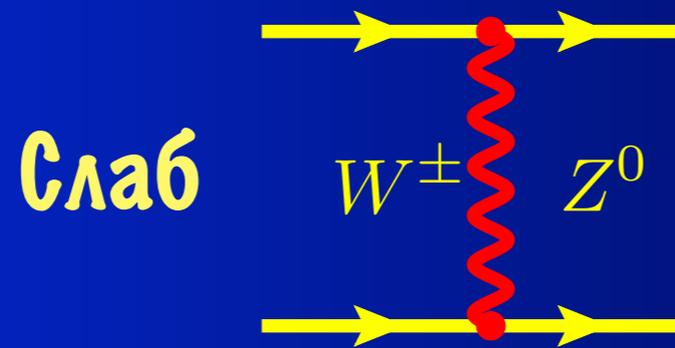
явилось триумфом
Стандартной модели
фундаментальных
взаимодействий



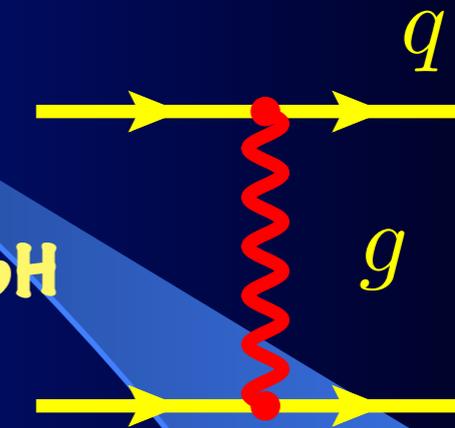
Пять фундаментальных сил Природы



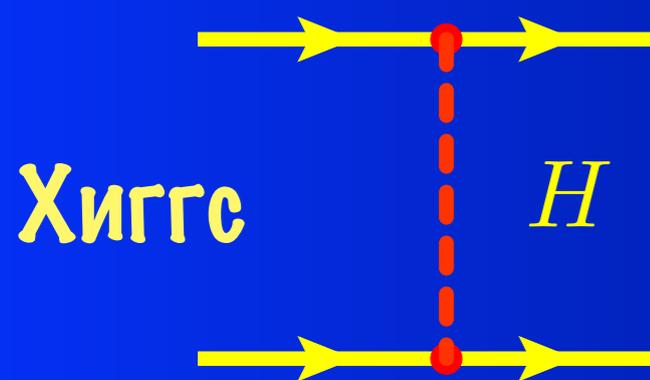
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



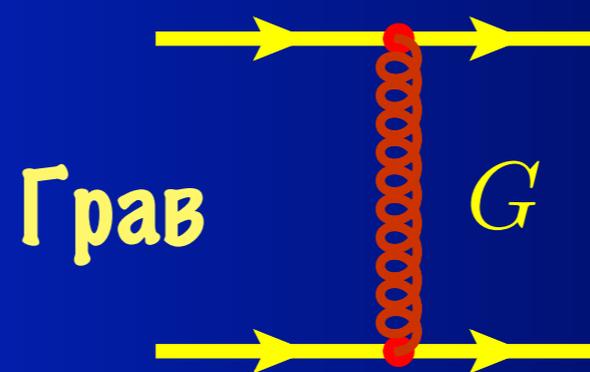
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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

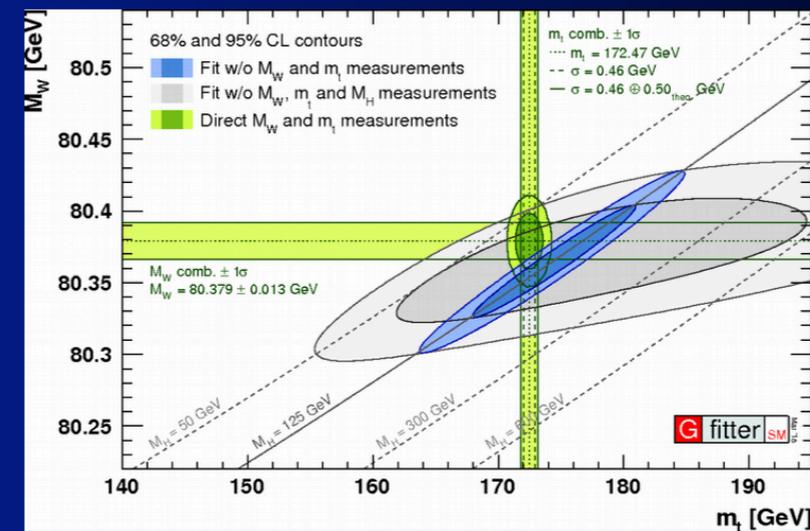
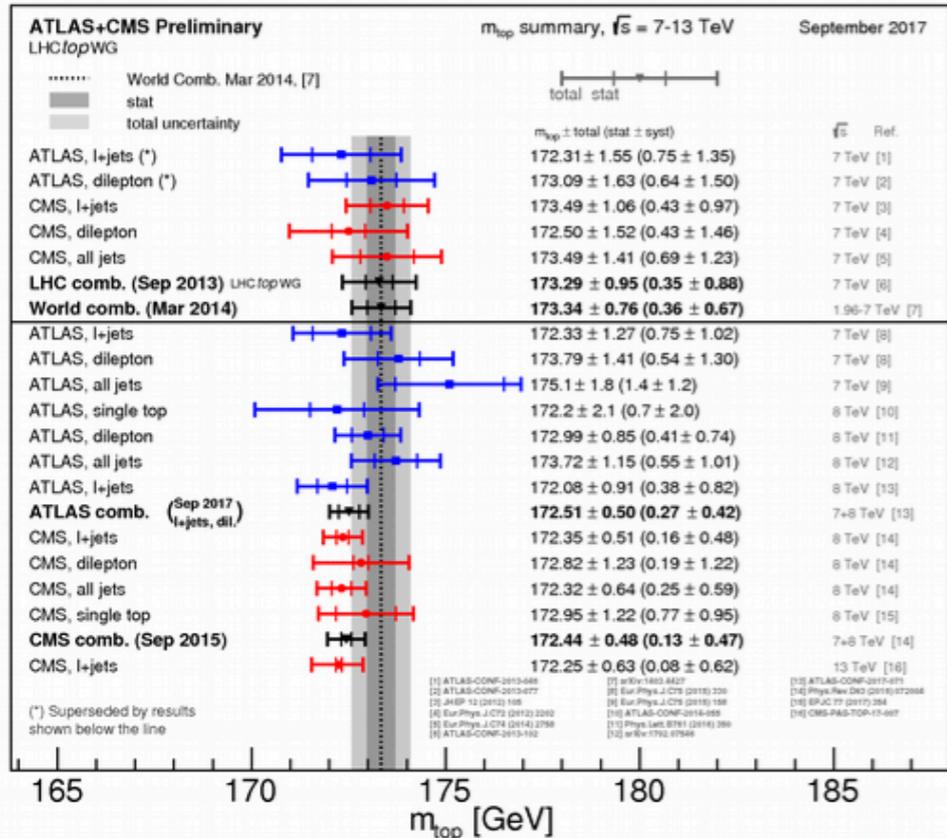
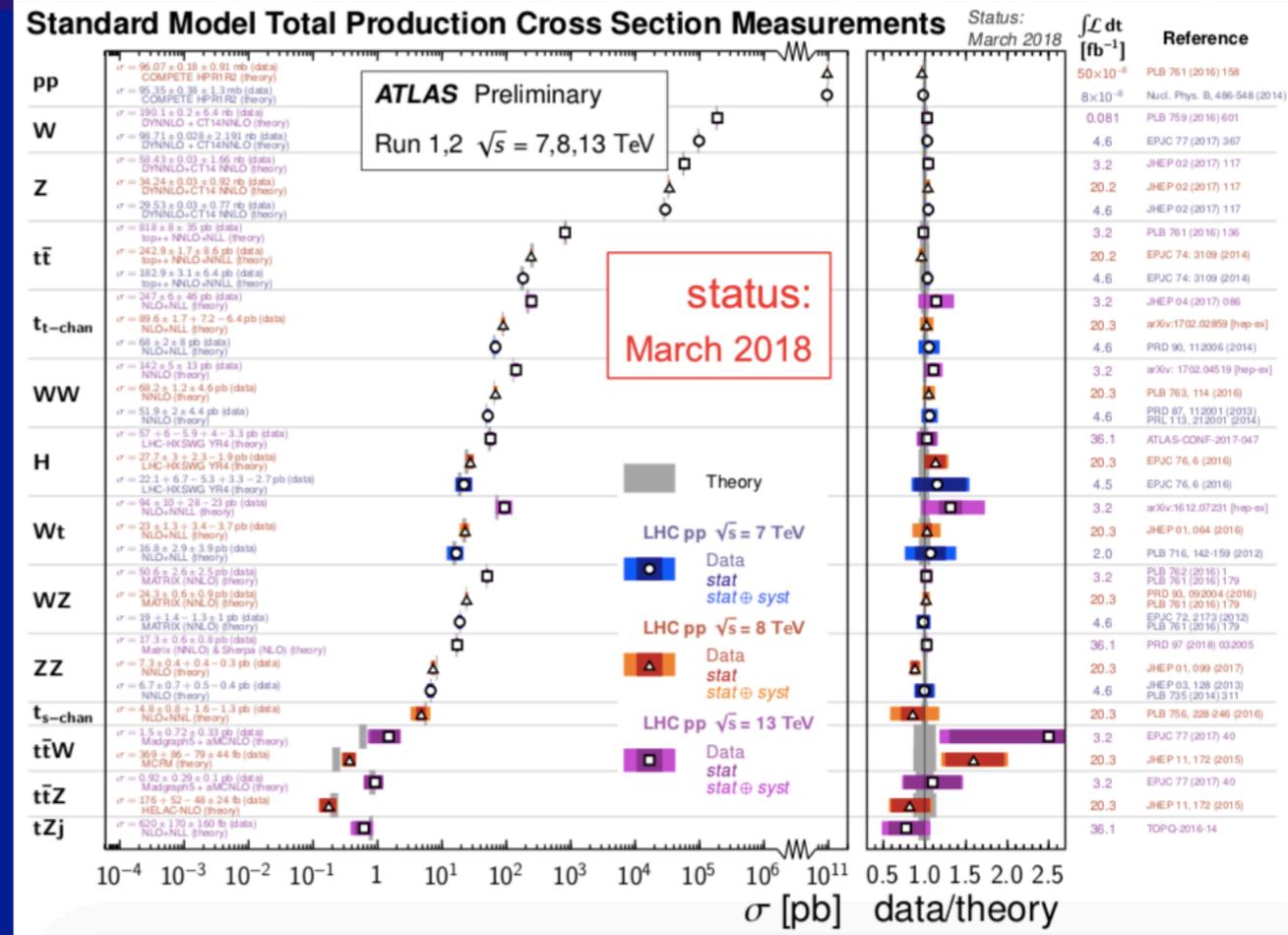
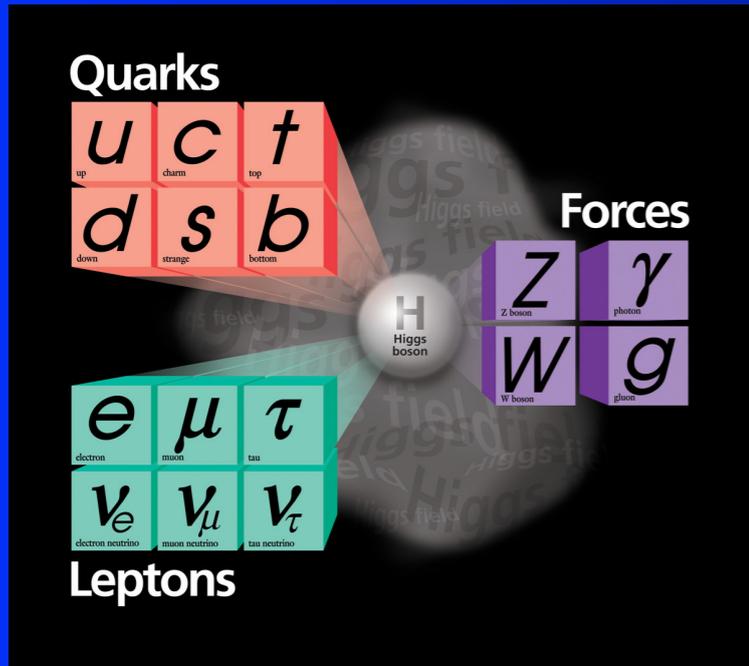


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	= 1
H			= 0
G			= 2

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ: СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ



Замечательное согласие между измерениями и предсказаниями СМ 32

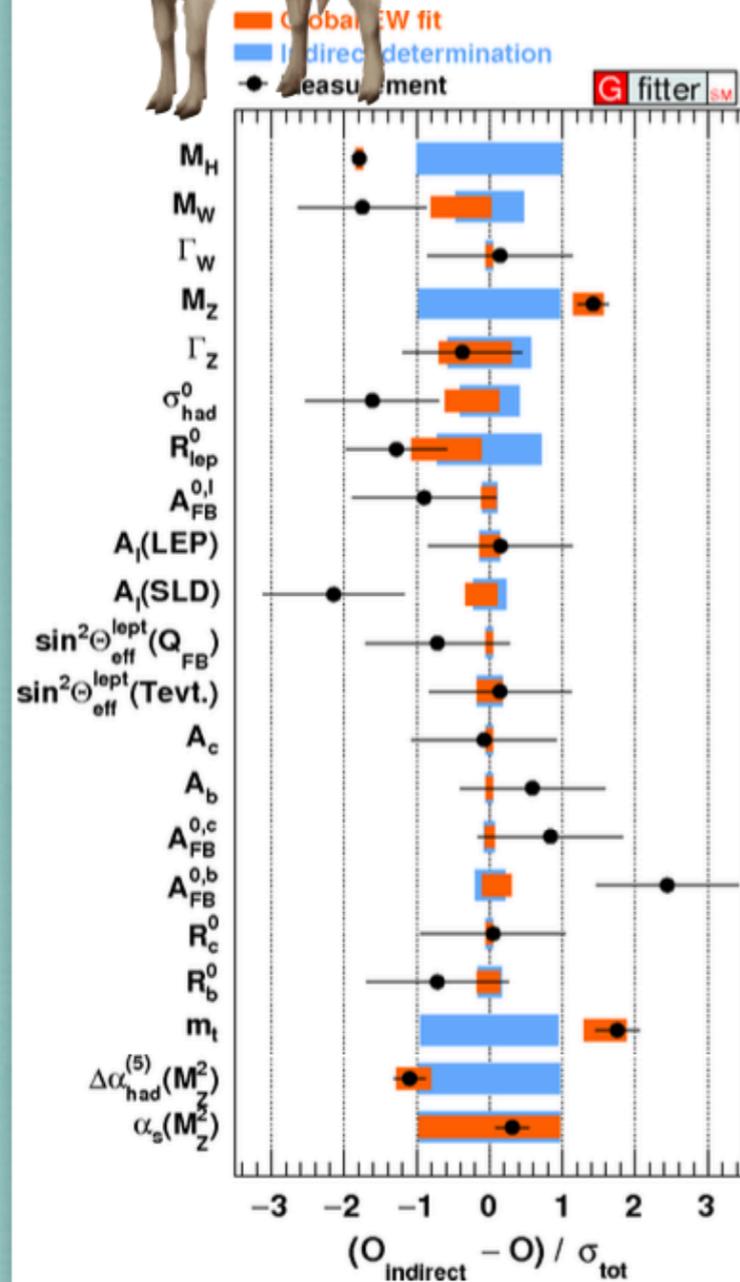
Триумф Стандартной Модели



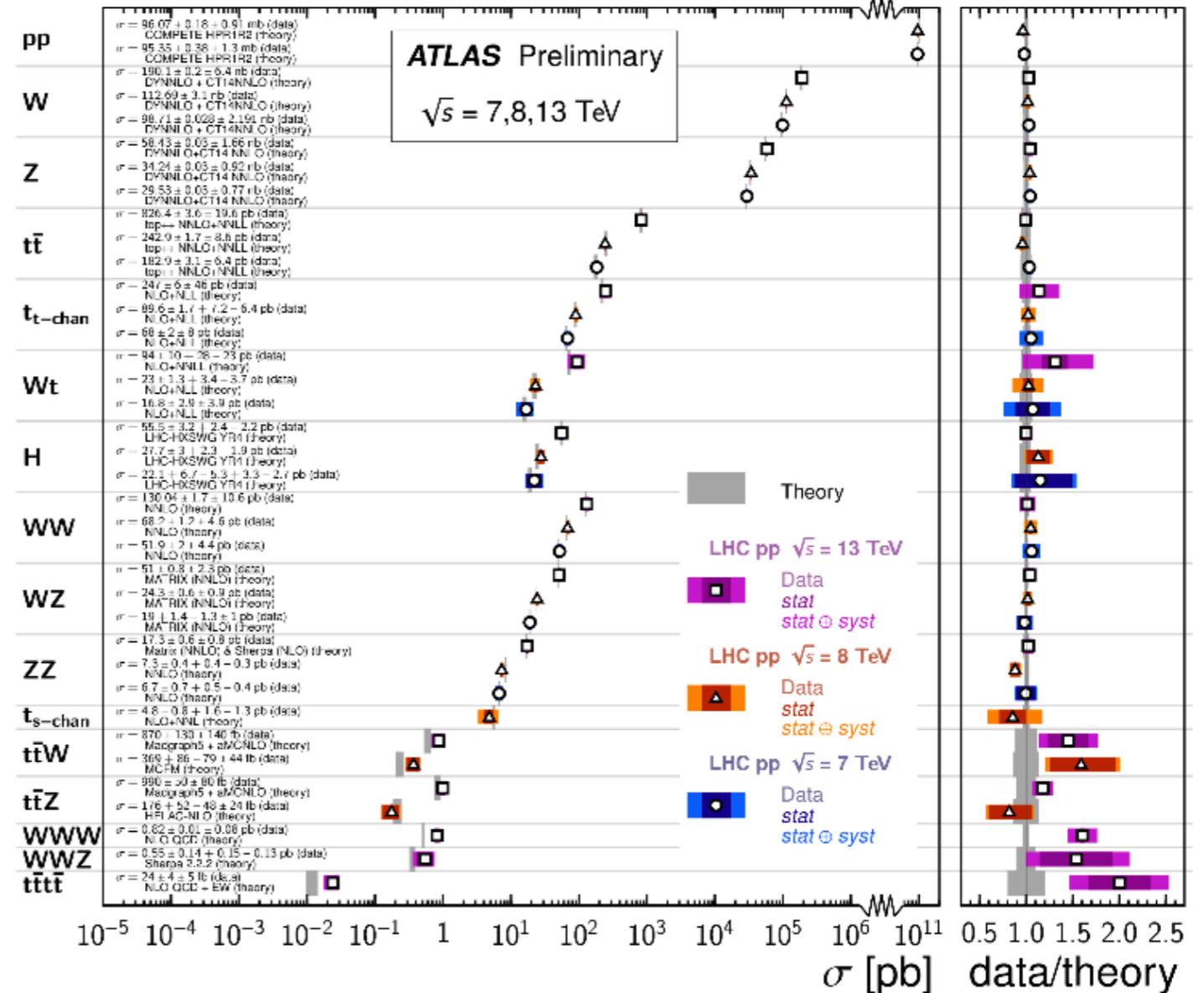
SM

Everything looks SM-like at LHC

Greatest Of All Theories



Standard Model Total Production Cross Section Measurements



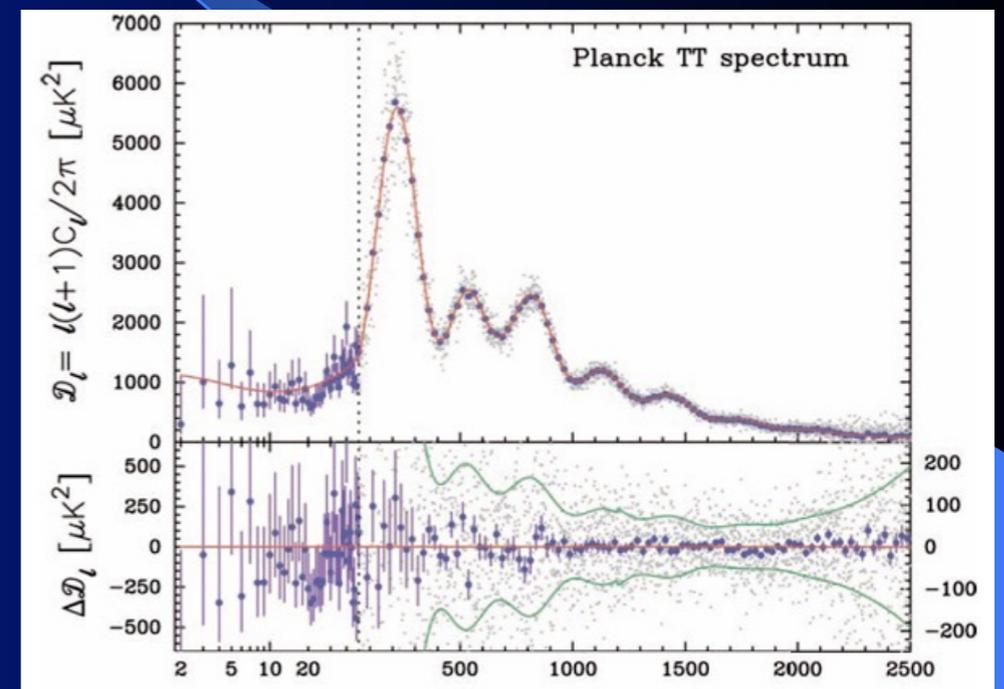
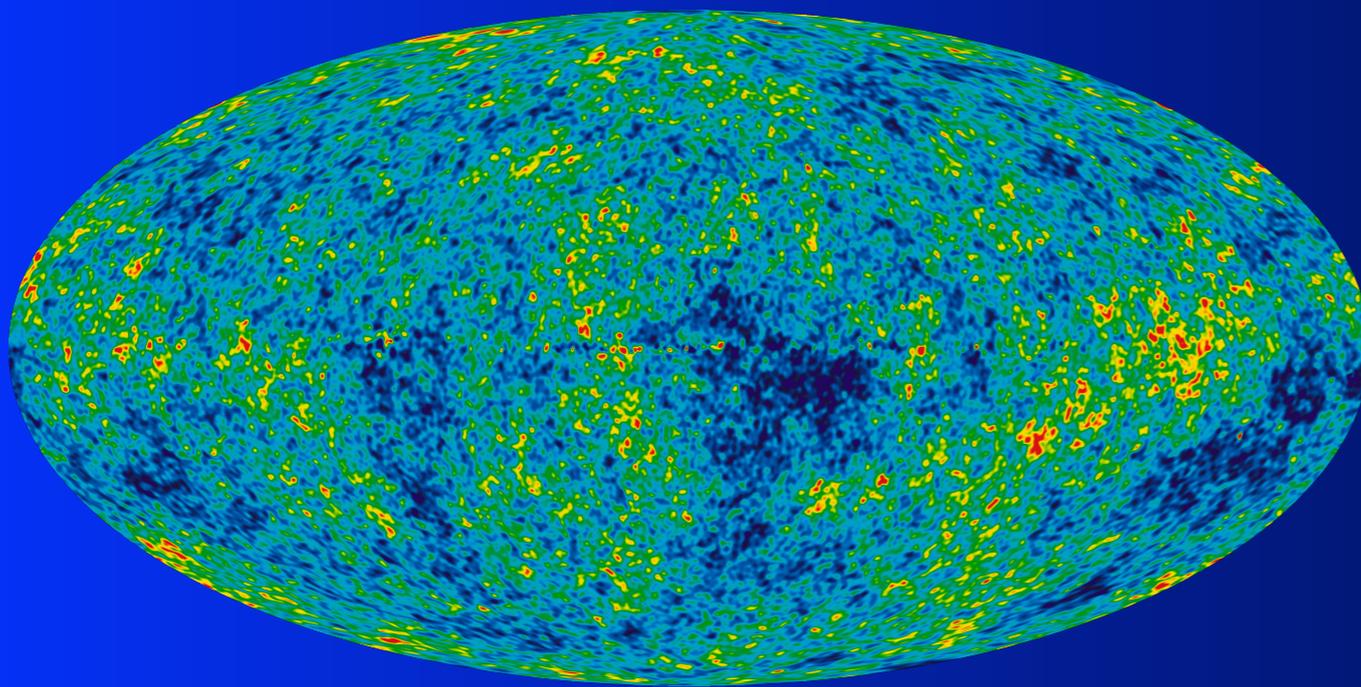
*Если новая физика за
пределами Стандартной
модели?*

Темная материя

Реликтовое микроволновое излучение

Реликтовое излучение $T \approx 2.7\text{K}^\circ$

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$
 $\Omega_{DarkMatter} = 26.8\%$
 $\Omega_{DarkEnergy} = 68.3\%$

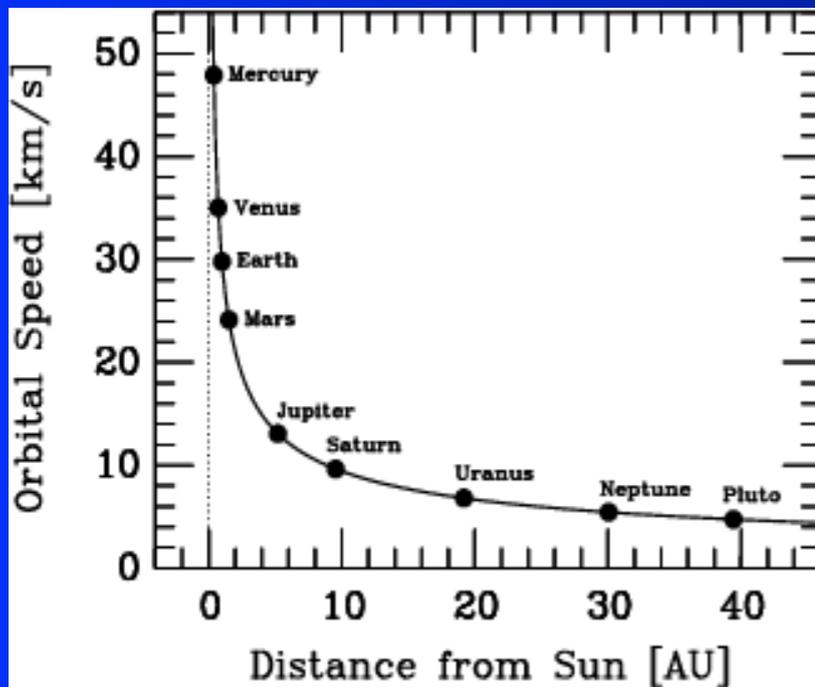
$$\Omega = 1.02 \pm_{36} 0.02$$

Кривые вращения звёзд

центробежная сила

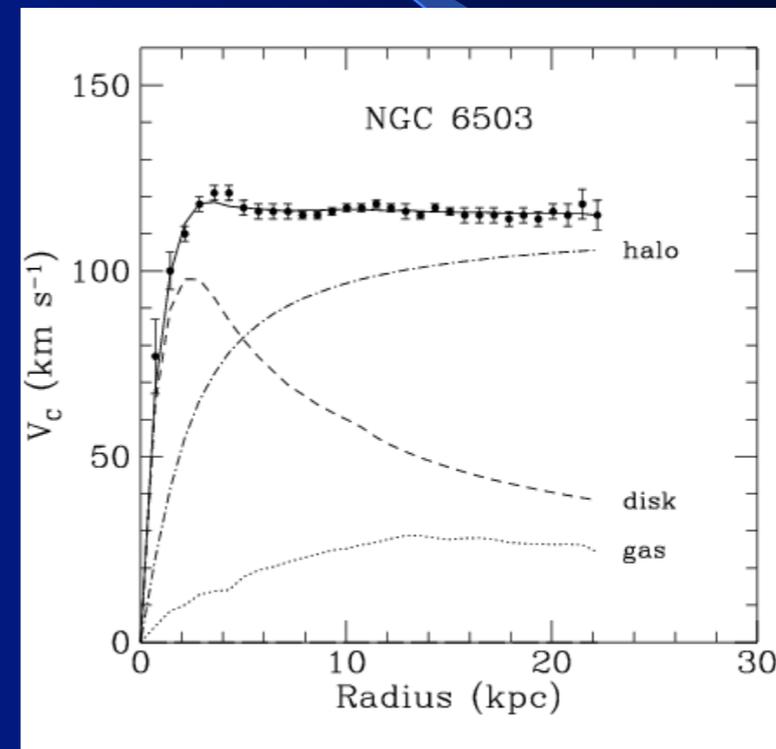
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



Солнечная система

Плотность тёмной материи в солнечной системе пренебрежимо мала

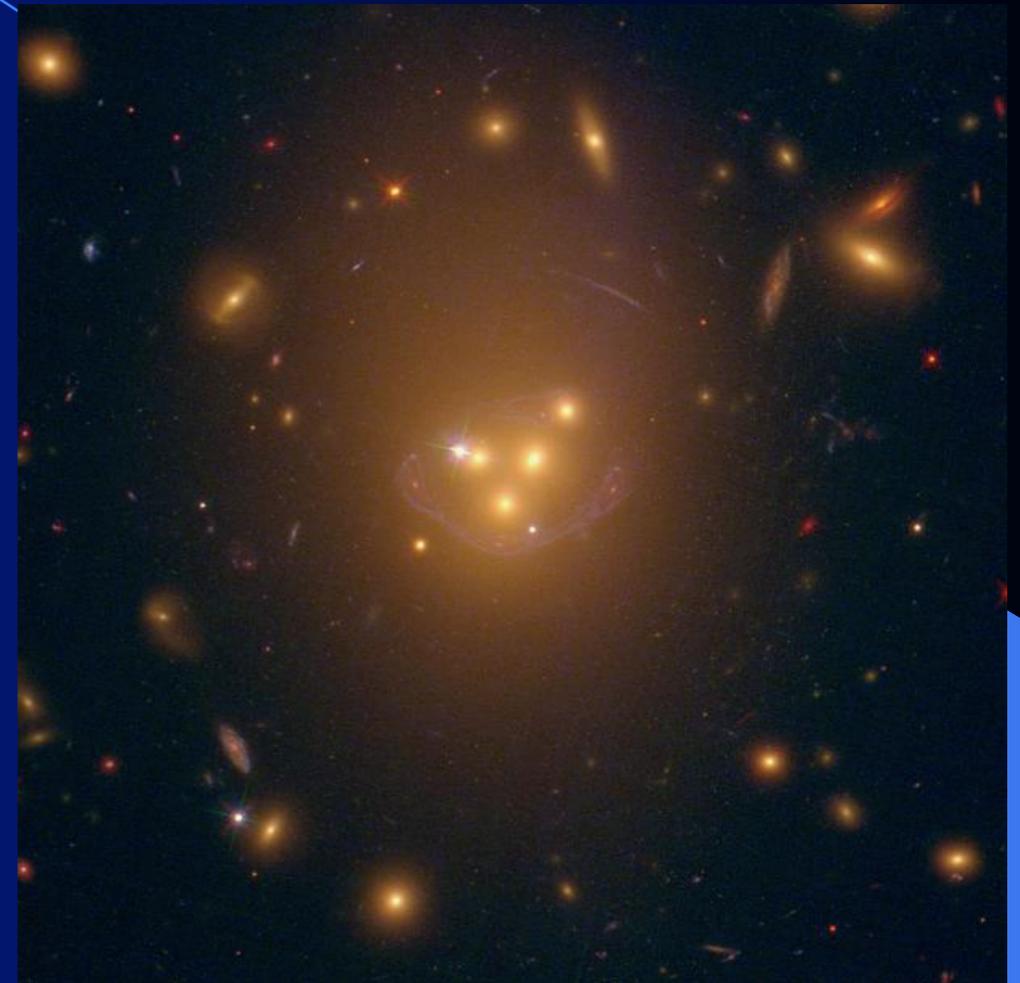
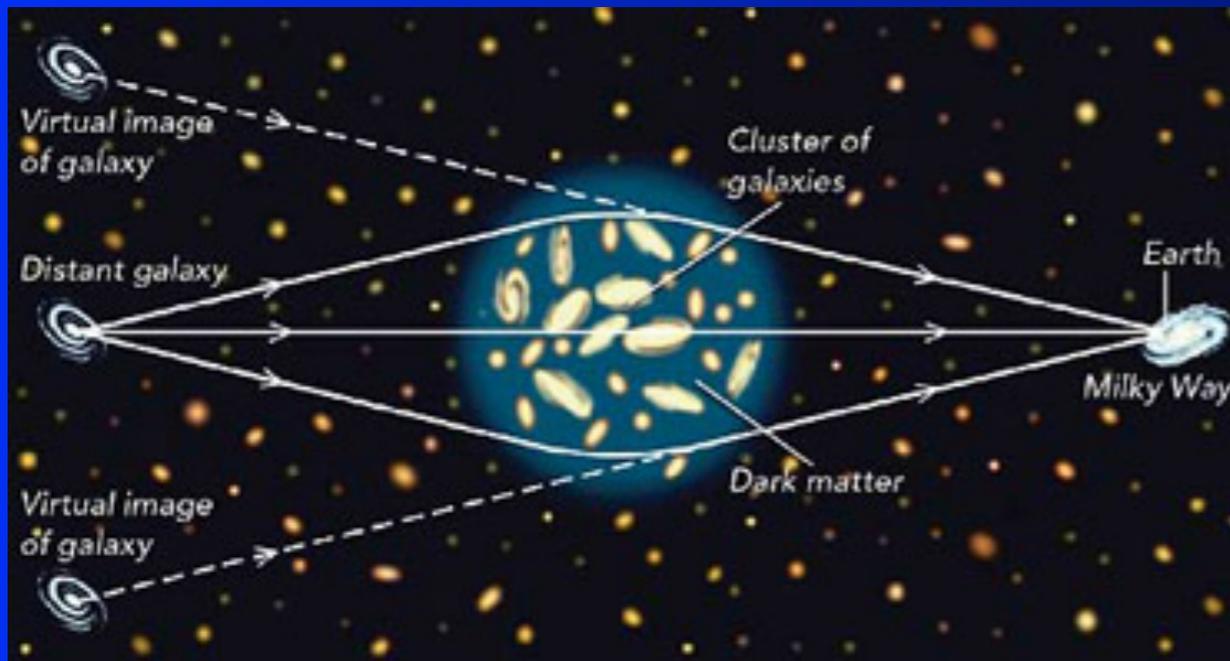


Галактика

Тёмная материя сосредоточена на галактических масштабах

- В настоящее время известны тысячи ротационных кривых и все они свидетельствуют в пользу существования массы в гало галактики десятикратно превышающей массу звёзд в диске

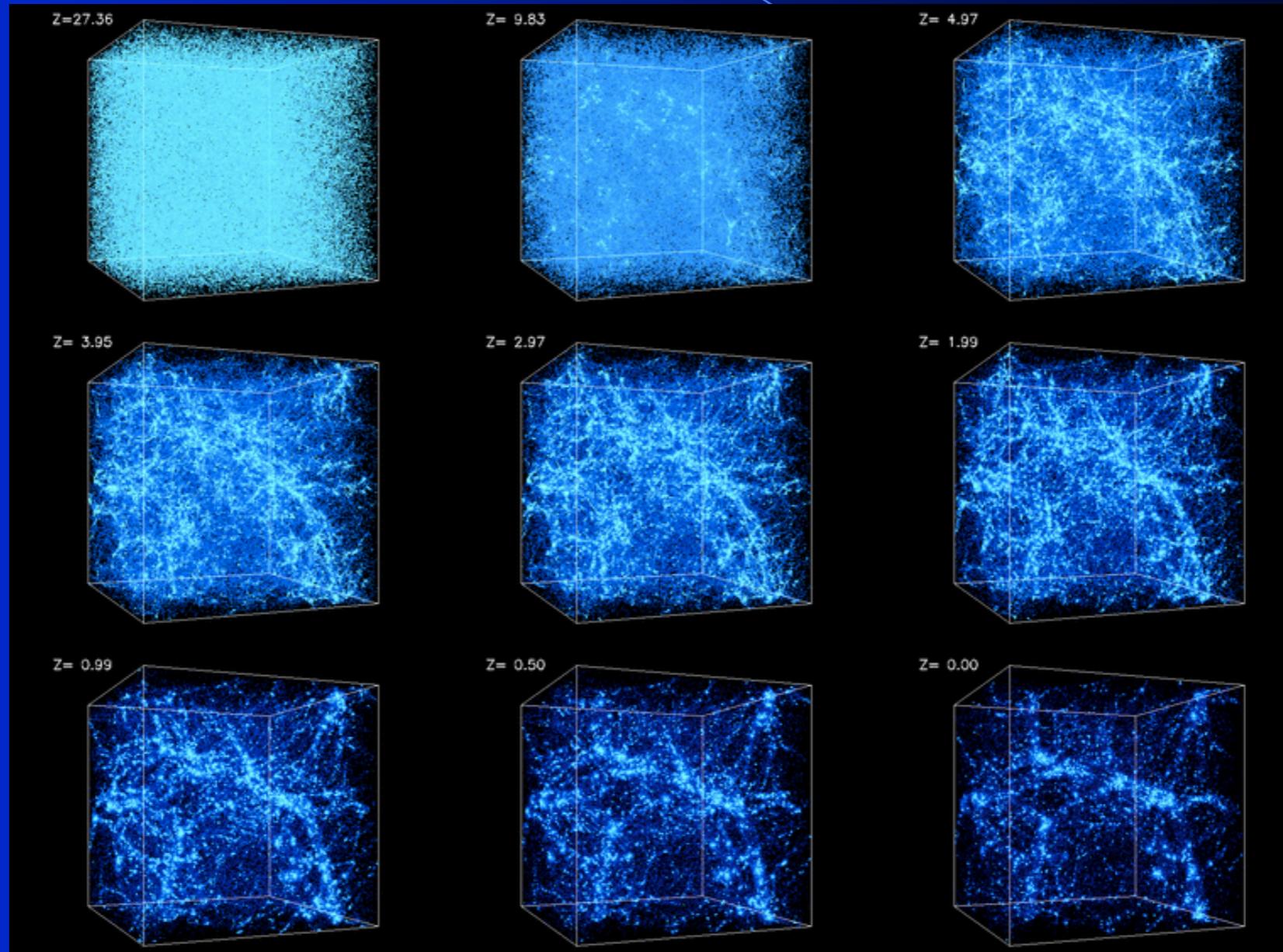
Гравитационные линзы



Следствие ОТО: отклонение света в гравитационном поле

Образования виртуального изображения удалённой галактики за счёт отклонения световых лучей тёмной материей находящейся между галактикой и наблюдателем

Образование крупномасштабных структур во Вселенной



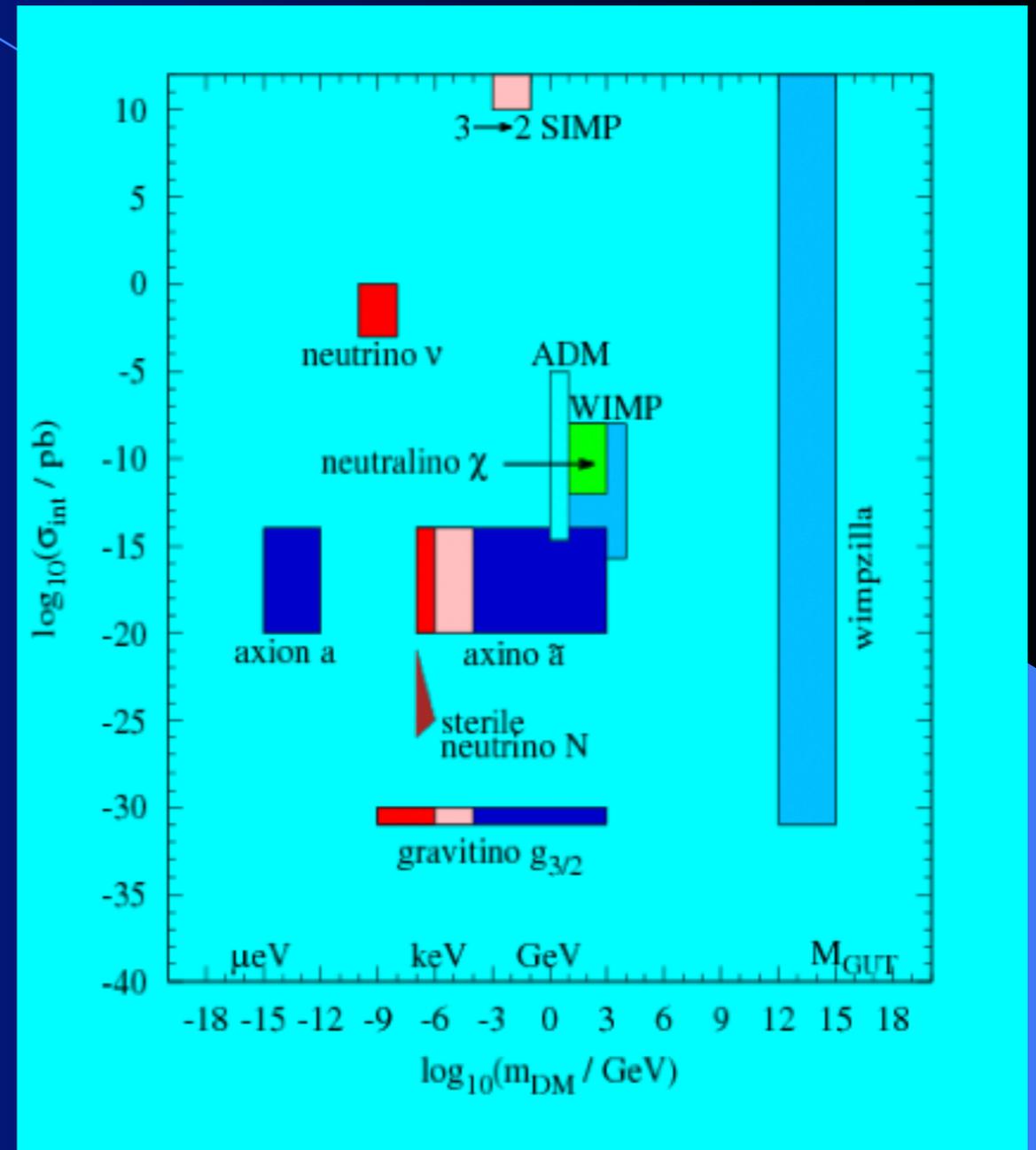
Сначала происходит образование структур из тёмной материи, а потом в гравитационном потенциале образованным тёмной материей происходит концентрация обычной материи

Загадка № 3:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

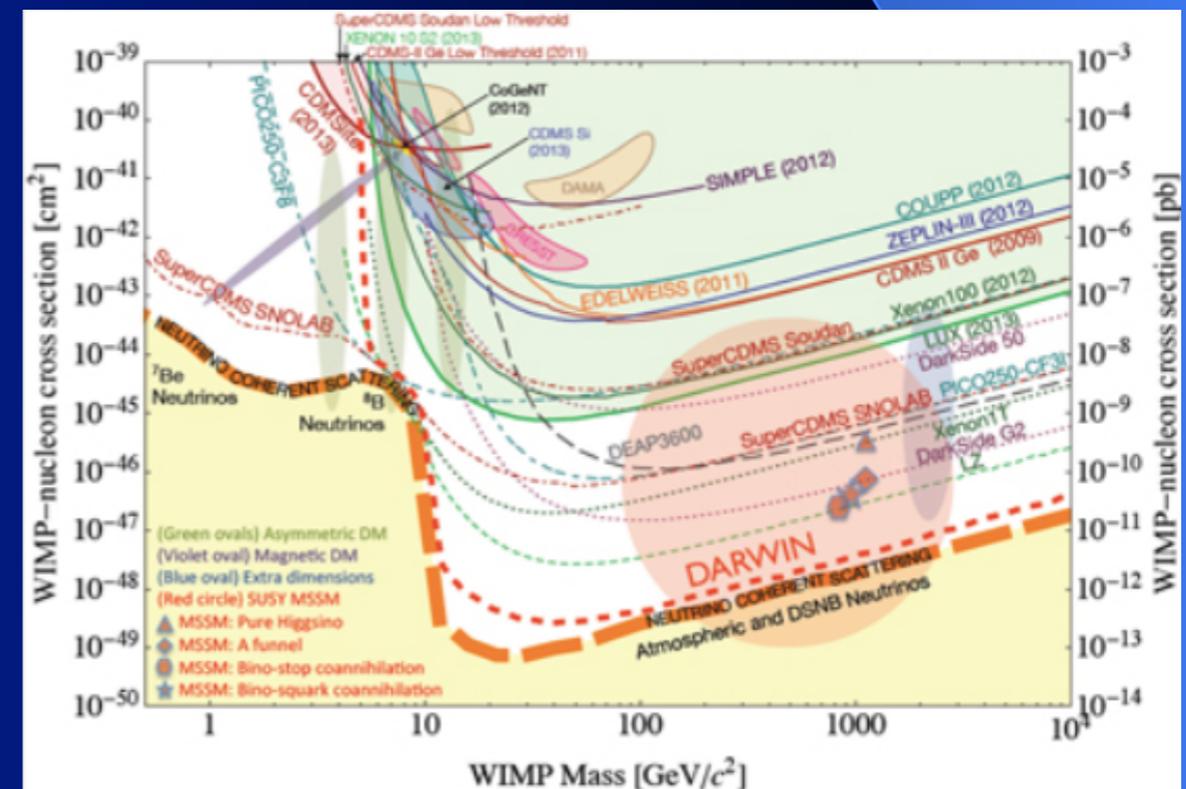
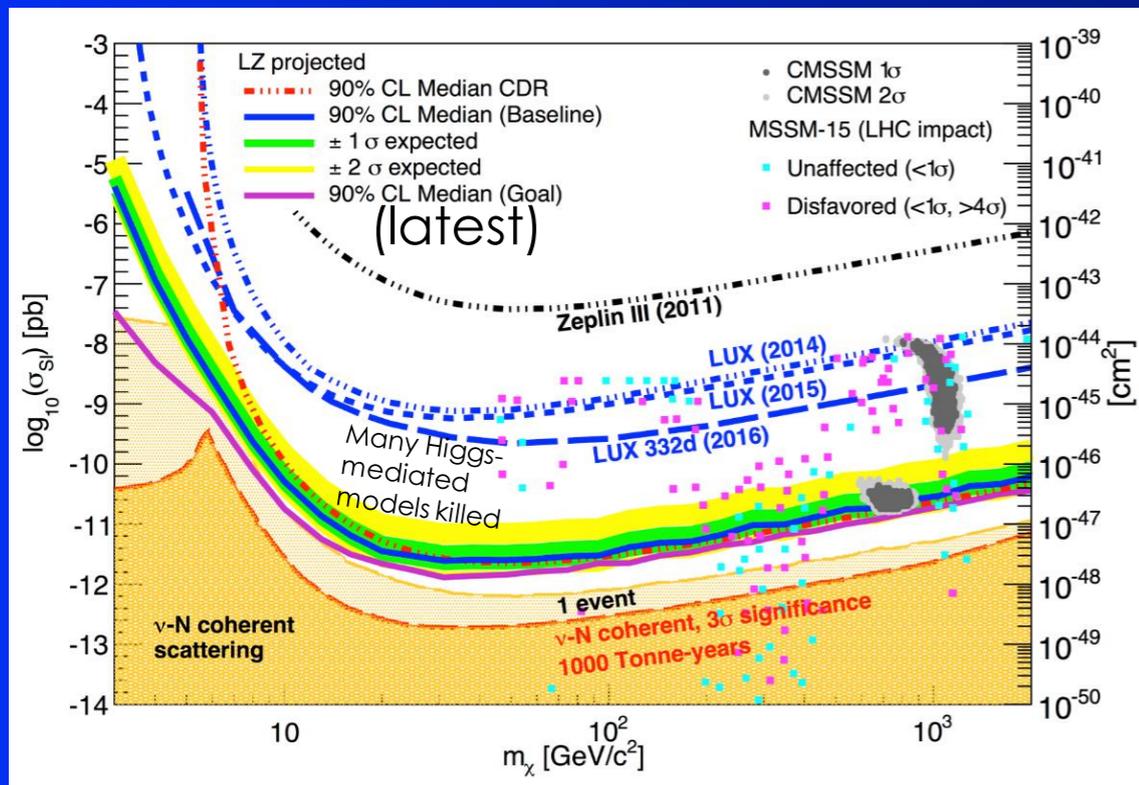
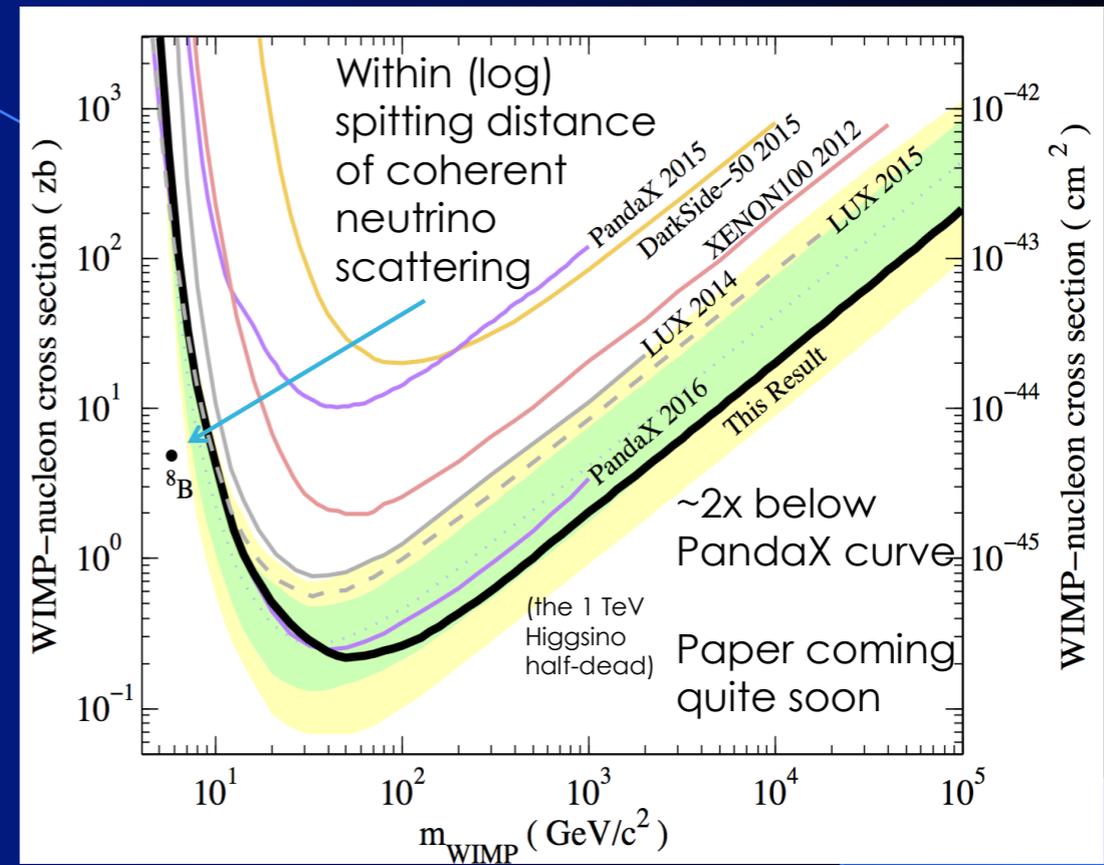
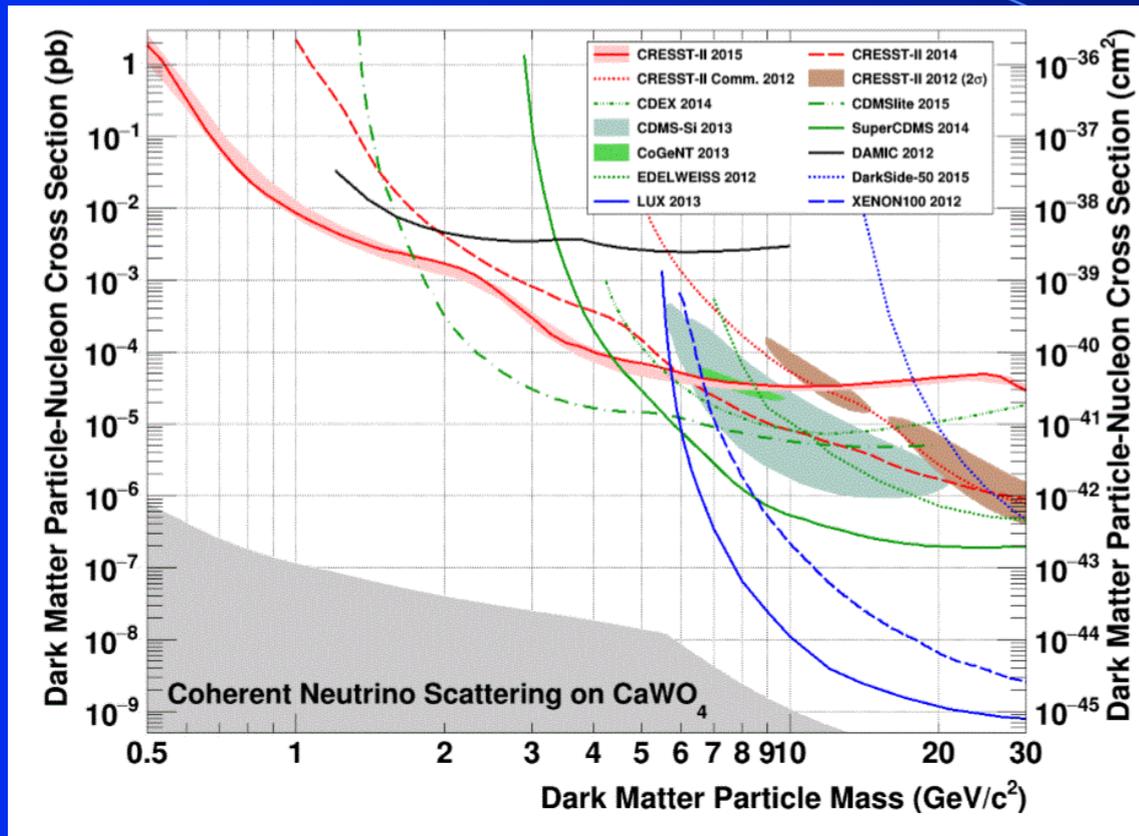
Частицы тёмной материи

Можно ли
зарегистрировать
частицу темной
материи?



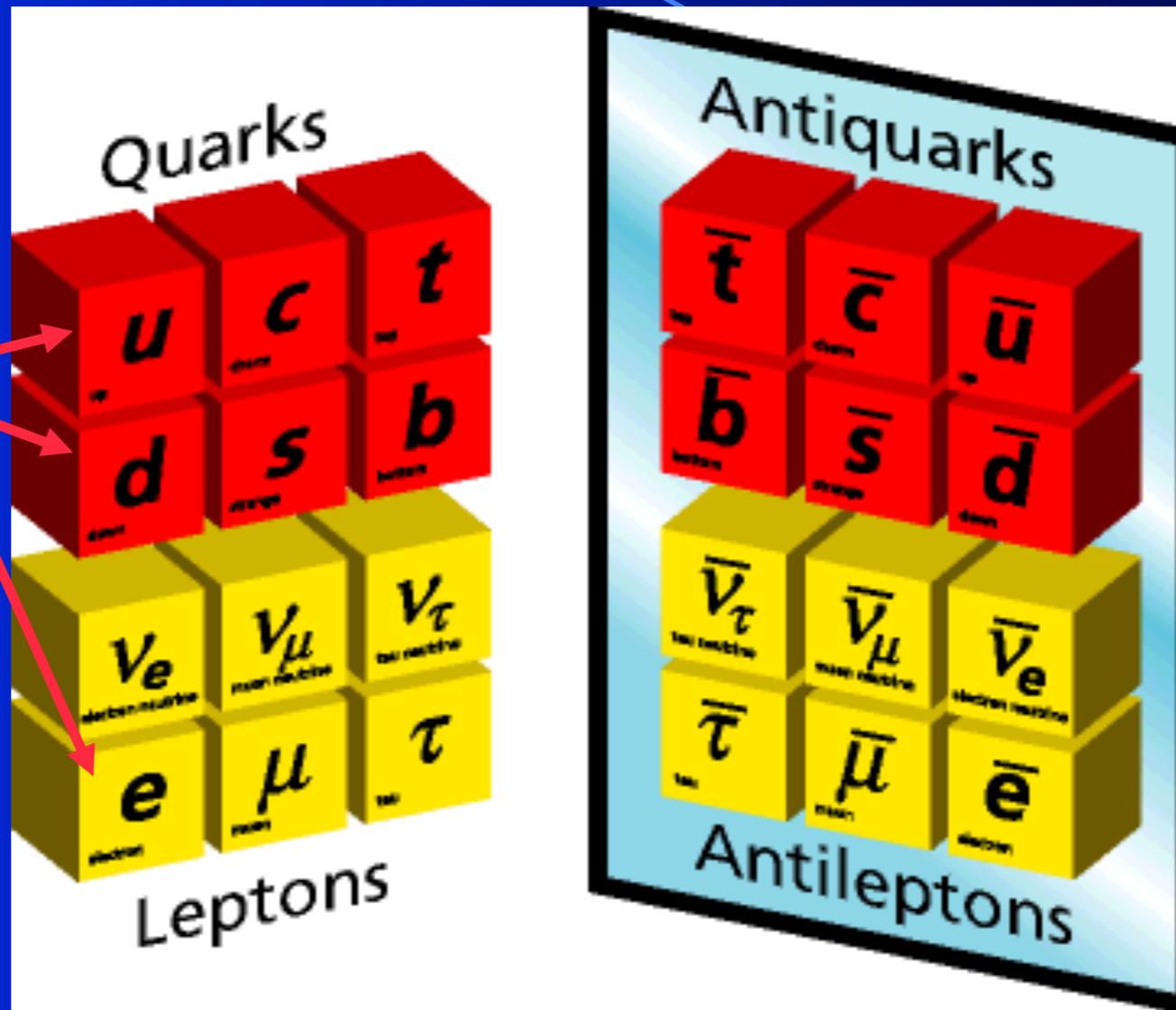
Если это WIMP, то её можно обнаружить средствами физики элементарных частиц. Если это лишь гравитационно взаимодействующая частица, то обнаружение сильно затруднено₄₁

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ



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 № 4:

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

Три критерия Сахарова

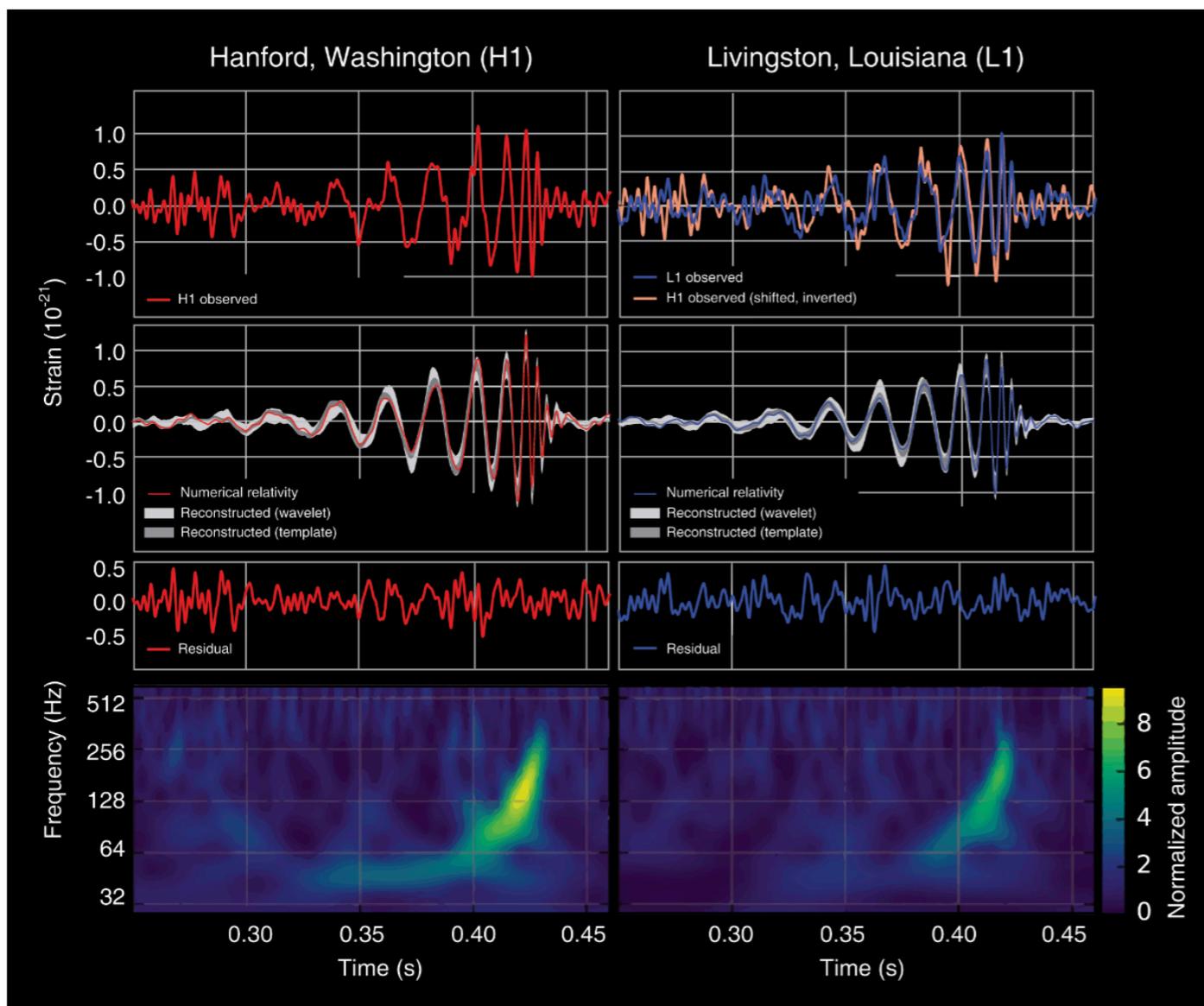
- Нарушение барионного числа
- Нарушение C и CP инвариантности
- Нарушение теплового равновесия



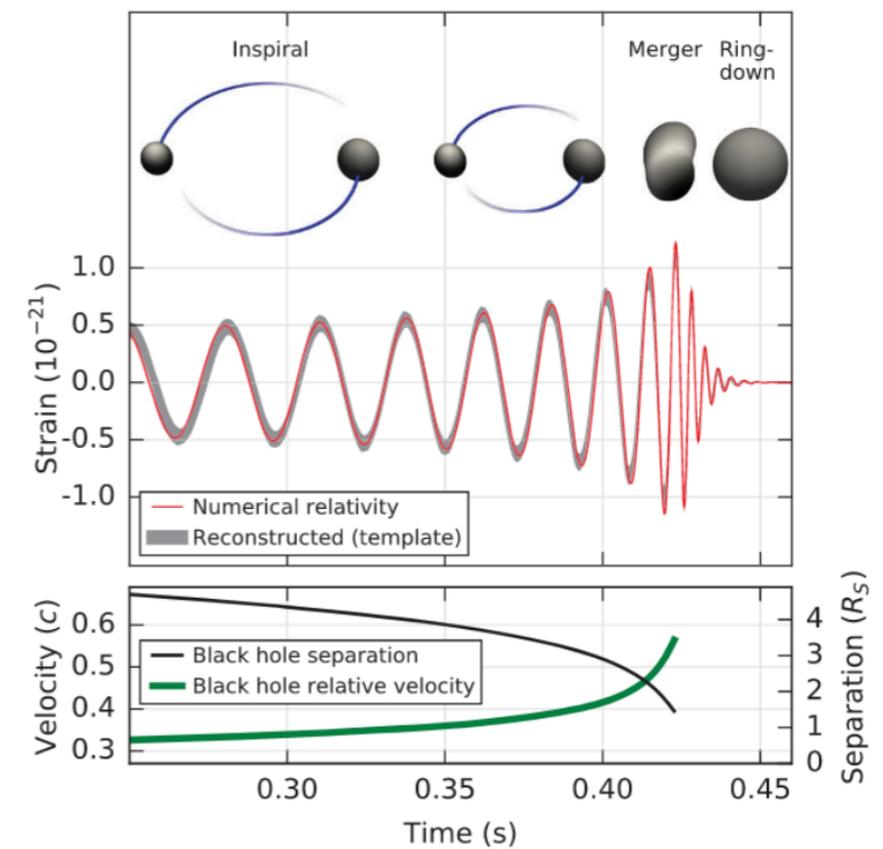
- Что является источником барионной асимметрии?
- Где нарушается симметрия между частицами и античастицами?

Всё ещё не разгаданная загадка!

GW150914: Первое детектирование гравитационных волн



(l.) LIGO; (r.) Abbott+ PRL (2016)

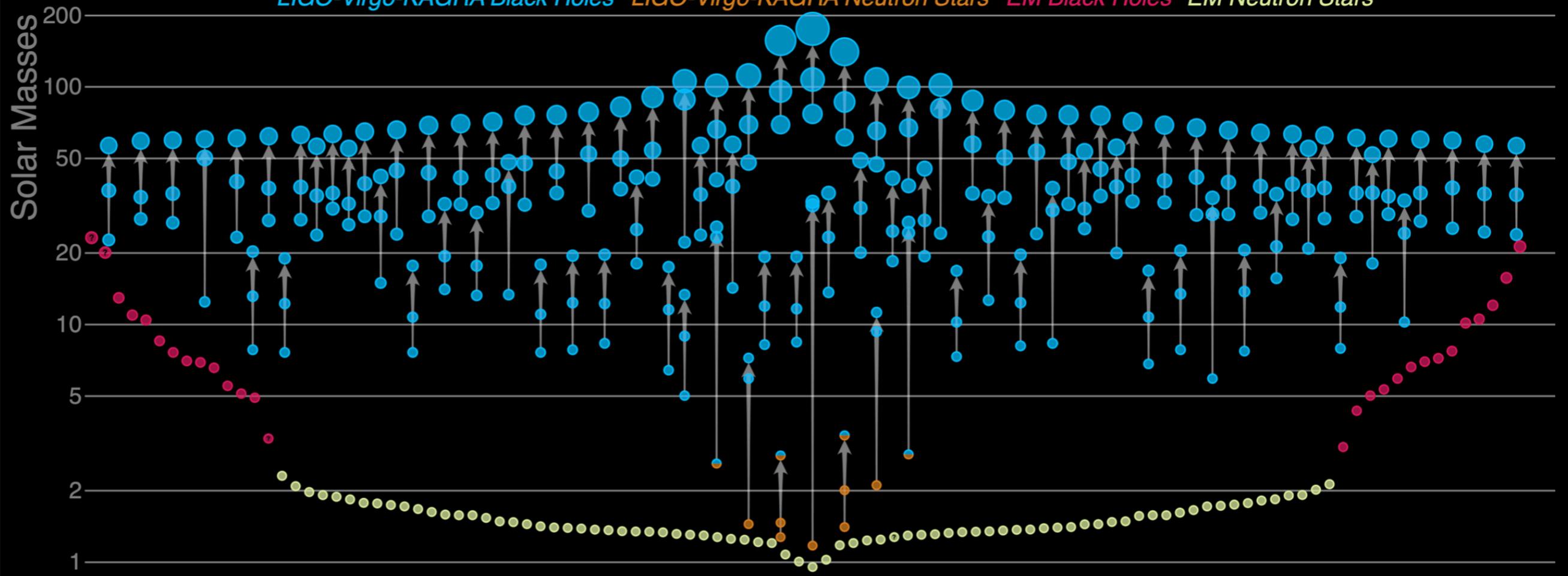


Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

Чёрные дыры и нейтронные звёзды: каталог гравитационных волн

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

<https://ligo.northwestern.edu/media/mass-plot/index.html>

Будущие большие проекты в физике элементарных частиц



Future Circular Colliders (FCC)

Conceptual design study of a ~100 km ring:

❑ **pp collider (FCC-hh):** ultimate goal

$\sqrt{s} \sim 100 \text{ TeV}$, $L \sim 2 \times 10^{35}$; 4 IP, $\sim 20 \text{ ab}^{-1}/\text{expt}$

❑ **e⁺e⁻ collider (FCC-ee):** possible first step

$\sqrt{s} = 90\text{-}350 \text{ GeV}$, $L \sim 200\text{-}2 \times 10^{34}$; 2 IP

❑ **pe collider (FCC-he):** option $\sqrt{s} \sim 3.5 \text{ TeV}$, $L \sim 10^{34}$

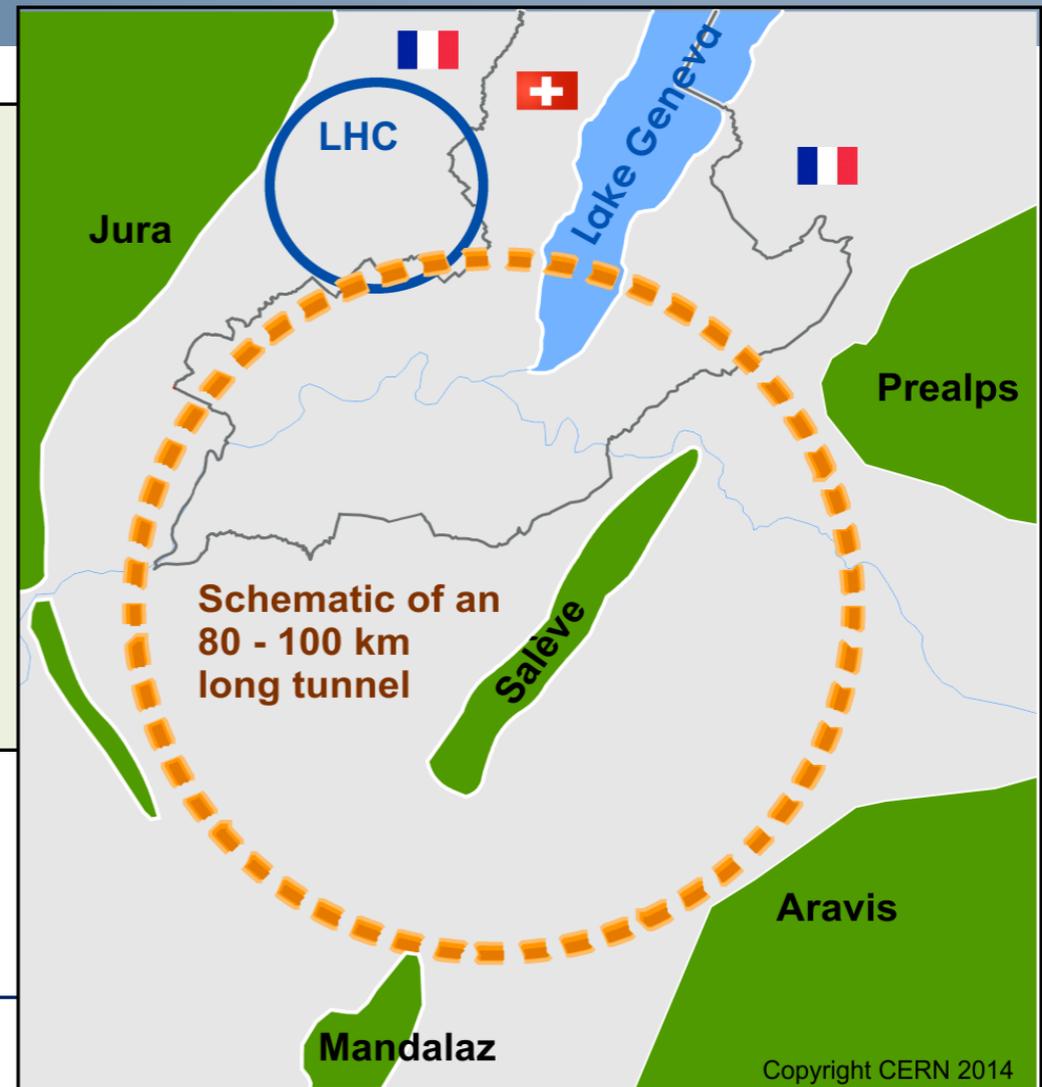
Main technology challenge: ~ 16 T magnets

FCC-hh: a ~100 TeV pp collider is expected to:

- ❑ explore directly the 10-50 TeV E-scale
- ❑ conclusive exploration of EWSB dynamics
- ❑ say the final word about heavy WIMP dark matter

FCC-ee: 90-350 GeV

- ❑ measure many Higgs couplings to few permill
- ❑ indirect sensitivity to E-scale up to $O(100 \text{ TeV})$ by improving by ~20-200 times the precision of EW parameters measurements, $\Delta M_W < 1 \text{ MeV}$, $\Delta m_{\text{top}} \sim 10 \text{ MeV}$



HEAVY-ION COLLIDERS

Relativistic Heavy Ion Collider at Brookhaven National Laboratory (BNL), USA

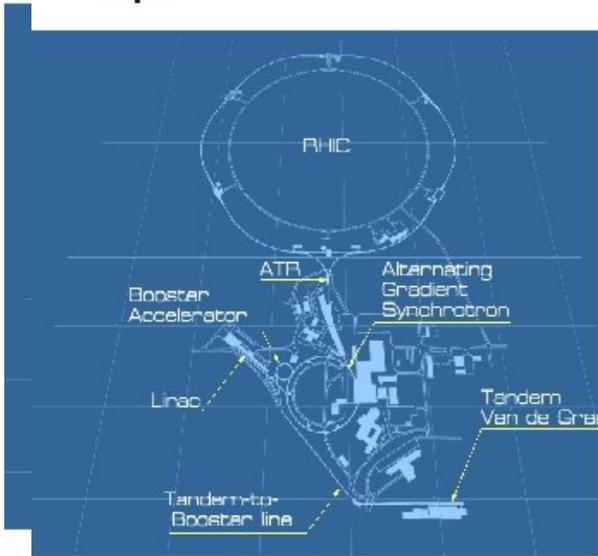
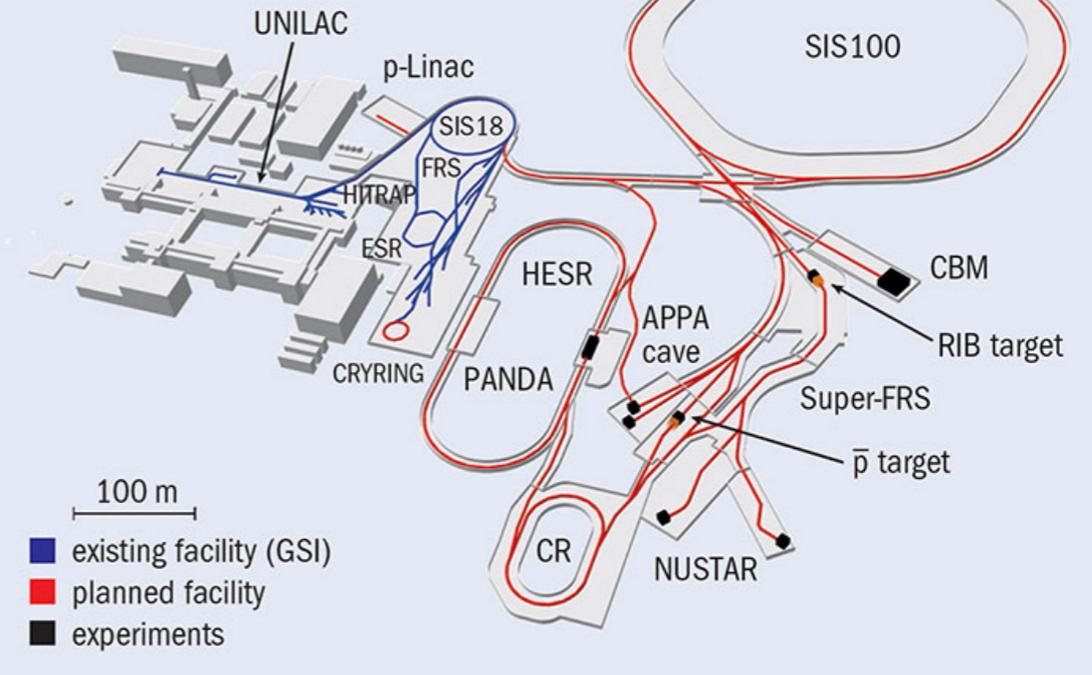
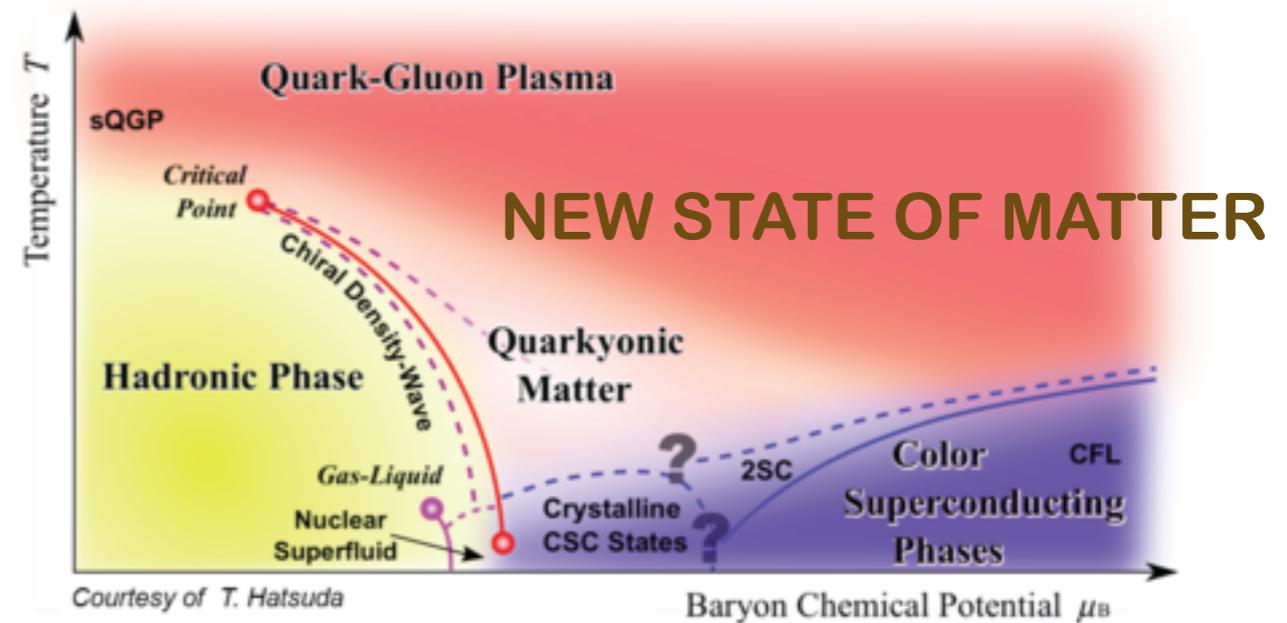


Figure 1. Schematic layout of ENL complex for polarized proton operations. Courtesy of MacKay (private communication) and BNL Collider Accelerator Department.

FAIR (GSI, Germany)



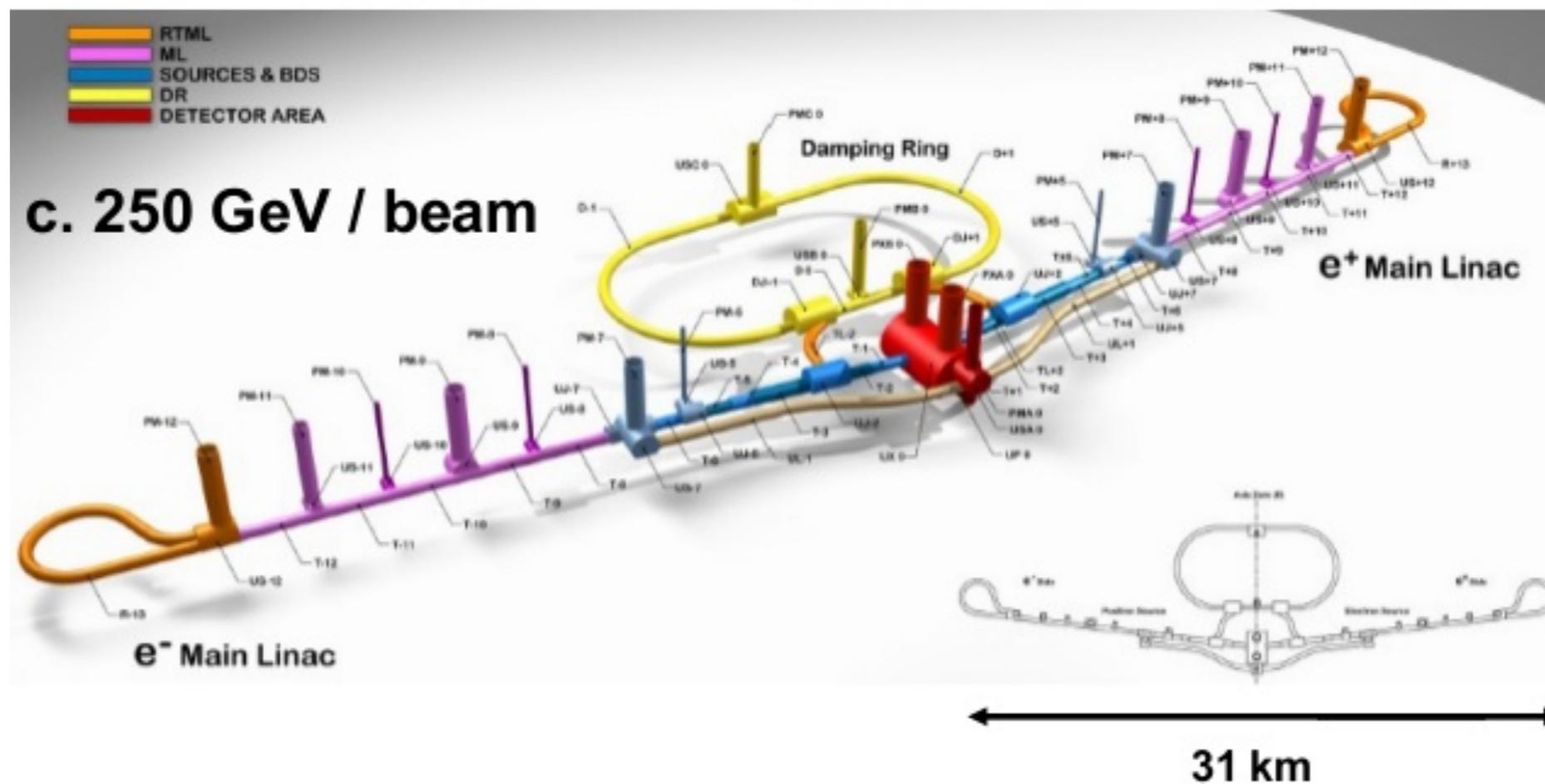
NICA (JINR, Dubna)



Courtesy of T. Hatsuda

ELECTRON-POSITRON LINEAR COLLIDER (JAPAN)

International Linear Collider (ILC)

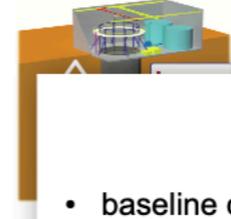
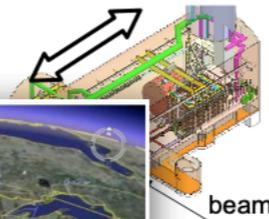


TECHNOLOGY EXISTS, CONSTRUCTION DID NOT START YET

future neutrino experiments

To suppress the systematic uncertainties

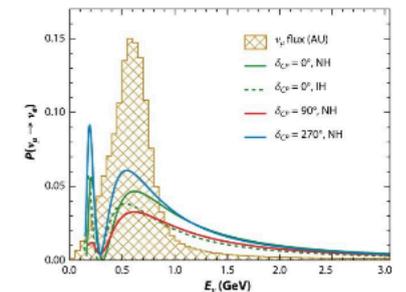
- cross-section measurements: LBL near detectors, MINERvA, MicroBooNE
 - need to improve knowledge of ν_e cross-section, nuclear initial state, final state interactions \leftarrow transverse kinematic imbalance variables \rightarrow better interactions models [PRC 94, 015503 \(2016\)](#)
- movable near detectors in DUNE and HK



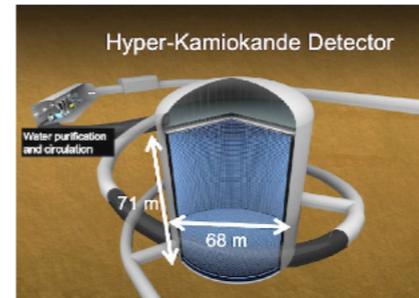
Hyper-Kamiokande



- baseline of **295 km** \rightarrow small matter effect
- **narrow band beam and off-axis technique** \rightarrow CC QE events, most events close to oscillation maximum



- far detector: **258-kt Water Cherenkov** (fiducial mass 186 kton)
- near detectors: upgraded ND280
 - new 1kton scale Water Cherenkov (IWCD) with off-axis angle spanning orientation (site investigation and facility design on-going)



Far site:
Access tunnels \rightarrow completed
 \leftarrow Cavern excavation in progress



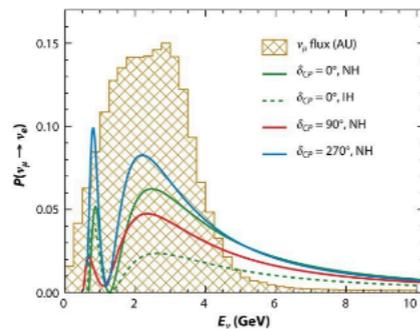
DUNE



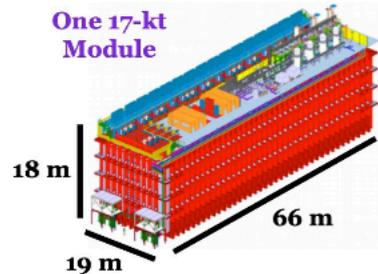
- **very long baseline** \rightarrow large mass effects, removing of degeneracy
- **broad band beam** \rightarrow covering full oscillation period
- large **LAr detectors** \rightarrow imaging and calorimetry
- movable and on-axis near detectors to constrain systematic uncertainties
- phase 1: 1.2MW beam, 2x17kt (2x10kt fiducial mass) Far Detector modules
- phase 2: two more modules, >2MW beam, ND upgrades



neutrino beams: direct measurement of the decay tunnel: ENUBET, NuMI
[EPJ C75 155 \(2015\)](#)
[arXiv:2308.09402](#)
neutrino beams: ESSnuSB, [EPJ. ST. 231 \(2022\) 37](#)
LiquidO, Theia [EPJ C80 416 \(2020\)](#)



One 17-kt Module



Far site excavation 75% complete, civil construction to be completed in 2024, detector construction underway

