

НЕРАЗГАДАННЫЕ ЗАГАДКИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Д.И. Казаков

Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

Объединённый Институт Ядерных Исследований

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	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

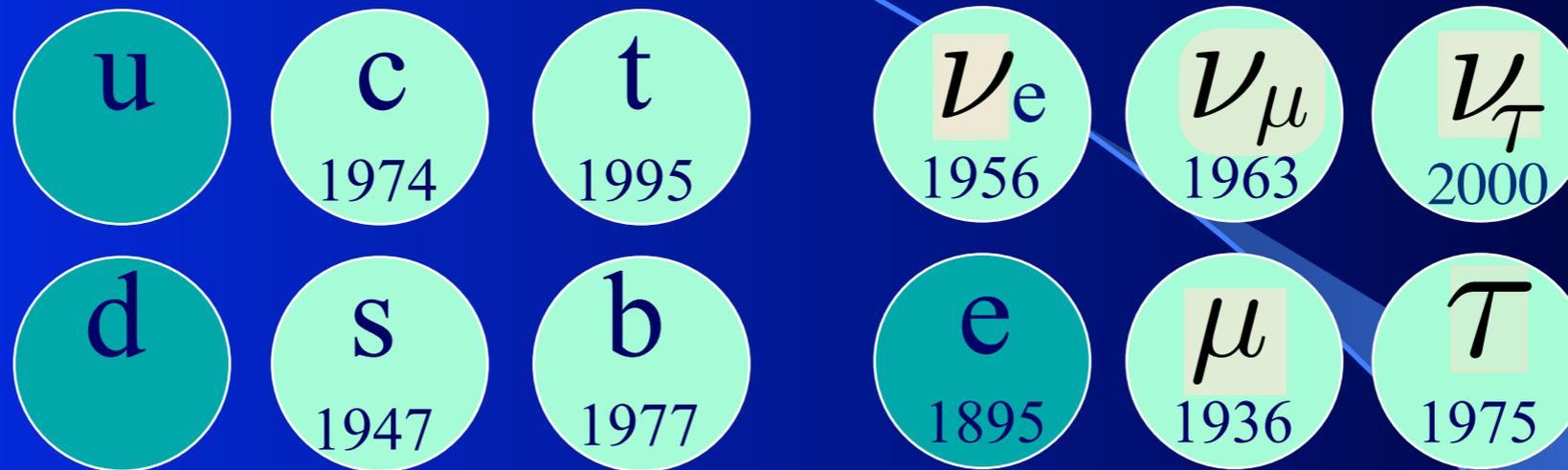
Электромагнитные

Сильные

Слабые

Гравитация

История открытий



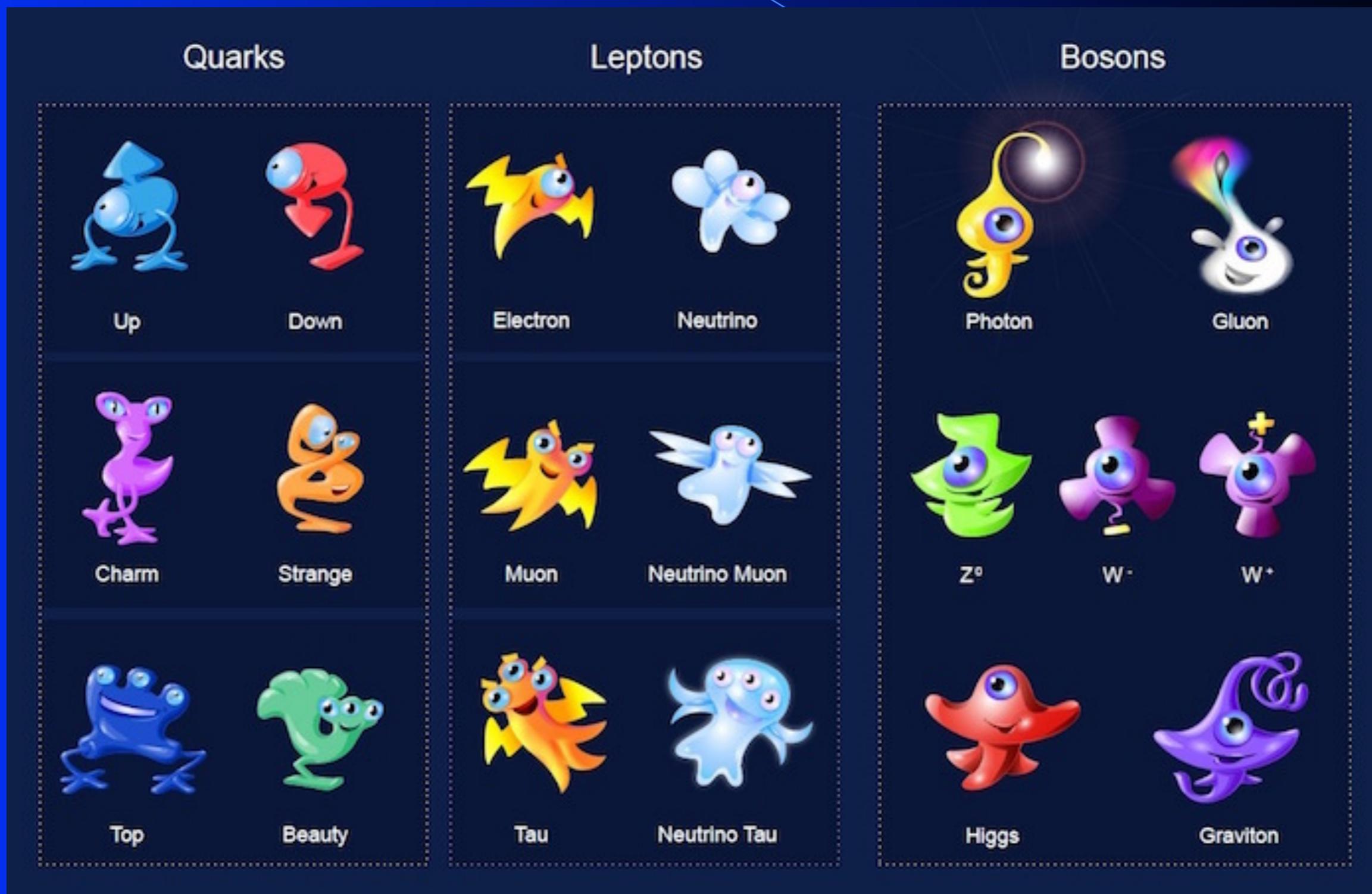
шесть кварков

шесть лептонов

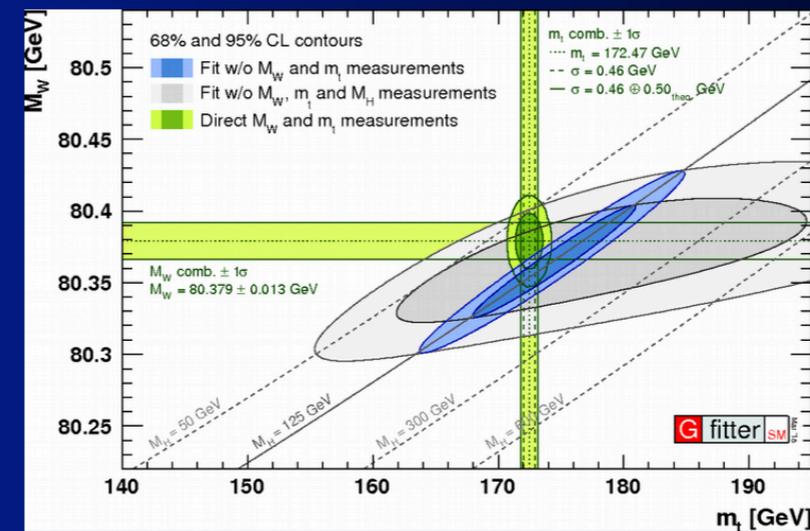
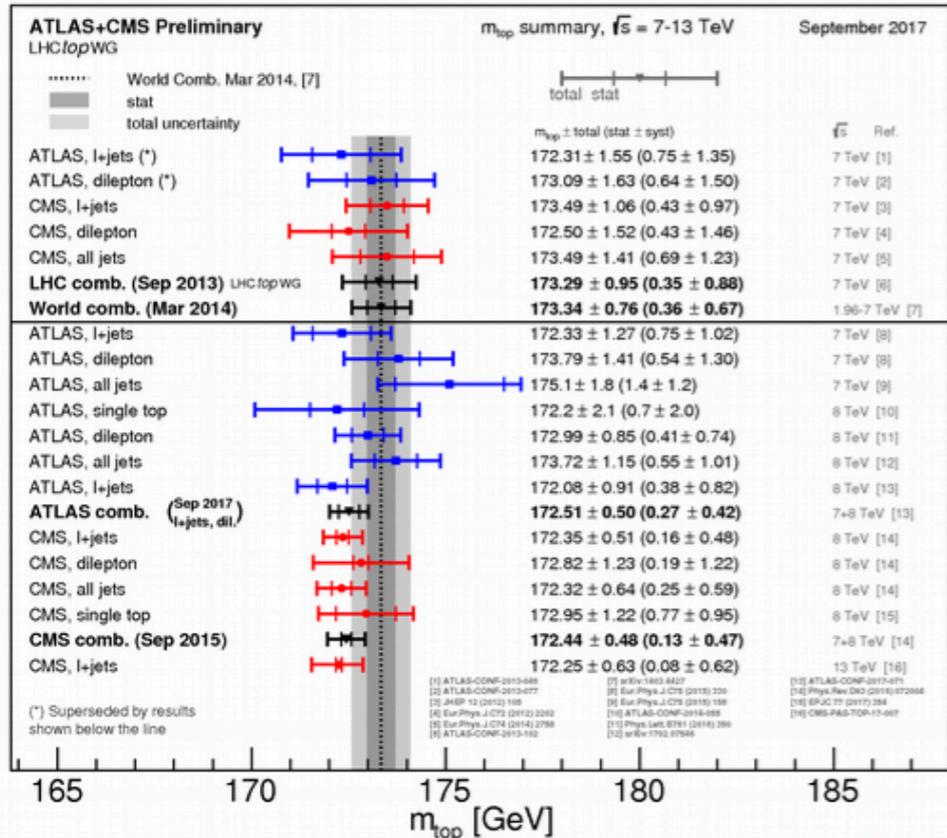
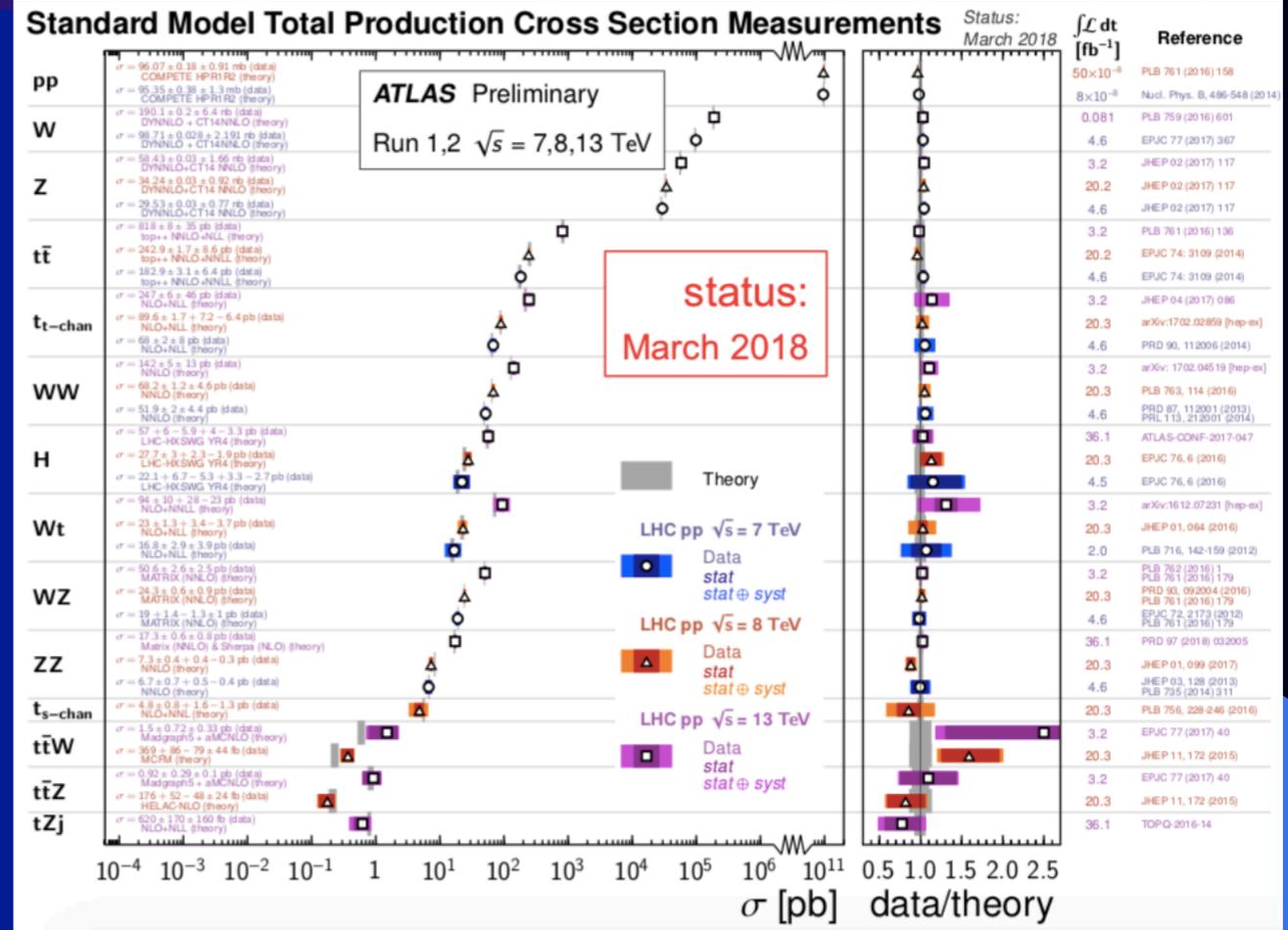
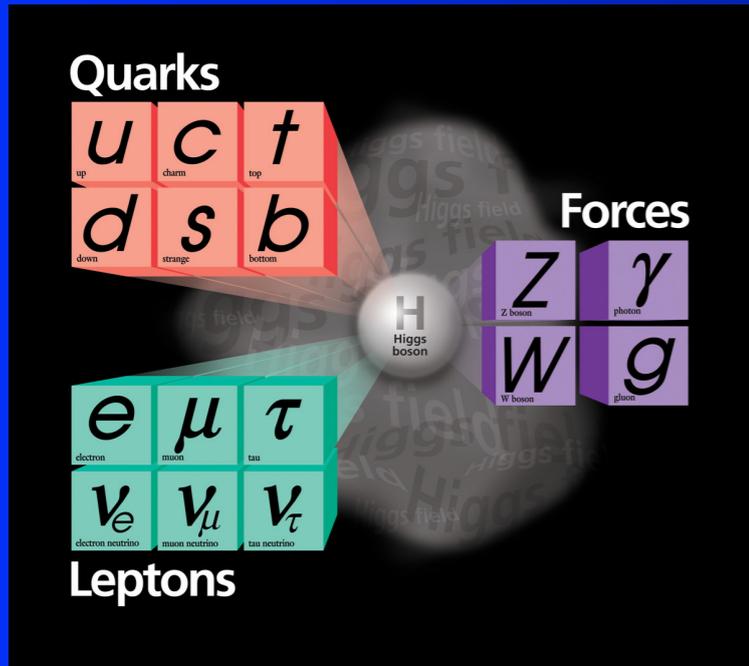


Теперь у нас есть замечательная картина из трёх пар кварков и трёх пар лептонов и пяти переносчиков фундаментальных взаимодействий. Здесь показана также история их открытия.

Ароматы (сорта) частиц СМ



СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ: СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ



Замечательное согласие между измерениями и предсказаниями СМ

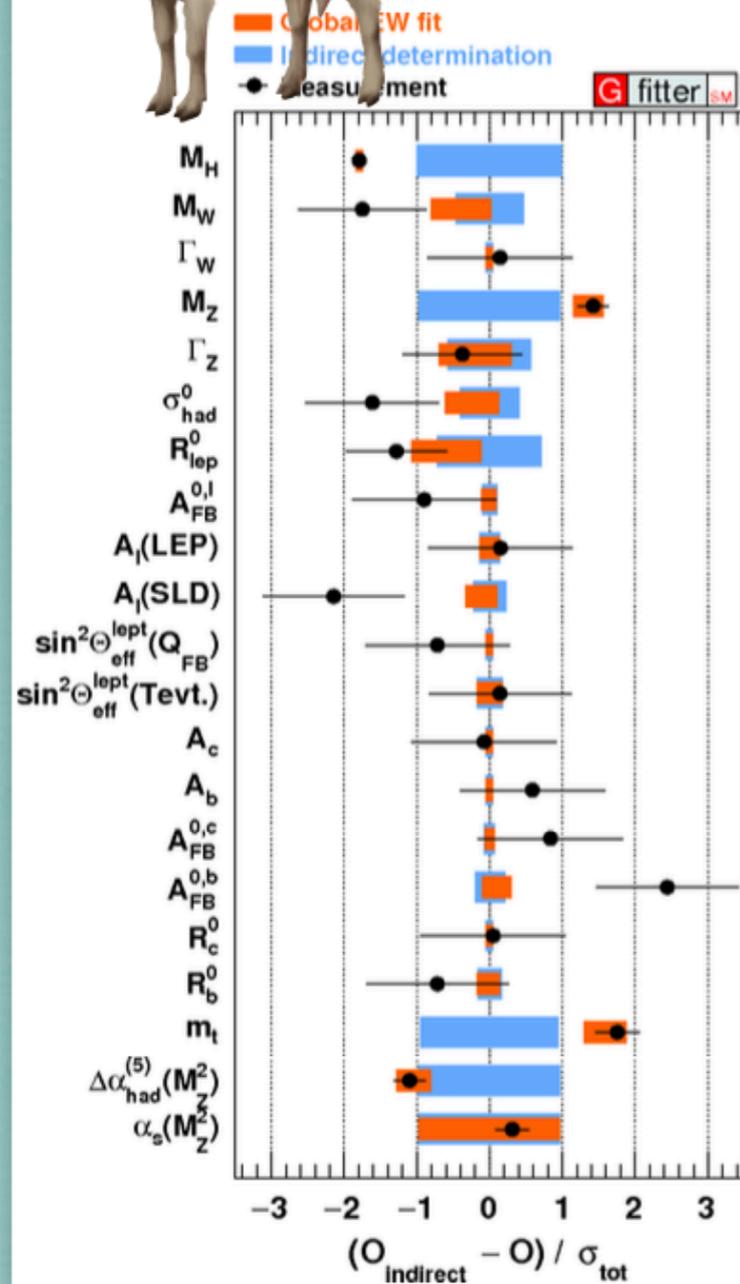
Триумф Стандартной Модели



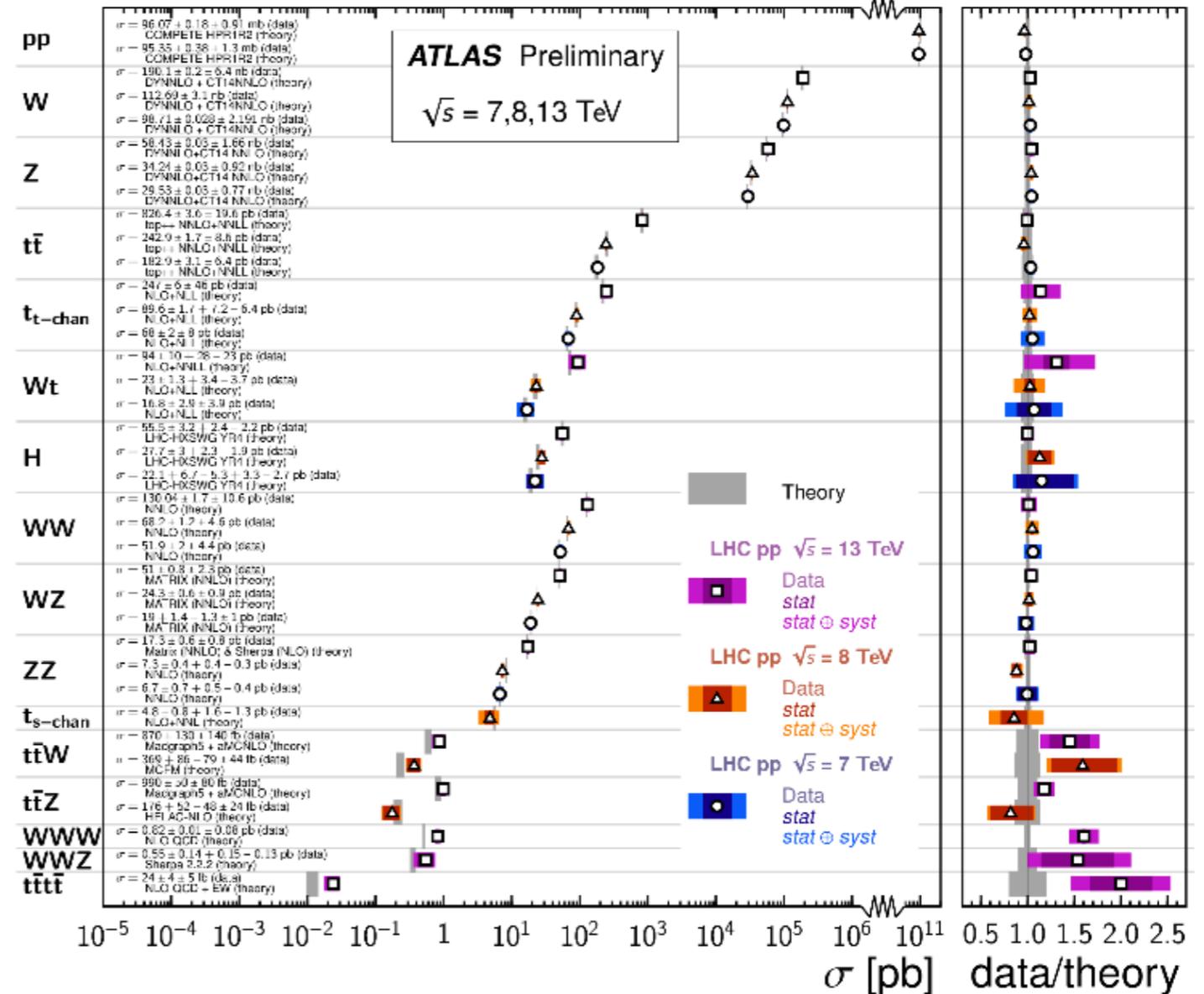
SM

Everything looks SM-like at LHC

Greatest Of All Theories



Standard Model Total Production Cross Section Measurements



Загадка № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

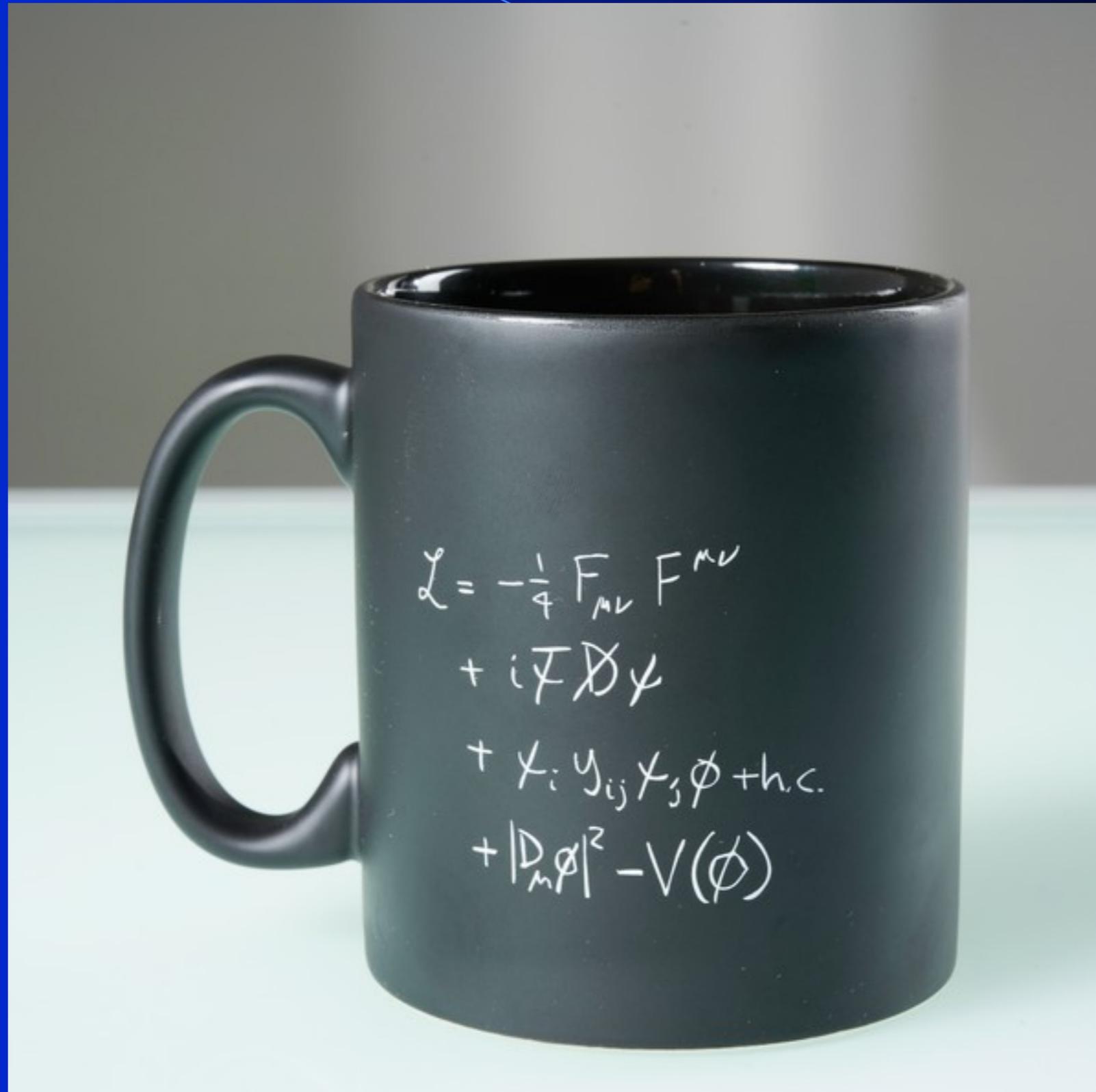
Стандартная Модель фундаментальных взаимодействий

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



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

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

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^I F^{\mu\nu I} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^2 G^{\mu\nu 2}$$

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

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

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

$$\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^2 \phi^0 \phi^0 + \frac{1}{2} ig \frac{1-2c_w^2}{c_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^-) + \\ & \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 m_\lambda}{2M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g m_\lambda}{2M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig m_\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig m_\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_\lambda}{2M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g m_\lambda}{2M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig m_\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig m_\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}$$

25 свободных параметров!

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

1/2	↘	T_3
-1/2	↙	
0	↘	T_3
0	↙	

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

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

1

2

-1

1

1

0

1

1

-2

Электрический
заряд

$$Q = T_3 + Y/2$$

Электродинамика как калибровочная теория

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности $U(1)$

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \quad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$

Ур. Максвелла

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \quad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$

Ур. Максвелла

$$(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi = 0$$

Ур. Дирака

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \quad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$

Ур. Максвелла

$$(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi = 0$$

Ур. Дирака

- Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \quad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$

Ур. Максвелла

$$(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi = 0$$

Ур. Дирака

- Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла
- Заряженные частицы (кварки и лептоны) описываются уравнением Дирака

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \quad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$

Ур. Максвелла

$$(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi = 0$$

Ур. Дирака

- Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла
- Заряженные частицы (кварки и лептоны) описываются уравнением Дирака
- Взаимодействие осуществляется путём обмена квантом электромагнитного поля - фотоном

Хромодинамика как калибровочная теория сильных взаимодействий

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(3)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + \bar{\psi}_i \gamma^\mu (\partial_\mu - m - gT_{ij}^a A_\mu^a) \psi_j$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

Хромодинамика как калибровочная теория сильных взаимодействий

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(3)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + \bar{\psi}_i \gamma^\mu (\partial_\mu - m - gT_{ij}^a A_\mu^a) \psi_j$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu - m - eA_\mu) \psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Хромодинамика как калибровочная теория сильных взаимодействий

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(3)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + \bar{\psi}_i \gamma^\mu (\partial_\mu - m - gT_{ij}^a A_\mu^a) \psi_j$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu - m - eA_\mu) \psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

- Сильное вз. осуществляются путём обмена квантом глюонного (цветного) поля -глюоном
- Глюонное поле описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
- Главное отличие от электродинамики в том, что глюоны тоже несут цветной заряд и взаимодействуют друг с другом

Электрослабая калибровочная теория

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(2)

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

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

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 $R \sim 1/M_W$

Спонтанное нарушение симметрии

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

Скалярное поле

$$H(x)$$

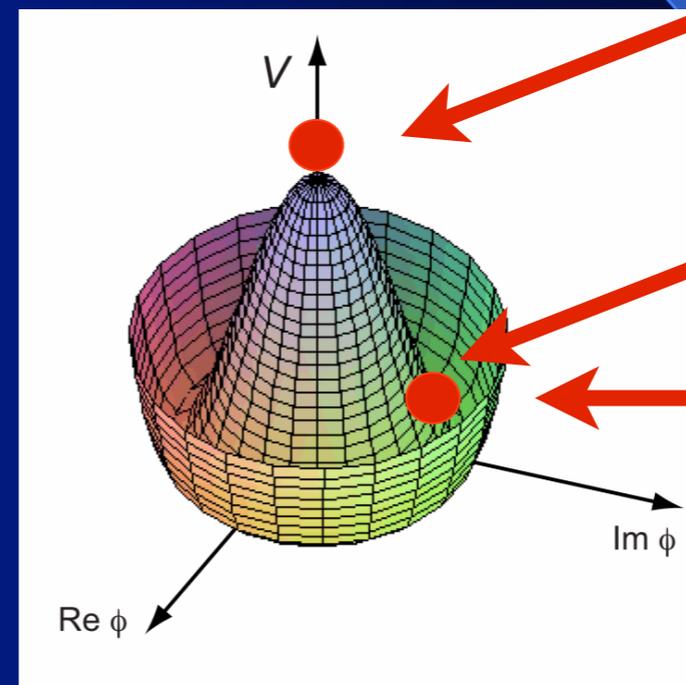
$$\langle H(x) \rangle = v$$

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

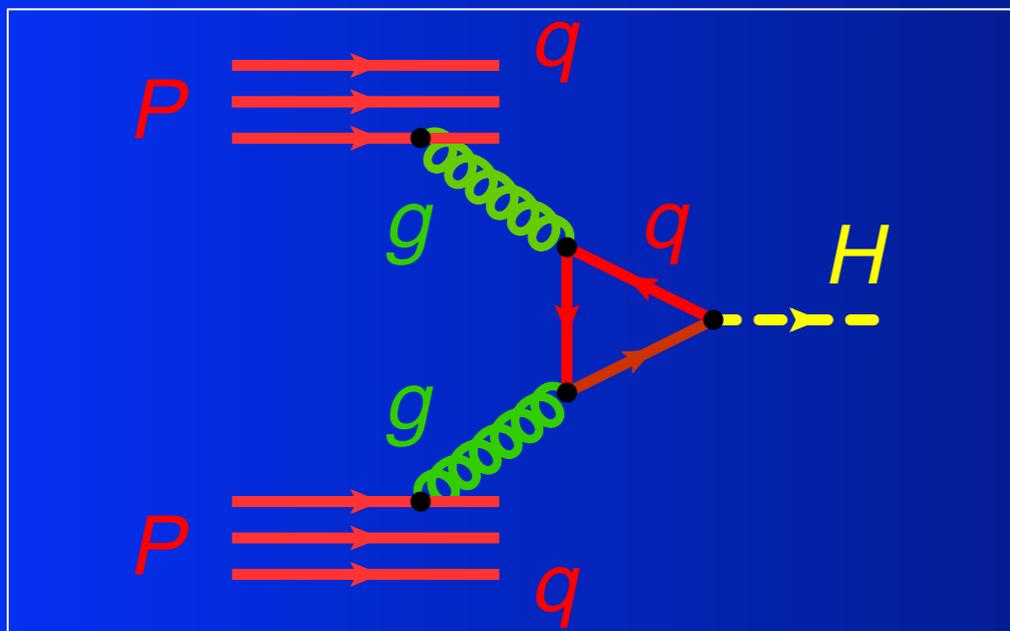
Спонтанное нарушение симметрии

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

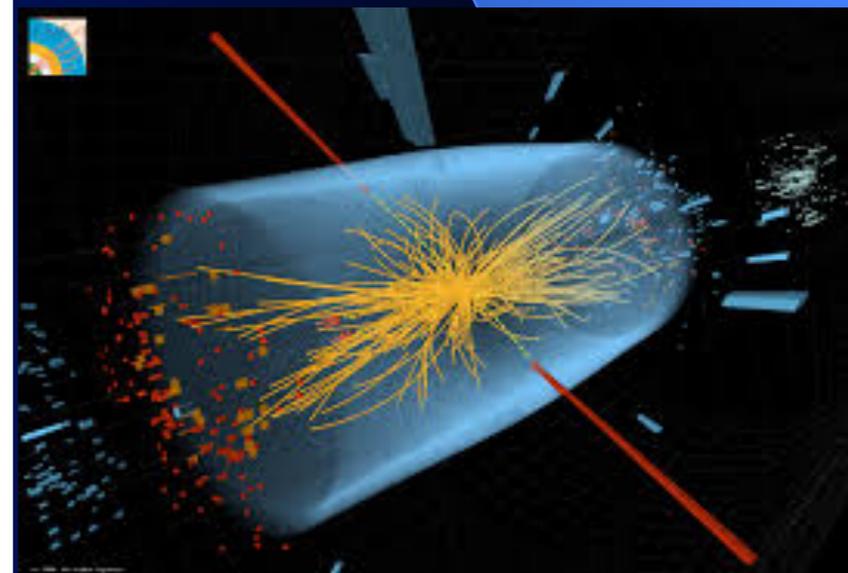
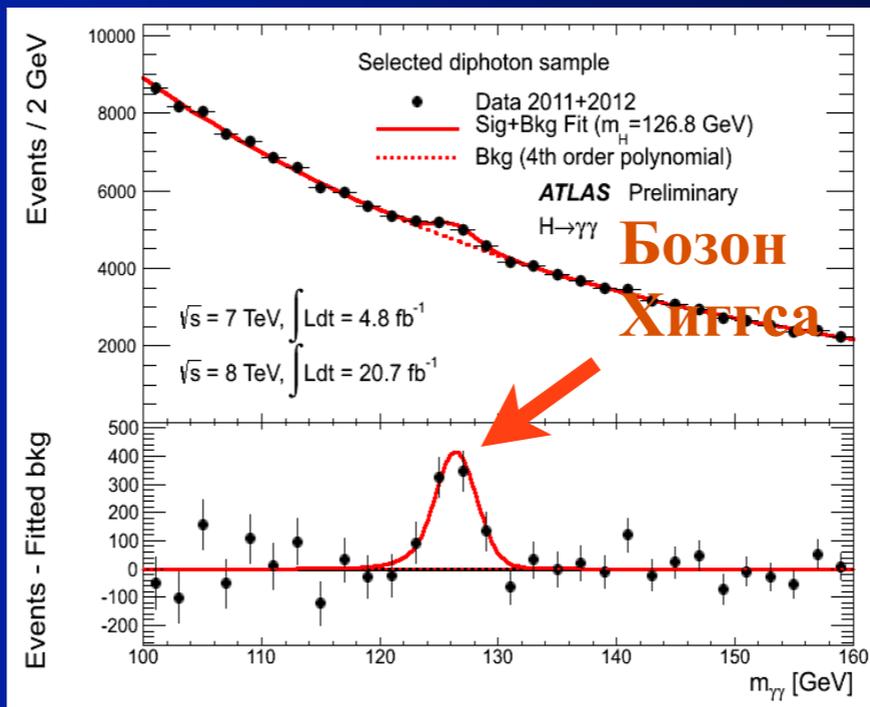
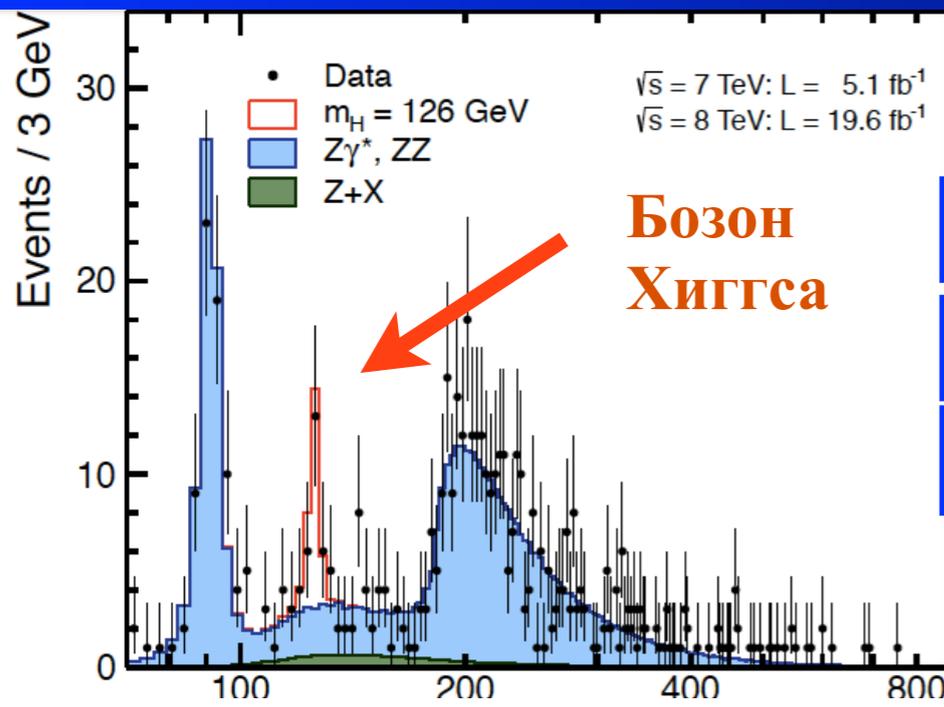
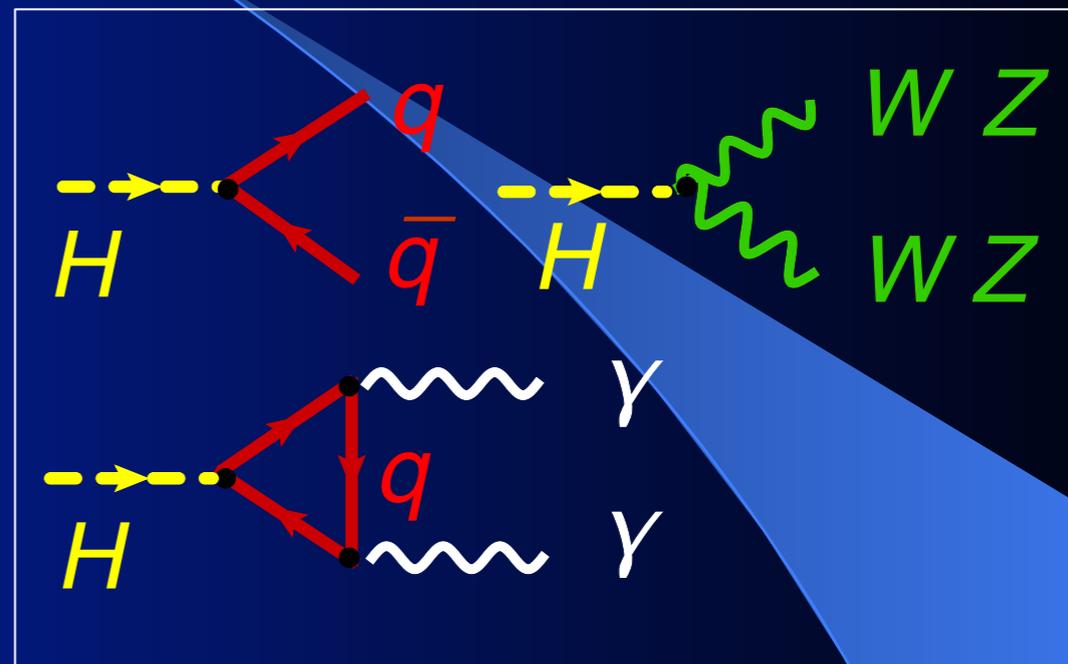
Открытие хиггсовского бозона

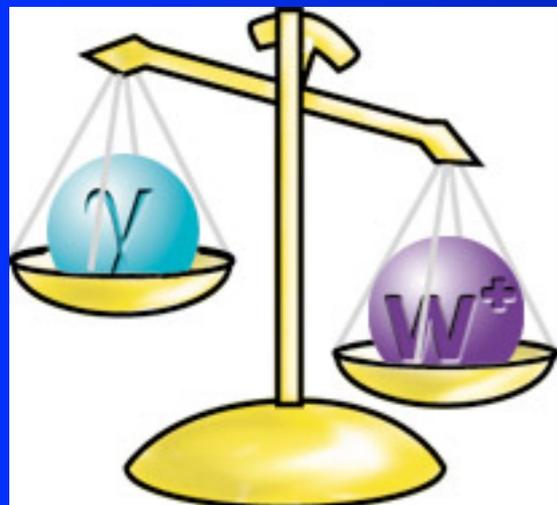
ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



Процессы распада





ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН

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

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

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

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

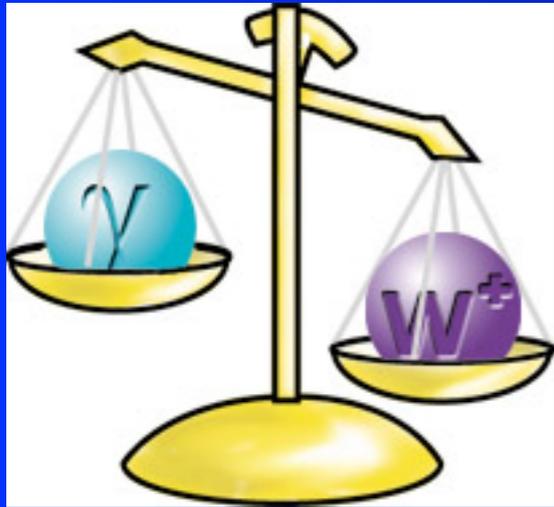
$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

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

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

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

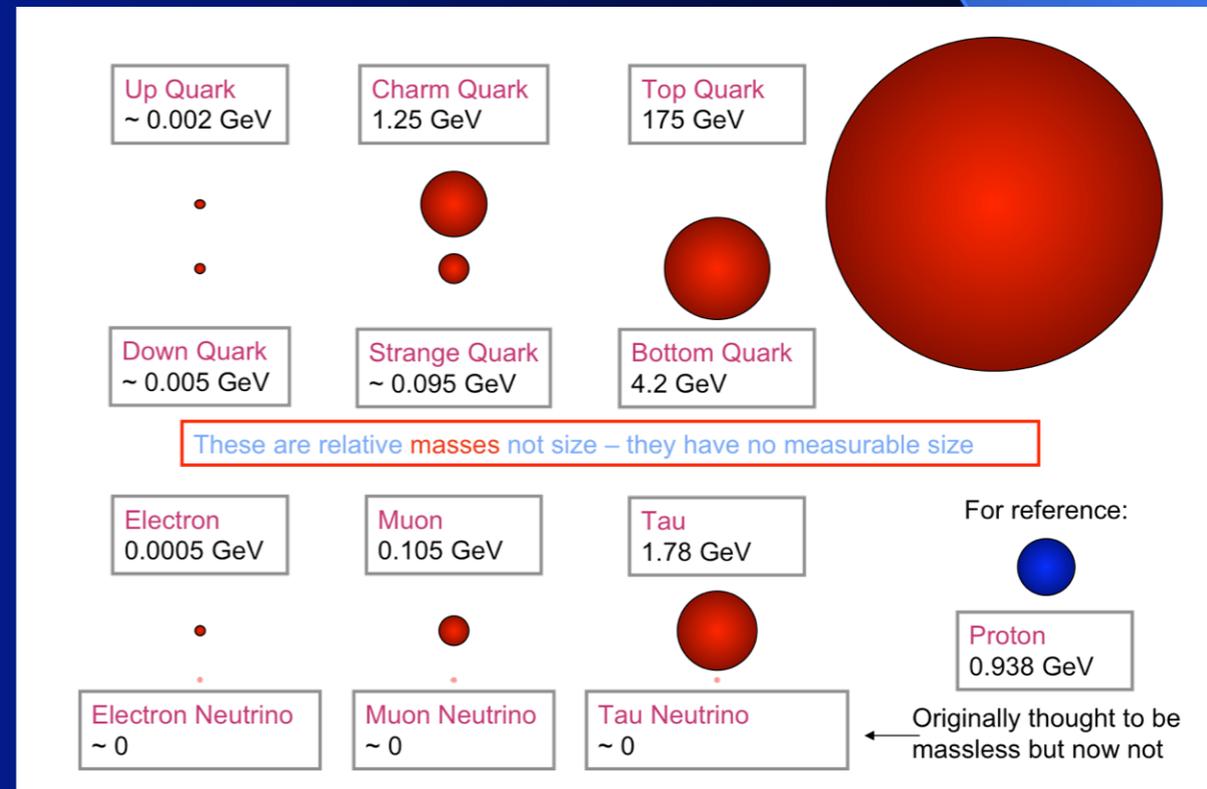
$$m_H = \sqrt{\lambda} \cdot v$$

$$m_\gamma = 0$$

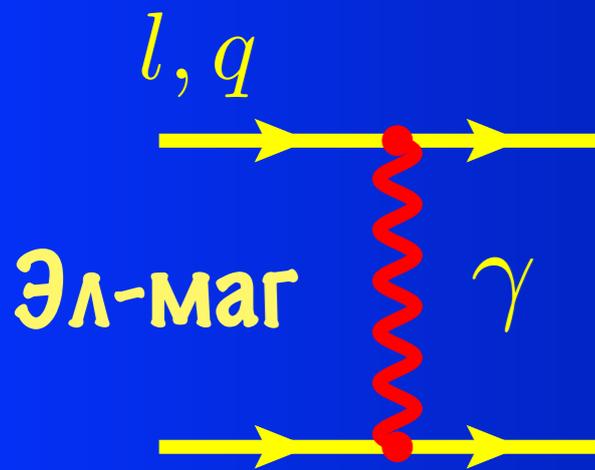
$$m_{gluon} = 0$$

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

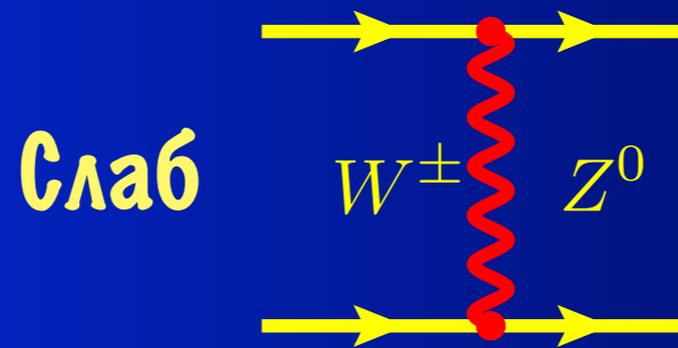
Все массы пропорциональны константе взаимодействия частиц с ХИГГСОВСКИМ (полем) бозоном



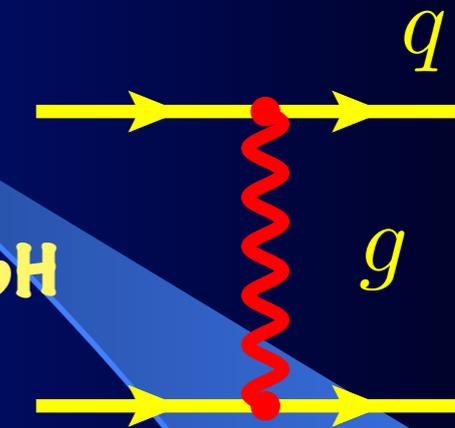
Пять фундаментальных сил Природы



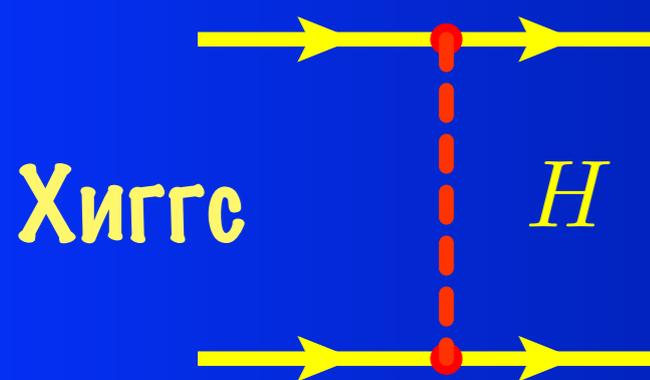
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



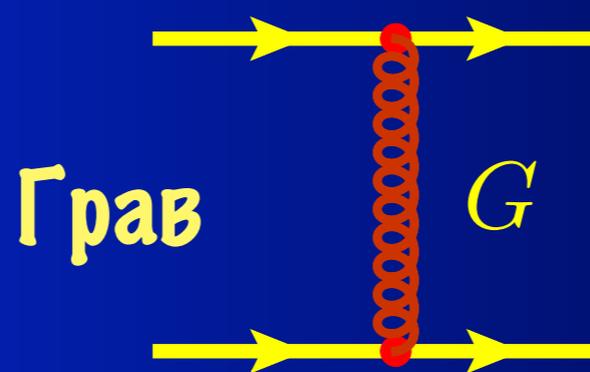
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



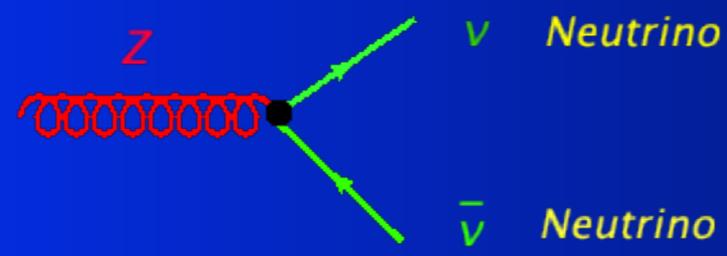
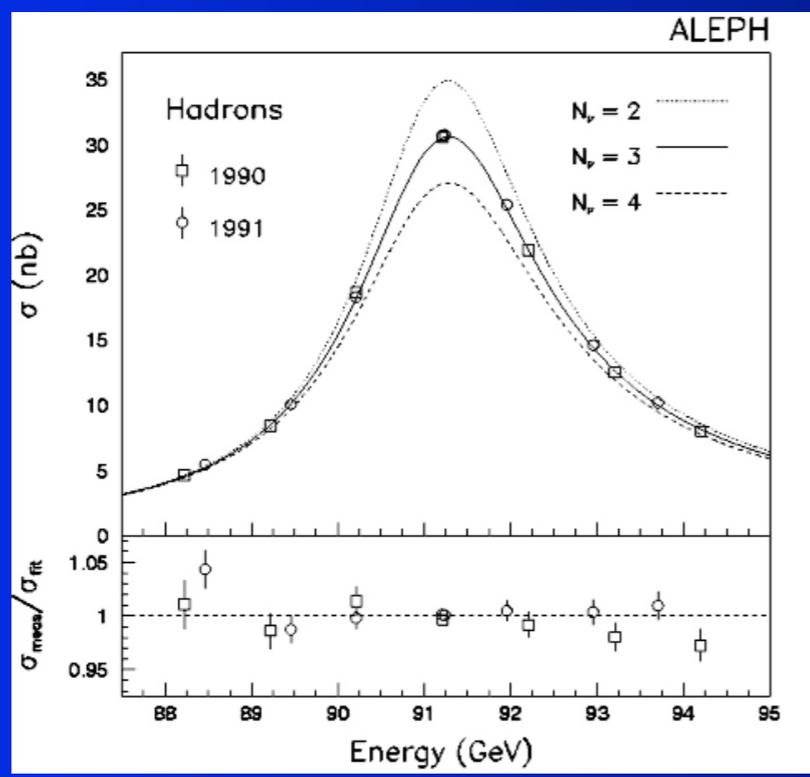
$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

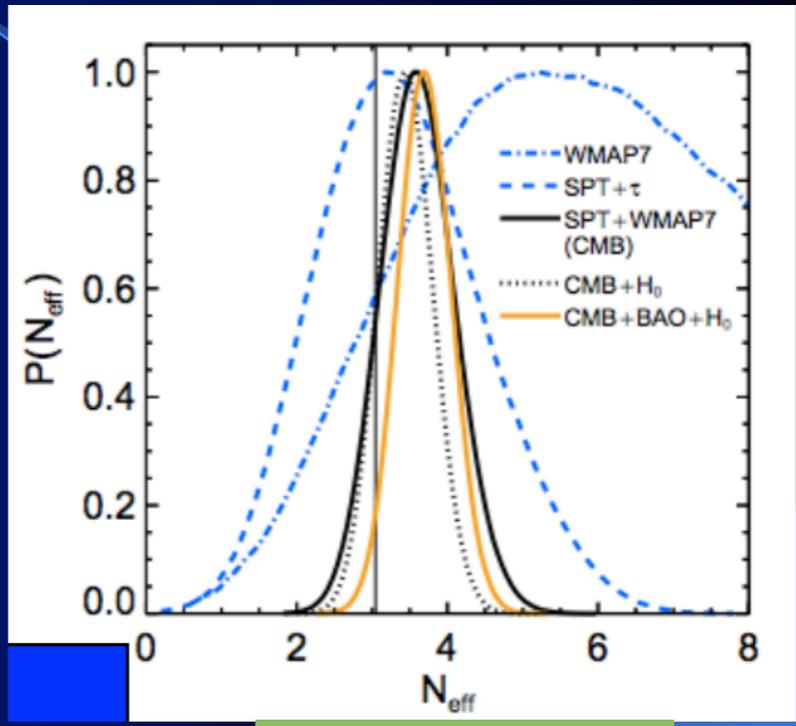
Число поколений частиц материи

- 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

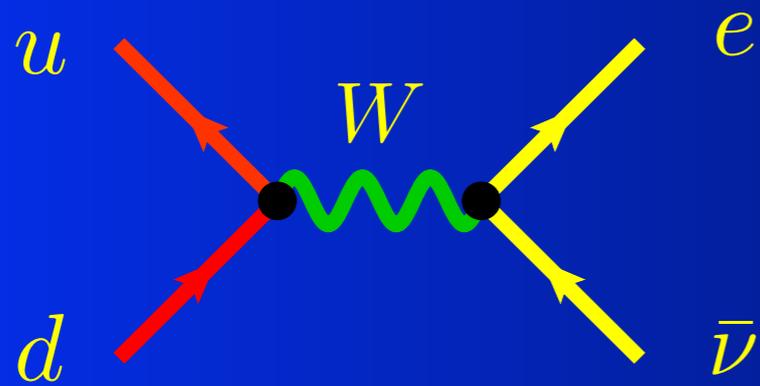
$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

Задача № 2:

Нейтринно-западоочная
частьца. Какова природа
нейтринно?

Нейтрино-загадочная частица

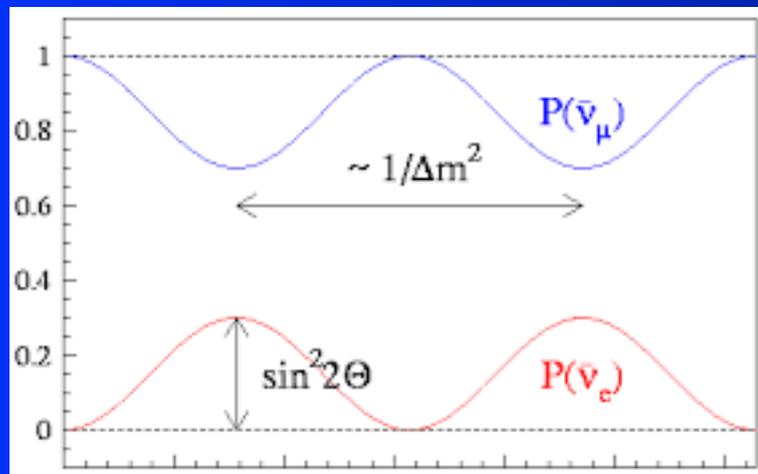
Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов



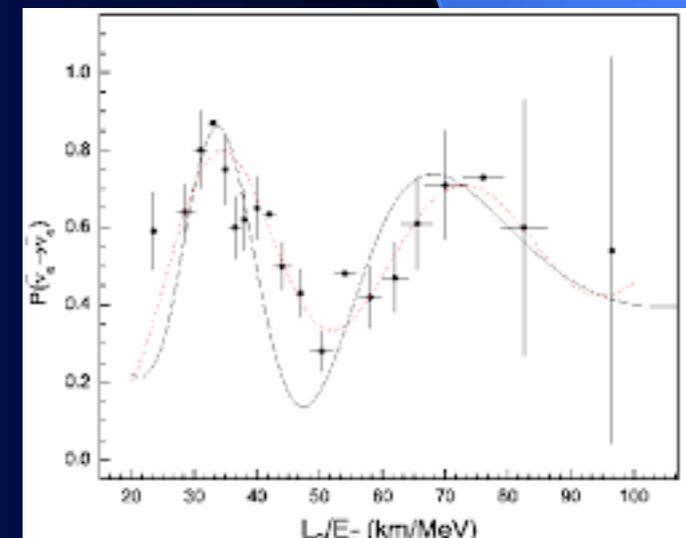
Нейтрино

- 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 ($< 1 \text{ eV}$) 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?

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

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

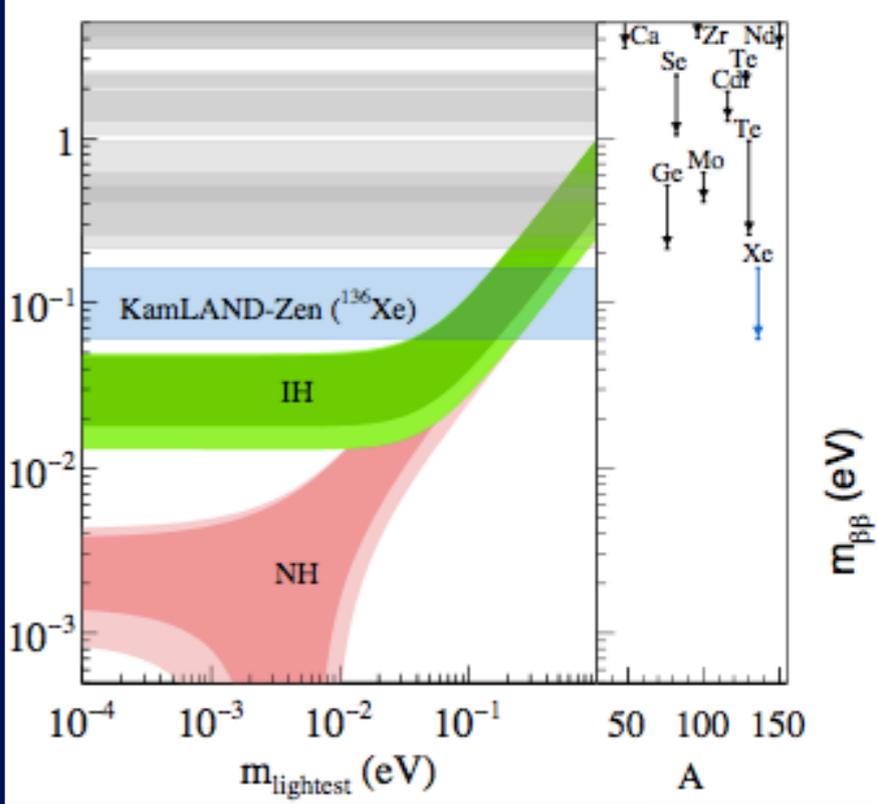
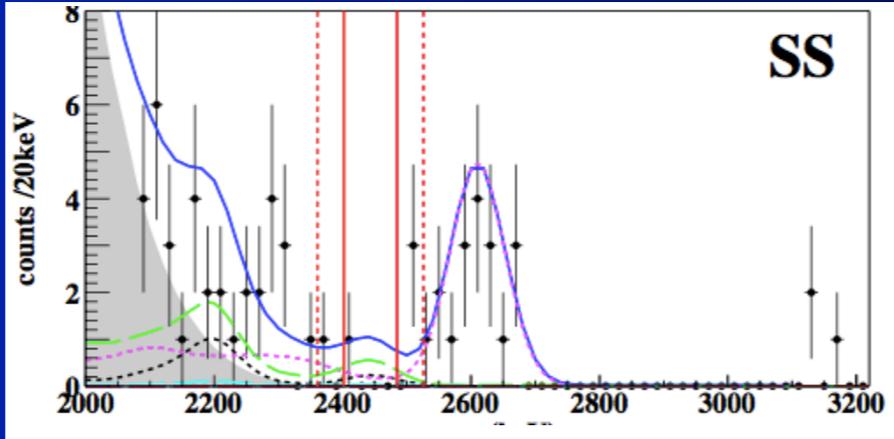
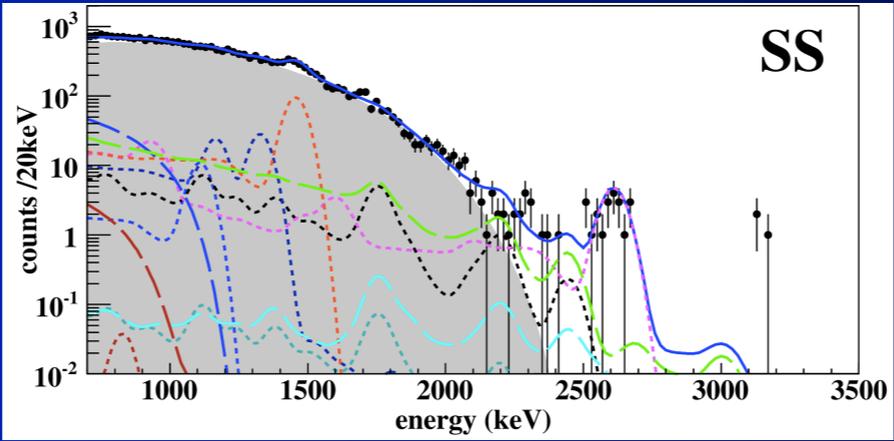
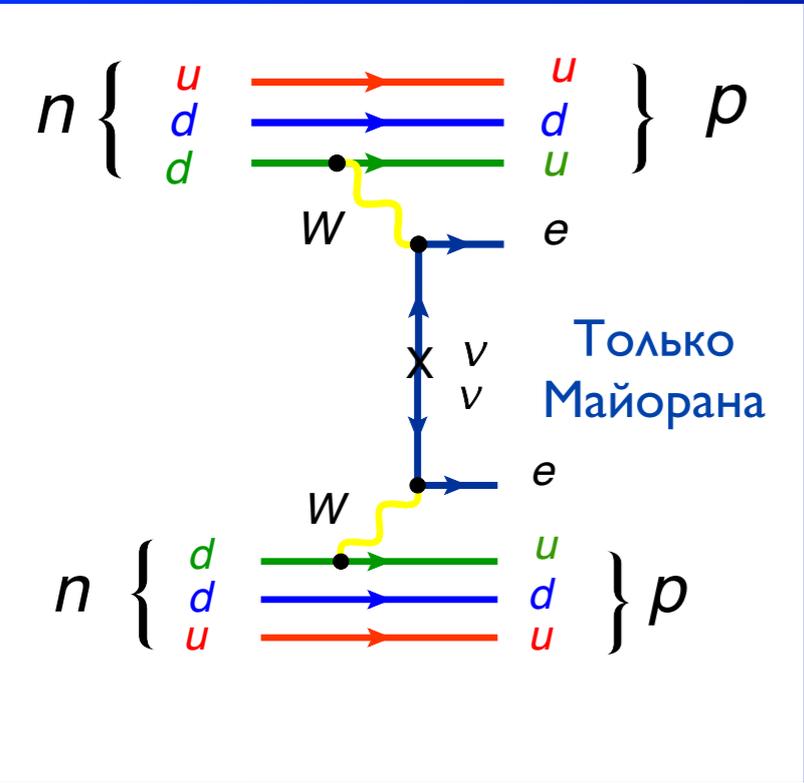
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

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

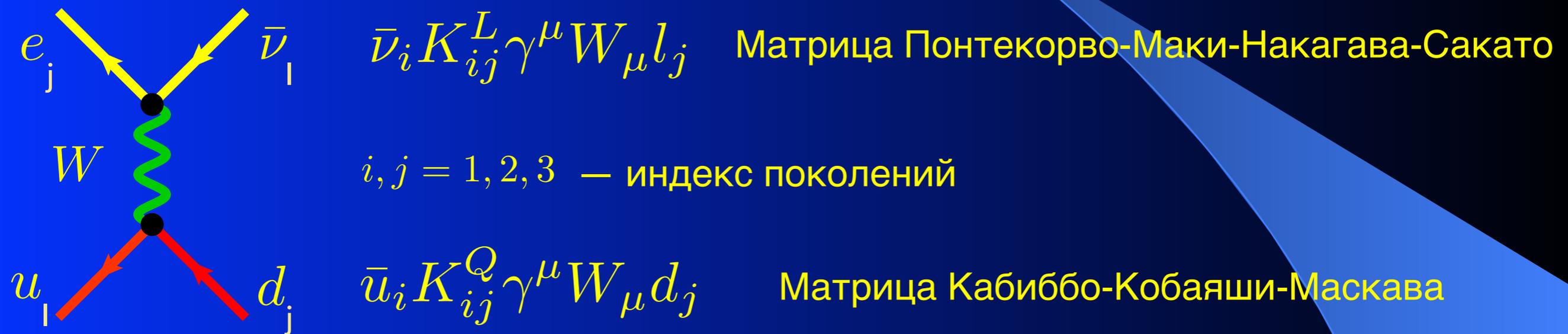
$0\nu\beta\beta$ decay



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

Смешивание поколений в СМ

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

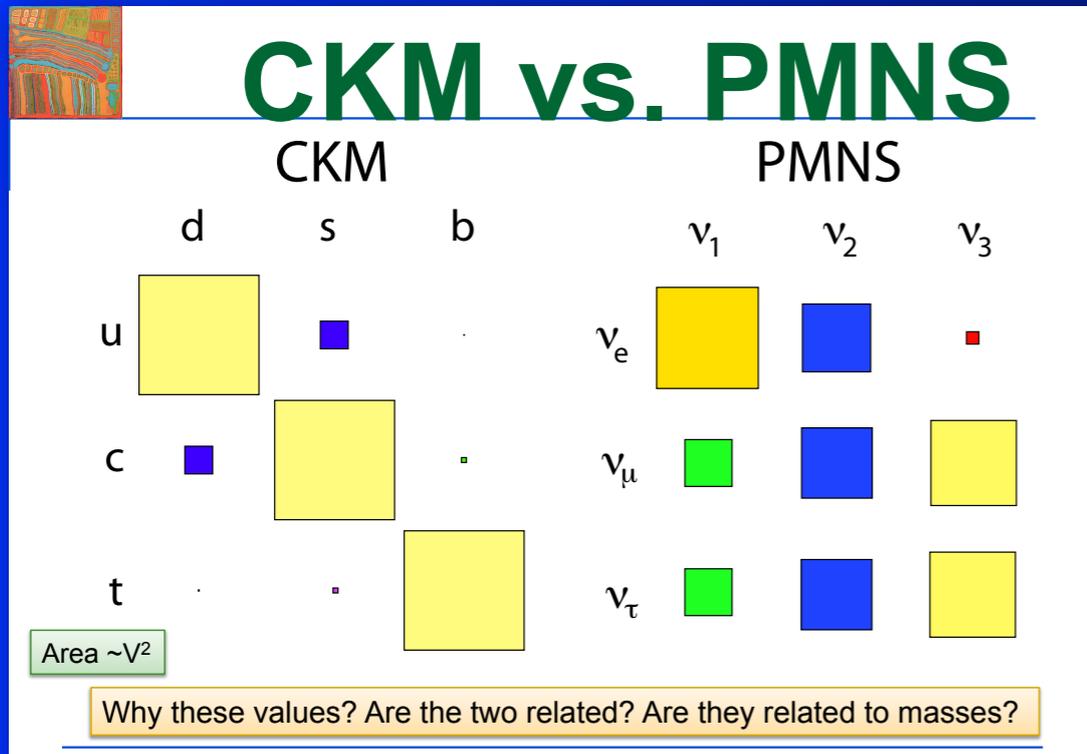


$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23}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

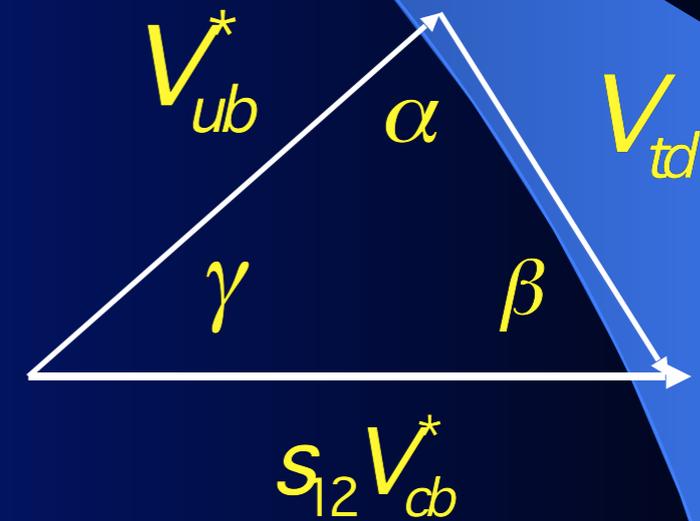
4 параметра в каждой из матриц: 3 угла и 1 фаза.

Фаза δ - источник CP нарушения в Стандартной модели

Смешивание поколений в СМ



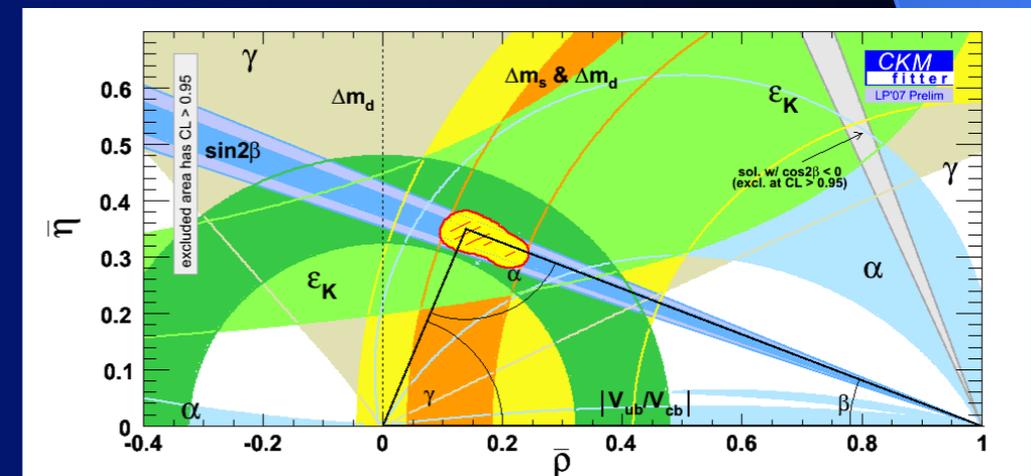
- Углы смешивания в кварковом и лептонном секторе найдены экспериментально
- Они сильно отличаются друг от друга



Условие унитарности матрицы смешивания - треугольник унитарности:

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

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

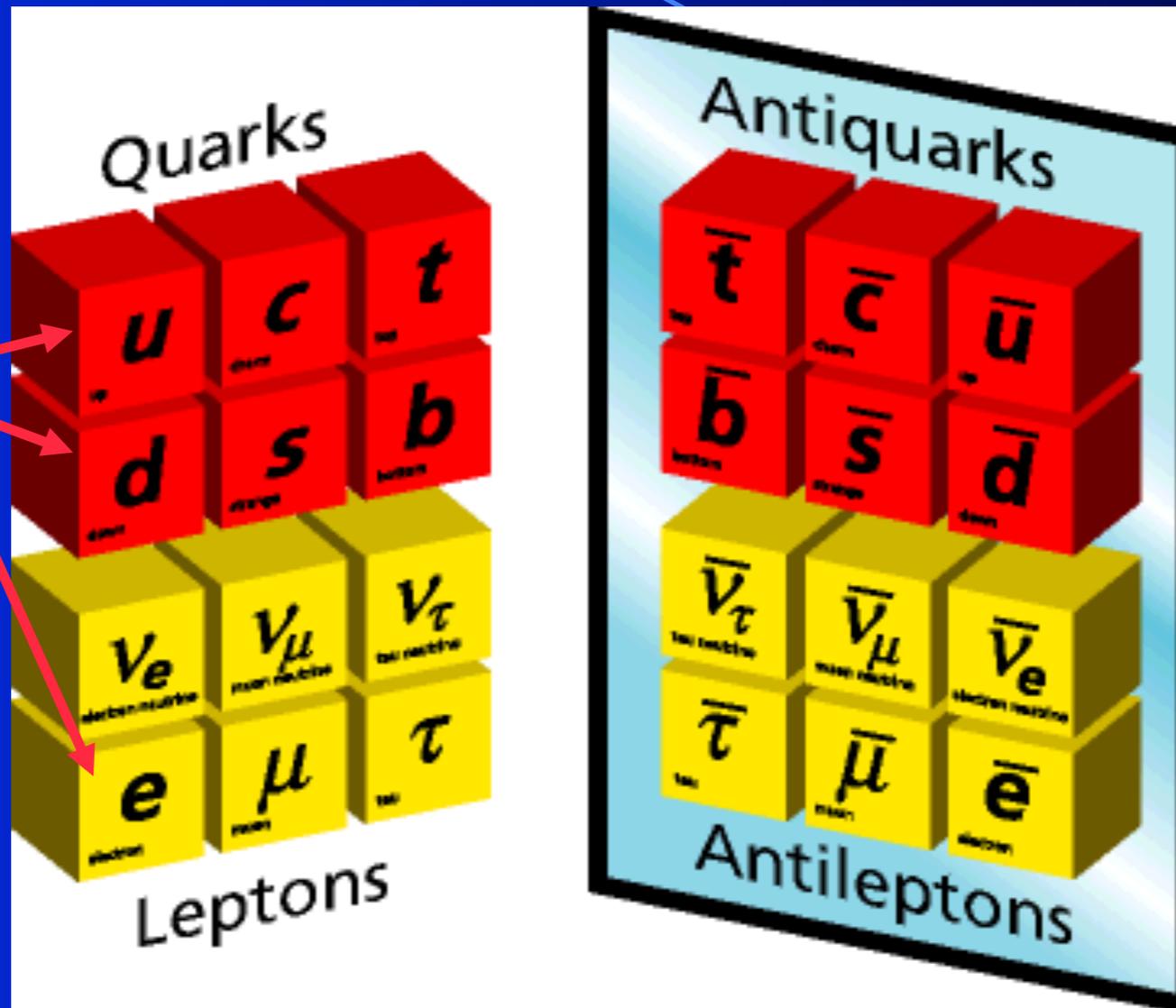


Загадка № 3:

Как объяснить отсутствие антиматерии во Вселенной?

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

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!

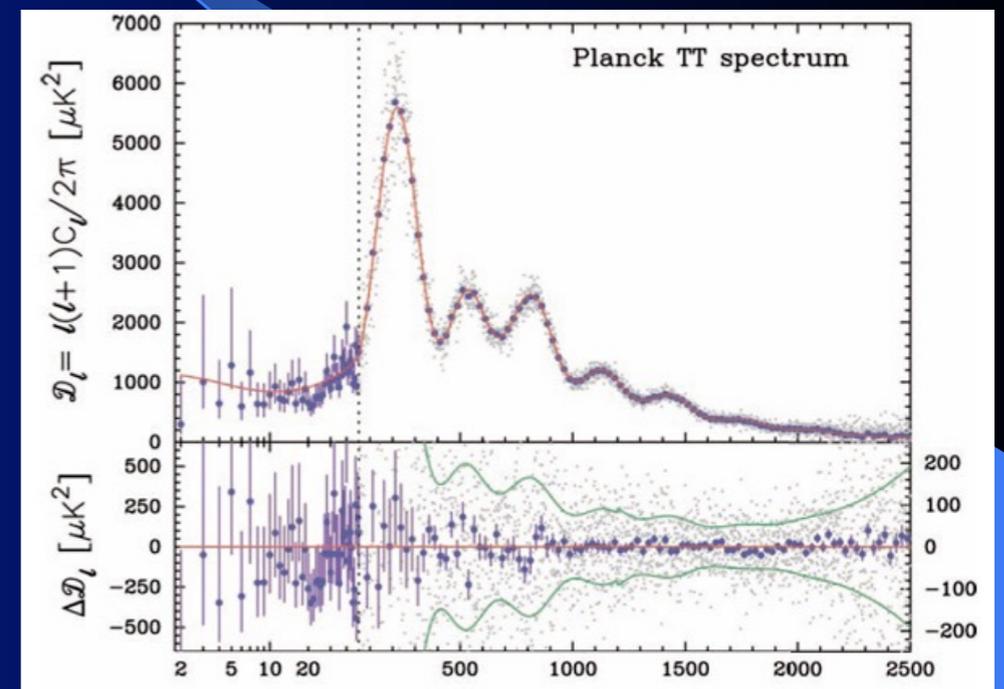
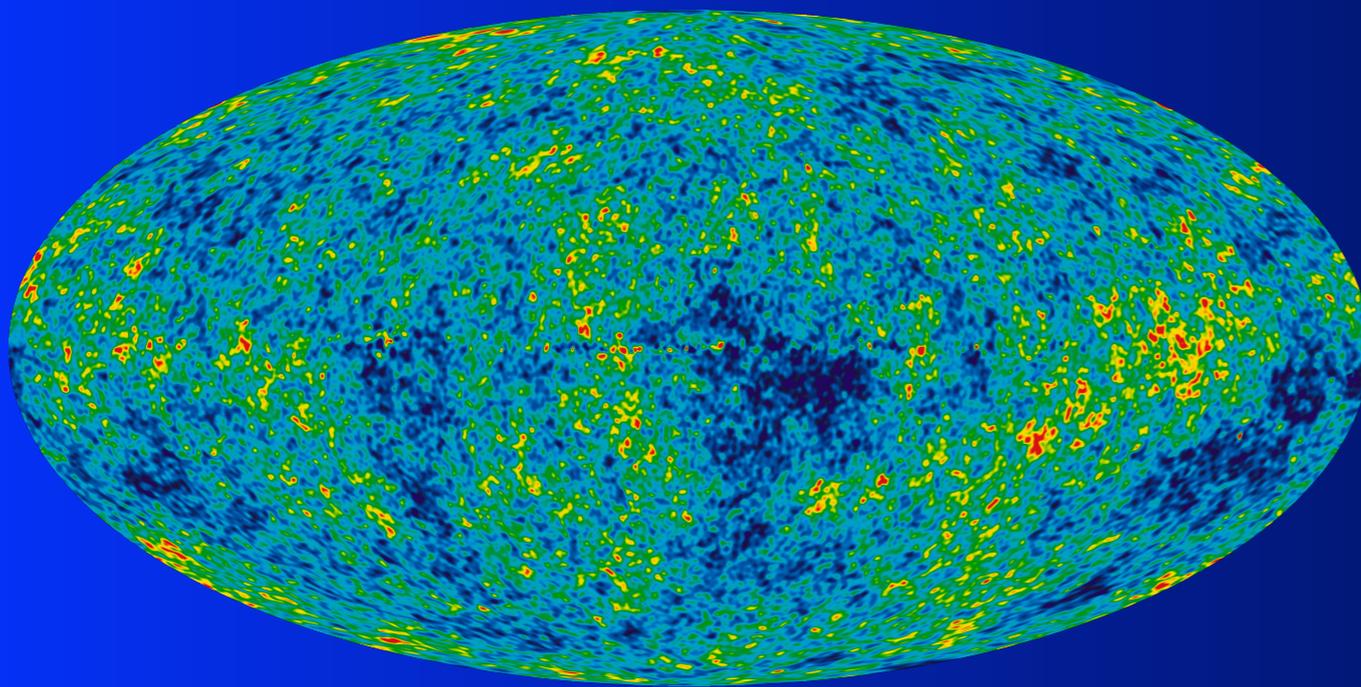
Загадка № 4:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

Реликтовое микроволновое излучение

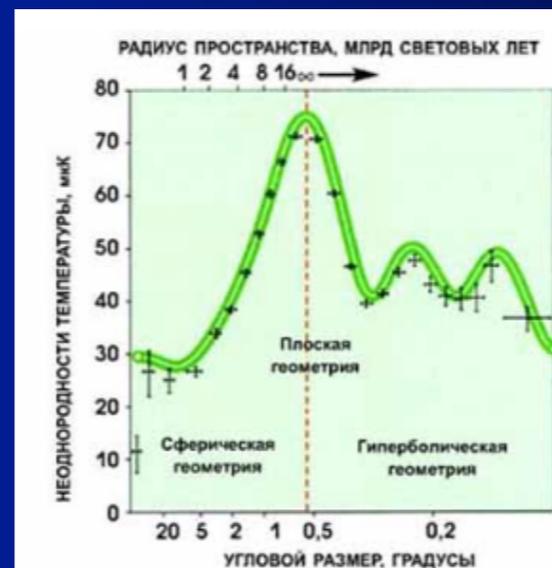
Реликтовое излучение $T \approx 2.7\text{K}^\circ$

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

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



$$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$$

$$\Omega_{DarkMatter} = 26.8\%$$

$$\Omega_{DarkEnergy} = 68.3\%$$

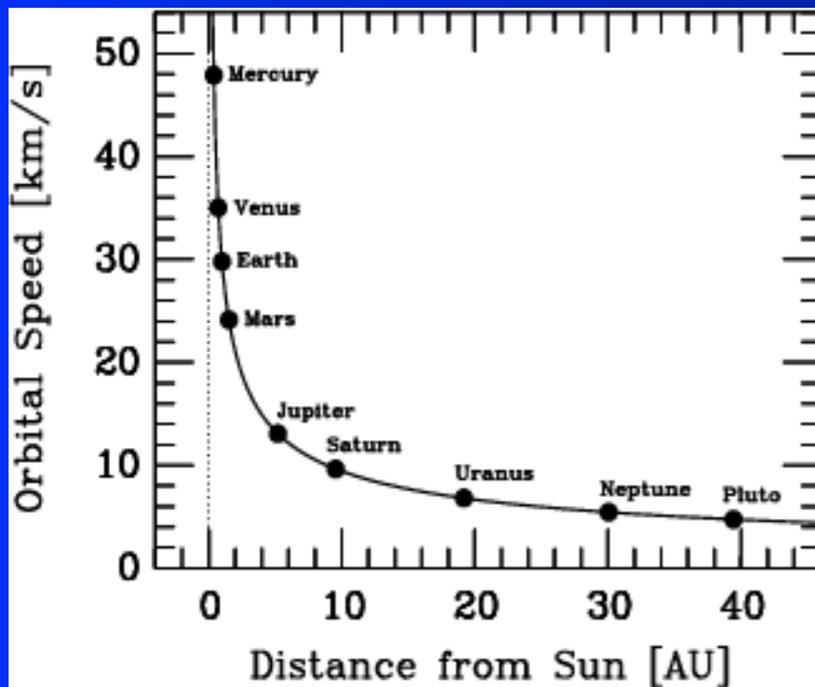
$$\Omega = 1.02 \pm_{30} 0.02$$

Кривые вращения звёзд

центробежная сила

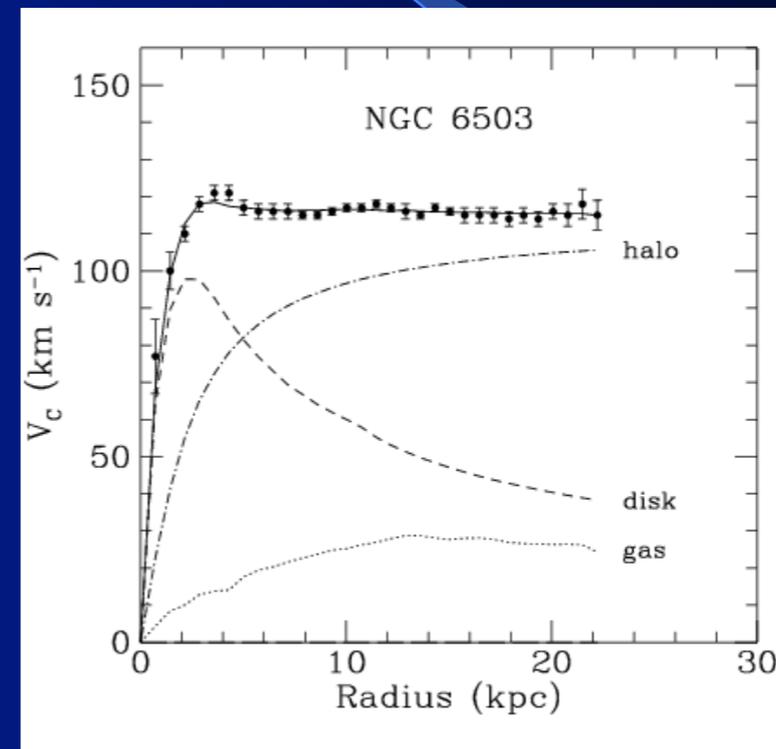
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



Солнечная система

Плотность тёмной материи в солнечной системе пренебрежимо мала

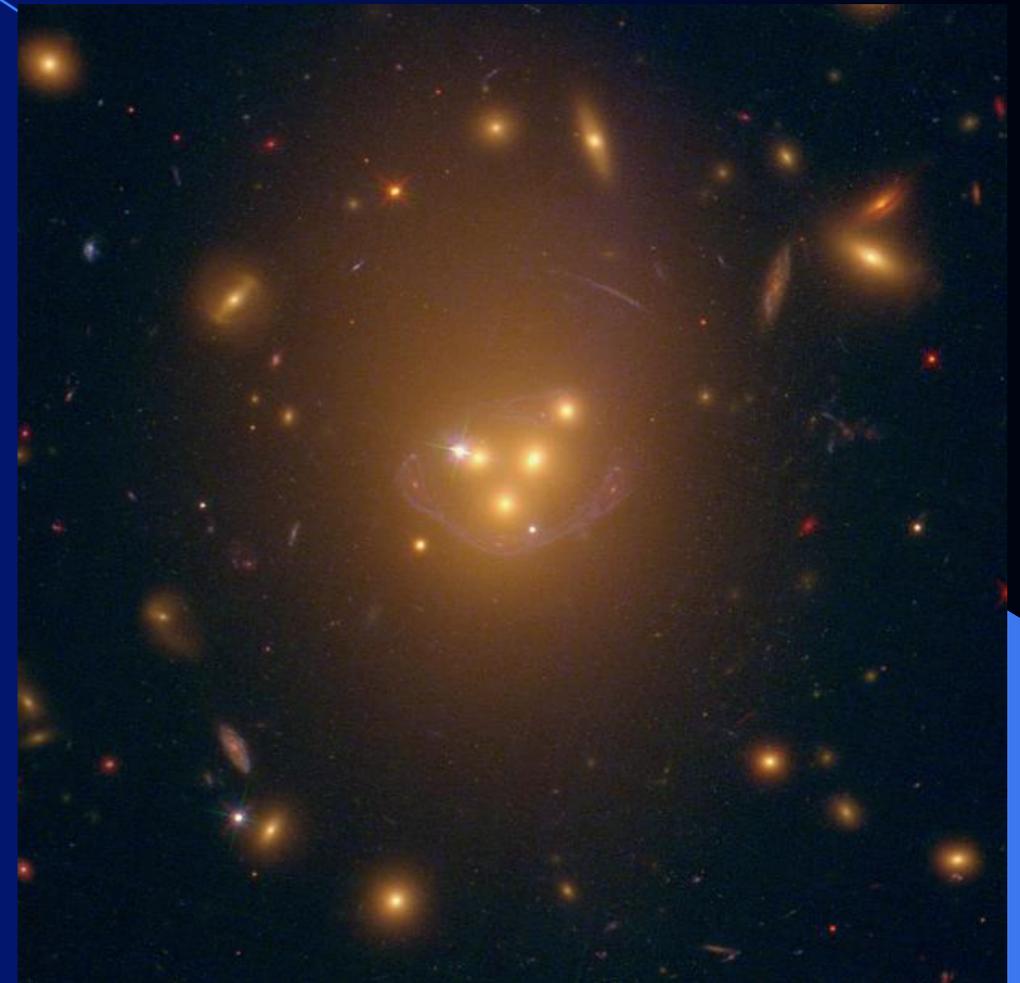
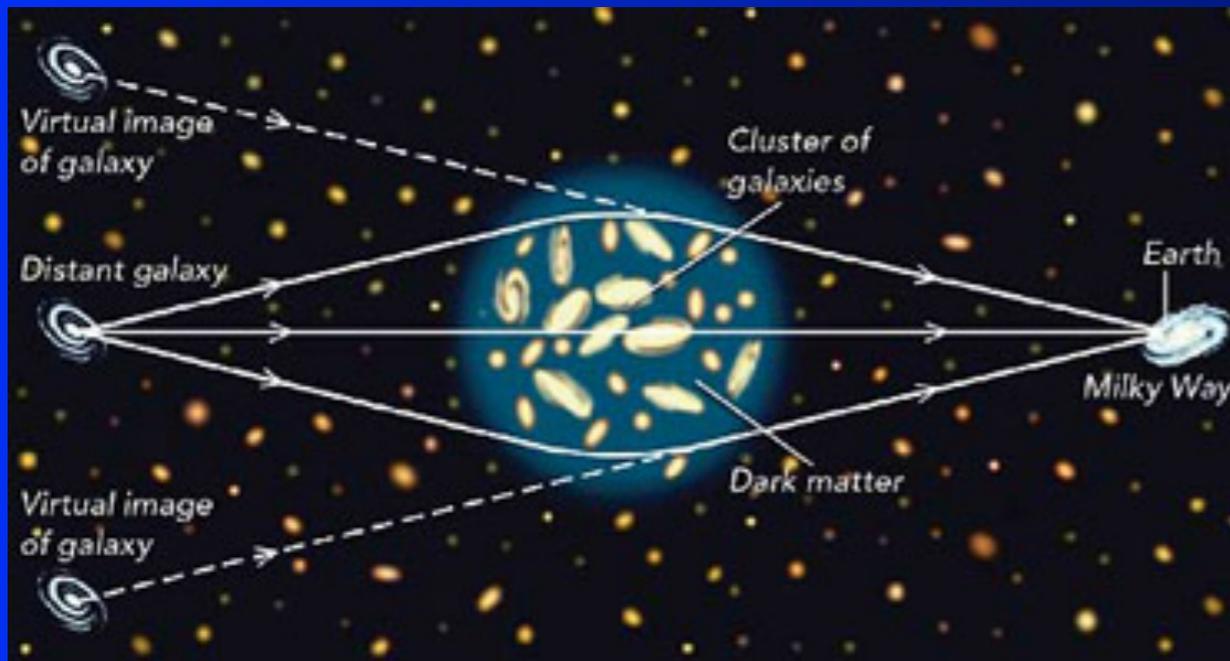


Галактика

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

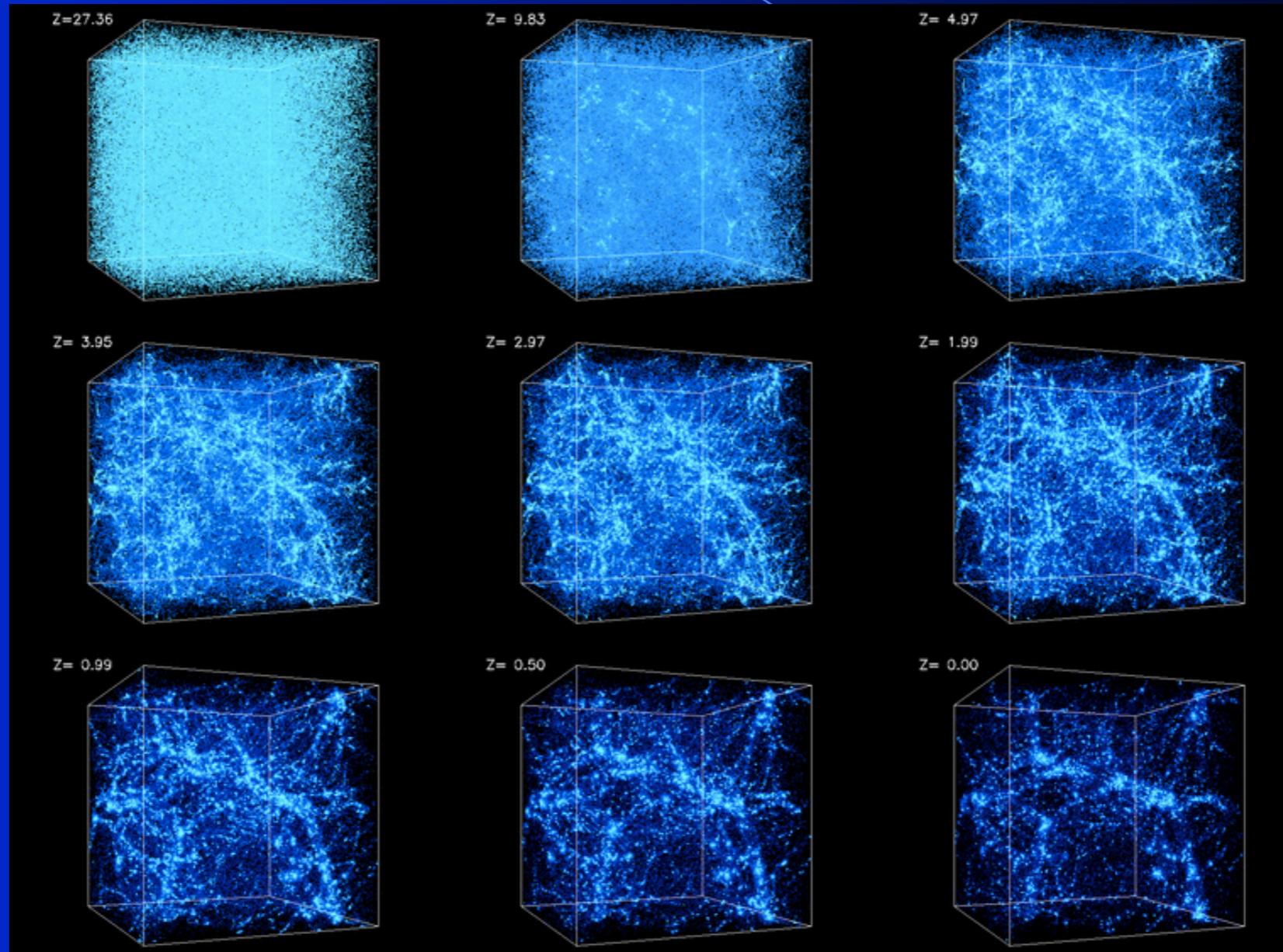
Гравитационные линзы



Следствие ОТО: отклонение света в гравитационном поле

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

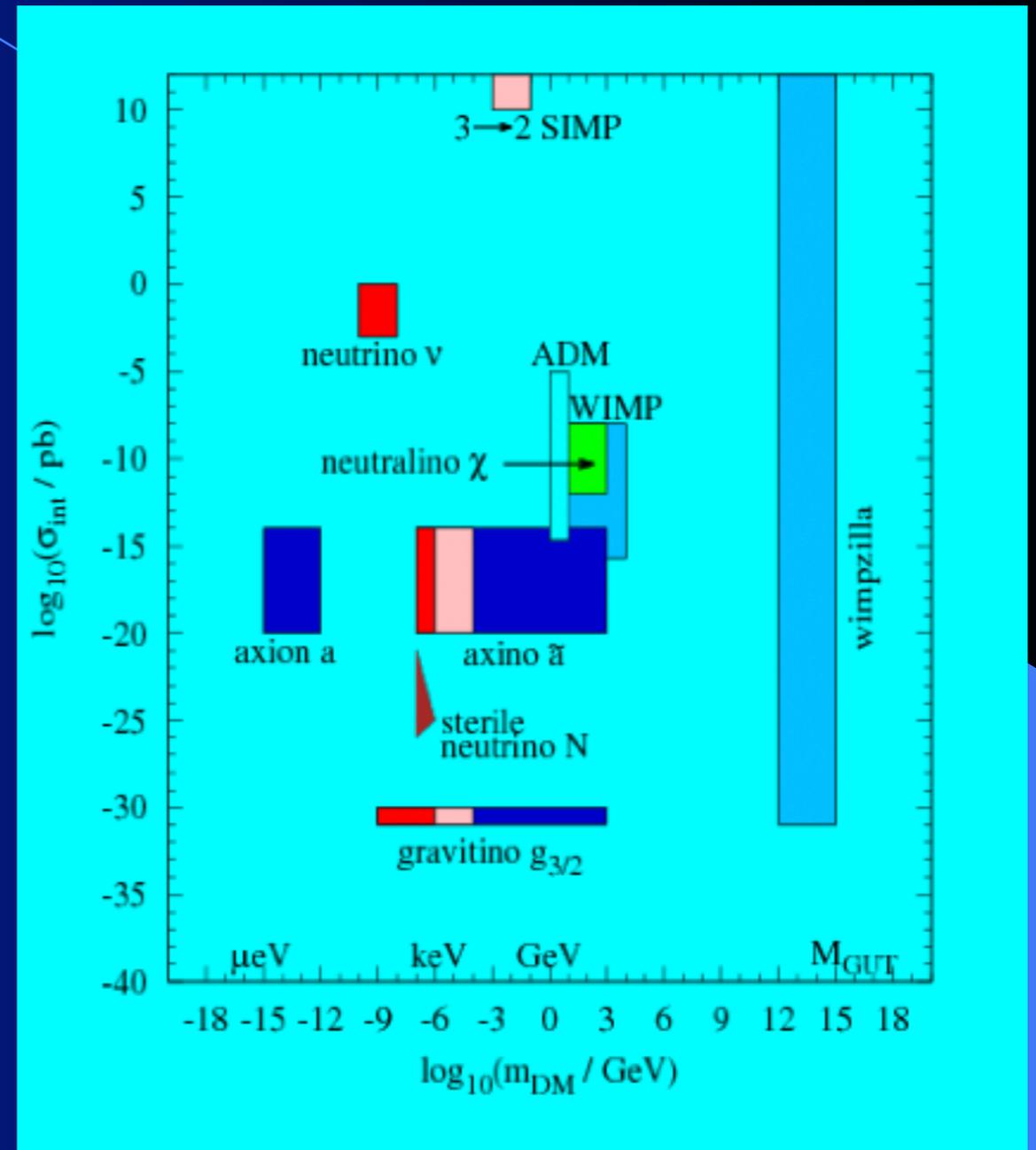
Образование крупномасштабных структур во Вселенной



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

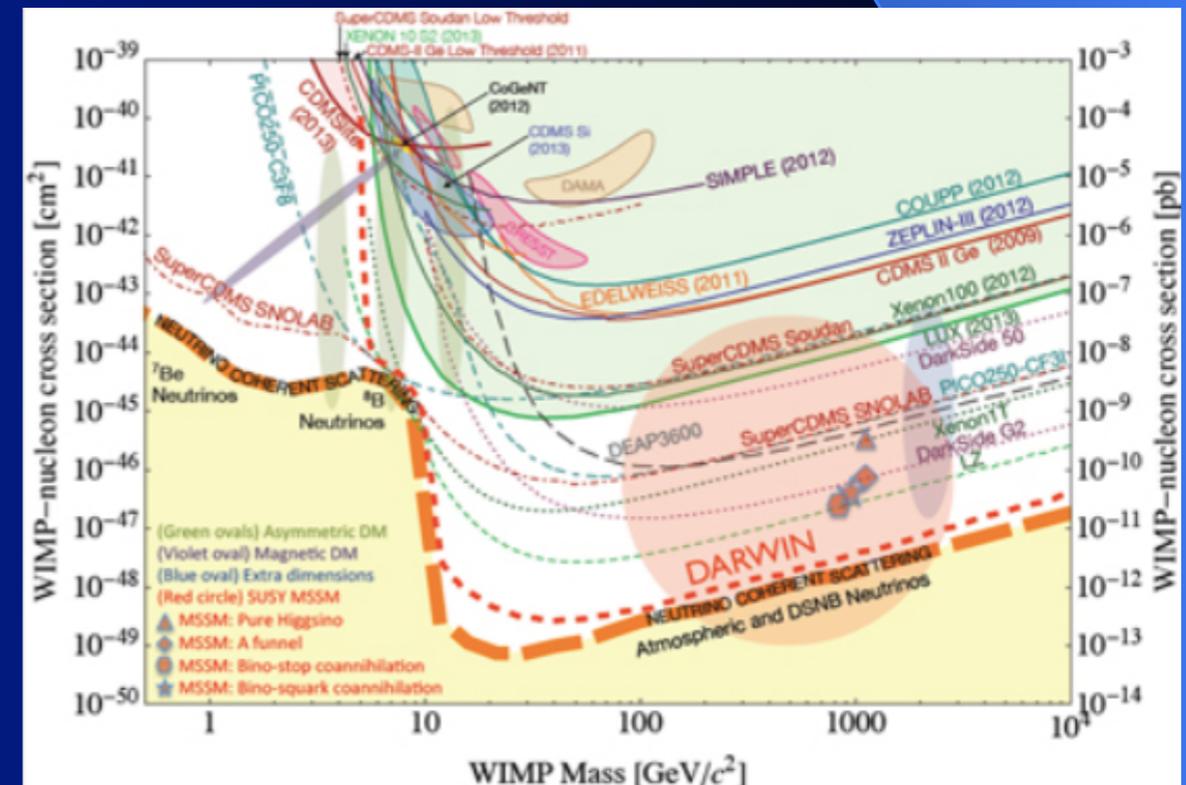
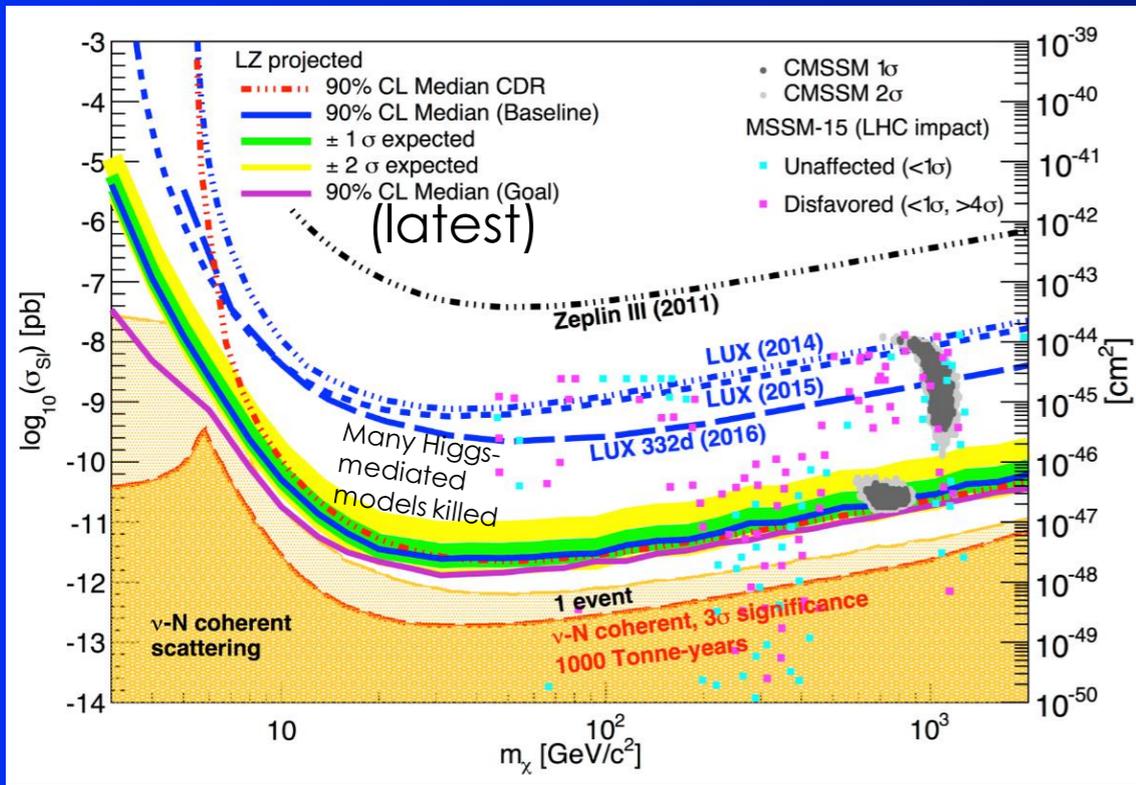
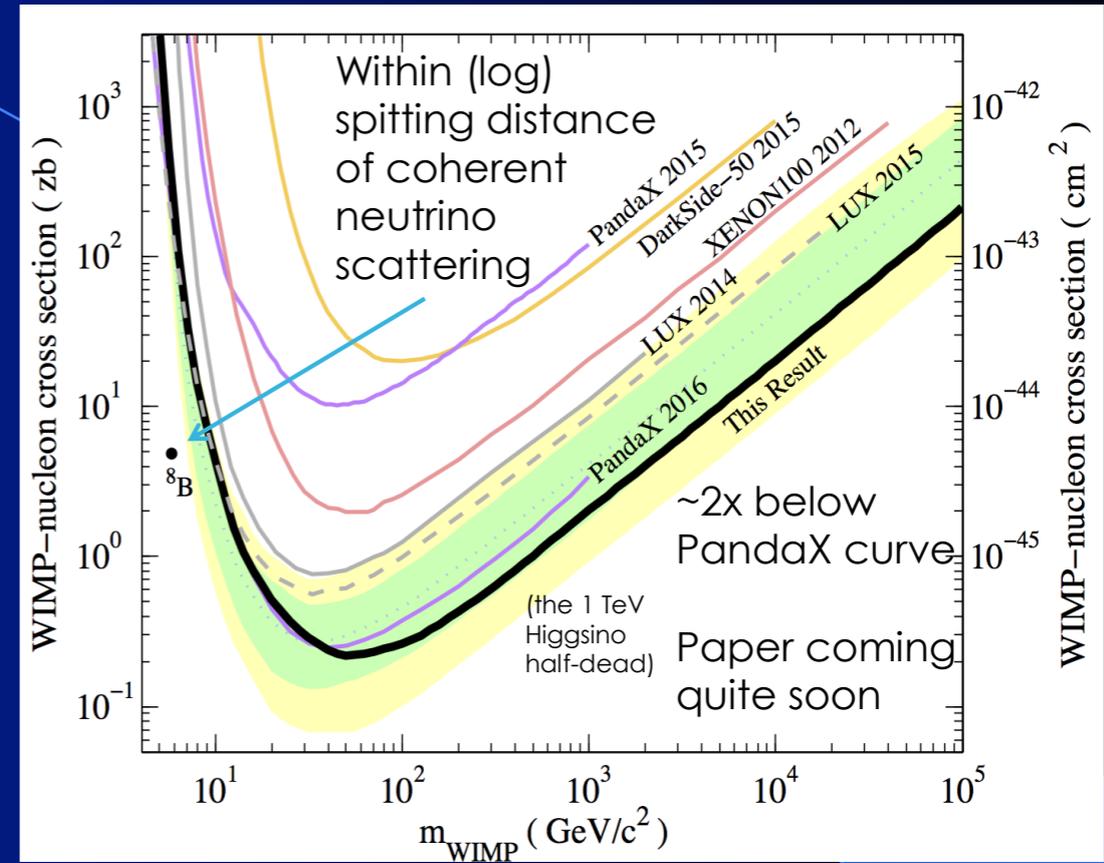
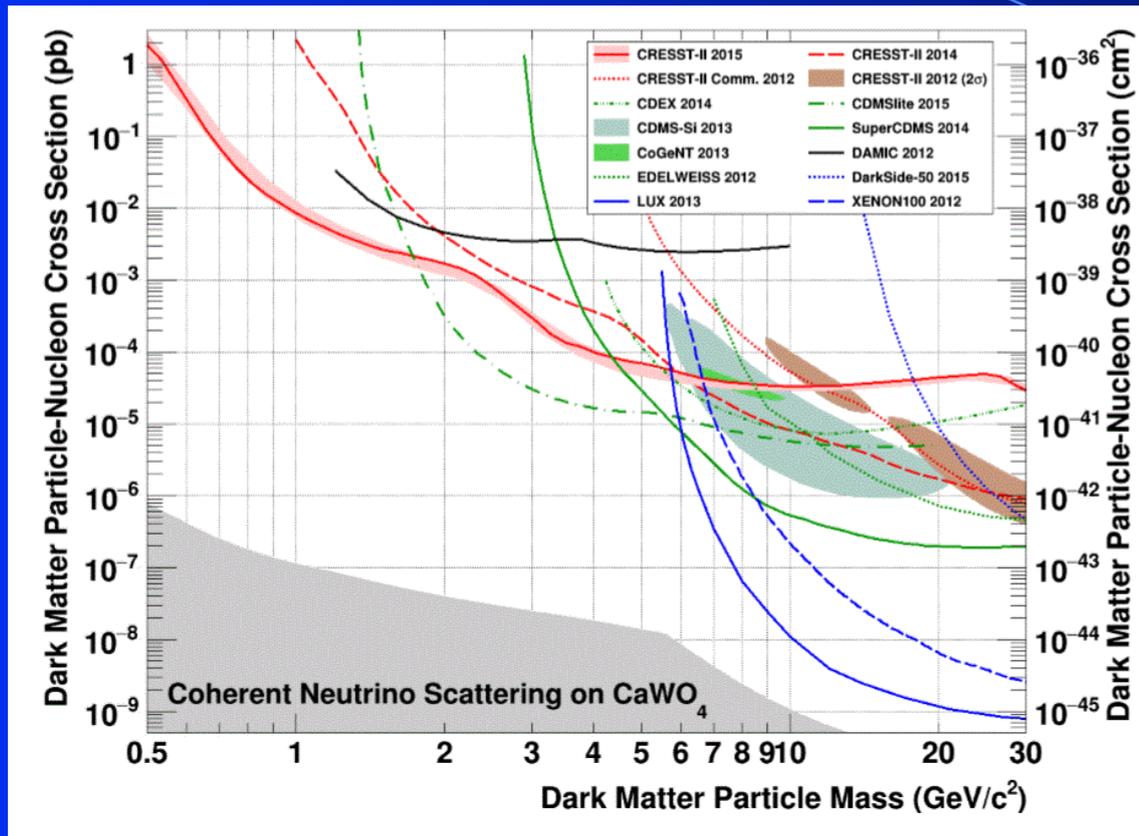
Частицы тёмной материи

Можно ли
зарегистрировать
частицу темной
материи?

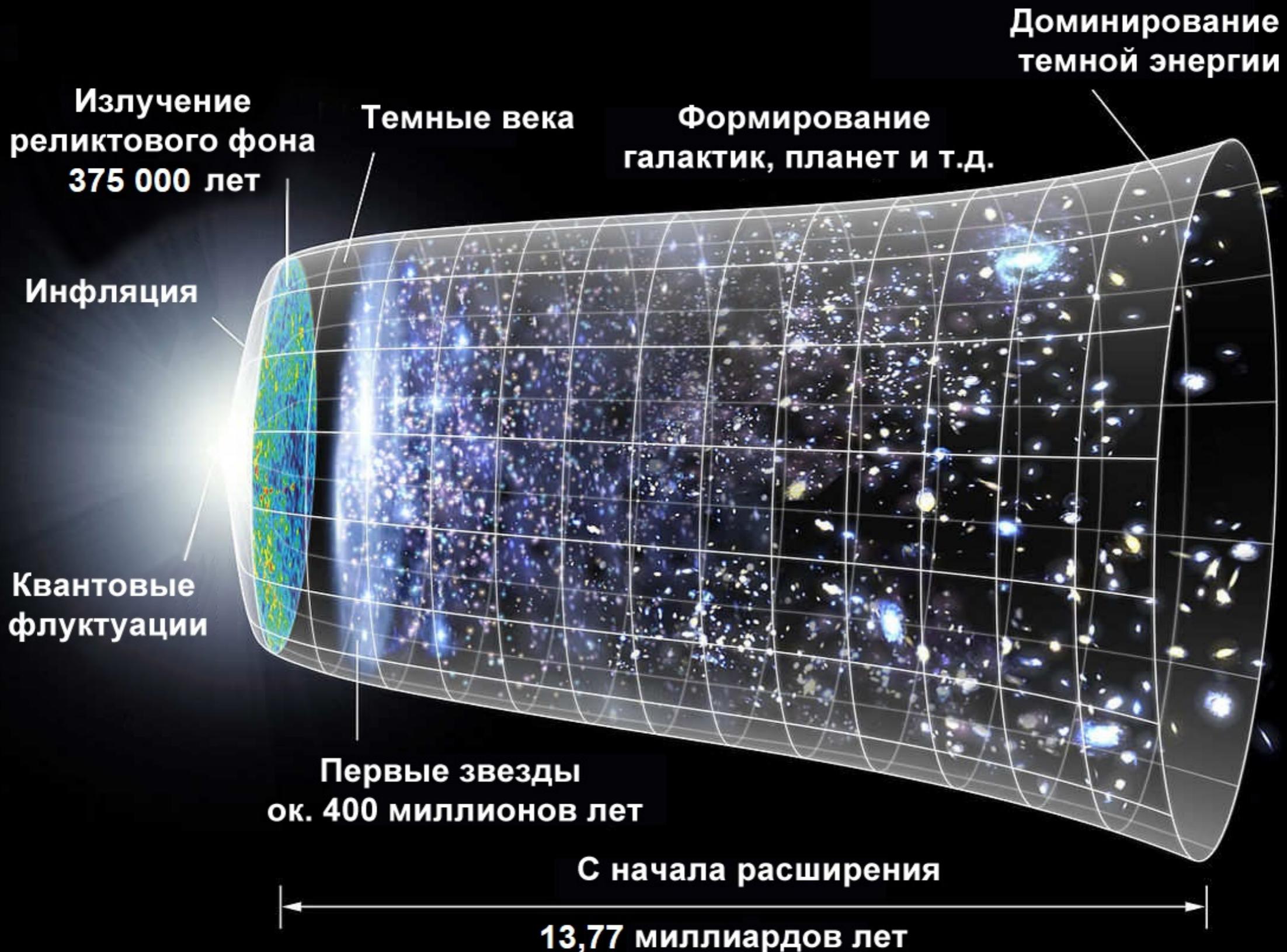


Если это WIMP, то её можно обнаружить средствами физики элементарных частиц. Если это лишь гравитационно взаимодействующая частица, то обнаружение сильно затруднено₃₄

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ



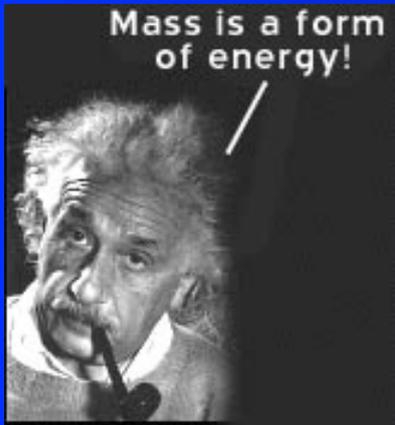
Эволюция Вселенной



Загадка № 5:

Что вызывает ускоренное расширение Вселенной?

Почему космологическая постоянная такая маленькая?



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

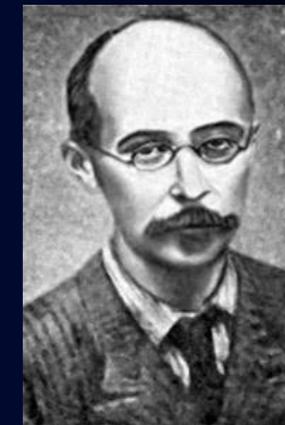
Приводит к антигравитации, что порождает ускоренное расширение Вселенной

Чтобы получить ~ 70 % вклада в энергетический баланс Вселенной Λ должна быть порядка $(10^{-4} \text{ эв})^2$

«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

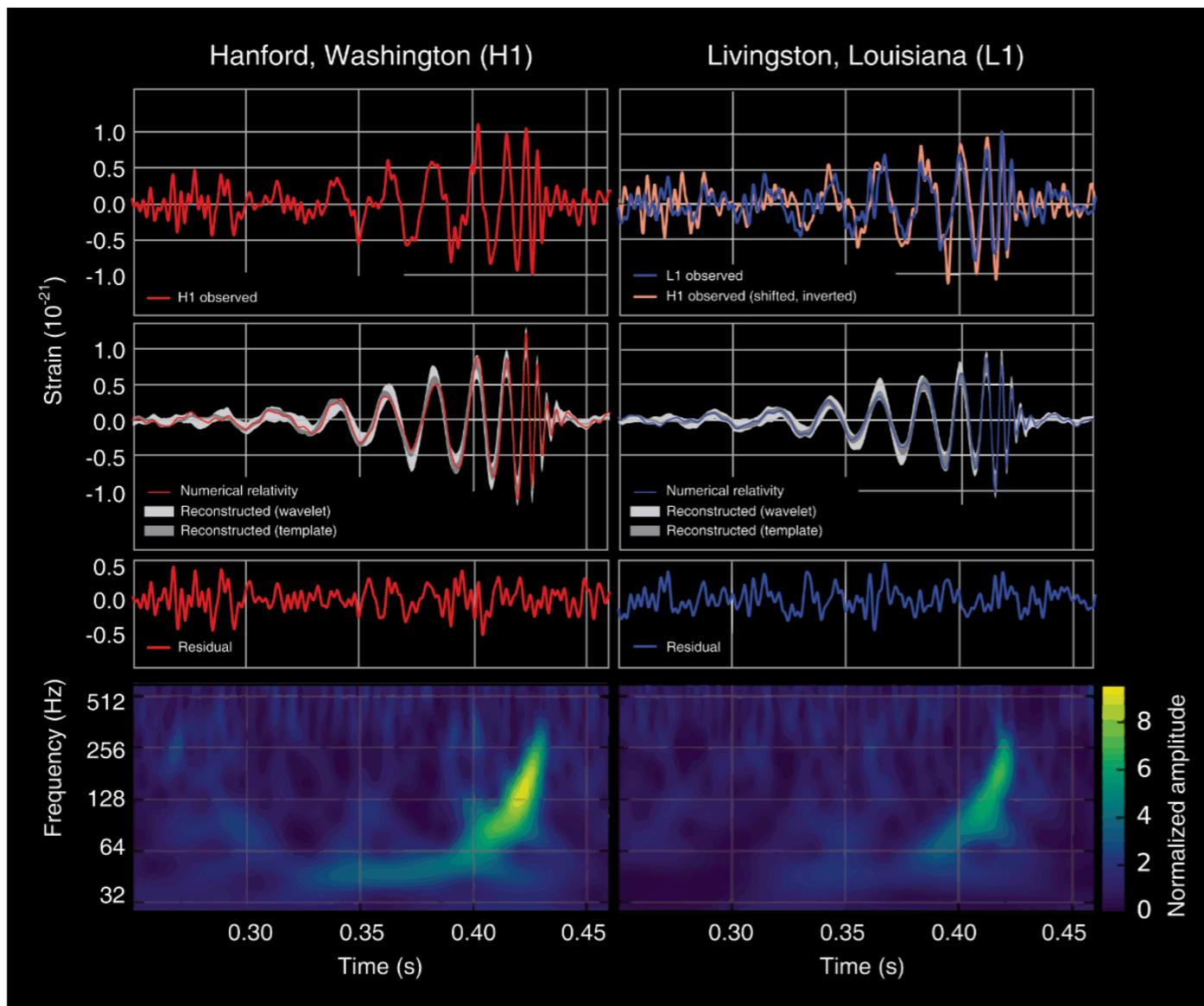
H Параметр Хаббла

P Плотность

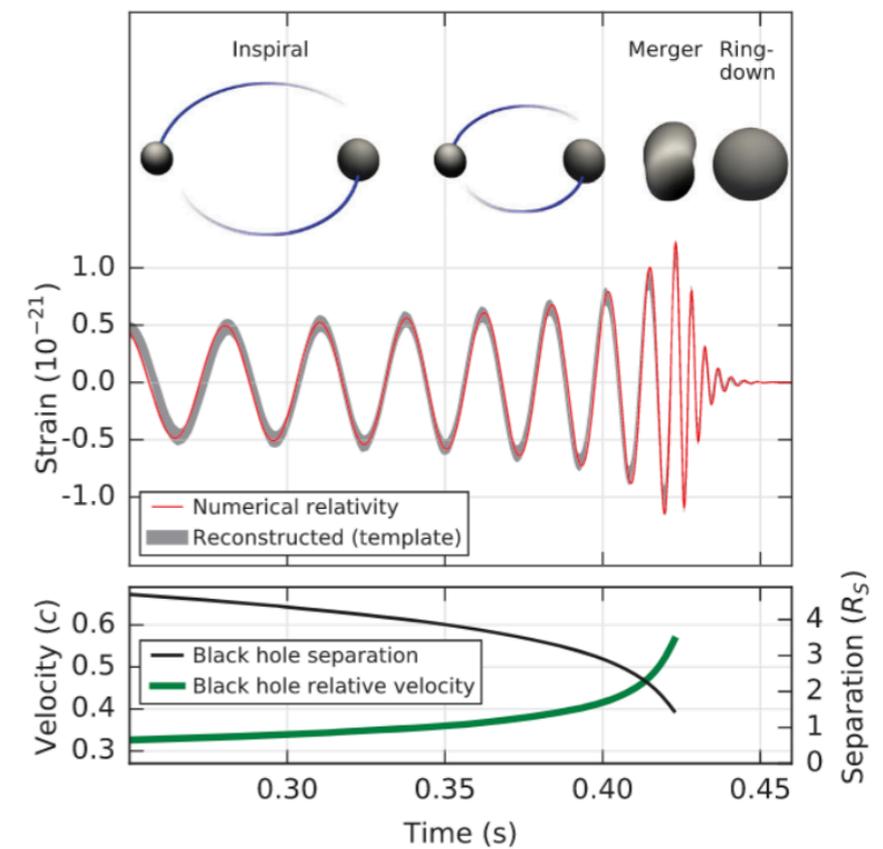
Λ Космологическая постоянная

ρ Давление

GW150914: Первое детектирование гравитационных волн



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

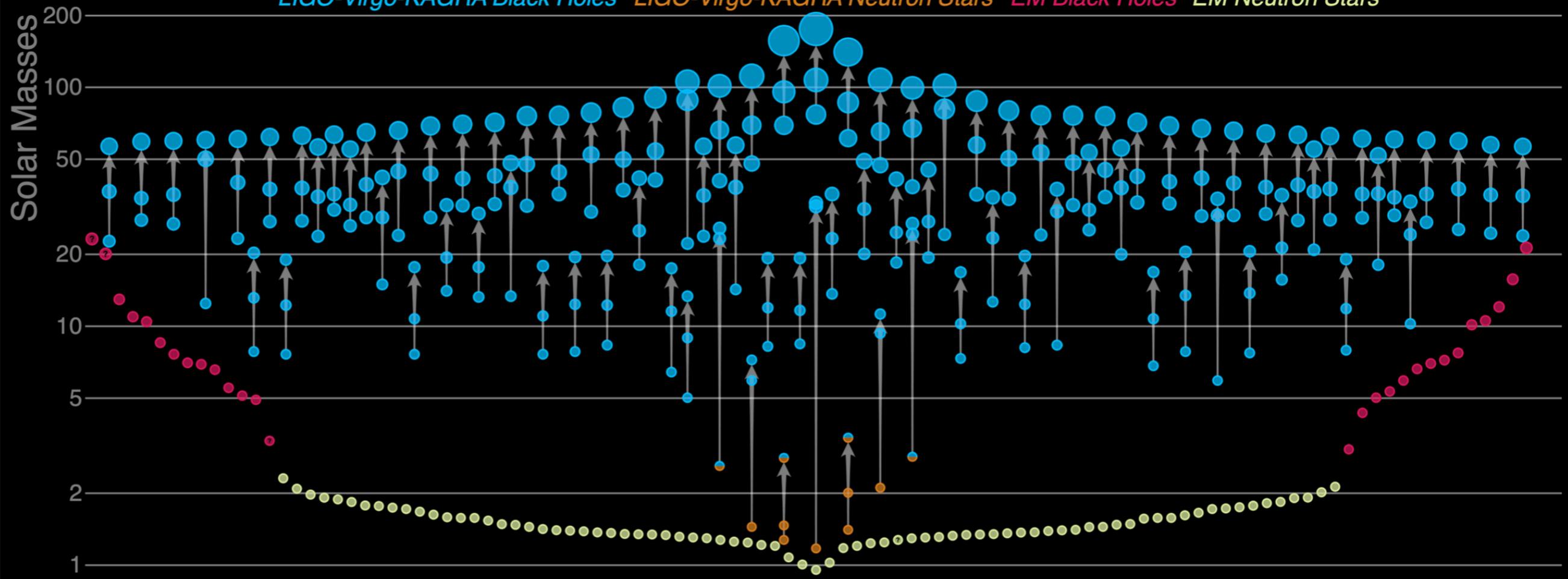


Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

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>

Реликтовые гравитационные волны

Gravitational waves (GW)

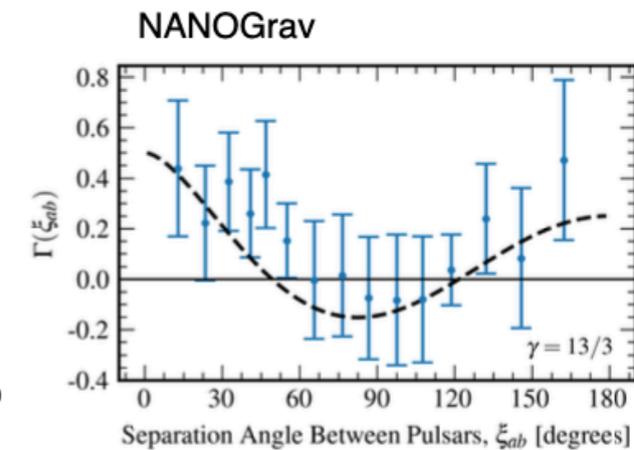
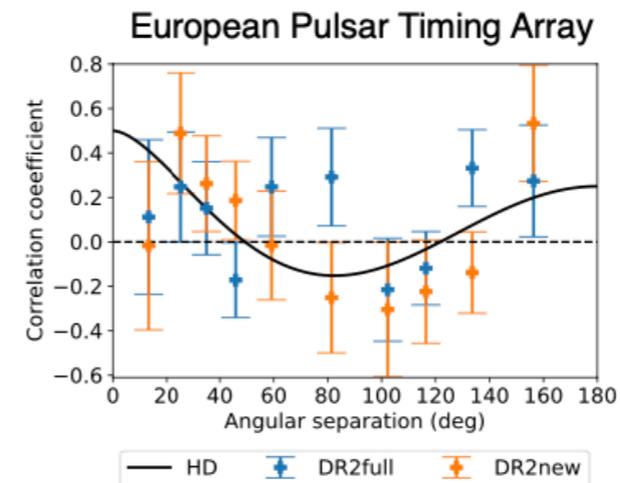
Antoine Petiteau, Jishnu Suresh, Sonali Verma

Evidence for stochastic gravitational wave background in the nHz range

by four groups analysing radio astronomy pulsar (dense neutron stars) data (Pulsar Timing Array experiments)



For an isotropic GW background, characteristic spatial correlation (Hellings-Down curve) — tricky analysis



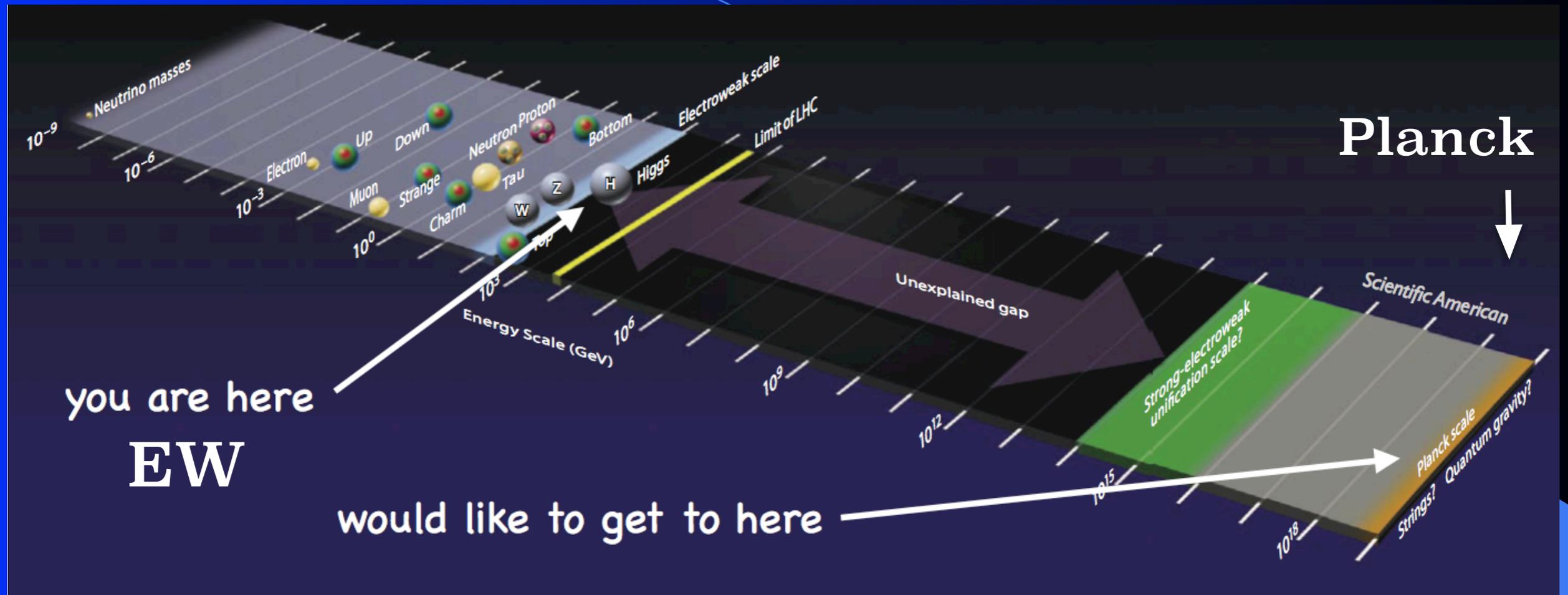
Angular-separation-binned inter-pulsar correlations, The dashed black line shows the Hellings-Downs correlation pattern [Left: arXiv:2306.16214, right: arXiv:2306.16213]

Both collaborations find $\sim 3\sigma$ evidence, but significance is noise model dependent. Important to analyse the combined data (IPTA) to better understand the signal

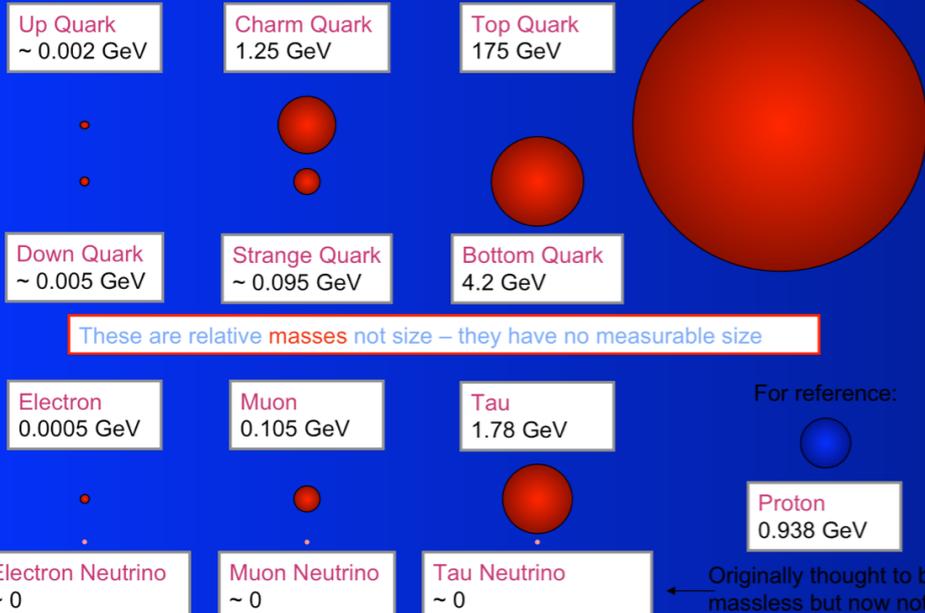


*Если новая физика за
пределами Стандартной
модели?*

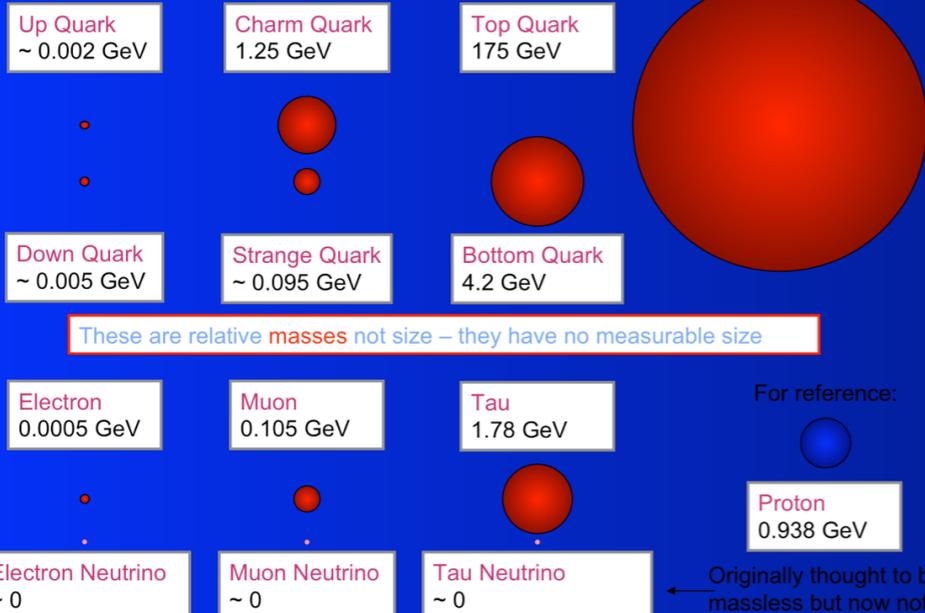
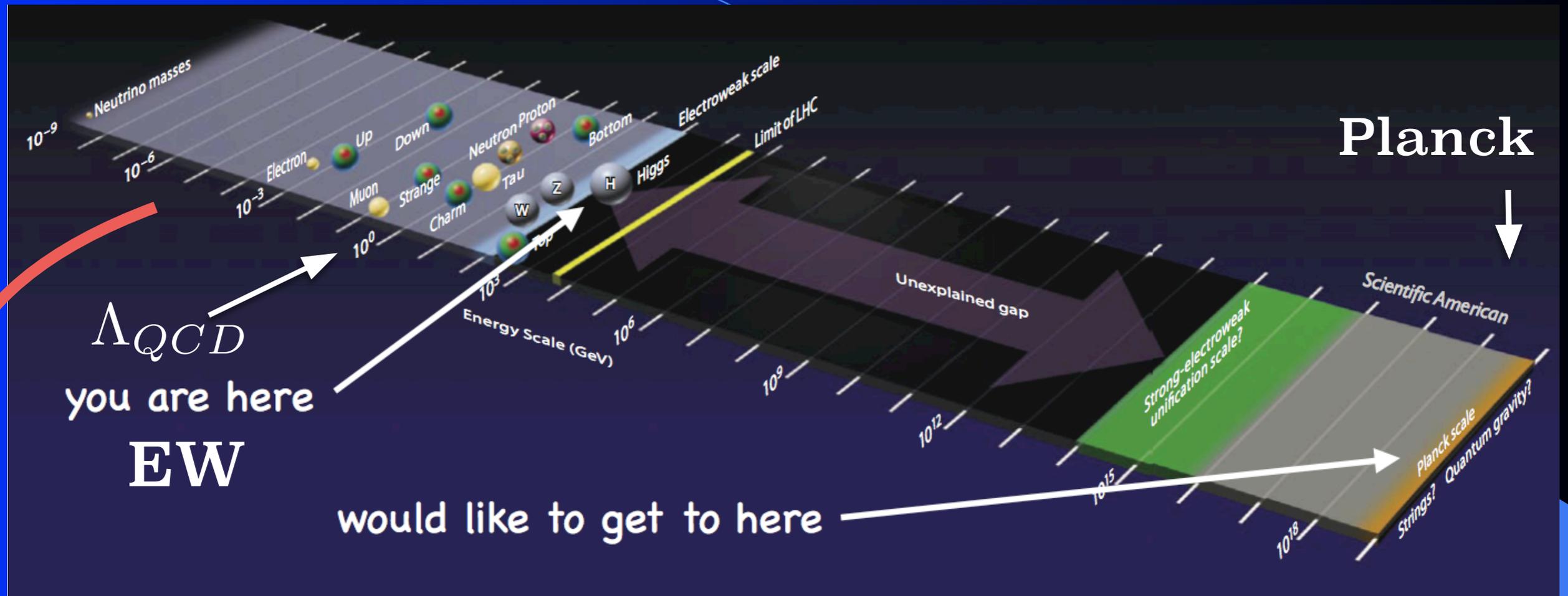
Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



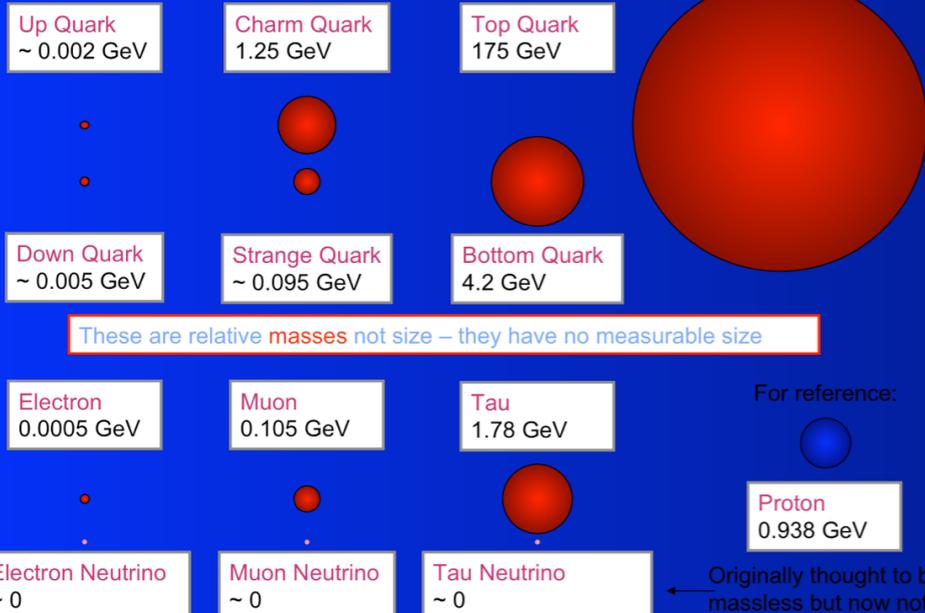
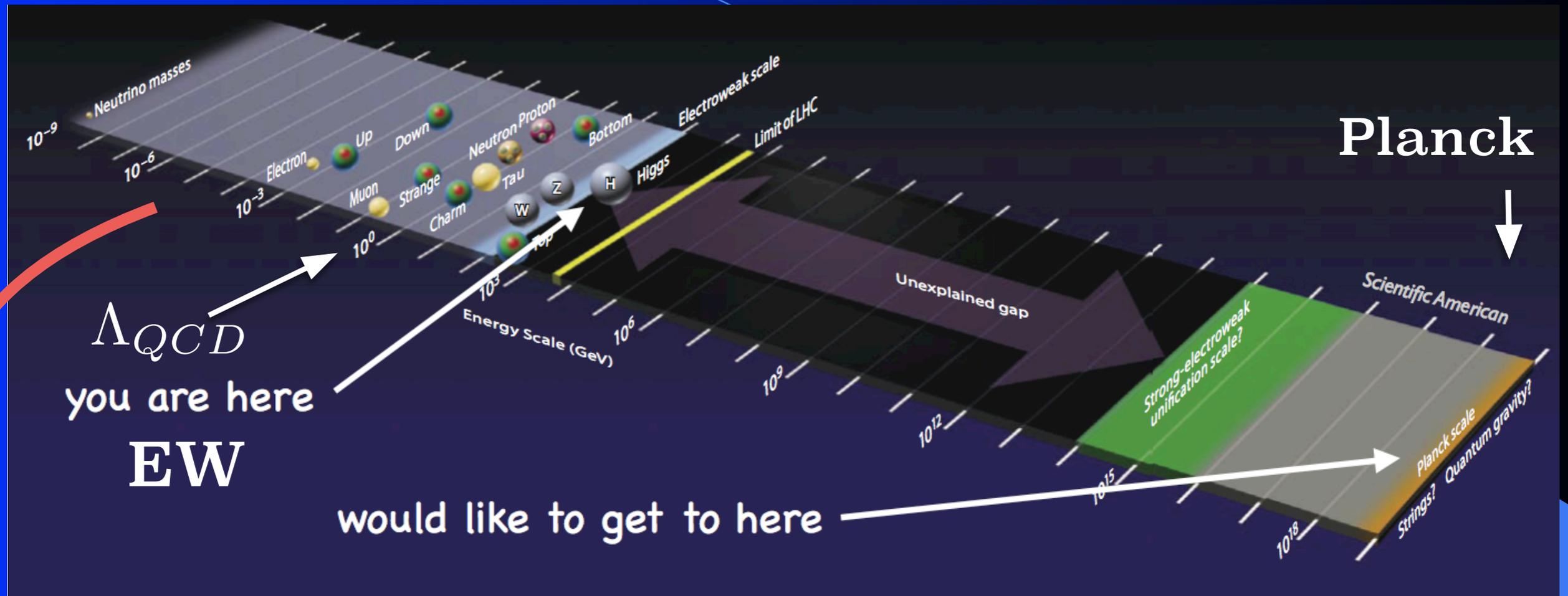
Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?

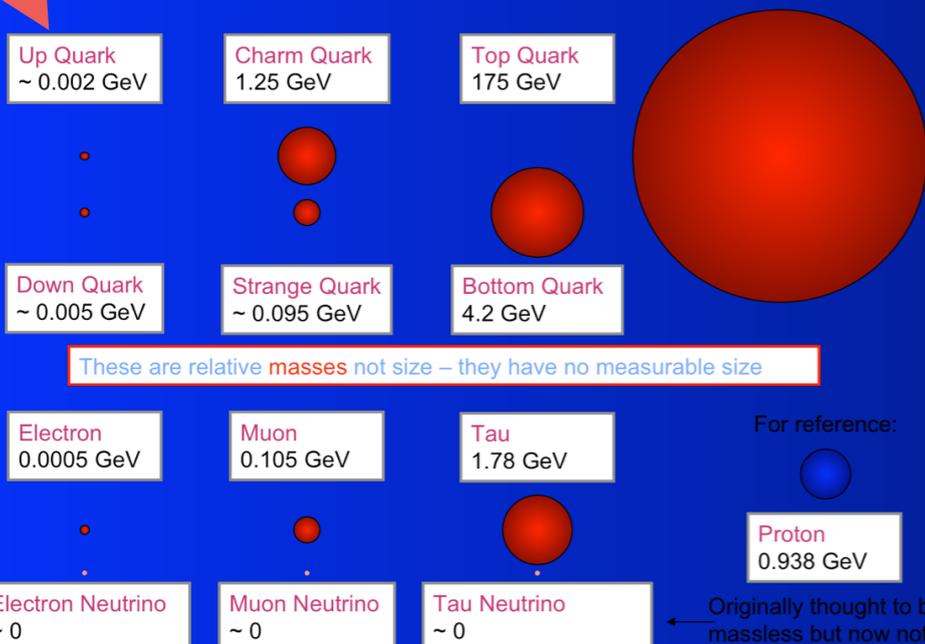


Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



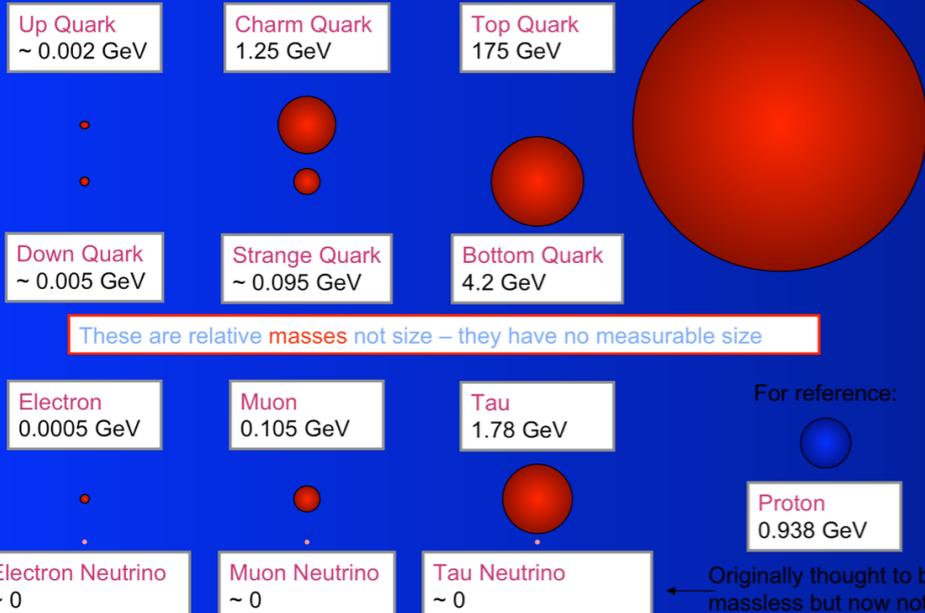
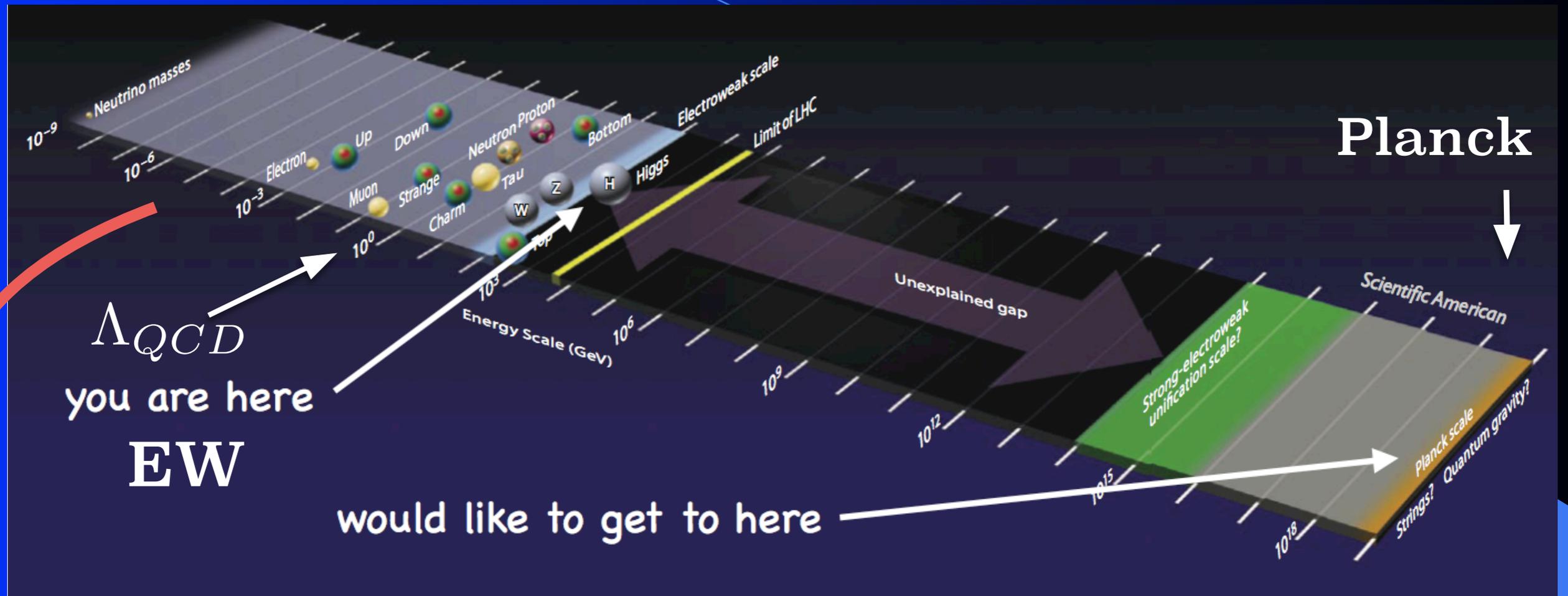
Планковская шкала ~ 10^{19} GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



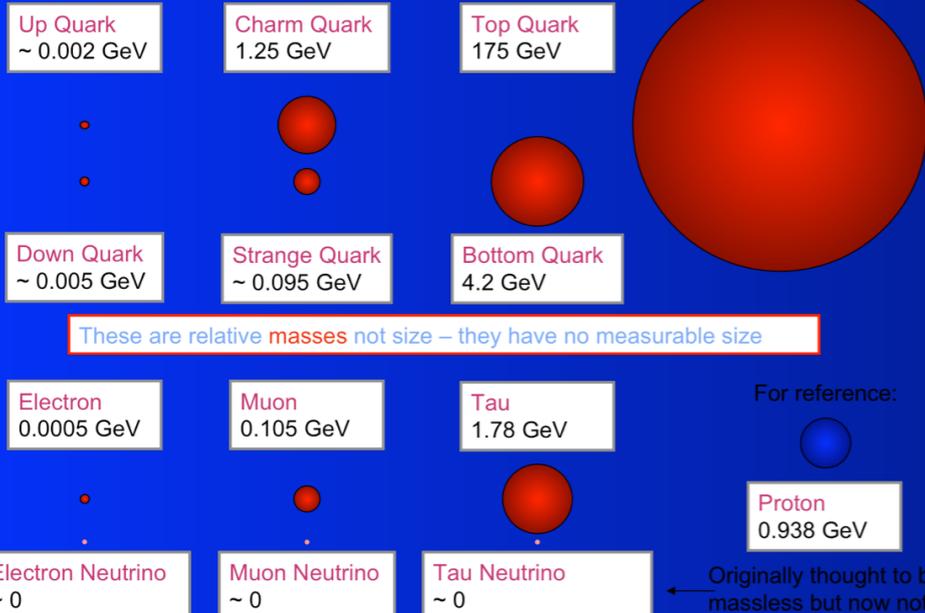
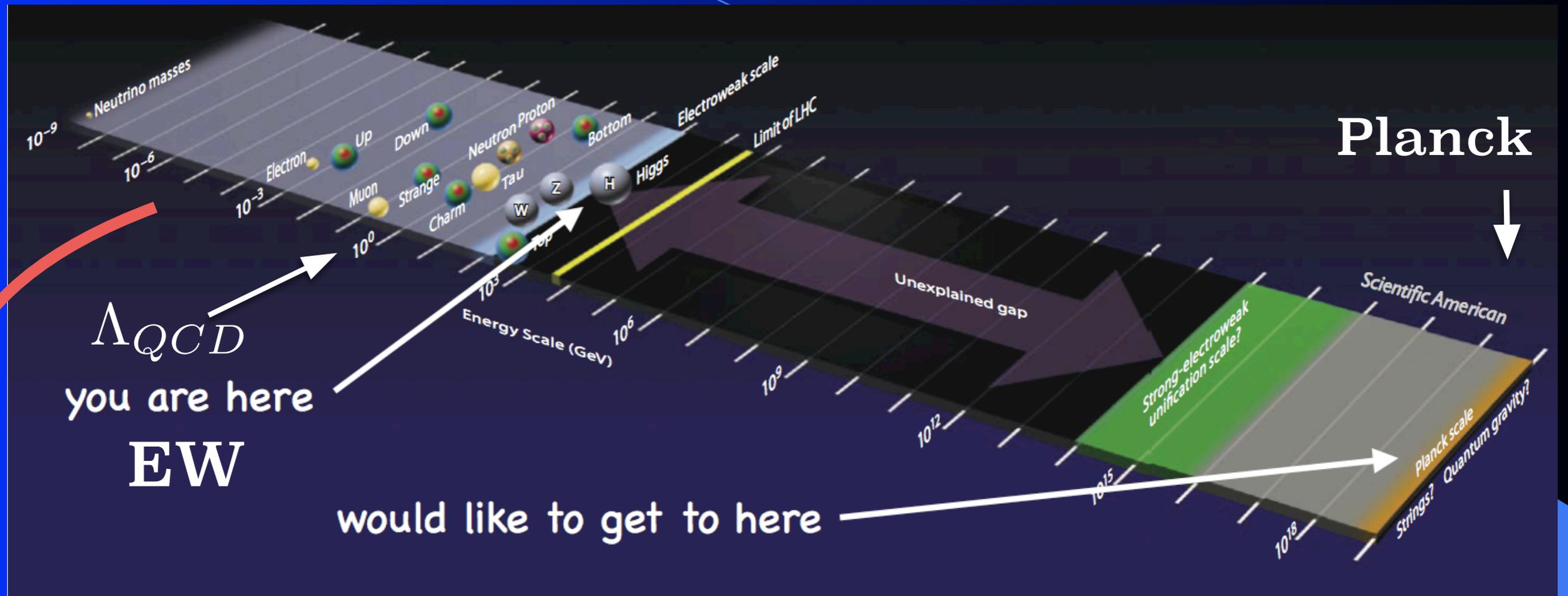
Струнная шкала ~ 10¹⁶ GeV
Планковская шкала ~ 10¹⁹ GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



Шкала ТВО ~ 10 GeV
Струнная шкала ~ 10 GeV
Планковская шкала ~ 10 GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



↑ Майорановская шкала ~ 10 GeV

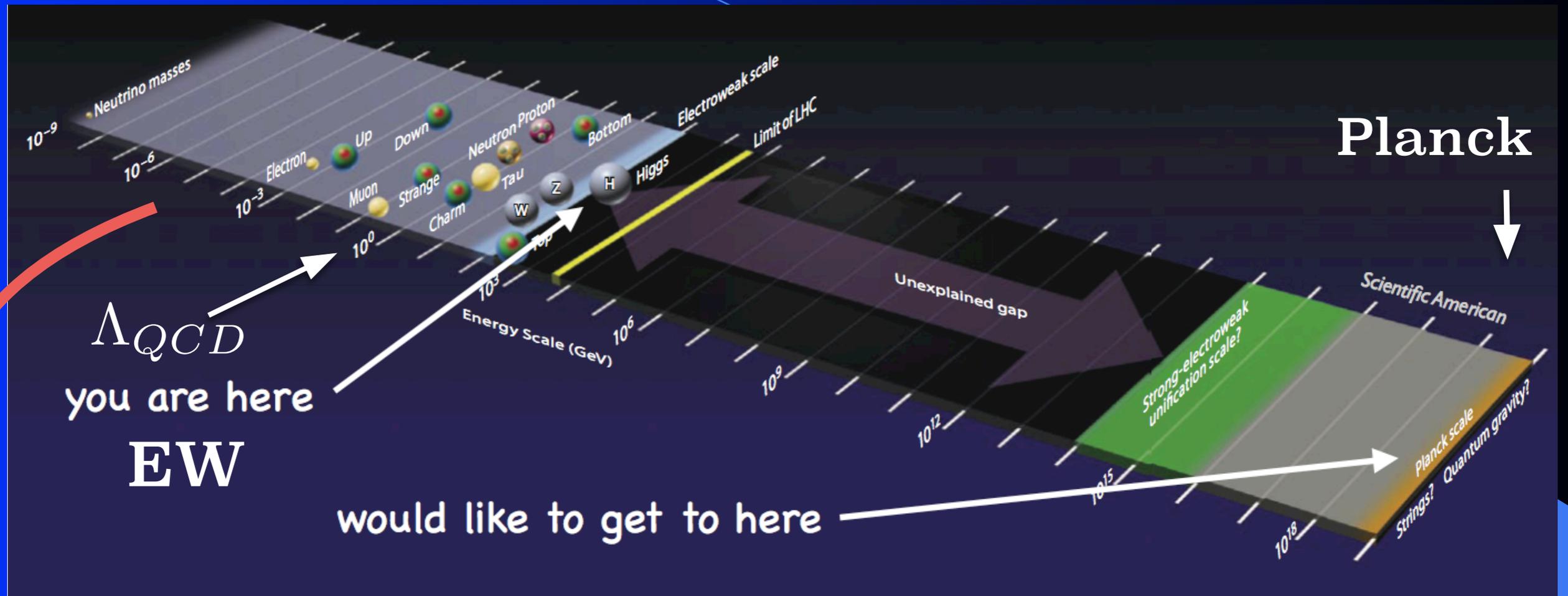
↑ Шкала ТВО ~ 10 GeV

↑ Струнная шкала ~ 10 GeV

↑ Планковская шкала ~ 10 GeV

↑ 10 GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



Up Quark ~ 0.002 GeV	Charm Quark 1.25 GeV	Top Quark 175 GeV
Down Quark ~ 0.005 GeV	Strange Quark ~ 0.095 GeV	Bottom Quark 4.2 GeV
Electron 0.0005 GeV	Muon 0.105 GeV	Tau 1.78 GeV
Electron Neutrino ~ 0	Muon Neutrino ~ 0	Tau Neutrino ~ 0

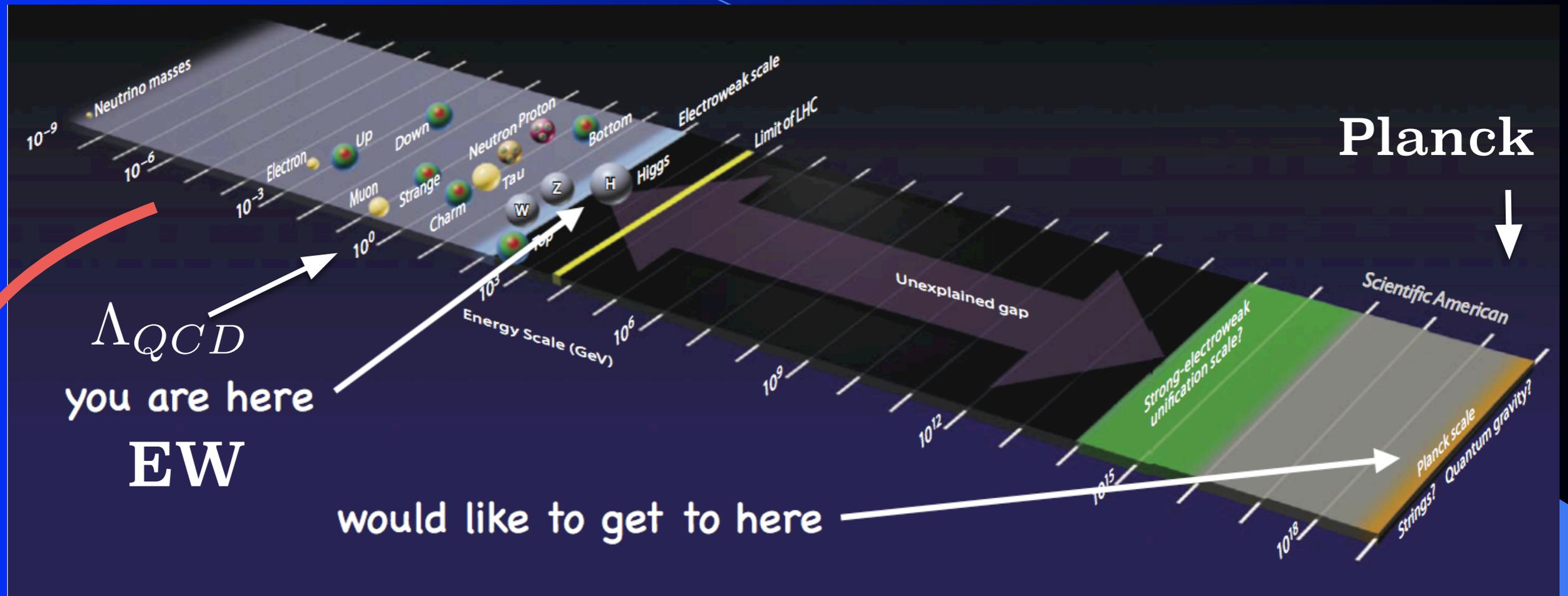
For reference:
Proton
0.938 GeV

Originally thought to be massless but now not

These are relative masses not size – they have no measurable size

Майорановская шкала ~ 10 GeV
 Шкала ТВО ~ 10 GeV
 Струнная шкала ~ 10 GeV
 Планковская шкала ~ 10 GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



Up Quark ~ 0.002 GeV	Charm Quark 1.25 GeV	Top Quark 175 GeV
Down Quark ~ 0.005 GeV	Strange Quark ~ 0.095 GeV	Bottom Quark 4.2 GeV
Electron 0.0005 GeV	Muon 0.105 GeV	Tau 1.78 GeV
Electron Neutrino ~ 0	Muon Neutrino ~ 0	Tau Neutrino ~ 0

These are relative masses not size – they have no measurable size

For reference:
Proton
0.938 GeV

Originally thought to be massless but now not

Стабильность вакуума ~ 10 GeV

Майорановская шкала ~ 10 GeV

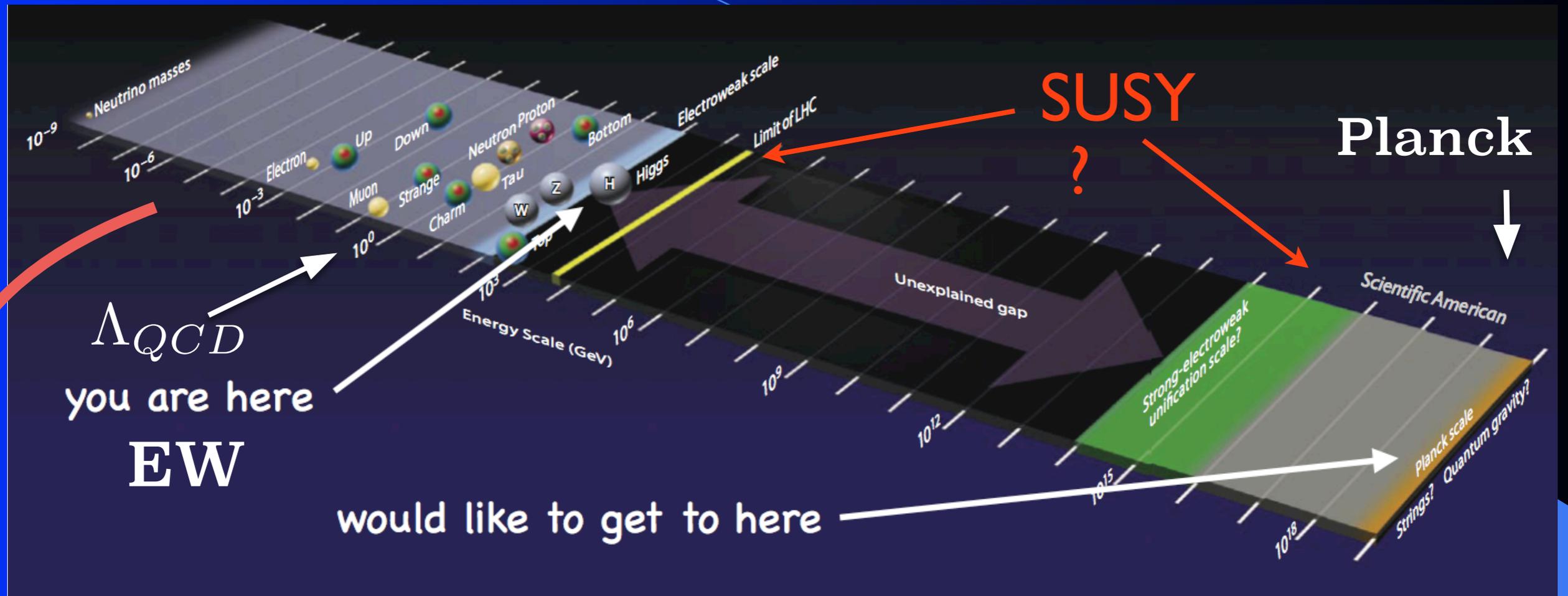
Шкала ТВО ~ 10 GeV

Струнная шкала ~ 10 GeV

Планковская шкала ~ 10 GeV

10 GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



Up Quark ~ 0.002 GeV	Charm Quark 1.25 GeV	Top Quark 175 GeV
Down Quark ~ 0.005 GeV	Strange Quark ~ 0.095 GeV	Bottom Quark 4.2 GeV
Electron 0.0005 GeV	Muon 0.105 GeV	Tau 1.78 GeV
Electron Neutrino ~ 0	Muon Neutrino ~ 0	Tau Neutrino ~ 0

For reference:
Proton
0.938 GeV

Originally thought to be massless but now not

These are relative masses not size – they have no measurable size

Майорановская шкала ~ 10 GeV
 Шкала ТВО ~ 10 GeV
 Струнная шкала ~ 10 GeV
 Планковская шкала ~ 10 GeV

Существует ли другая шкала энергий помимо электро-слабой и планковской?



Up Quark ~ 0.002 GeV	Charm Quark 1.25 GeV	Top Quark 175 GeV
Down Quark ~ 0.005 GeV	Strange Quark ~ 0.095 GeV	Bottom Quark 4.2 GeV
Electron 0.0005 GeV	Muon 0.105 GeV	Tau 1.78 GeV
Electron Neutrino ~ 0	Muon Neutrino ~ 0	Tau Neutrino ~ 0

For reference:
Proton
0.938 GeV

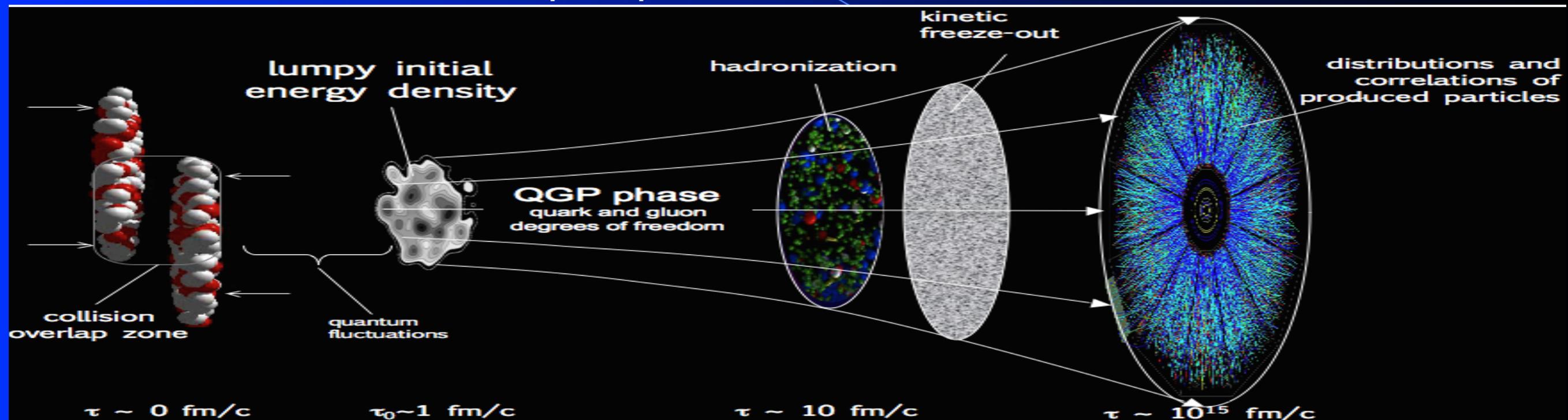
Originally thought to be massless but now not

These are relative masses not size – they have no measurable size

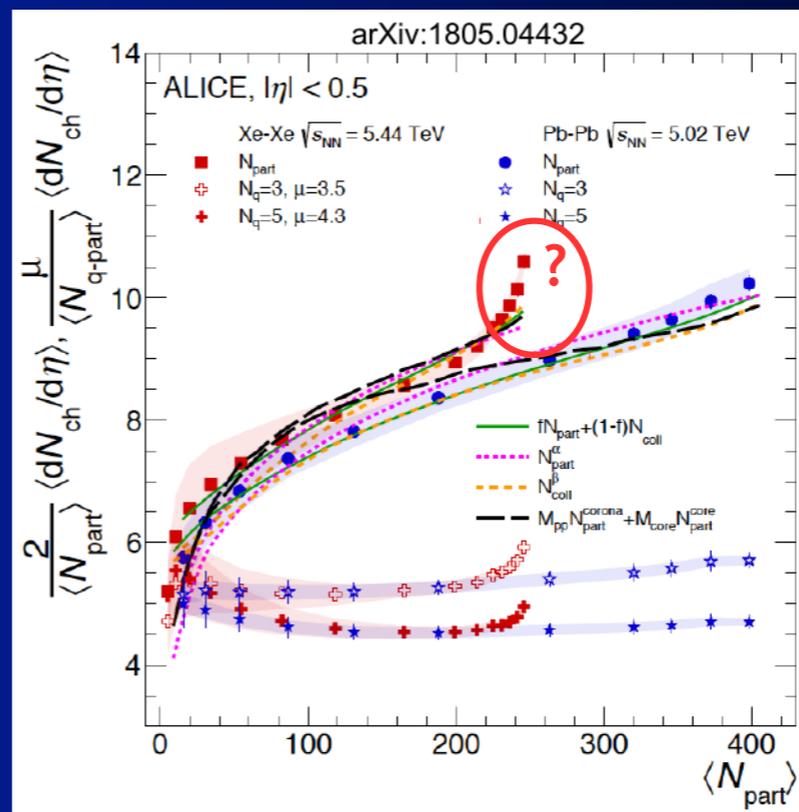
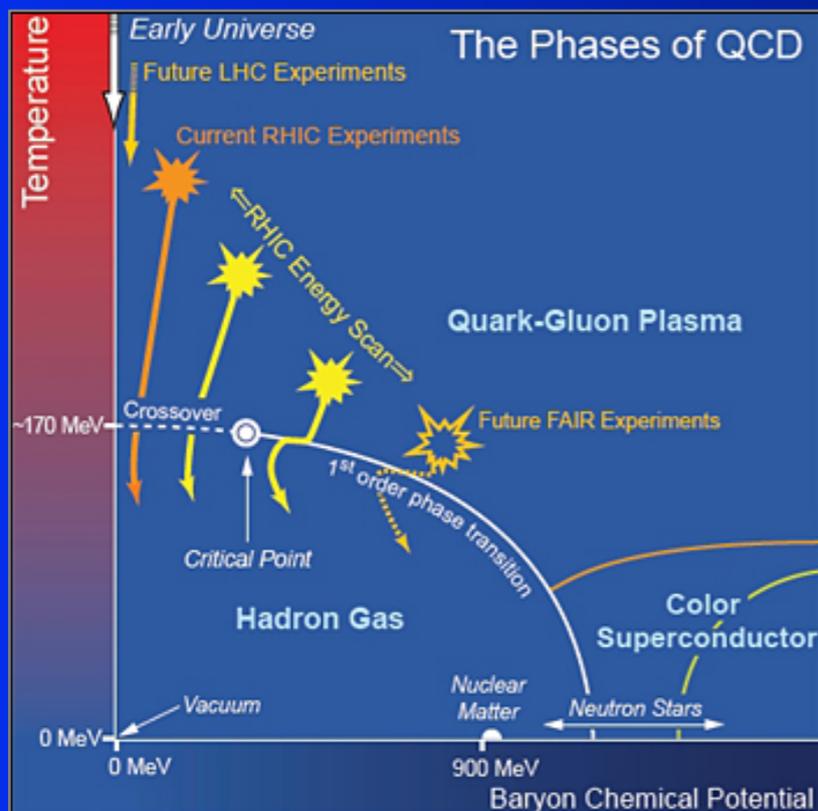
Стабильность вакуума ~ 10^{11} GeV
 Майорановская шкала ~ 10^{12} GeV
 Шкала ТВО ~ 10^{16} GeV
 Струнная шкала ~ 10^{18} GeV
 Планковская шкала ~ 10^{19} GeV

Физика тяжёлых ионов

Столкновения тяжёлых ионов: новые состояния вещества и новые явления при рекордных плотностях



Фазовая диаграмма КХД



Резкое возрастание множественности при центральном столкновении в XeXe - невидимое в PbPb

По какому пути пойти?

По какому пути пойти?



По какому пути пойти?

