



Стандартная модель фундаментальных взаимодействий

Дмитрий Казаков

ОИЯИ (Дубна)

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

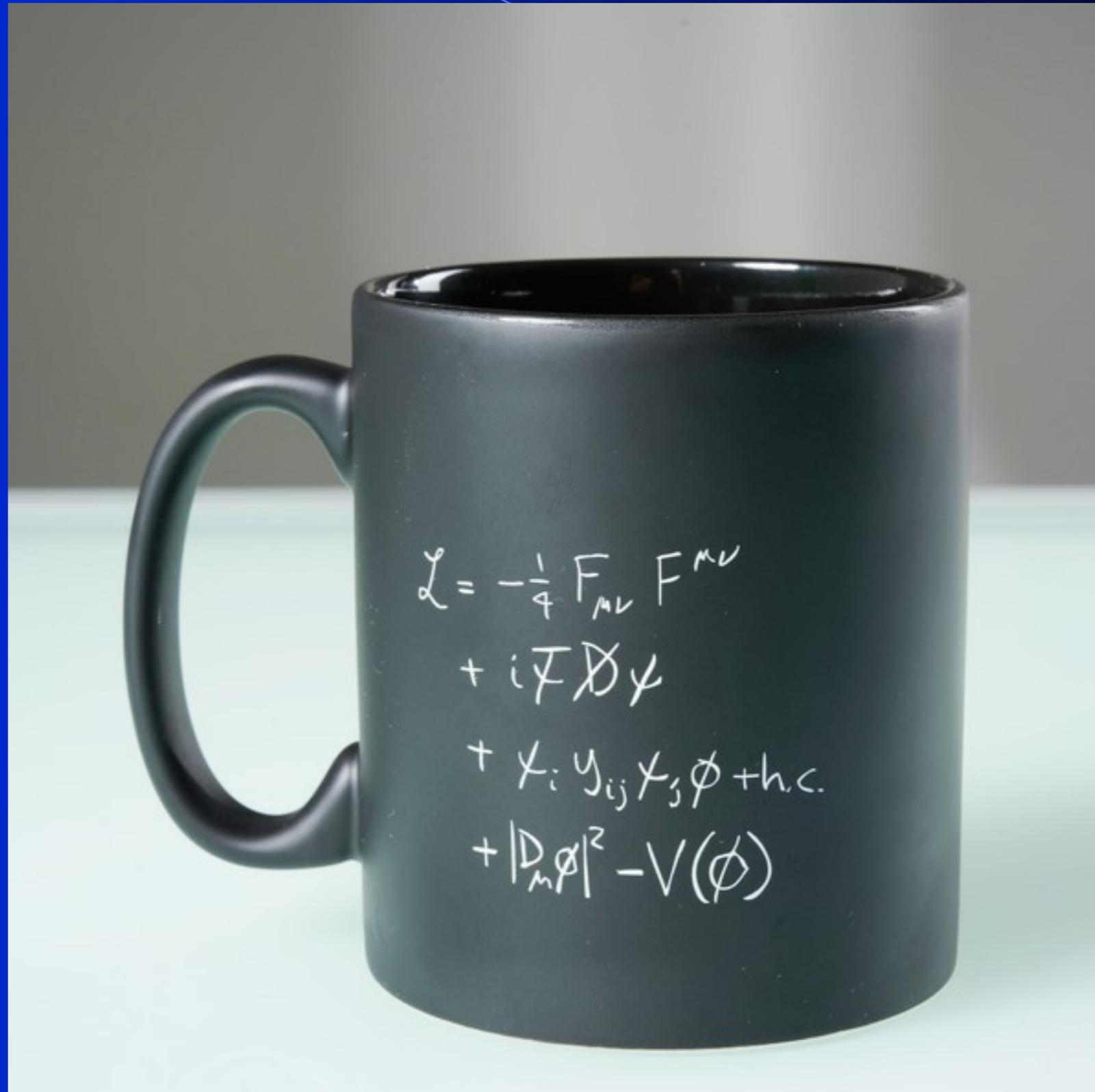
Гравитация

Стандартная Модель

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 \rightarrow Хиггсовский бозон
- Смешивания ароматов в заряженных токах (матрицы СКМ и PMNS)
- CP нарушение за счёт фазовых факторов
- Удержание кварков и глюонов внутри адронов
- Сохранение барионного и лептонного чисел
- CPT инвариантность \rightarrow 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

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

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

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

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

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

$$\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 s_w A_\mu (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \frac{1}{2} g^2 s_w^2 (2s_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^0 \phi^0 + \\ & g^2 s_w^2 A_\mu (\gamma \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \gamma) + \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!

Квантовые числа полей материи

➤ Кварки

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

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

➤ Лептоны

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

$$N_R = \nu_R ?$$

$$E_R = e_R$$

триплеты

V-A токи в
слаб вз-иях

SU(3)_c

SU(2)_L

U_Y(1)

дублеты

3

2

1/3

3

1

4/3

3

1

-2/3

Слабый изоспин

синглеты

$\frac{1}{2}$
 $-\frac{1}{2}$
 0
 0

T_3
 T_3

1

2

-1

1

1

0

1

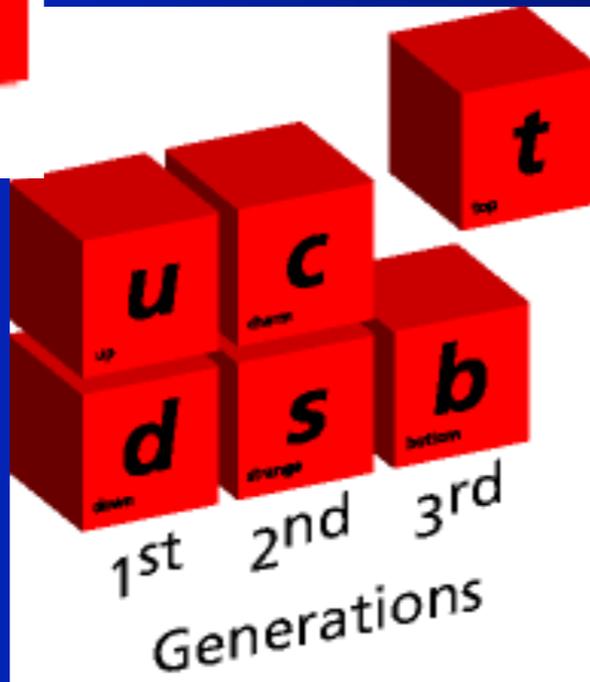
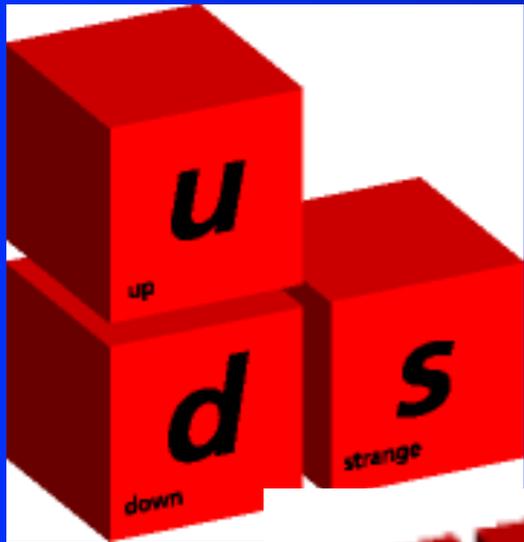
1

-2

Электрический
заряд

$$Q = T_3 + Y/2$$

Кварки — “кирпичики мироздания”

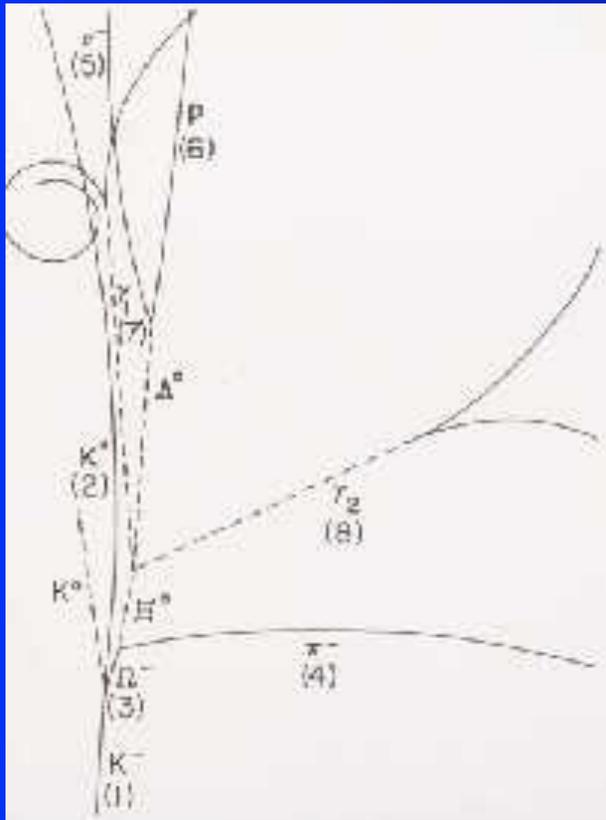


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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

$(\frac{2}{3})$ up	$(\frac{2}{3})$ charm	$(\frac{2}{3})$ top
		
$(-\frac{1}{3})$ down		
$(-\frac{1}{3})$	$(-\frac{1}{3})$	$(-\frac{1}{3})$

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.

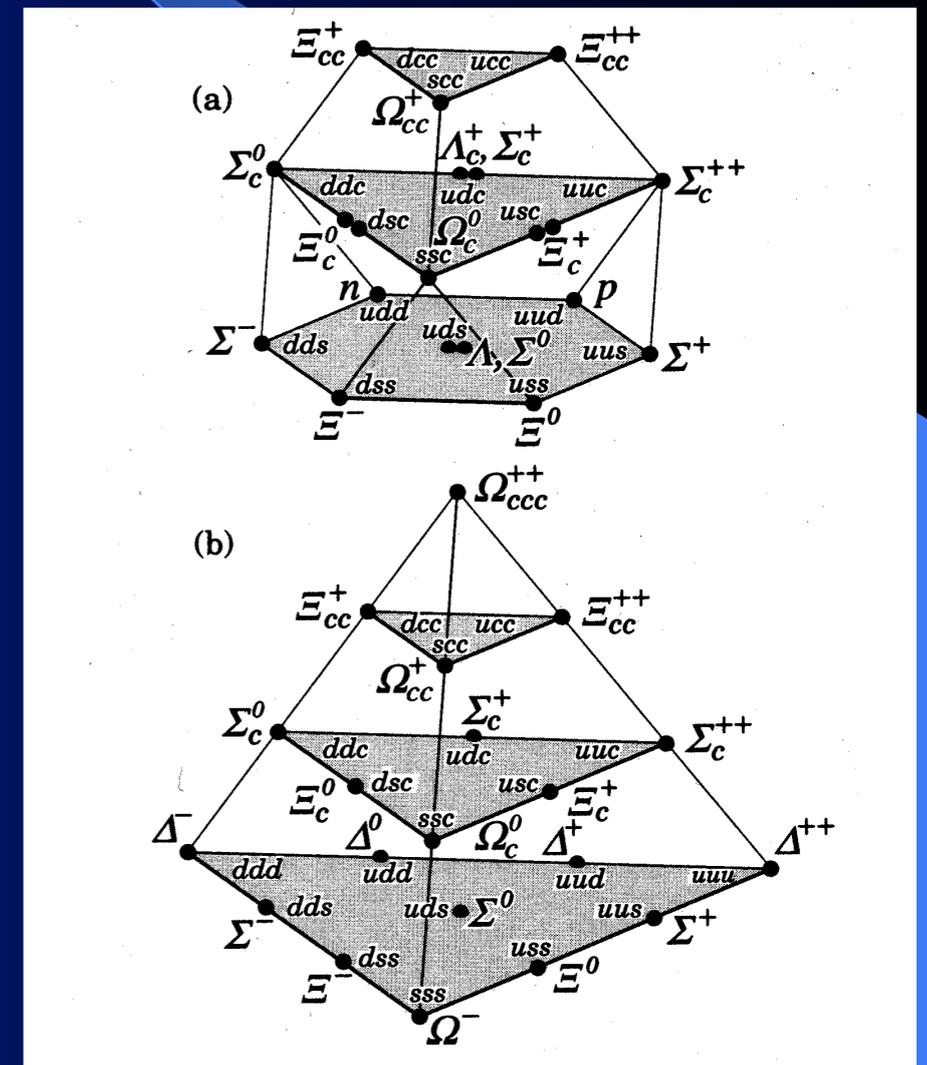
$$\Sigma^0 (d \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

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

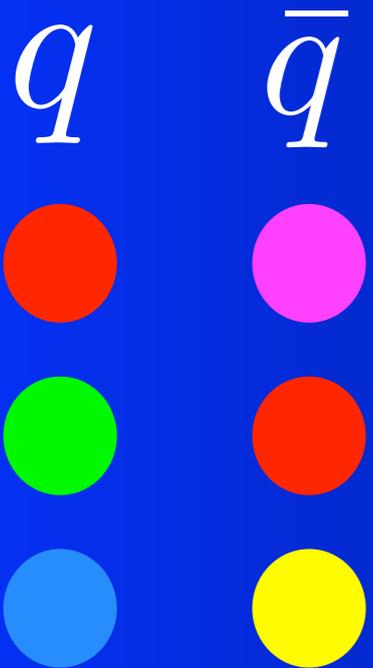
$$\Lambda^+ (u \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

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

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



Цветные кварки



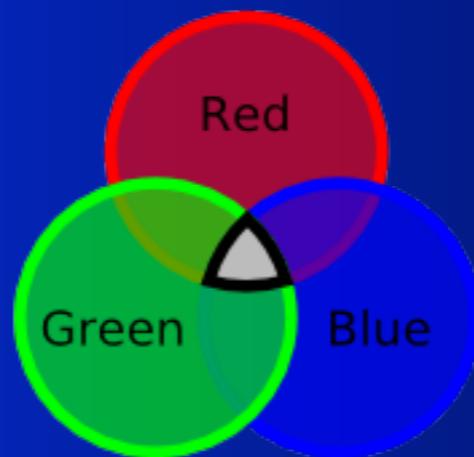
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

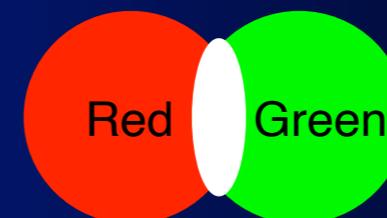
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

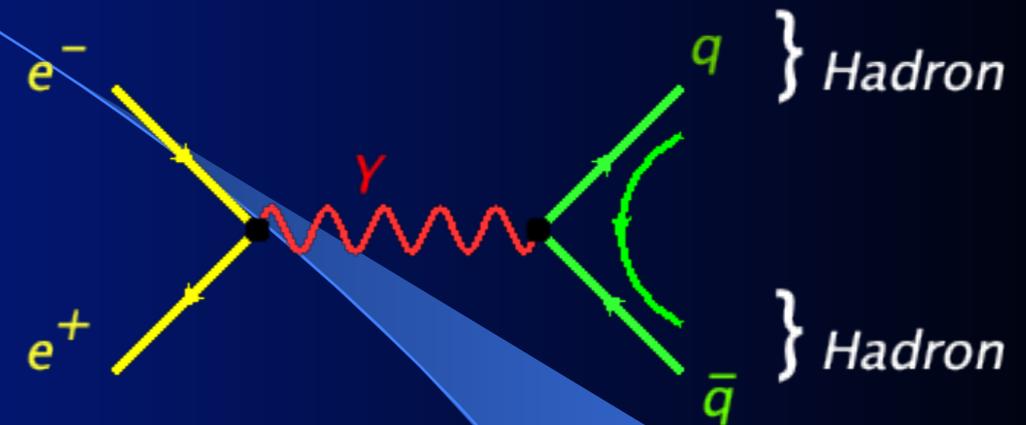
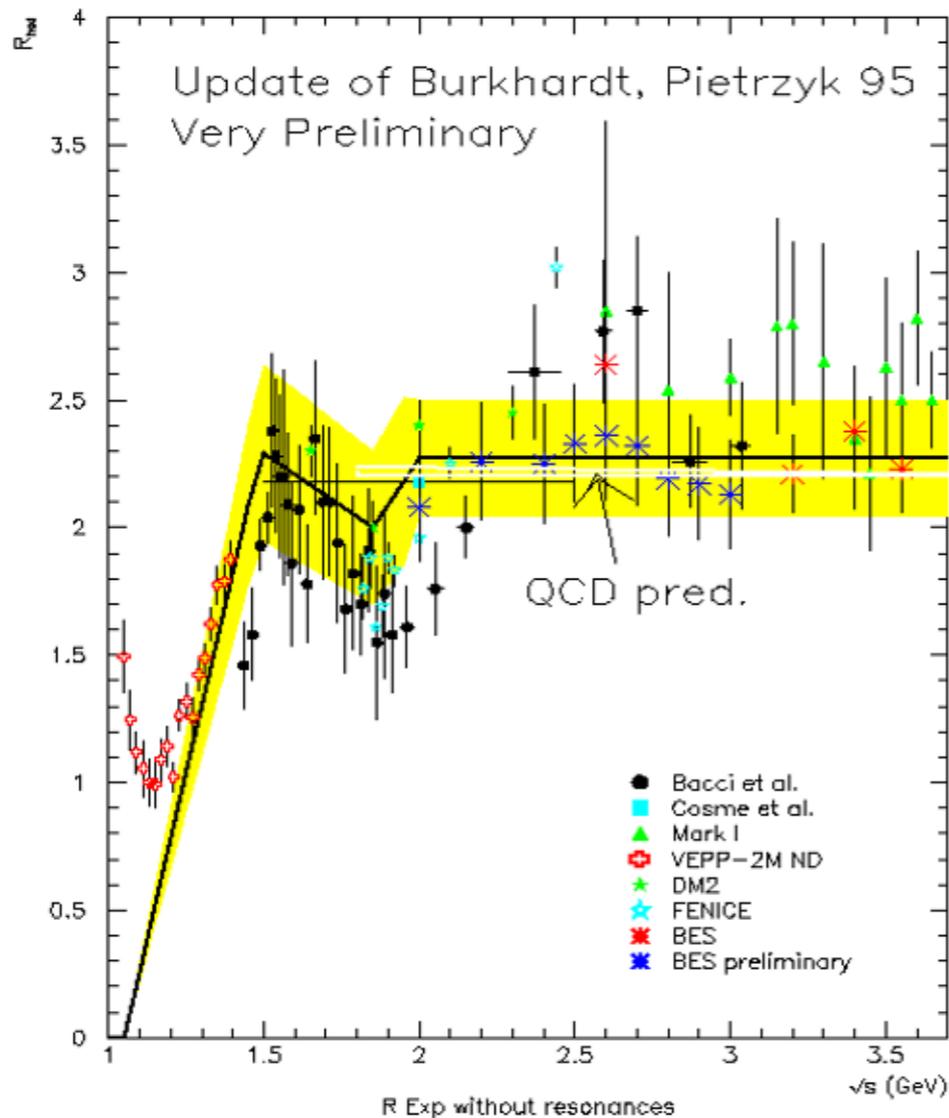


барион



МЕЗОН

Число цветов кварков



Сечение электрон-позитронной аннигиляции в адроны пропорционально числу цветов кварков.

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrons)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum_i Q_i^2$$

Сравнение с экспериментальными данными с разных коллайдеров при разных энергиях даёт

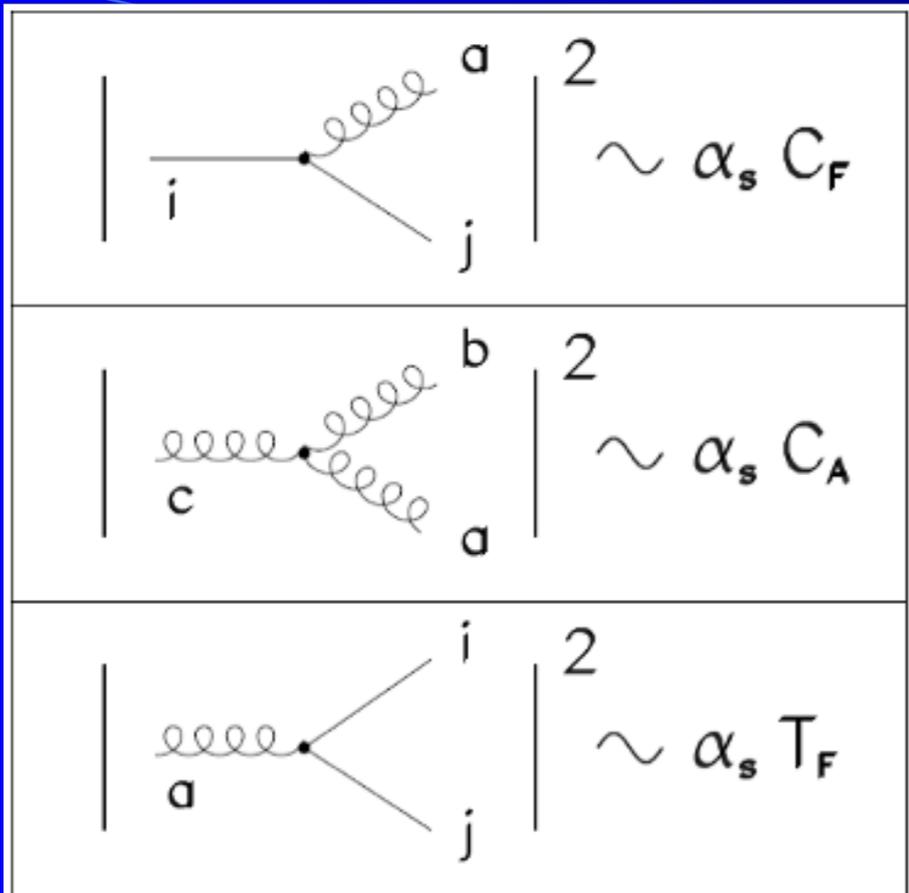
$$N_c = 3.06 \pm 0.10$$

Группа симметрии сильных взаимодействий

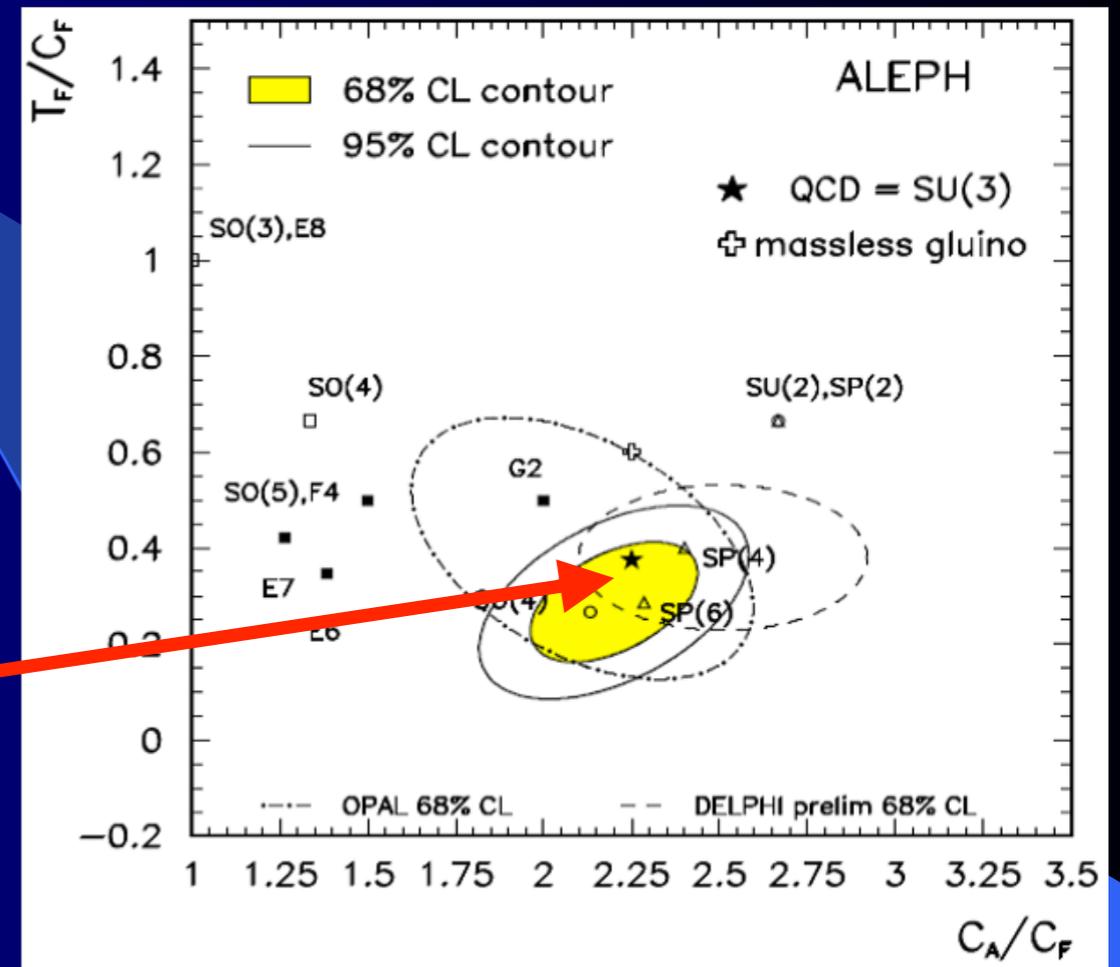
$$\sum_{a=1}^{N_A} (T^a T^{\dagger a})_{ij} = \delta_{ij} C_F \quad , \quad \sum_{i,j=1}^{N_F} T_{ij}^a T_{ji}^{\dagger b} = \delta^{ab} T_F \quad , \quad \sum_{a,b=1}^{N_A} f^{abc} f^{*abd} = \delta^{cd} C_A$$

For SU(N)

$$C_A = N_C \quad , \quad C_F = \frac{N_C^2 - 1}{2N_C} \quad , \quad T_F = 1/2$$

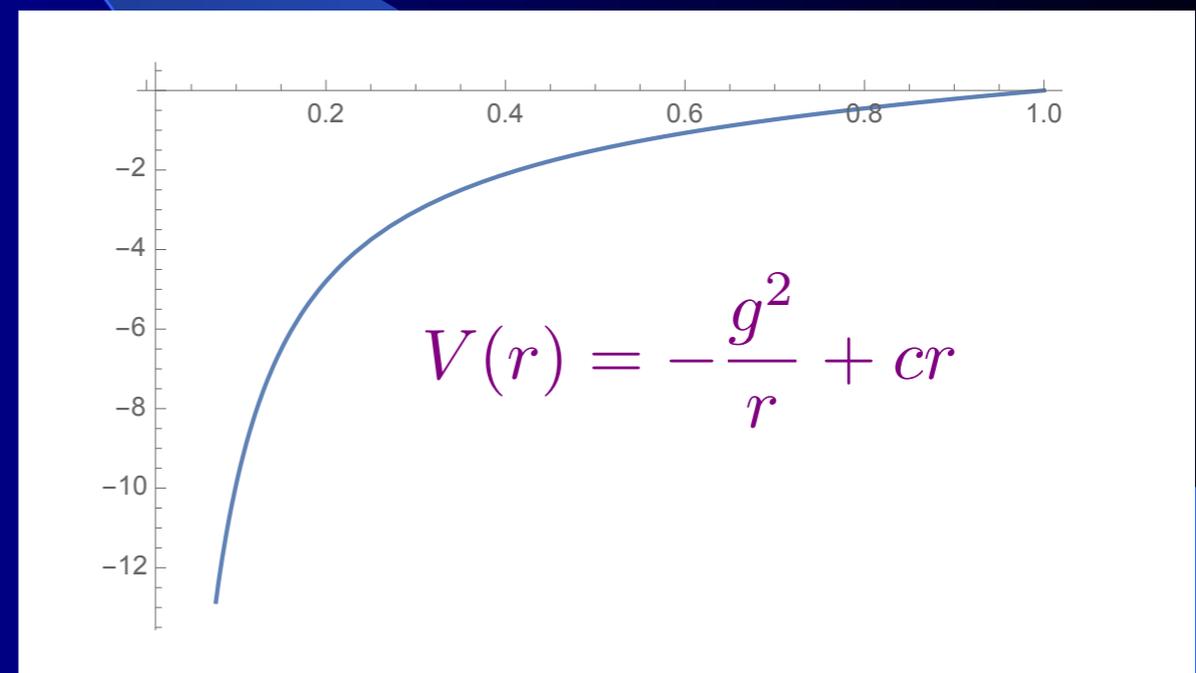
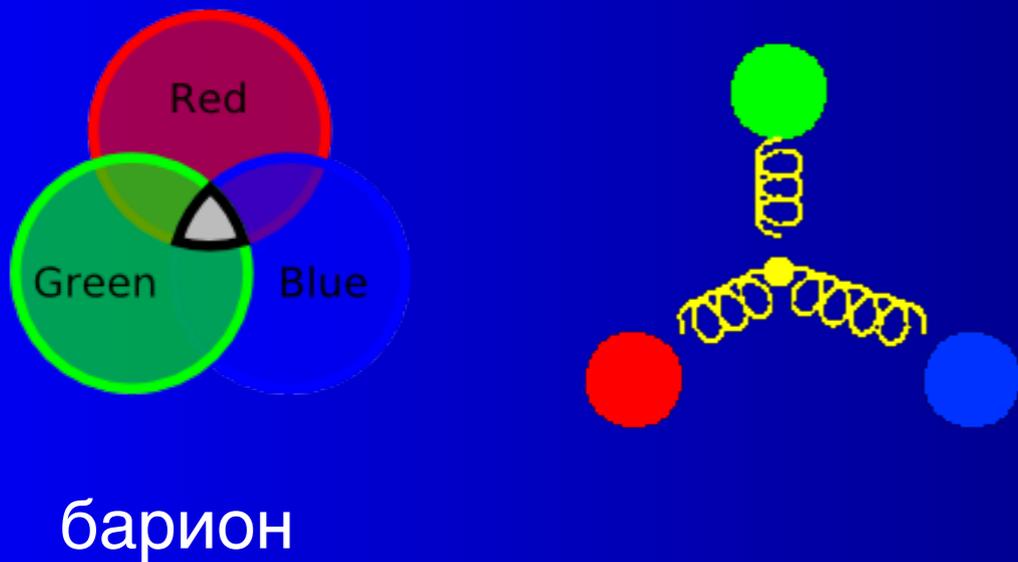


КХД анализ определённо указывает на группу SU(3) как группу симметрии сильных взаимодействий



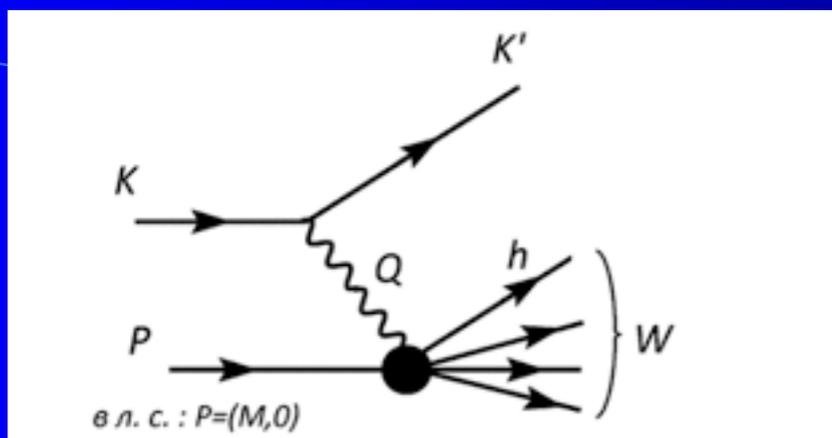
Гипотеза невылетания кварков

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

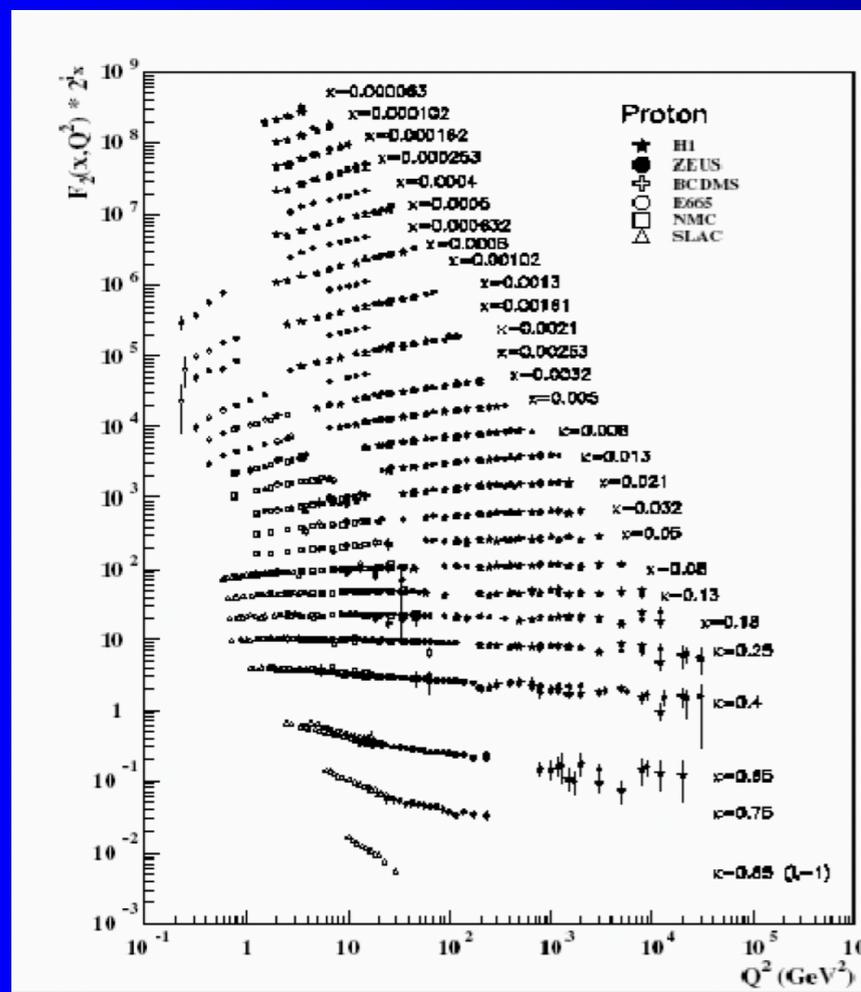
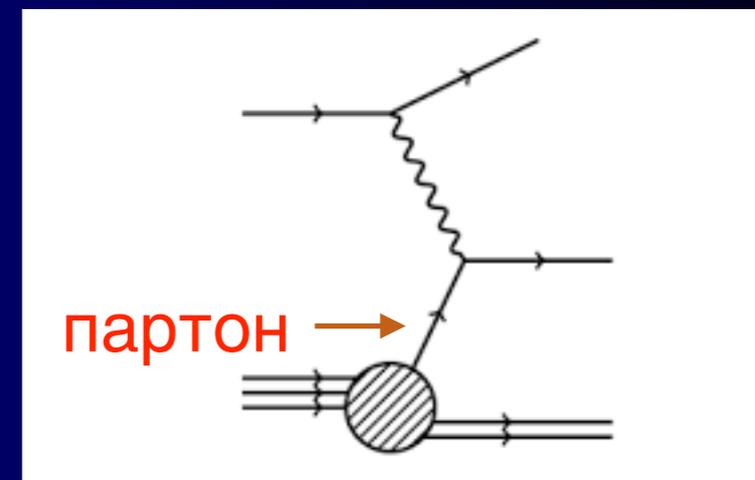


Рассеяние электронов на протонах

Партонная модель



Q - импульс переданный от электрона протону

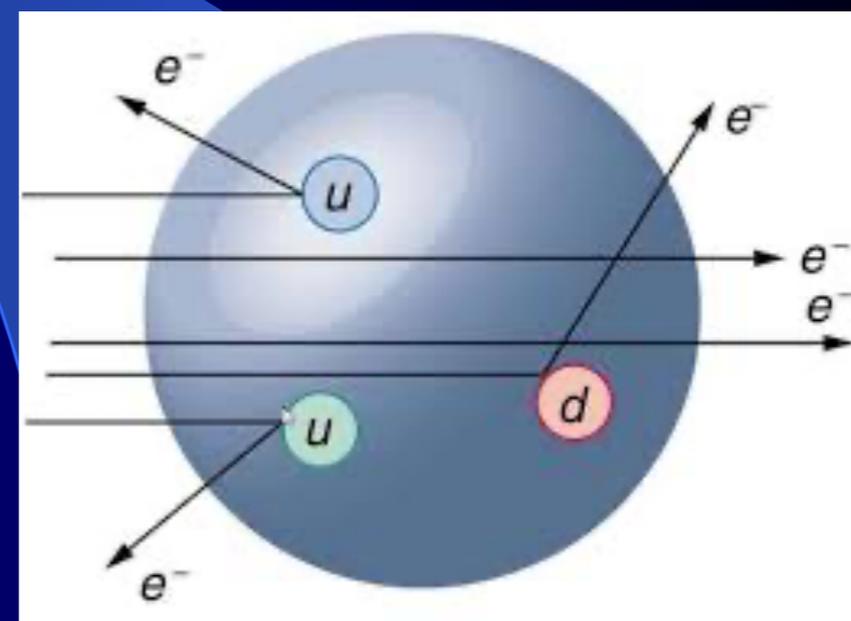


W - полная энергия рождённых адронов

Отждествление партон с кварками

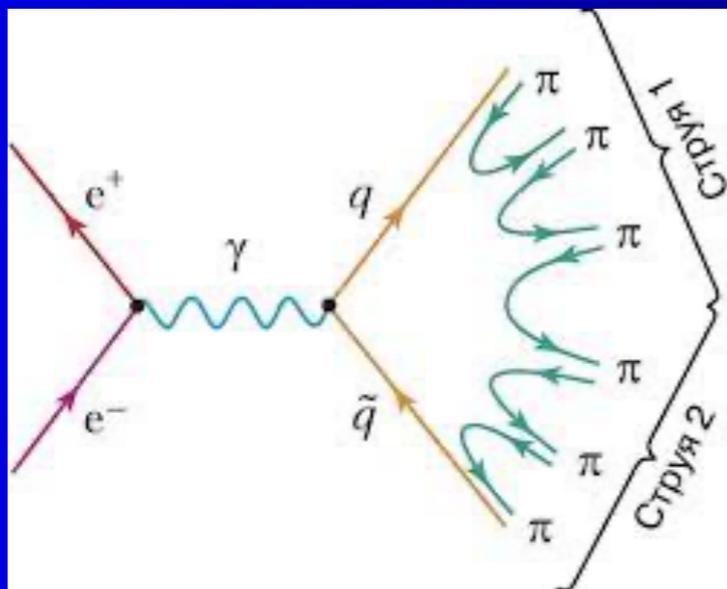
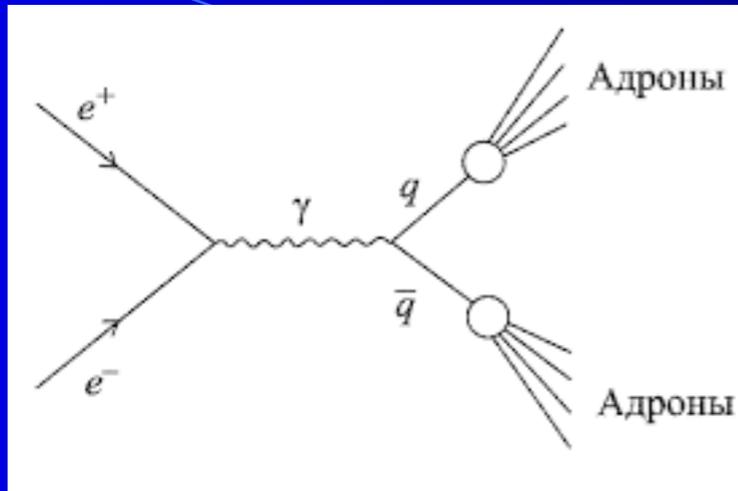
$$x = \frac{Q^2}{W^2}$$

скейлинг



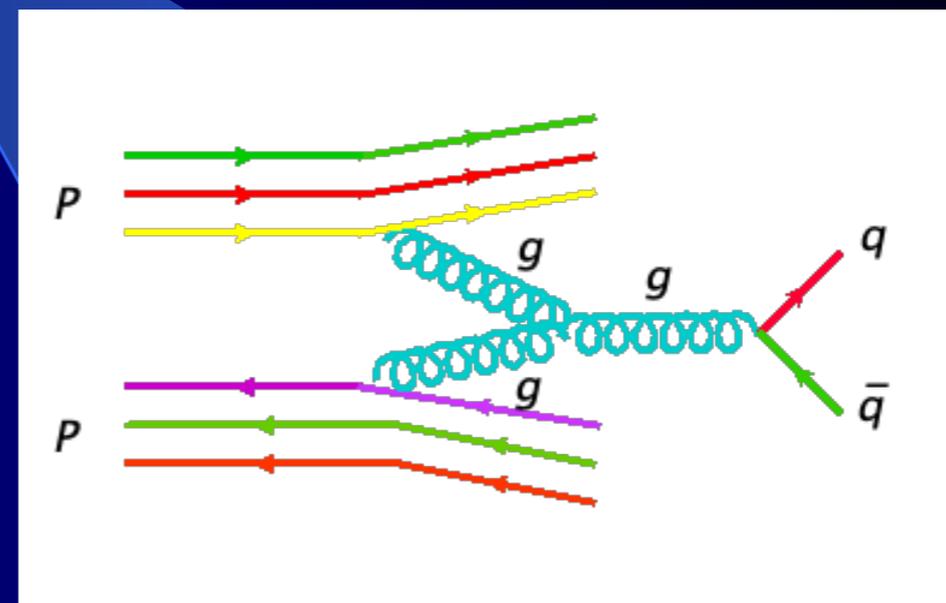
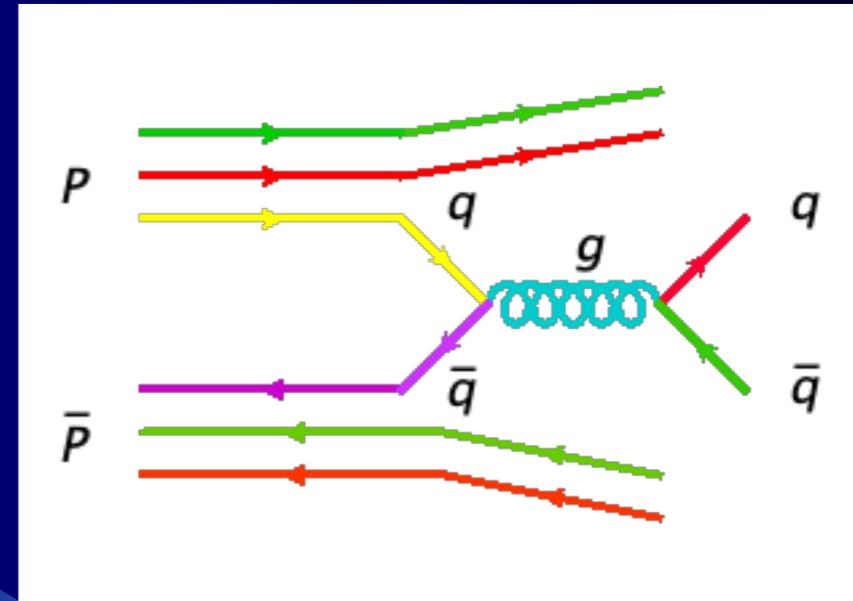
Рождение адронов на коллайдерах

Электрон-позитронный коллайдер



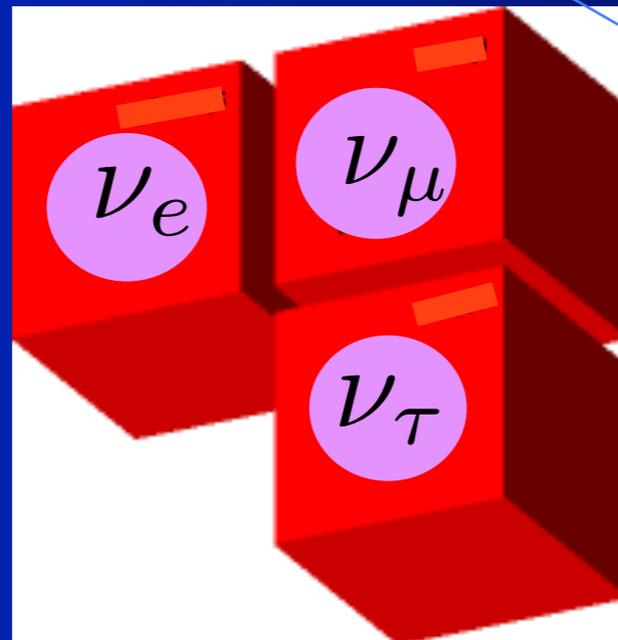
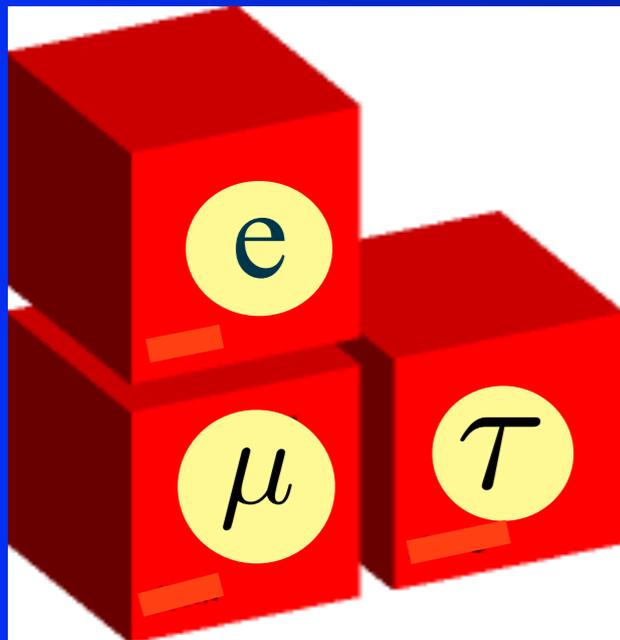
Адроны образуют струи вдоль направлений рождённых кварков

Протонный коллайдер



Кварковые subprocessы

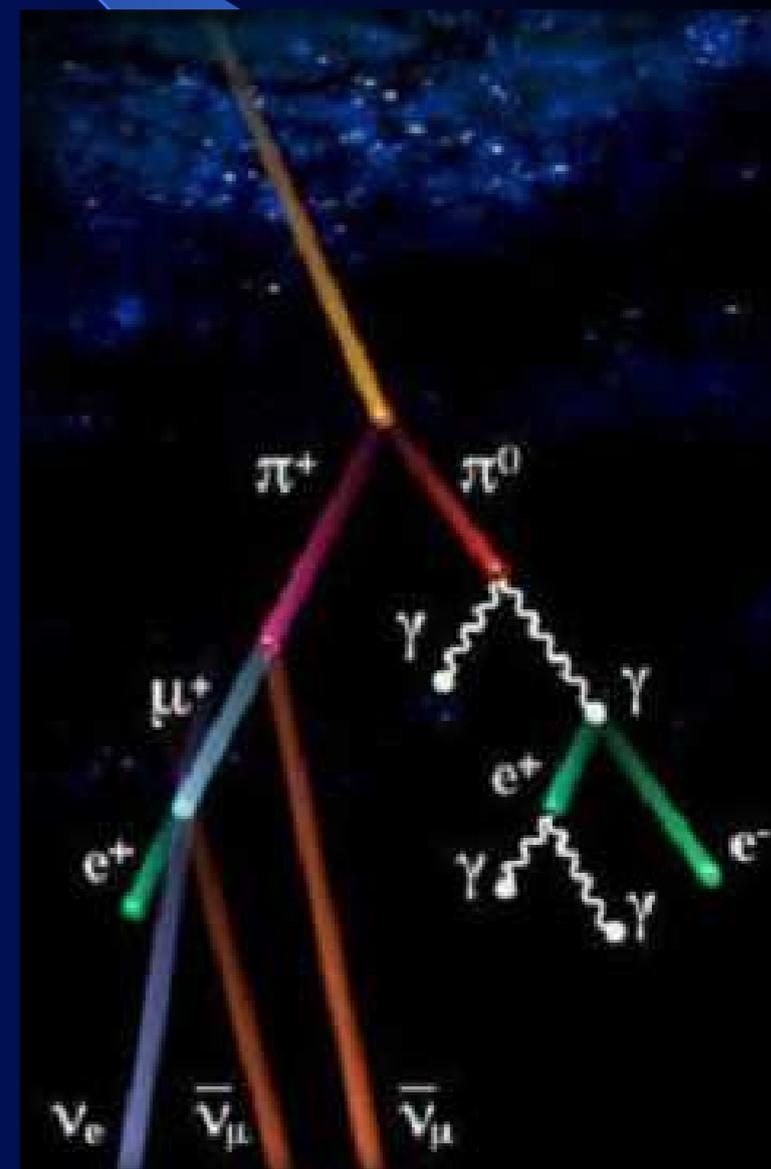
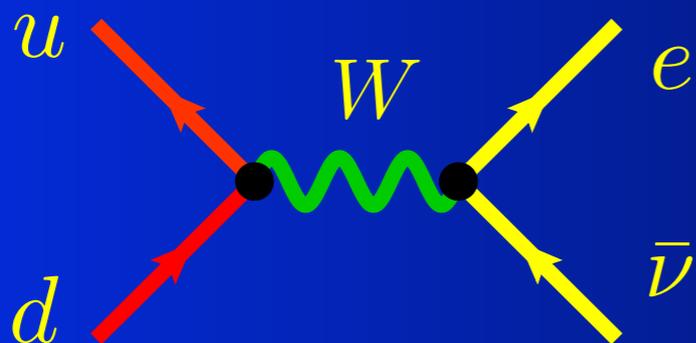
Лептоны от слова ΛΕΤΤΟΪ



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



Электро-слабый сектор СМ

$SU(2) \times U(1)$ или $O(3)$

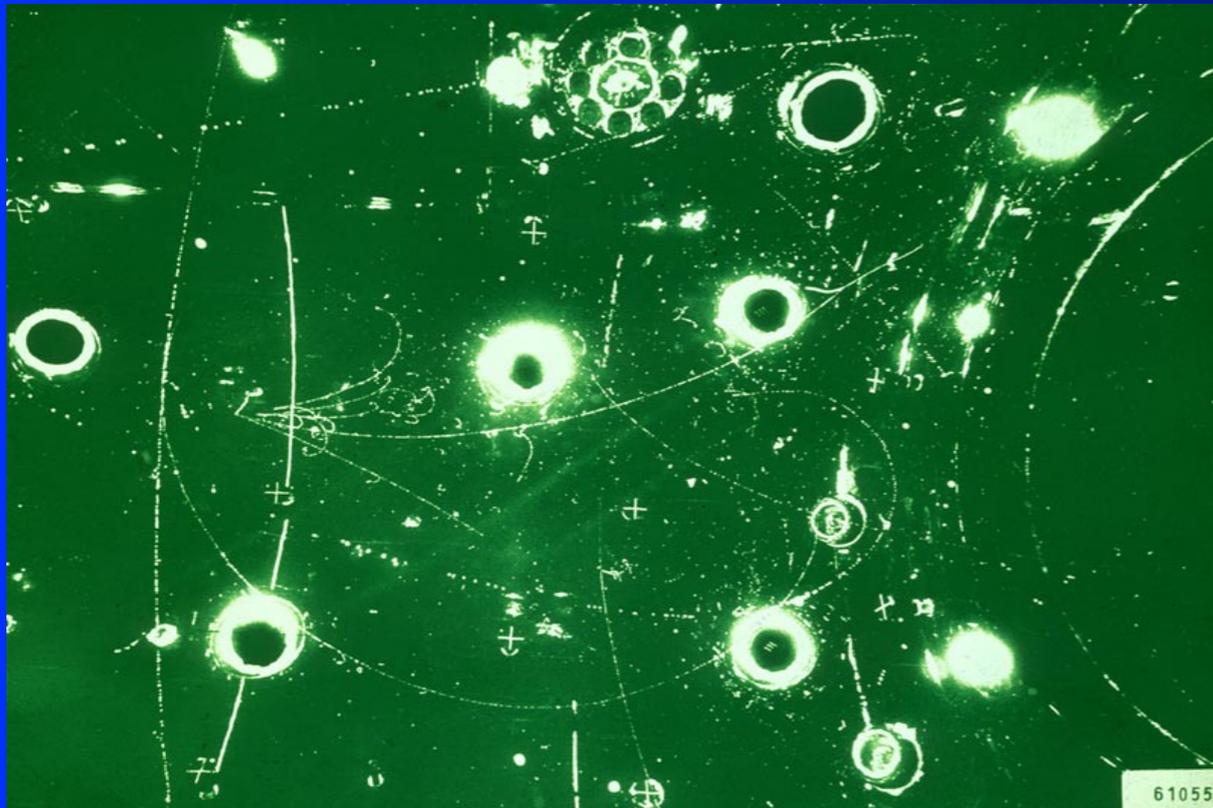
3 калибровочных бозона 1 калибровочный бозон 3 калибровочных бозона

После спонтанного нарушения симметрии получаем

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



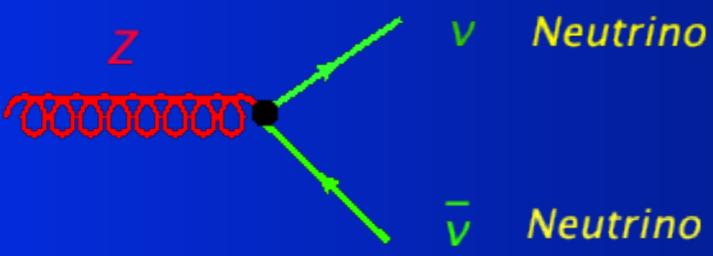
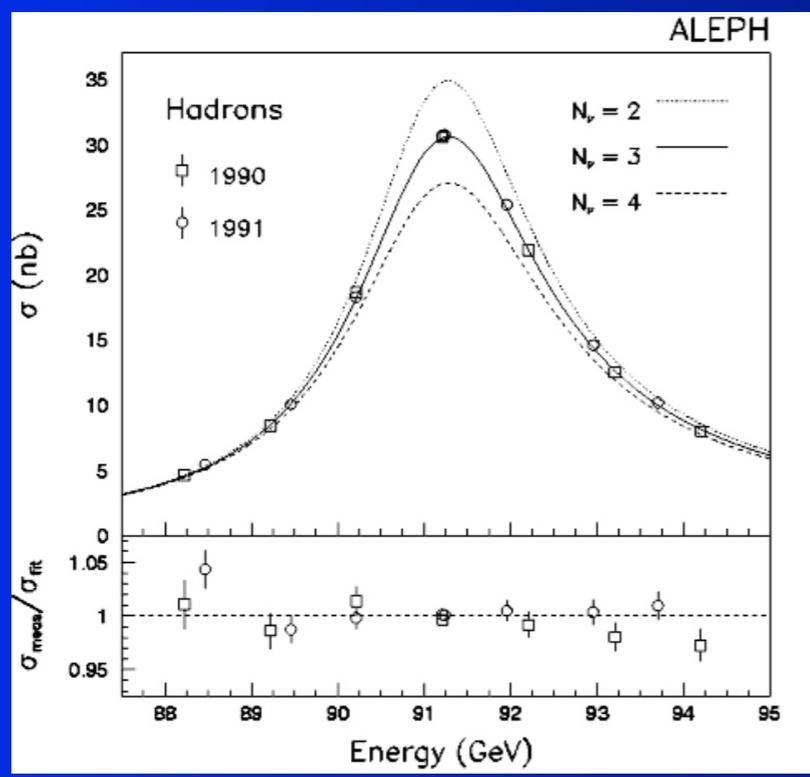
2 массивных калибровочных бозона (W^+ , W^-) и 1 безмассовый (γ)



- Открытие нейтральных токов в ЦЕРН в 1973 году явилось ключевым моментом в проверке калибровочной теории слабых взаимодействий
- Тяжёлый фотон порождает нейтральный ток без нарушения аромата

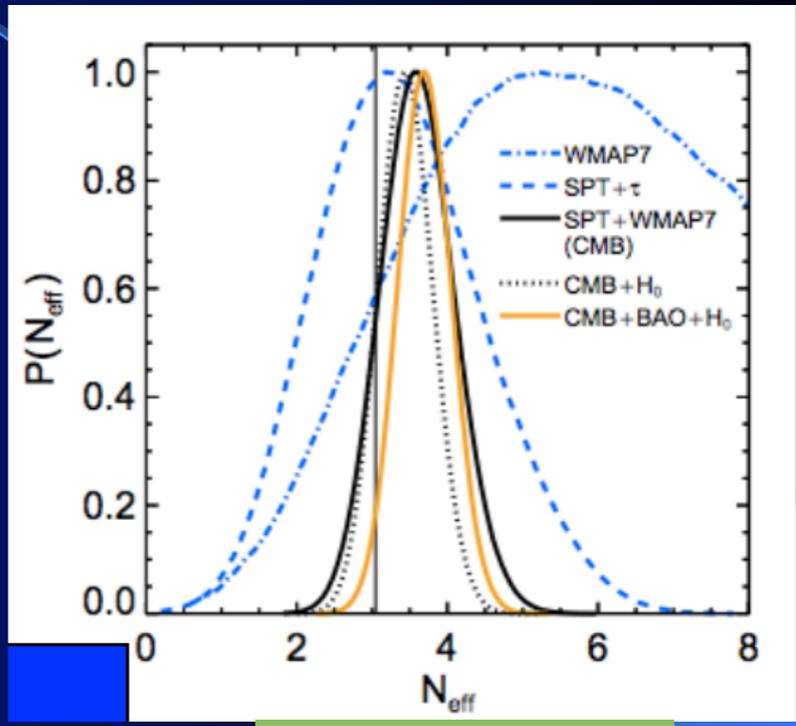
Число поколений частиц материи

- 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

$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

Ароматы (сорта) частиц СМ



Смешивание поколений в СМ

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

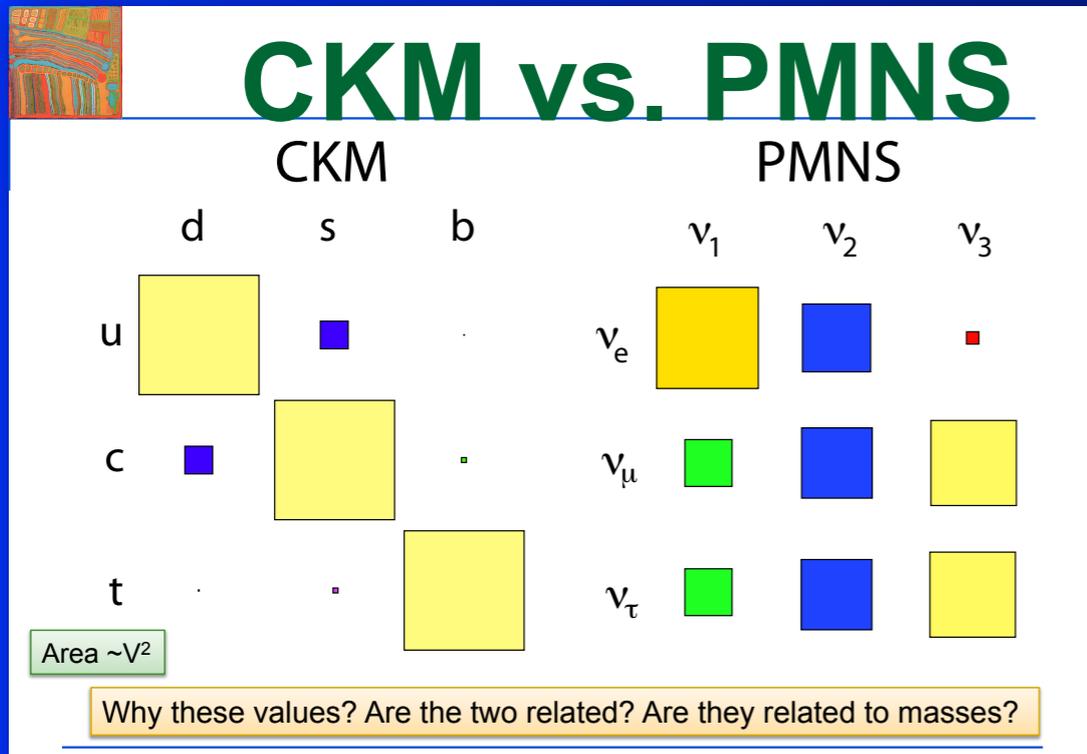


$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23}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

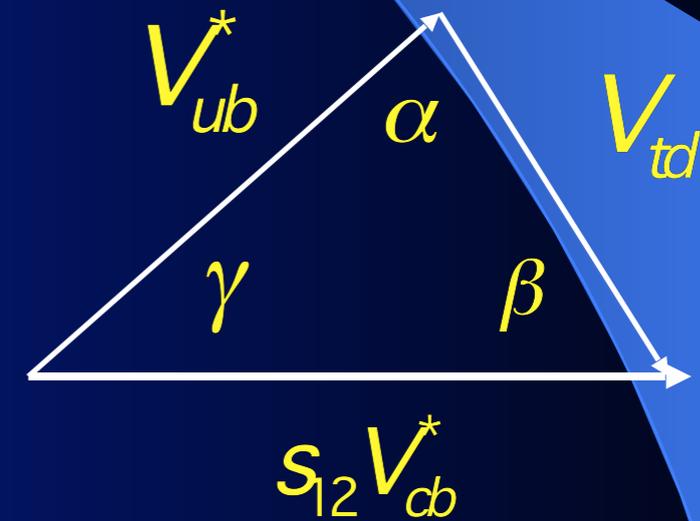
4 параметра в каждой из матриц: 3 угла и 1 фаза.

Фаза δ - источник CP нарушения в Стандартной модели

Смешивание поколений в СМ



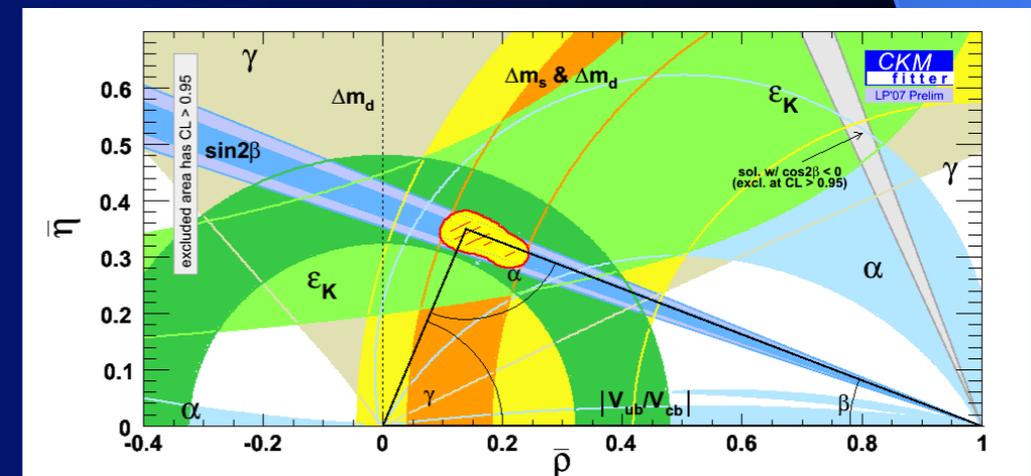
- Углы смешивания в кварковом и лептонном секторе найдены экспериментально
- Они сильно отличаются друг от друга



Условие унитарности матрицы смешивания - треугольник унитарности:

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

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



CP нарушение в SM

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

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

Два поколения

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

матрица смешивания

фаза - источник CP

Три поколения

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

матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Точно также и в лептонном секторе

Требуется как минимум 3 поколения частиц в SM

Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

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

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

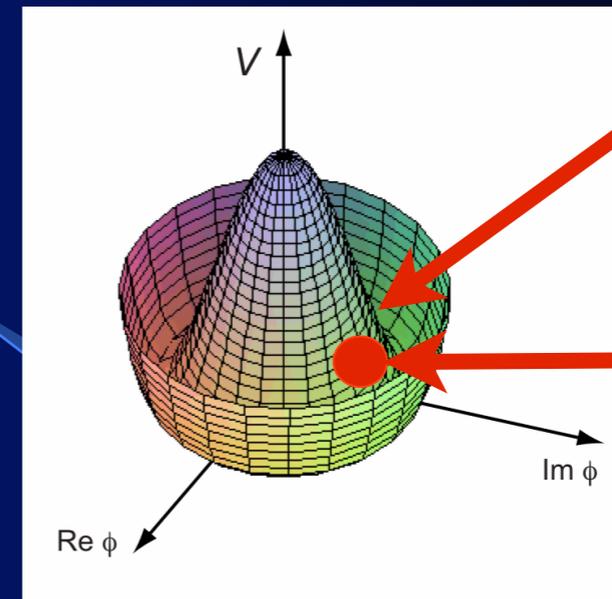
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

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,
бесспиновая 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

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

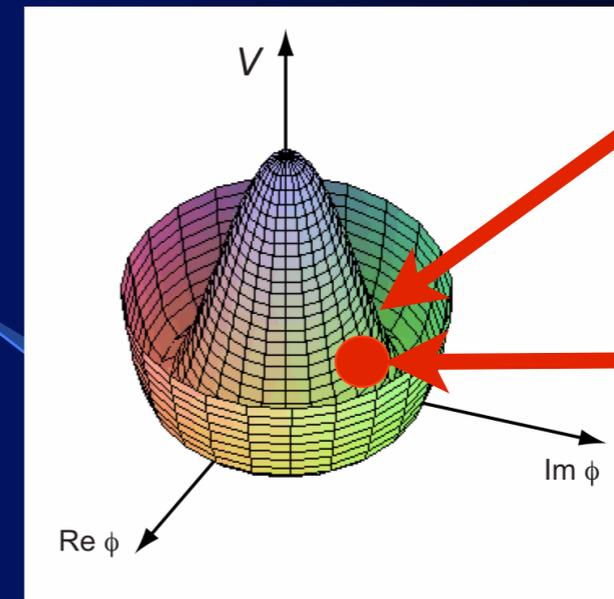
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Потенциал

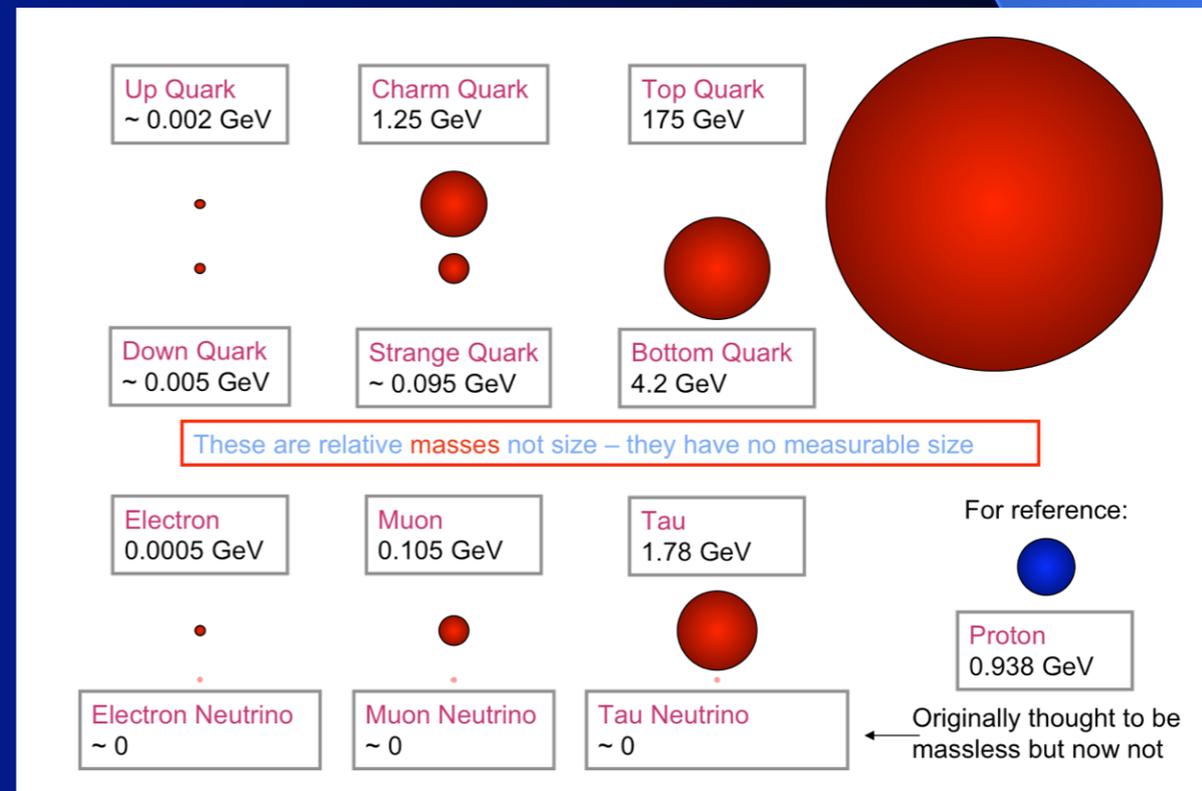


Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

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

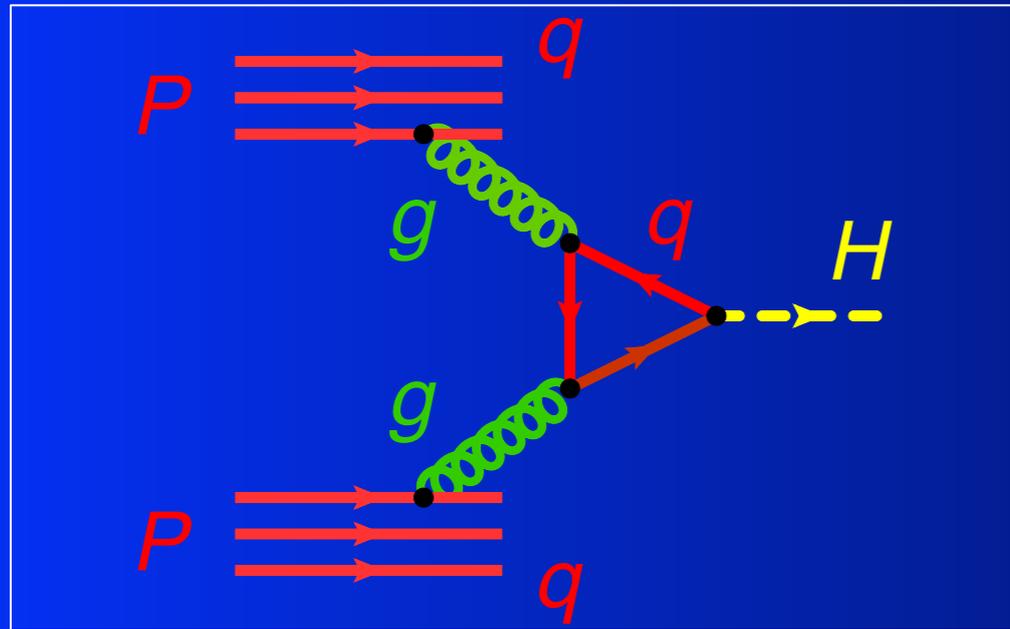
Все массы частиц пропорциональны константе взаимодействия частиц с хиггсовским (полем) бозоном



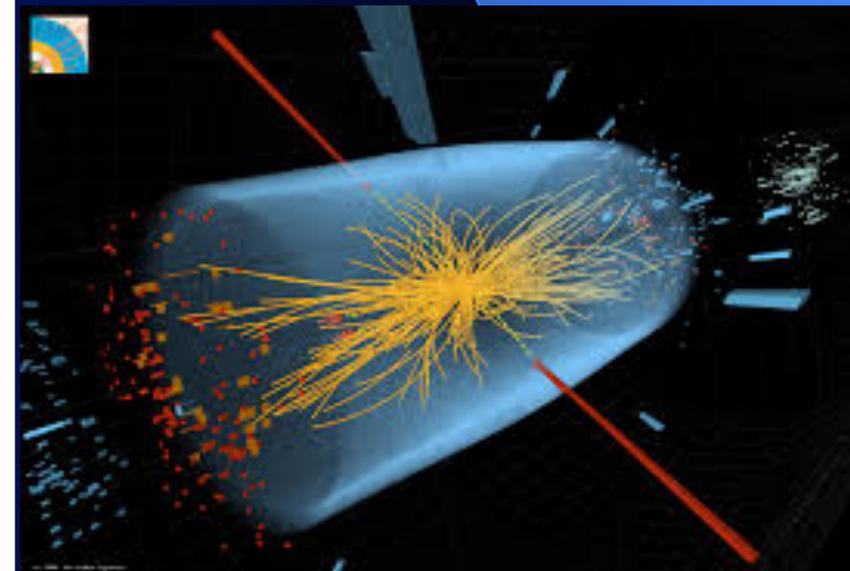
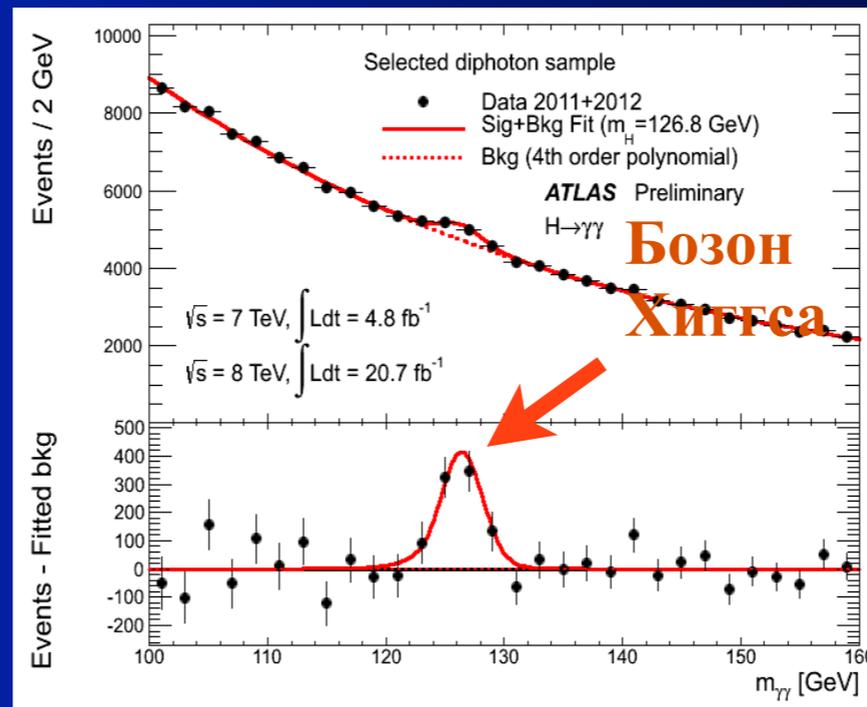
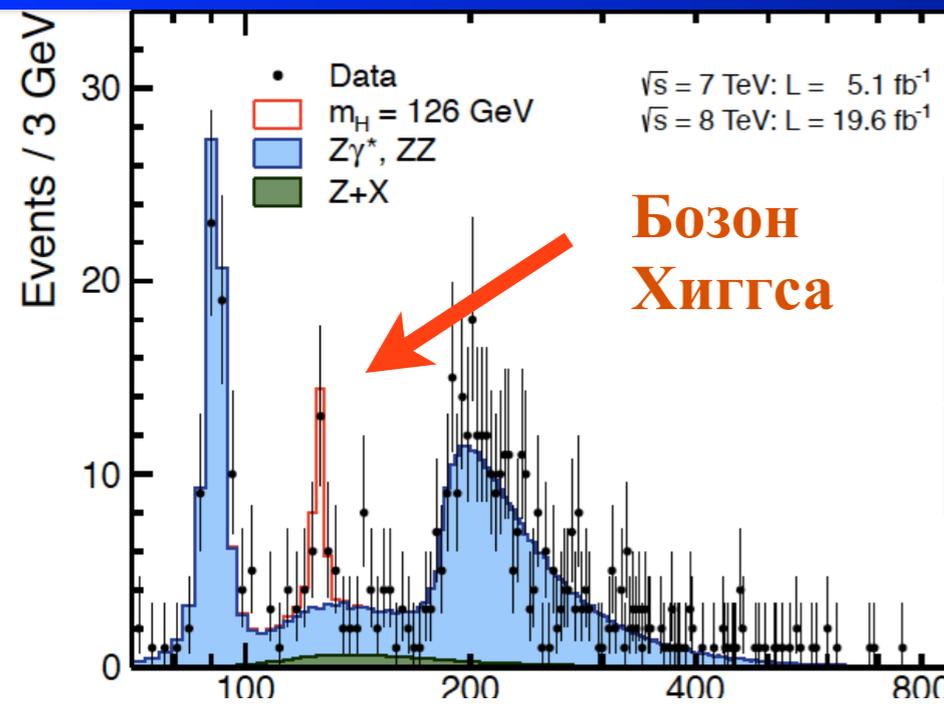
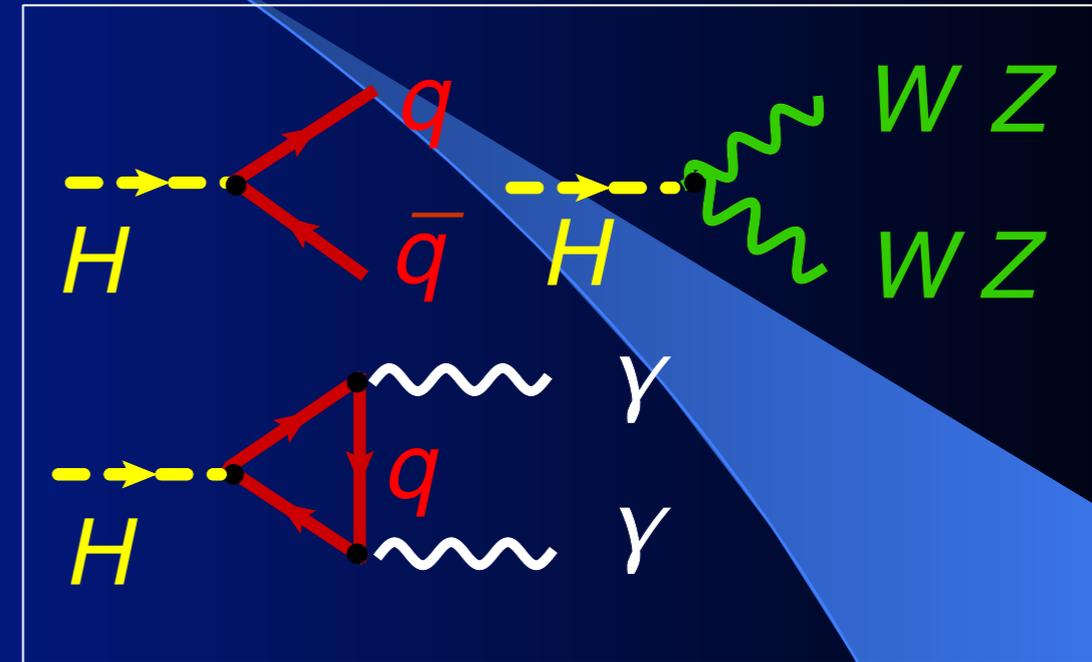
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



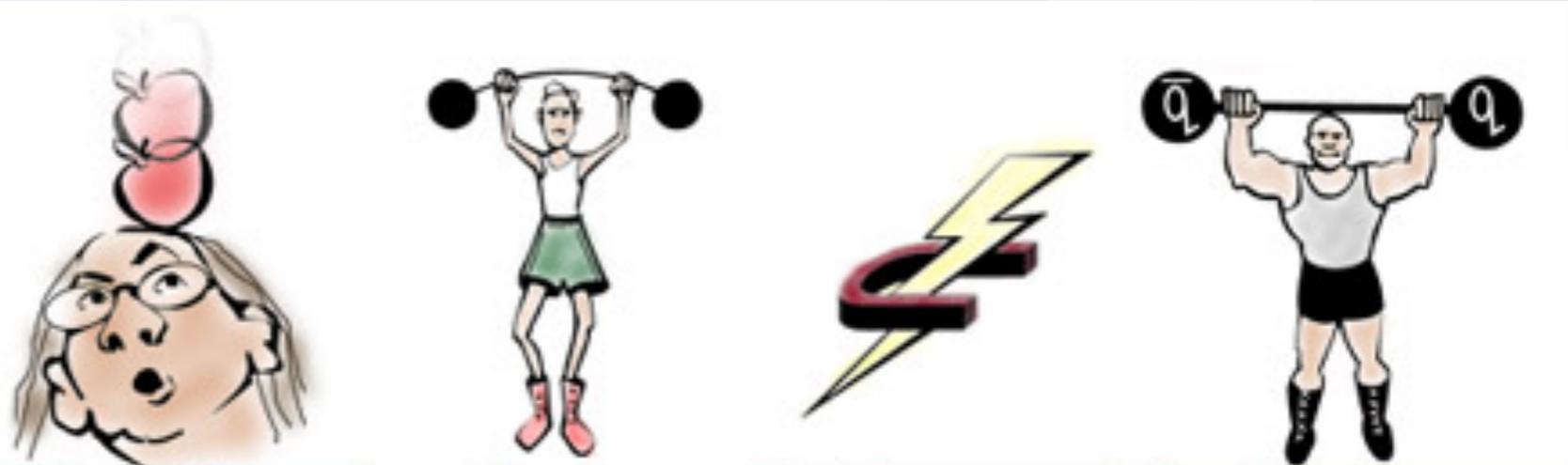
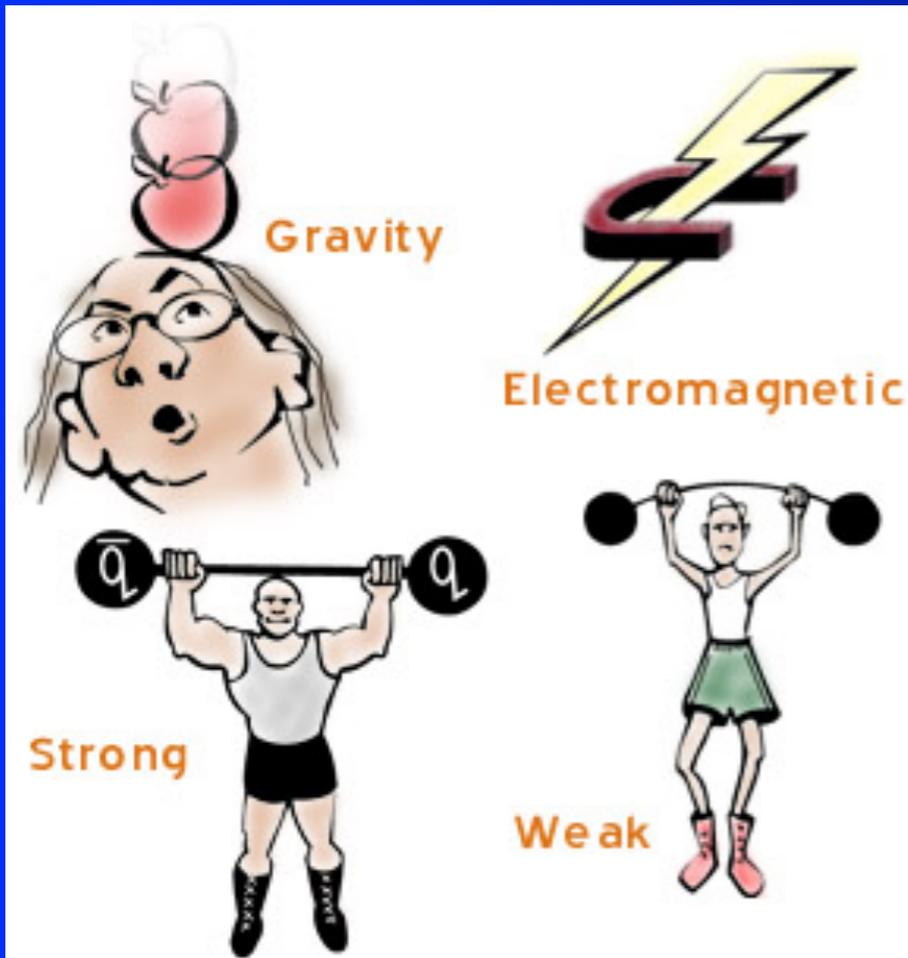
Процессы распада



Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе

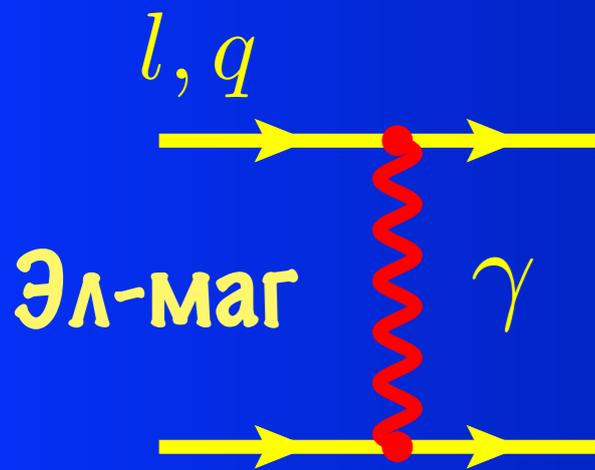


Пятая сила - обмен хиггсовским бозоном

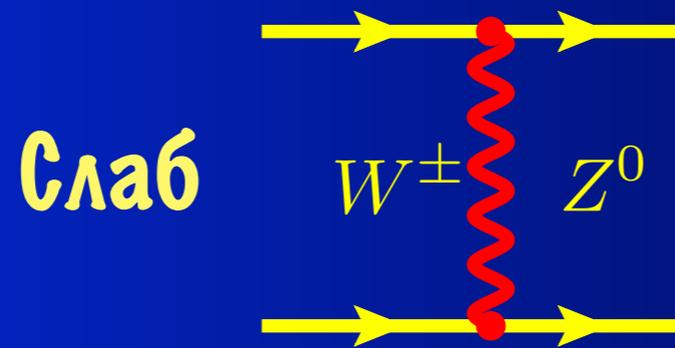


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

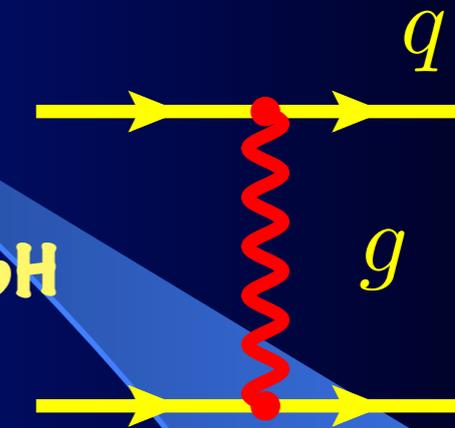
Пять фундаментальных сил Природы



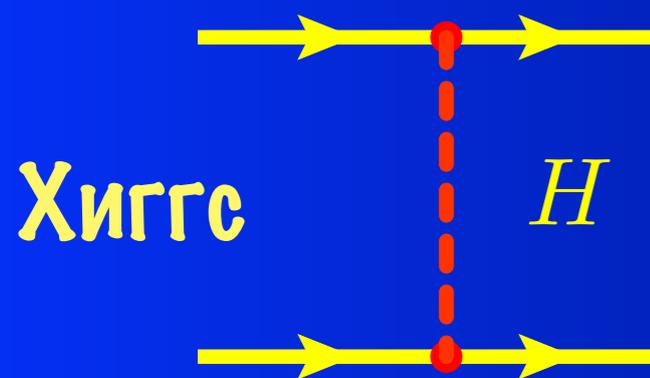
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



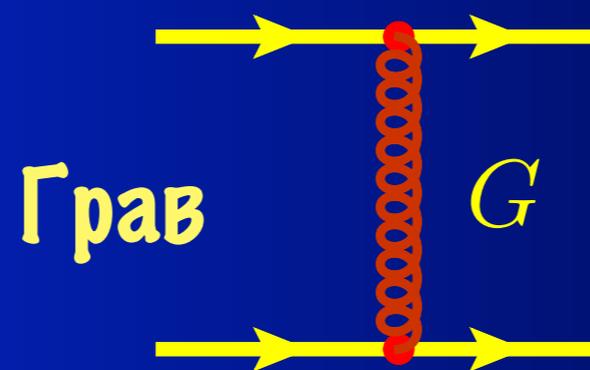
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



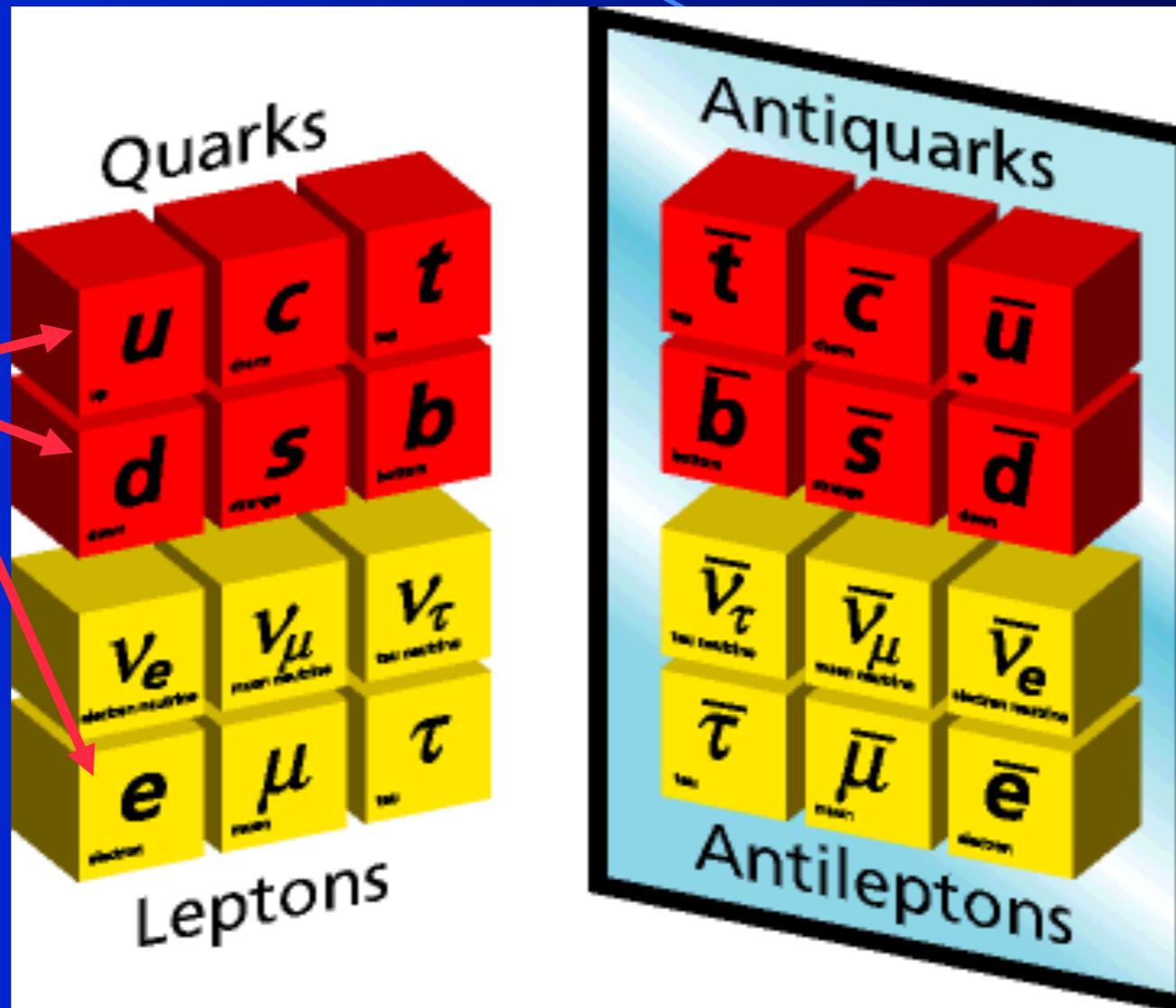
$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Материя и Антиматерия

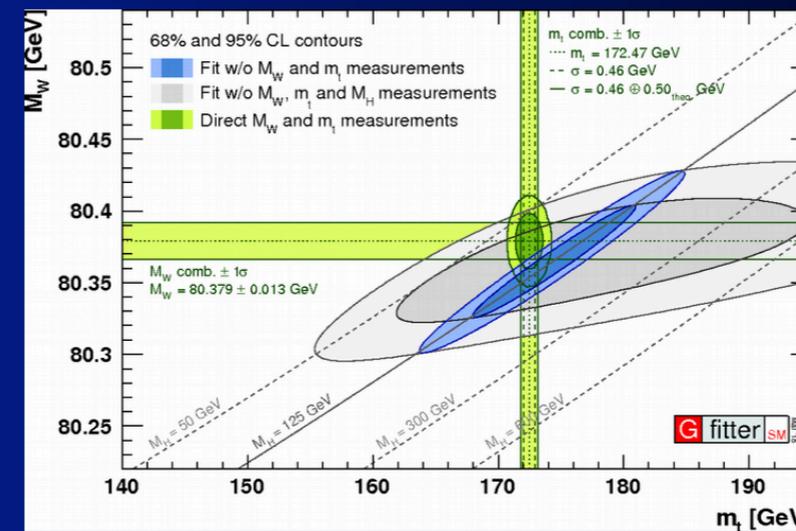
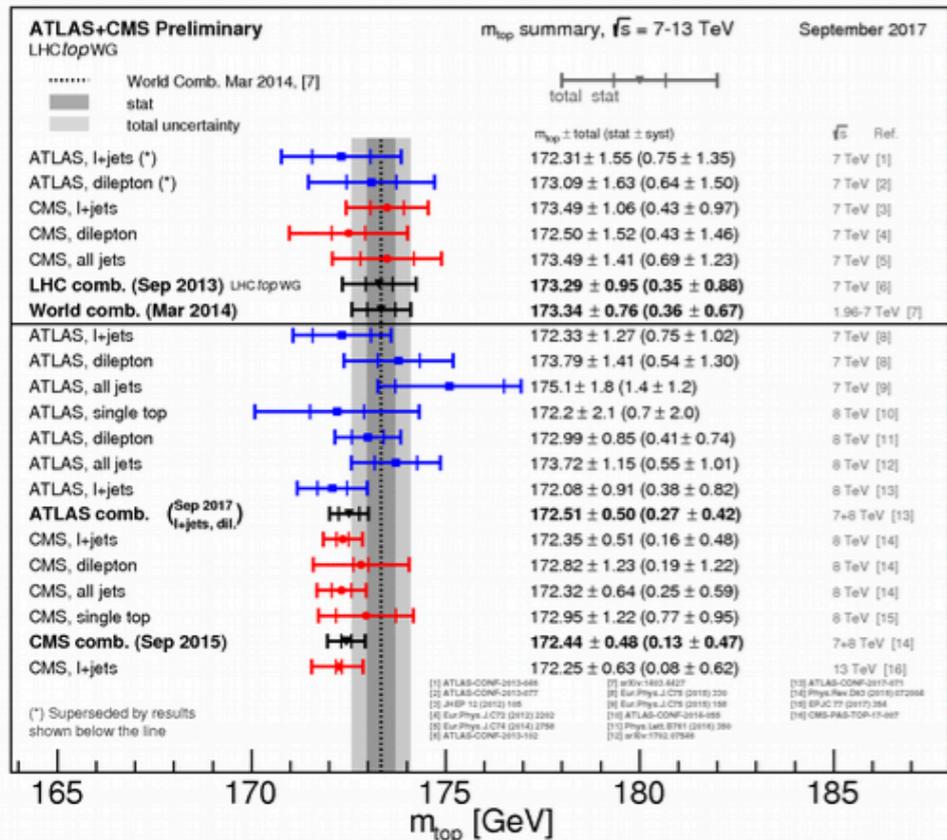
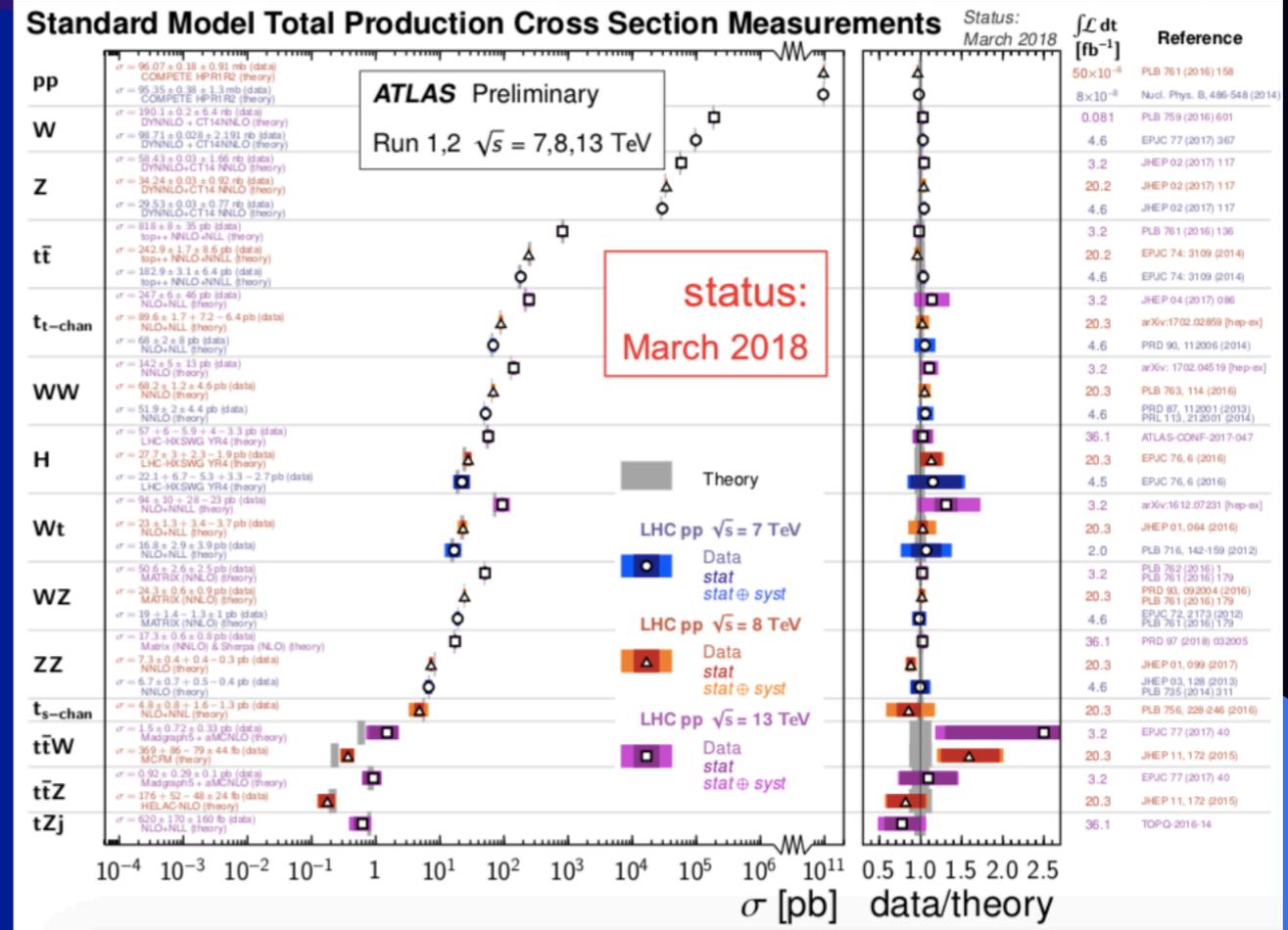
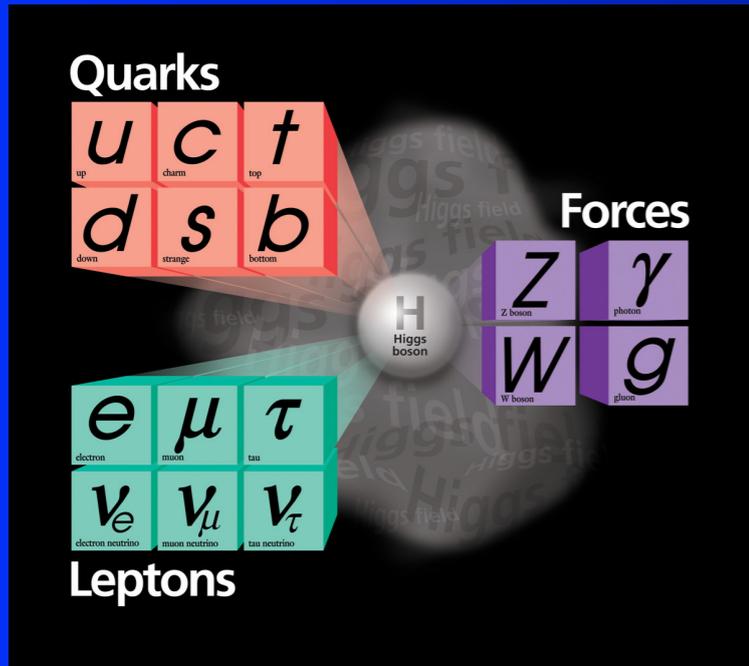
Первое поколение - это то из чего мы состоим



Антиматерия родилась вместе с материей во время «Большого взрыва»

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

THE STANDARD MODEL: THE STATUS REPORT AND OPEN QUESTIONS



Extraordinary agreement between measurements and SM predictions 27

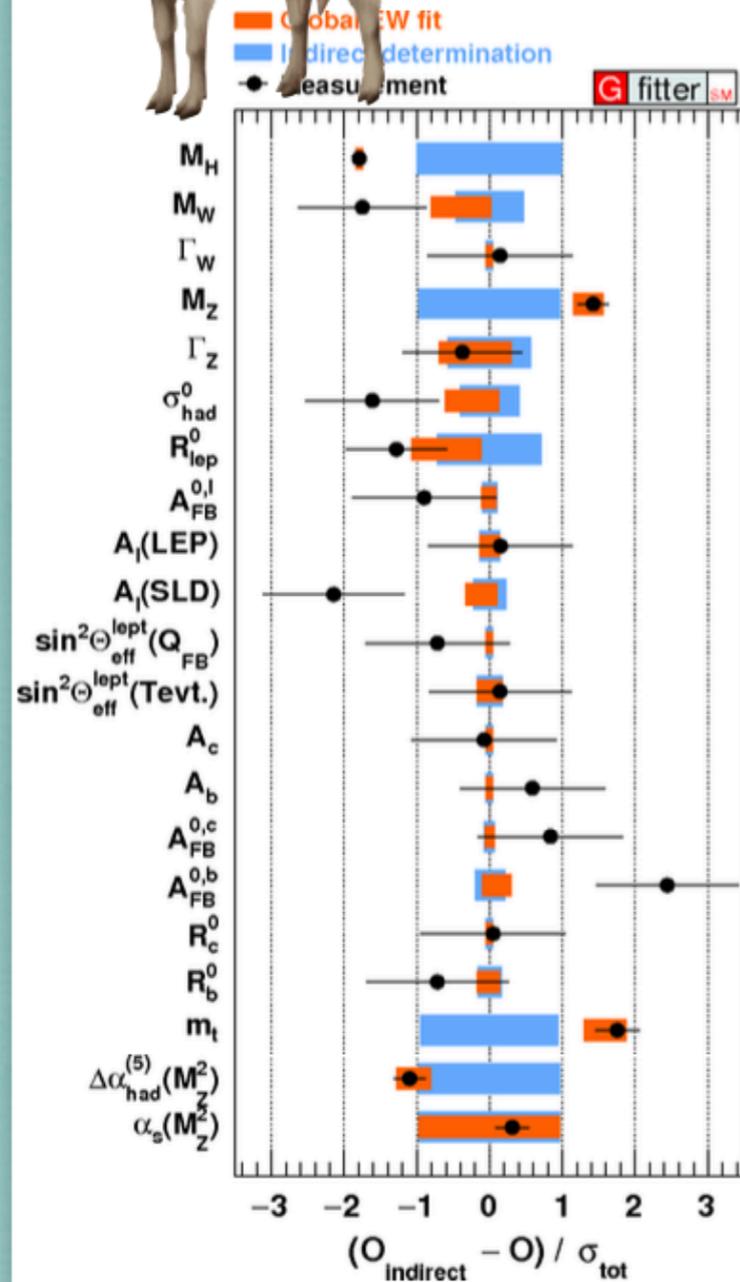
Триумф Стандартной Модели



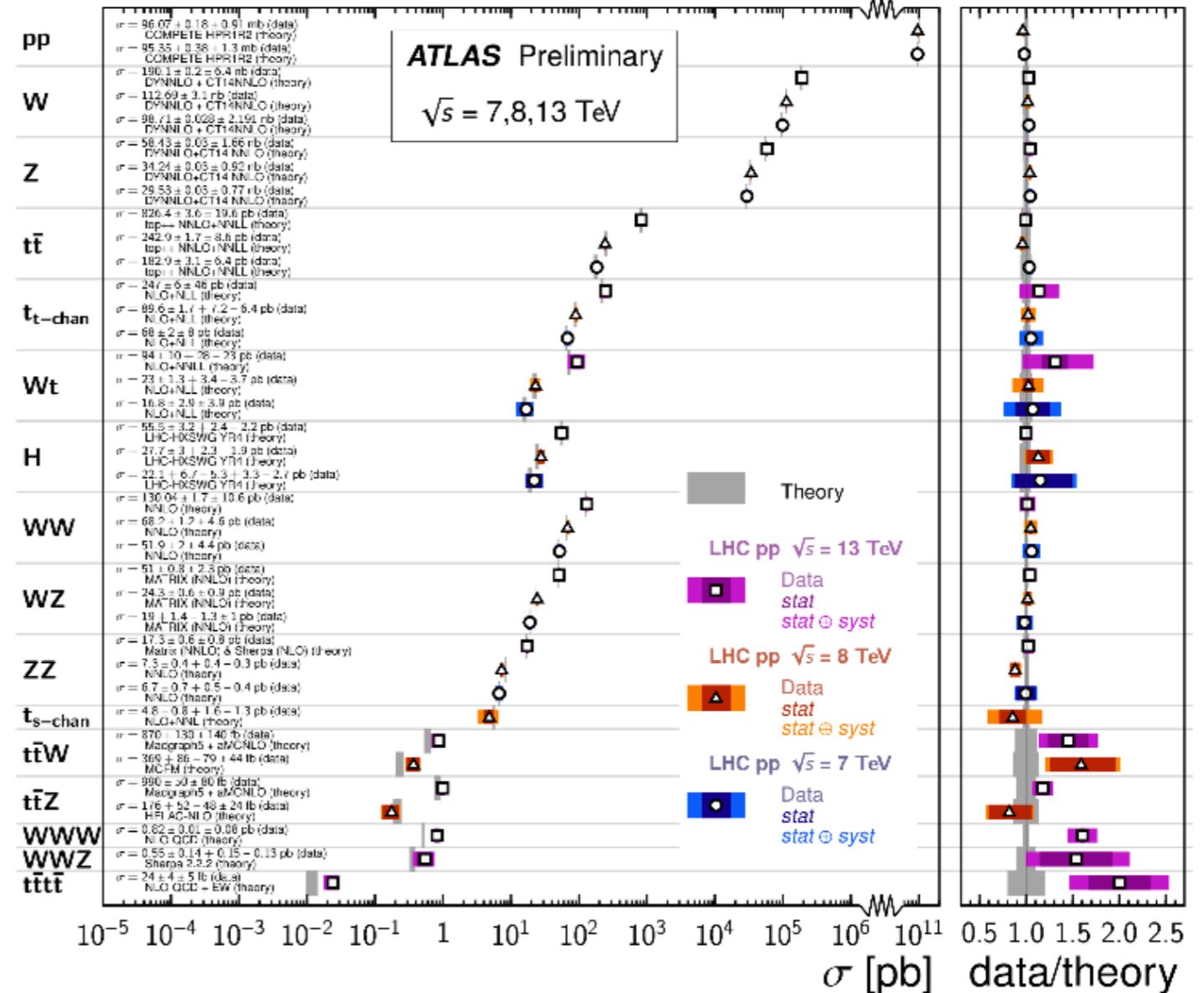
SM

Everything looks SM-like at LHC

Greatest Of All Theories

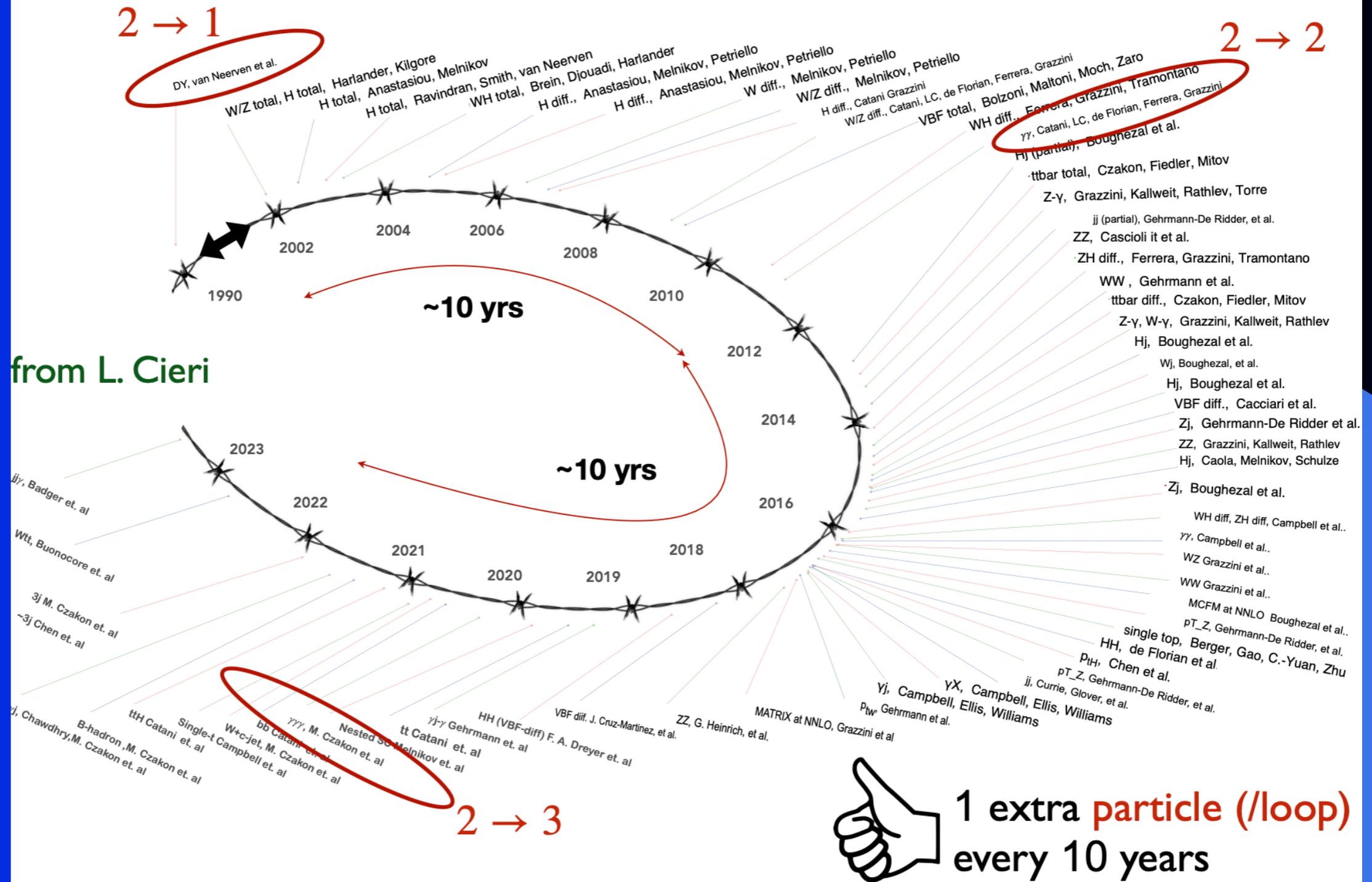


Standard Model Total Production Cross Section Measurements

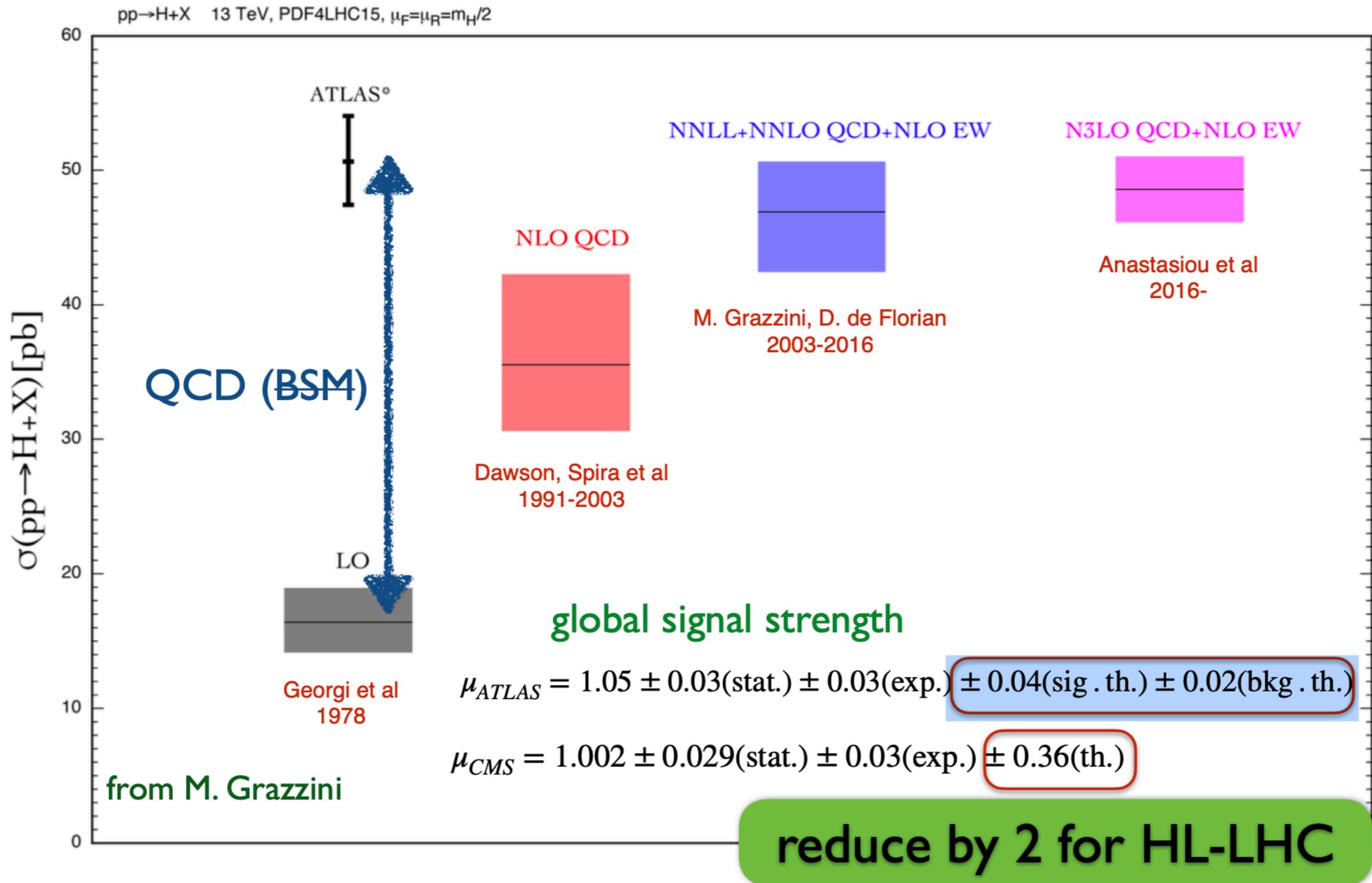


Прогресс теоретических расчётов

The NNLO revolution standard



Inclusive Higgs : an example of precision

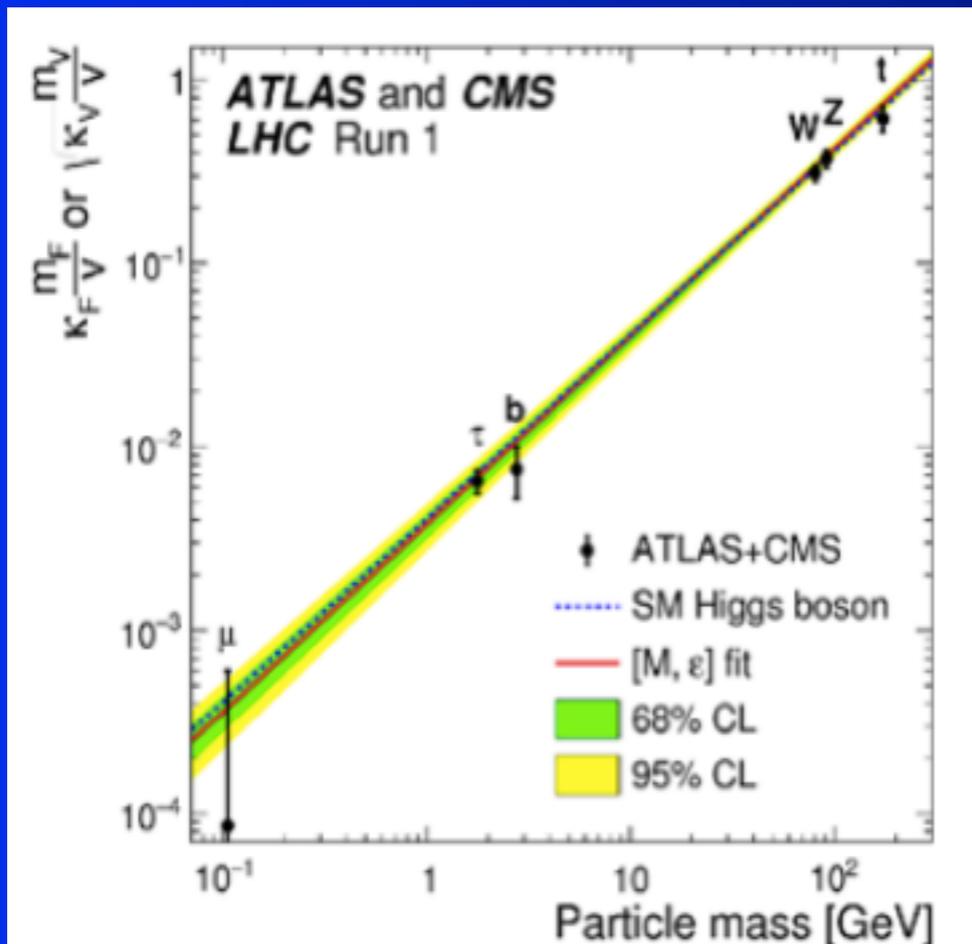


Белые пятна Стандартной Модели

Расширенный хиггсовский сектор

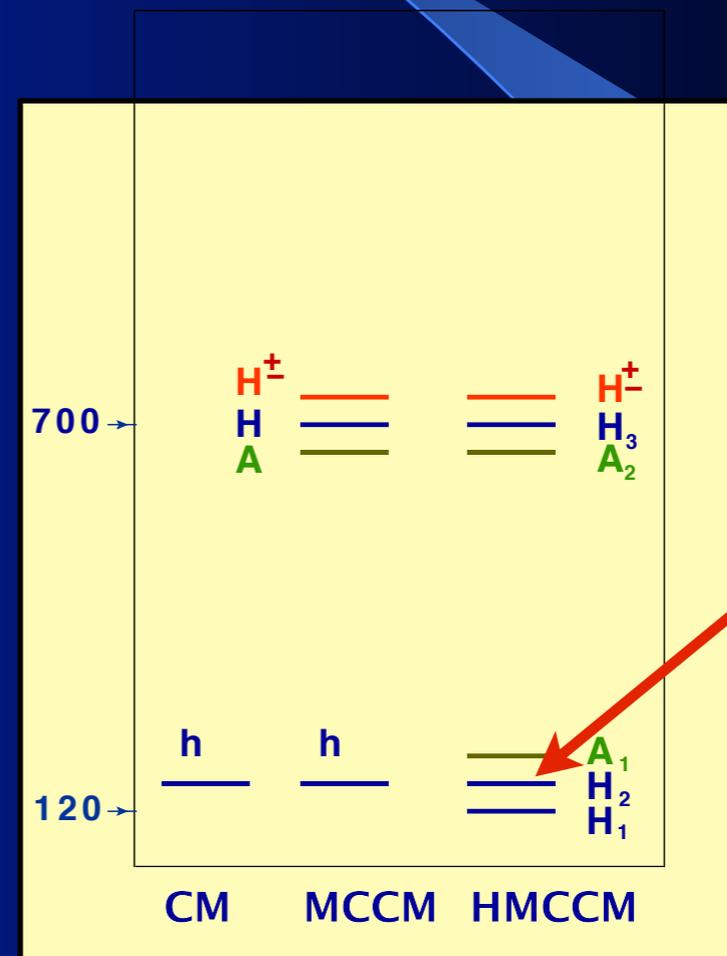
Новые частицы

- Является ли открытый хиггсовский бозон частицей СМ?
- Какова альтернатива?



- Высокоточные измерения вероятностей распада

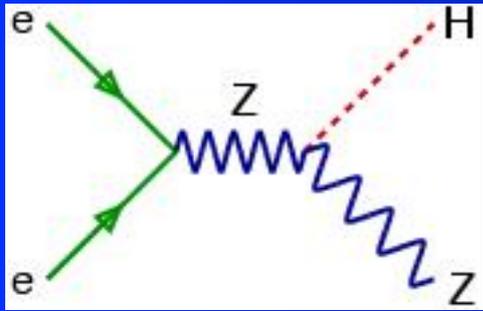
- Синглетные, дублетные и трепетные расширения



- Может быть мы нашли эту частицу?

- Поиски новых хиггсовских бозонов

PRECISION PHYSICS OF THE HIGGS BOSONS

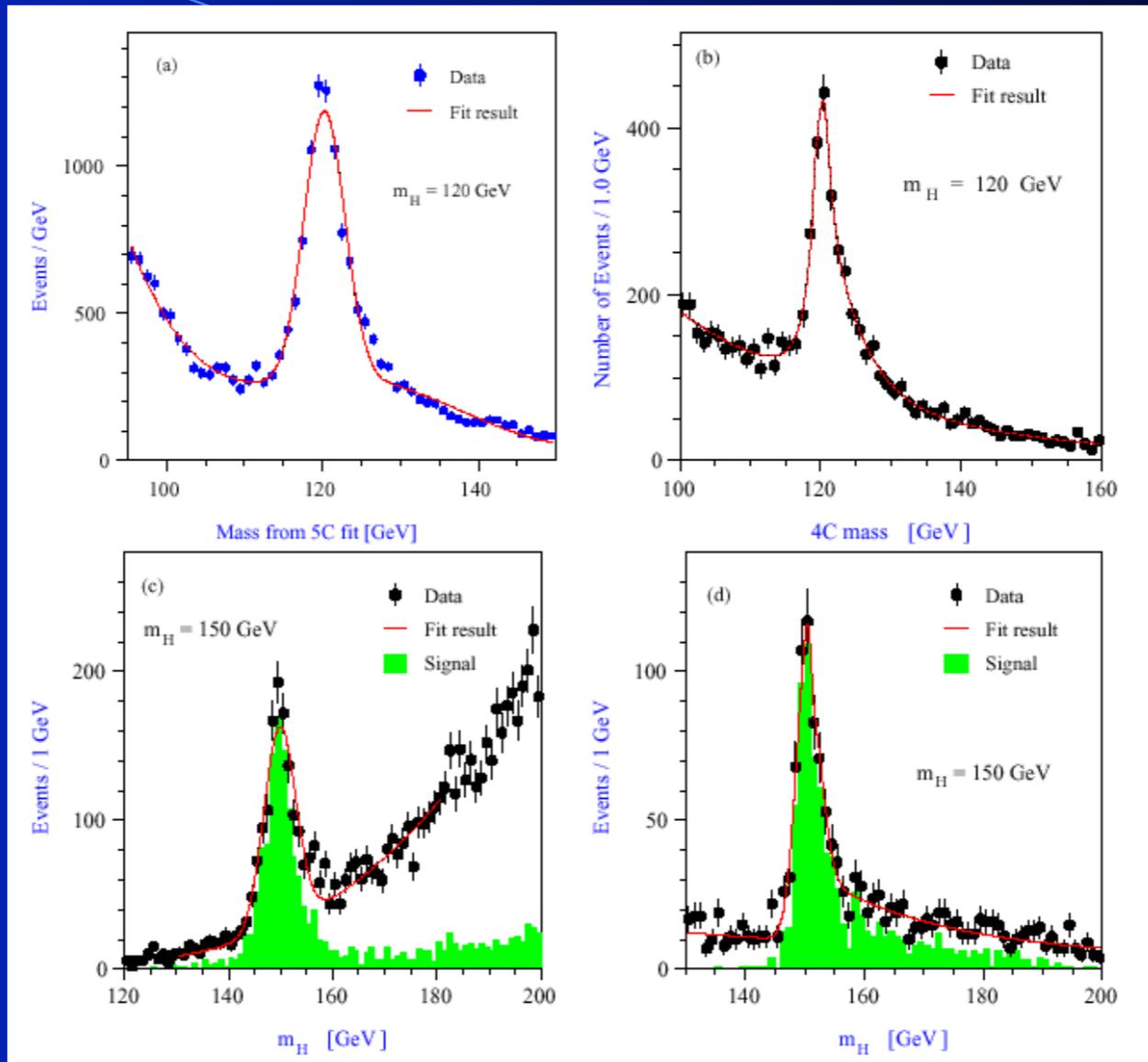


$$\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}$$

$ee \rightarrow HZ$ diff. decay channels

Int Linear Collider

$$\rightarrow W^+W^-q\bar{q}$$



$$\rightarrow q\bar{q}l^+l^-$$

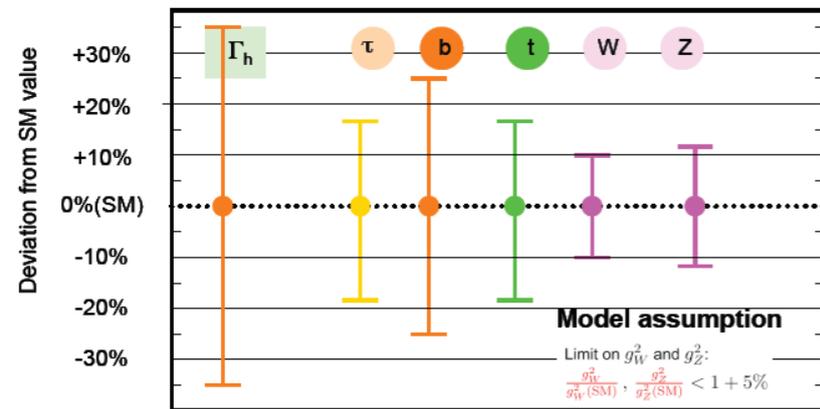
$\Delta m_H = 40 \text{ MeV}$

$$\rightarrow W^+W^-l^+l^-$$

$\Delta m_H = 70 \text{ MeV}$

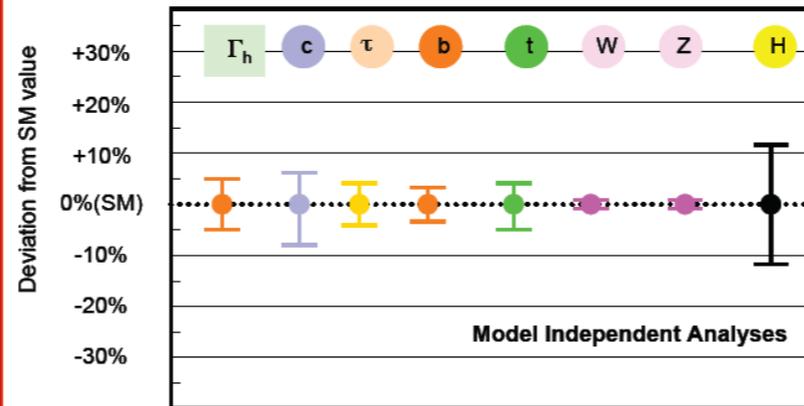
Coupling Precision

LHC 300 fb⁻¹ x 2



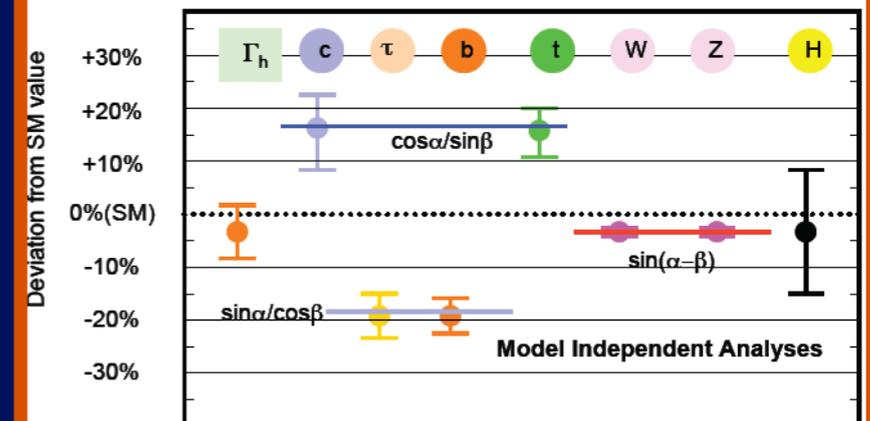
Coupling Precision

ILC



SUSY or 2HDM

ILC



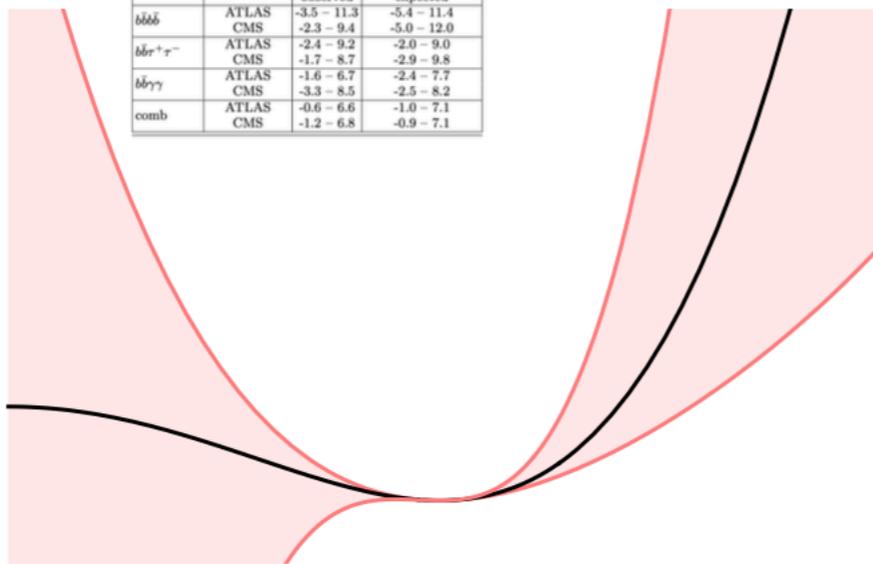
Хиггсовский потенциал - тест СМ

Higgs self coupling [Meade]

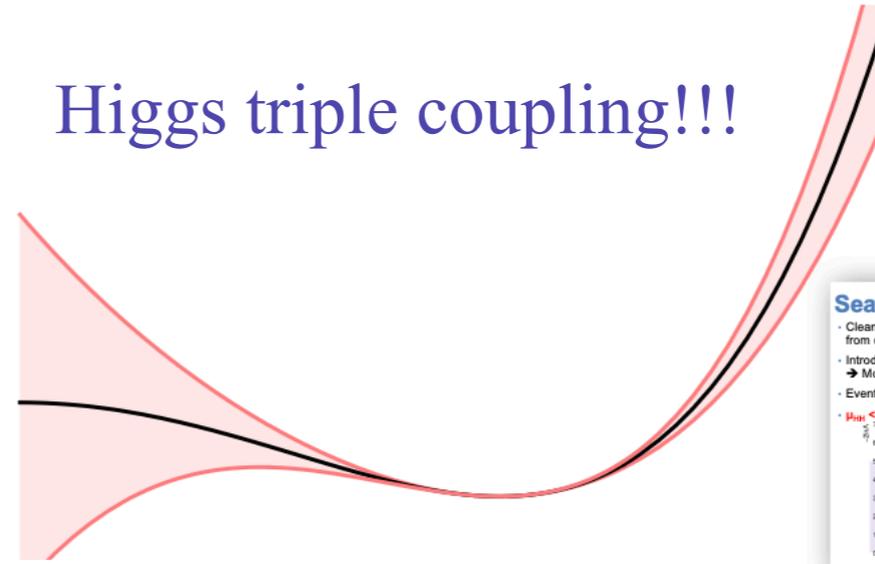
If the questions center on the Higgs, do we need to do more than sit back and wait for more data for more precision (or a Higgs factory)?

Snowmass EF Higgs Topical Report
2209.07510

Final state	Collaboration	allowed κ_λ interval at 95% CL	observed	expected
$b\bar{b}\delta$	ATLAS	-3.5 - 11.3	-5.4	-11.4
	CMS	-2.3 - 9.4	-5.0	-12.0
$b\bar{b}\tau^+\tau^-$	ATLAS	-2.4 - 9.2	-2.0	-9.0
	CMS	-1.7 - 8.7	-2.9	-9.8
$b\bar{b}\gamma\gamma$	ATLAS	-1.6 - 6.7	-2.4	-7.7
	CMS	-3.3 - 8.5	-2.5	-8.2
comb	ATLAS	-0.6 - 6.6	-1.0	-7.1
	CMS	-1.2 - 6.8	-0.9	-7.1



Higgs triple coupling!!!



Search for DiHiggs in $b\bar{b}\gamma\gamma$ ATLAS-CONF-2023-050
Viviana's talk

- Clean $H \rightarrow \gamma\gamma$ signature and excellent $m_{\gamma\gamma}$ resolution to discriminate HH signal from continuum $\gamma\gamma$ background
- Introduced VBF-jet tagger to improve jet assignment
→ More sensitive to VBF HH
- Event categorization using BDT scores

$\mu_{HH} < 4.0$ (6.4 exp.) at 95% CL

$-1.4 < \kappa_\lambda < 6.9$ at 95% CL

H/T N.Craig, R. Petrossian-Byrne

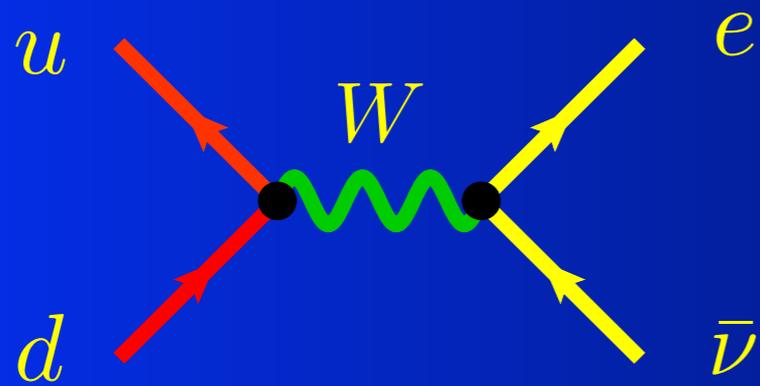
When do we *really* care about non-resonant di-Higgs (λ_3) for its own sake?

Interesting to think about in more general setups beyond singlet, e.g. composite Higgs

See G. Durieux et al, 2110.06941 for recent extensions

Нейтрино-загадочная частица

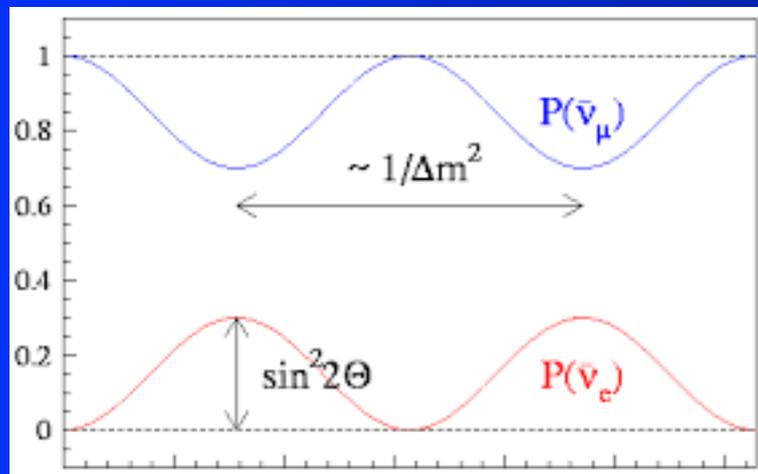
Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов



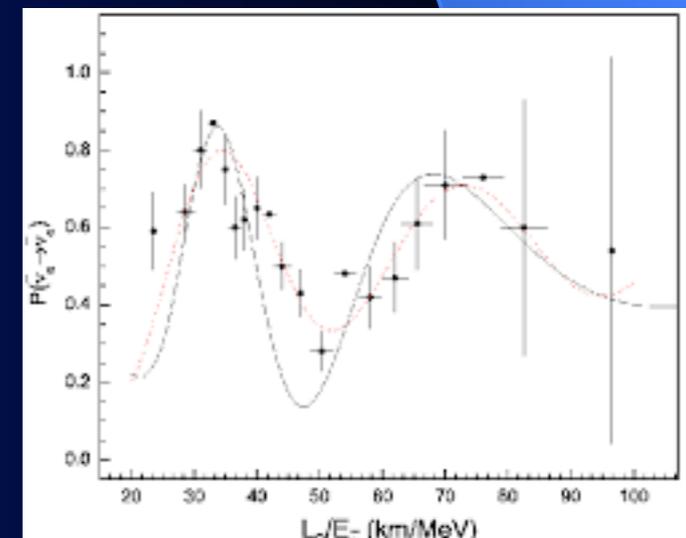
Нейтрино

- 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

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



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

$$0.06 \text{ eV} < \sum m_\nu < 0.12 \text{ eV}$$

β -распад

KATRIN

Нейтринные осцилляции

Спектр реликтового микроволнового фона

Троицк-Майнц

Античастица ли нейтрино самой себе?

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

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

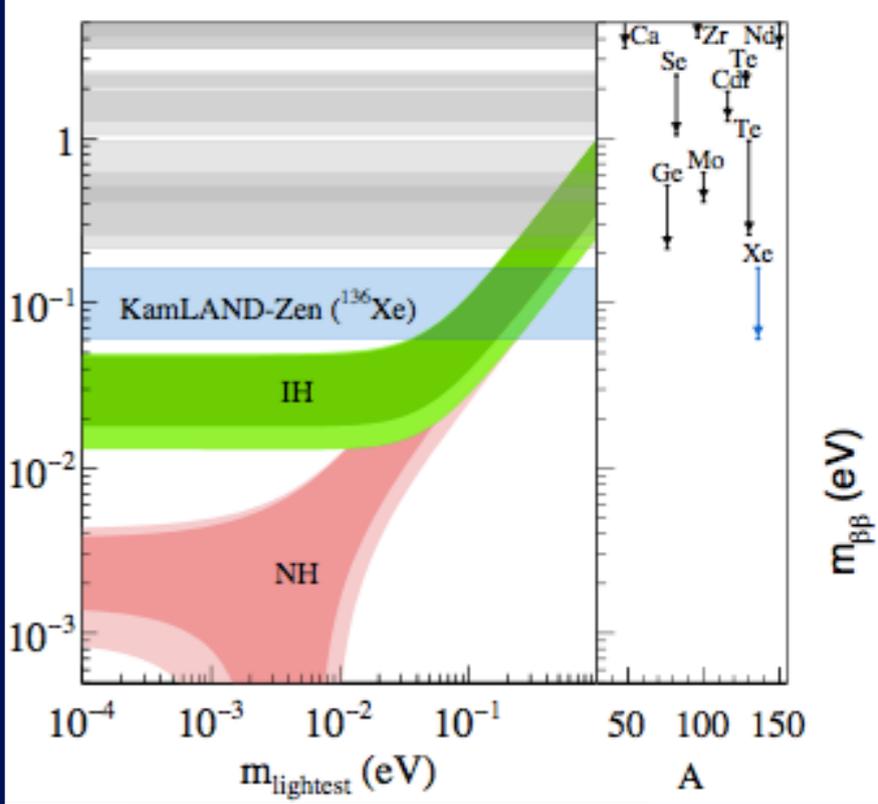
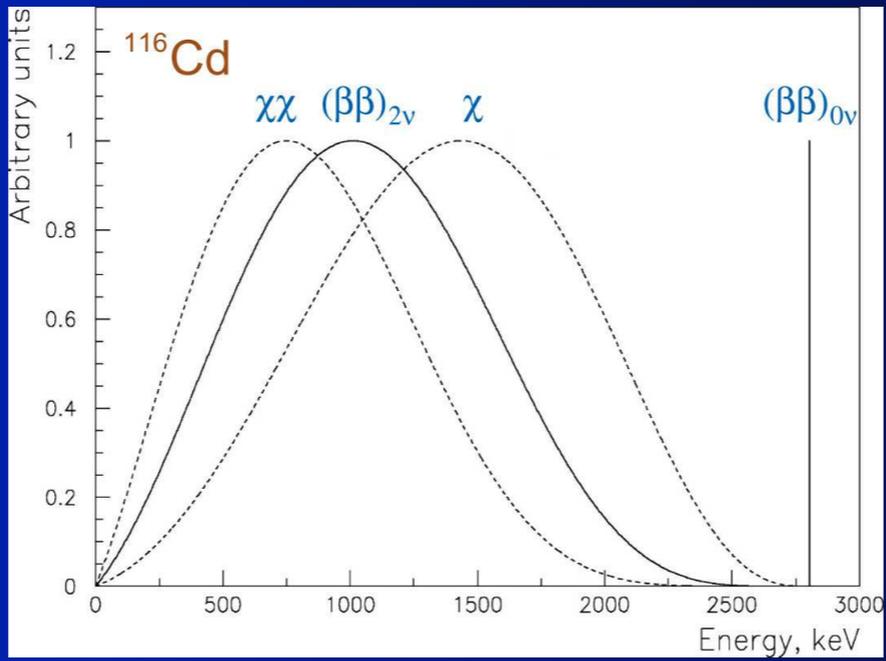
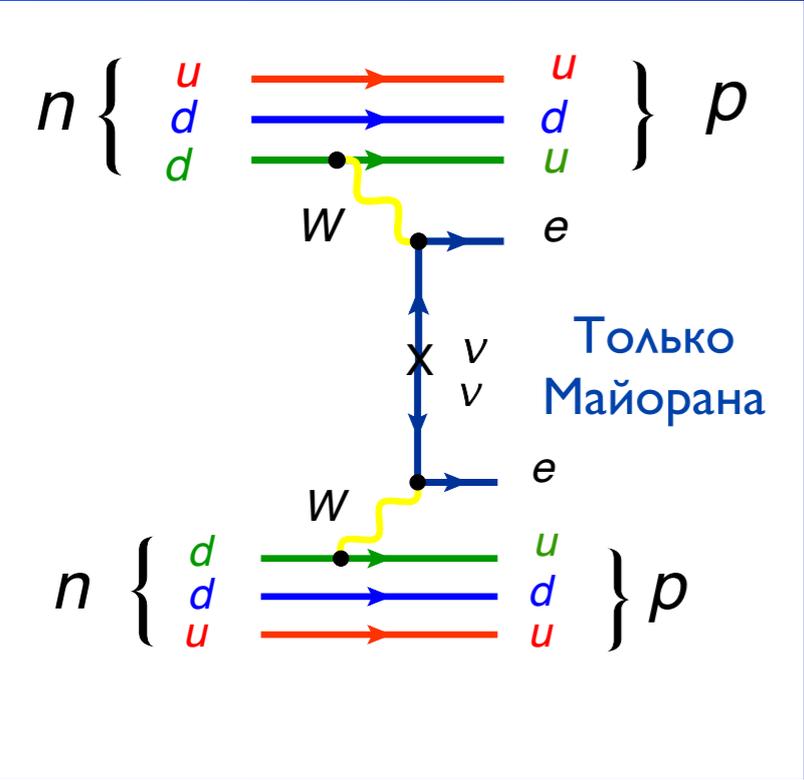
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

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

$0\nu\beta\beta$ decay



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

Античастица ли нейтрино самой себе?

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

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

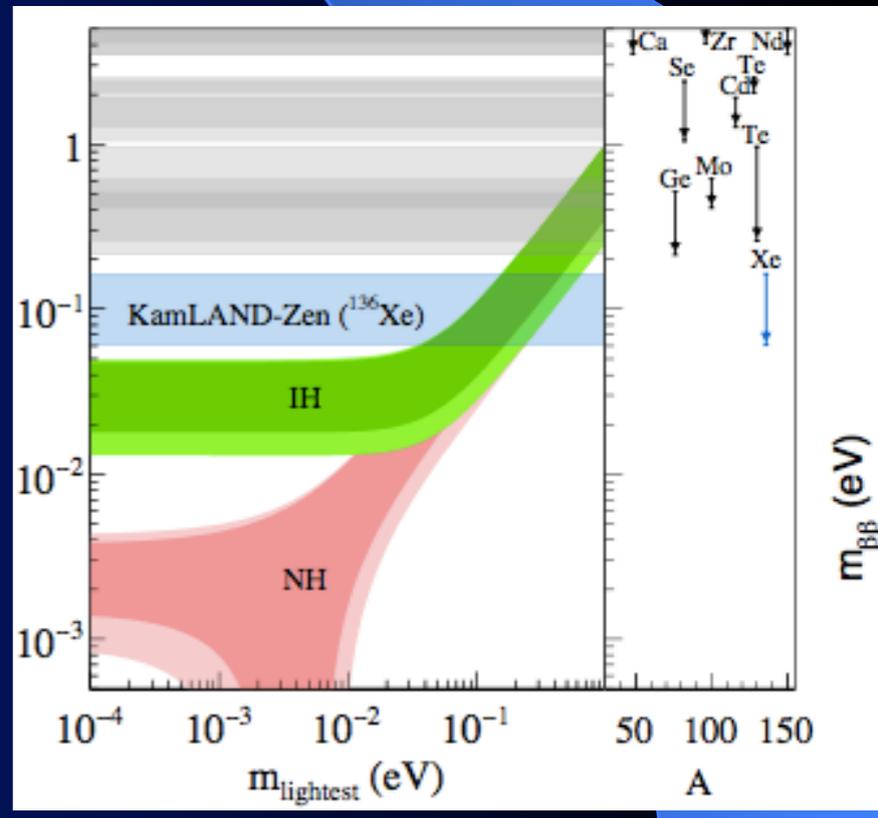
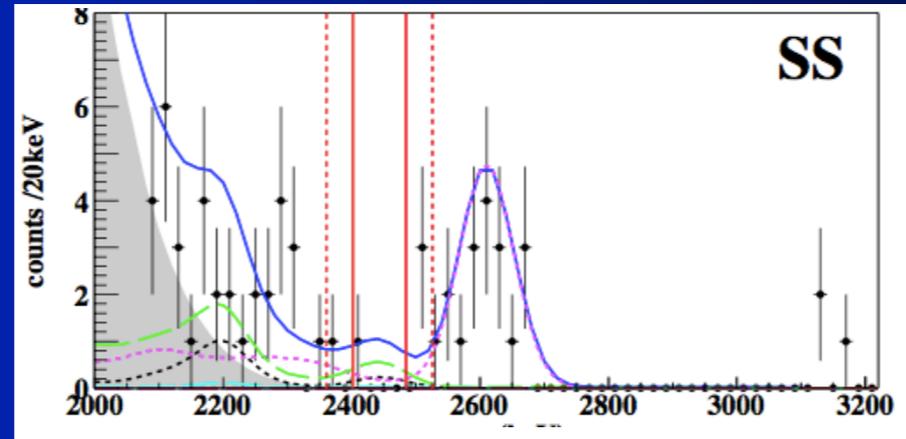
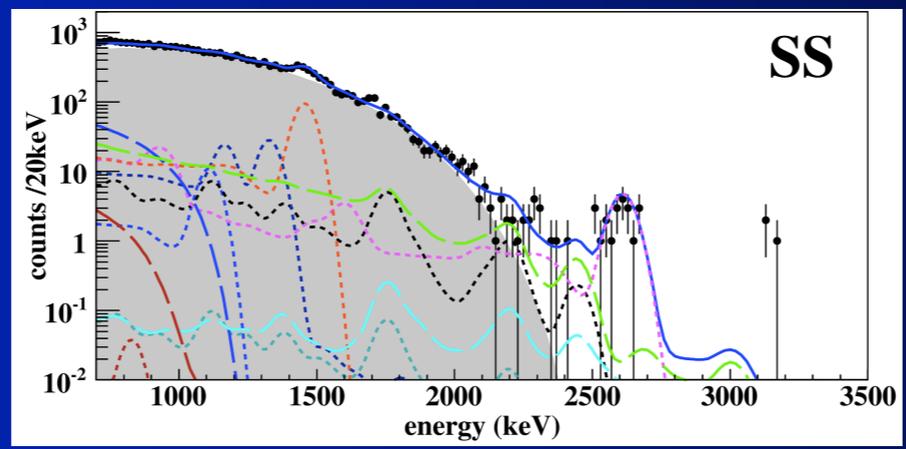
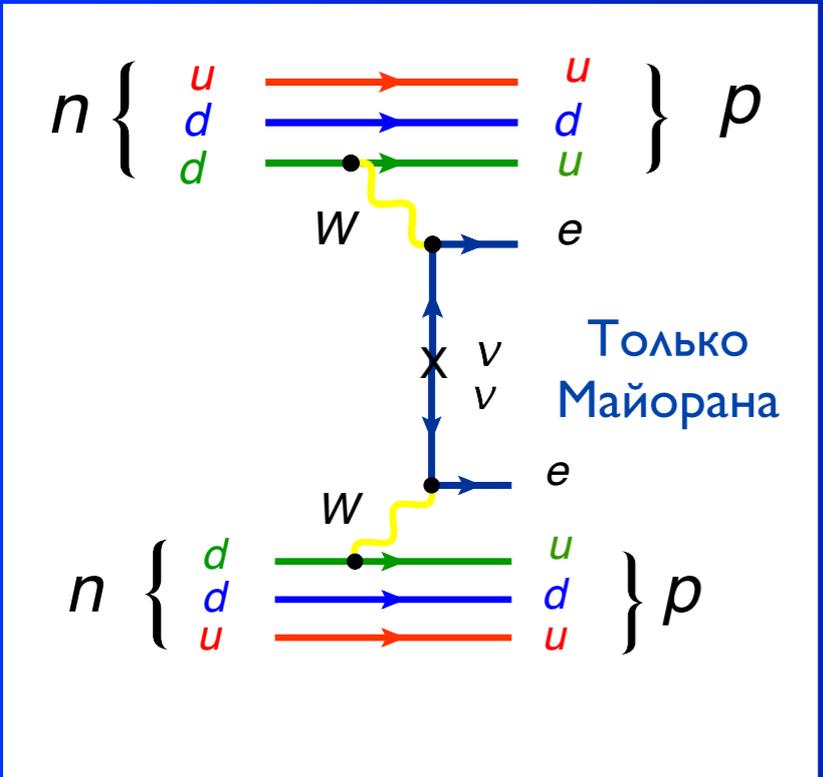
$$m_{\nu_L} = m_{\nu_R}$$



$$\nu_M = \nu_M^*$$

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

$0\nu\beta\beta$ decay



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

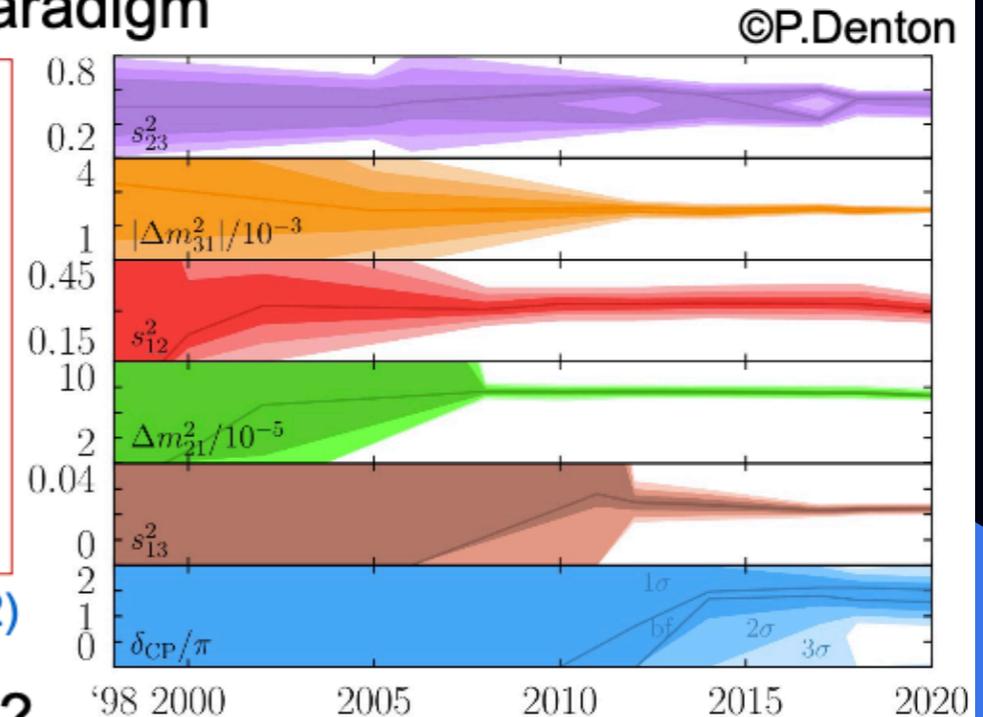
Прецизионная нейтронная физика

Current knowledge and open questions

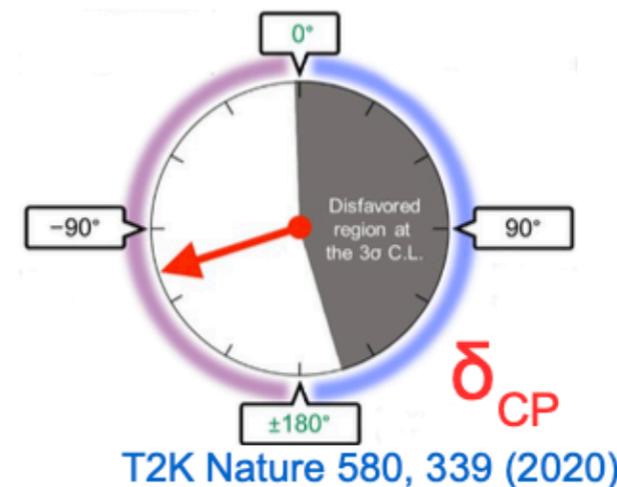
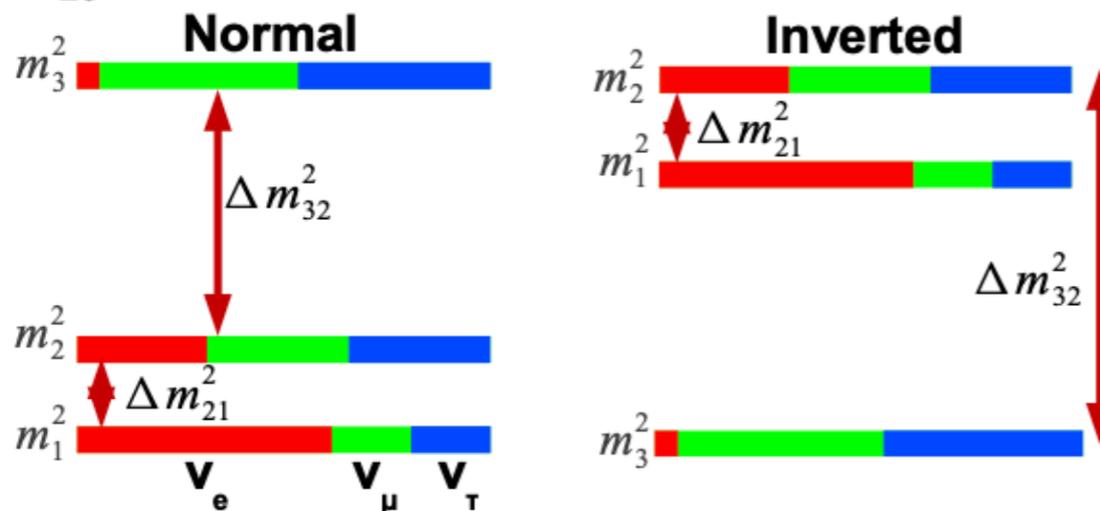
- precise measurements test the 3-flavor paradigm

$$\begin{aligned} \sin^2(\theta_{12}) &= 0.307 \pm 0.013 \\ \Delta m_{21}^2 &= (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2(\theta_{23}) &= 0.539 \pm 0.022 \quad (S = 1.1) \quad (\text{Inverted order}) \\ \sin^2(\theta_{23}) &= 0.546 \pm 0.021 \quad (\text{Normal order}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (-2.536 \pm 0.034) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Inverted order}) \\ \Delta m_{32}^2 &= (2.453 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Normal order}) \\ \sin^2(\theta_{13}) &= (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-2} \\ \delta, CP \text{ violating phase} &= 1.36^{+0.20}_{-0.16} \pi \text{ rad} \end{aligned}$$

PTEP 2022, 083C01 (2022)



- θ_{23} octant, mass ordering, CP violation ???

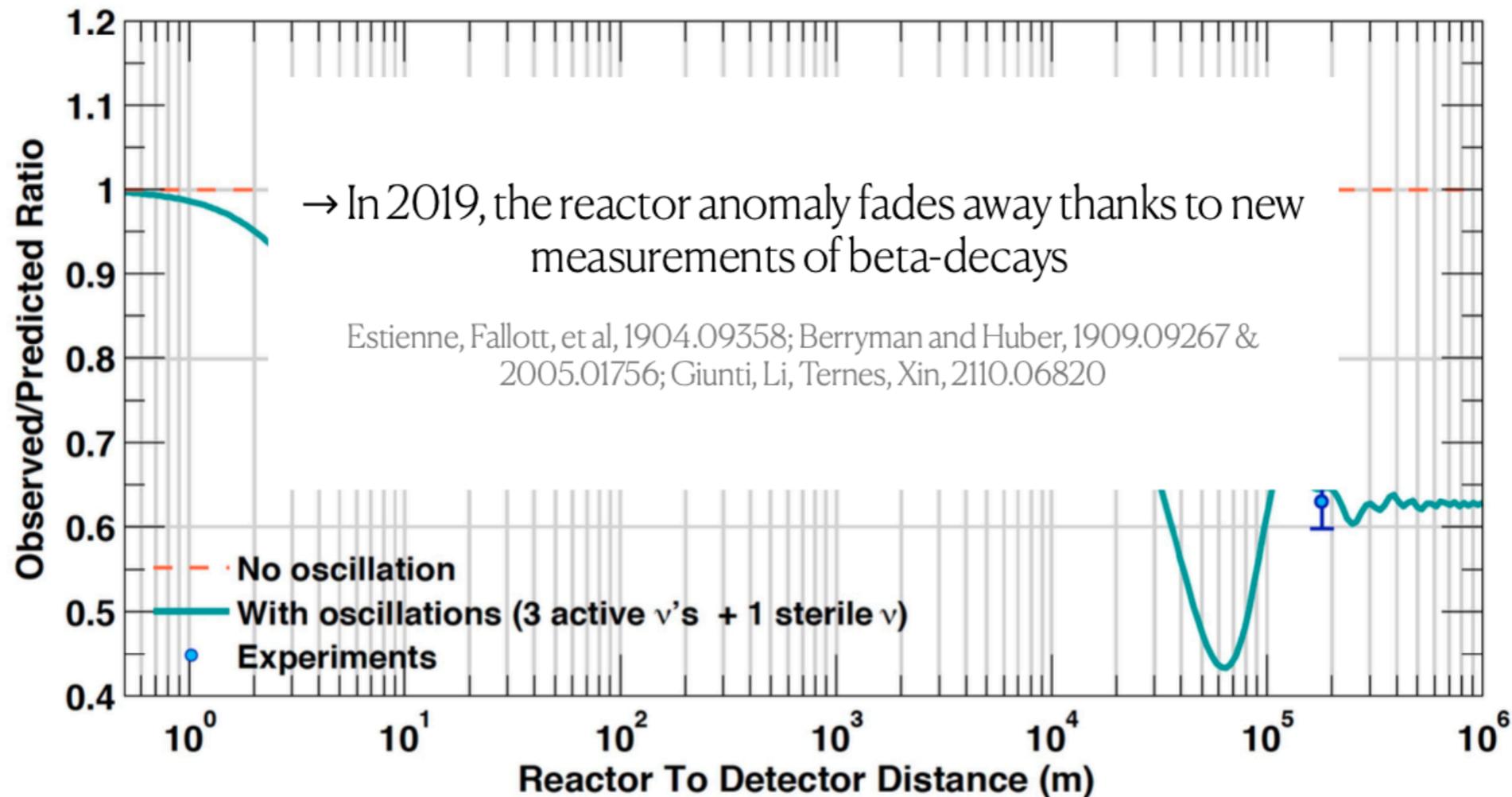


Not covered by this talk: direct mass measurements, Dirac/Majorana nature of neutrinos, origin of masses and mixing

Нейтринные аномалии

Reactor antineutrino anomaly?

$$P_{ee} \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{ee} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_\nu [\text{MeV}]} \right)$$

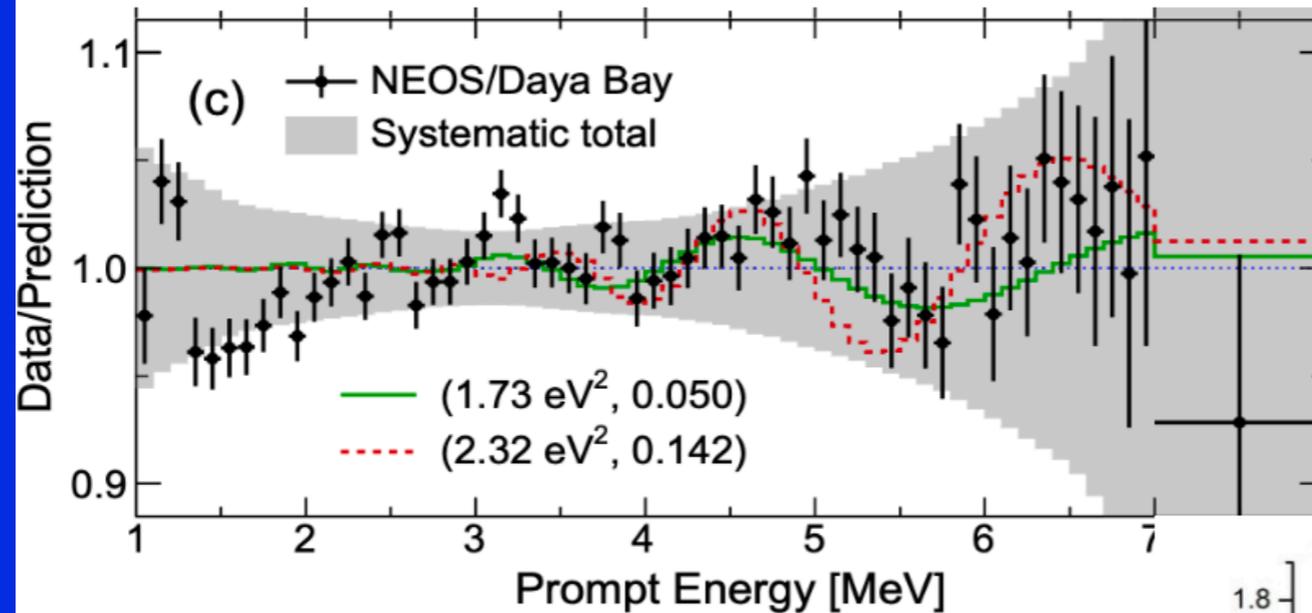


Нейтринные аномалии

Very Short-Baseline reactors

(PROSPECT,
STEREO,
NEOS,
DANSS,
Neutrino-4)

NEOS coll., 1610.05134

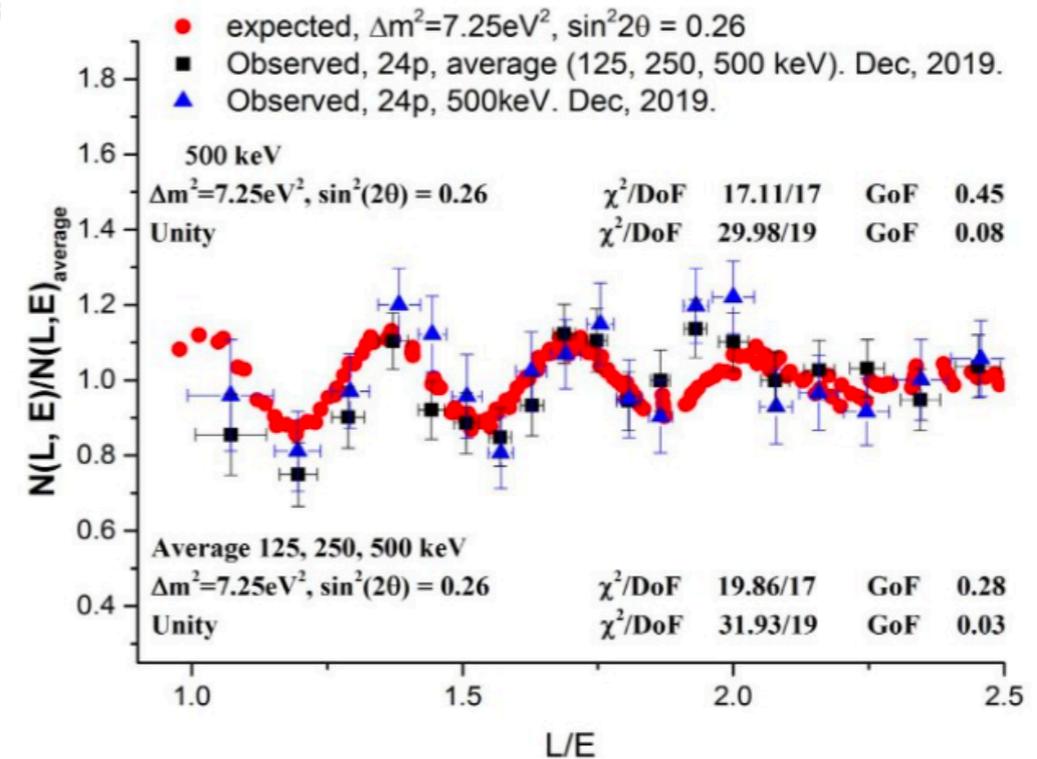


→ Was there a signal beyond statistical fluctuations?

Agostini, Neumair, 1906.11854
 Giunti, 2004.07577
 PROSPECT & STEREO, 2006.13147
 Coloma, Huber, Schwetz, 2008.06083

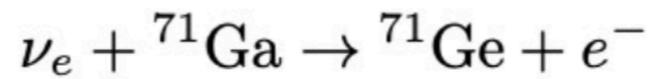
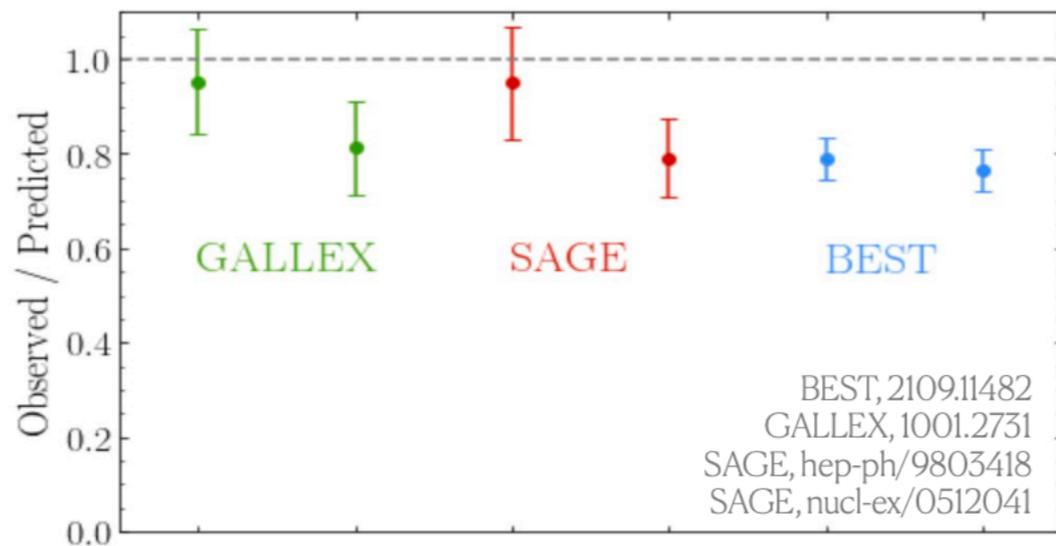
Pilar Coloma - IFT

Neutrino-4 coll., 2005.05301

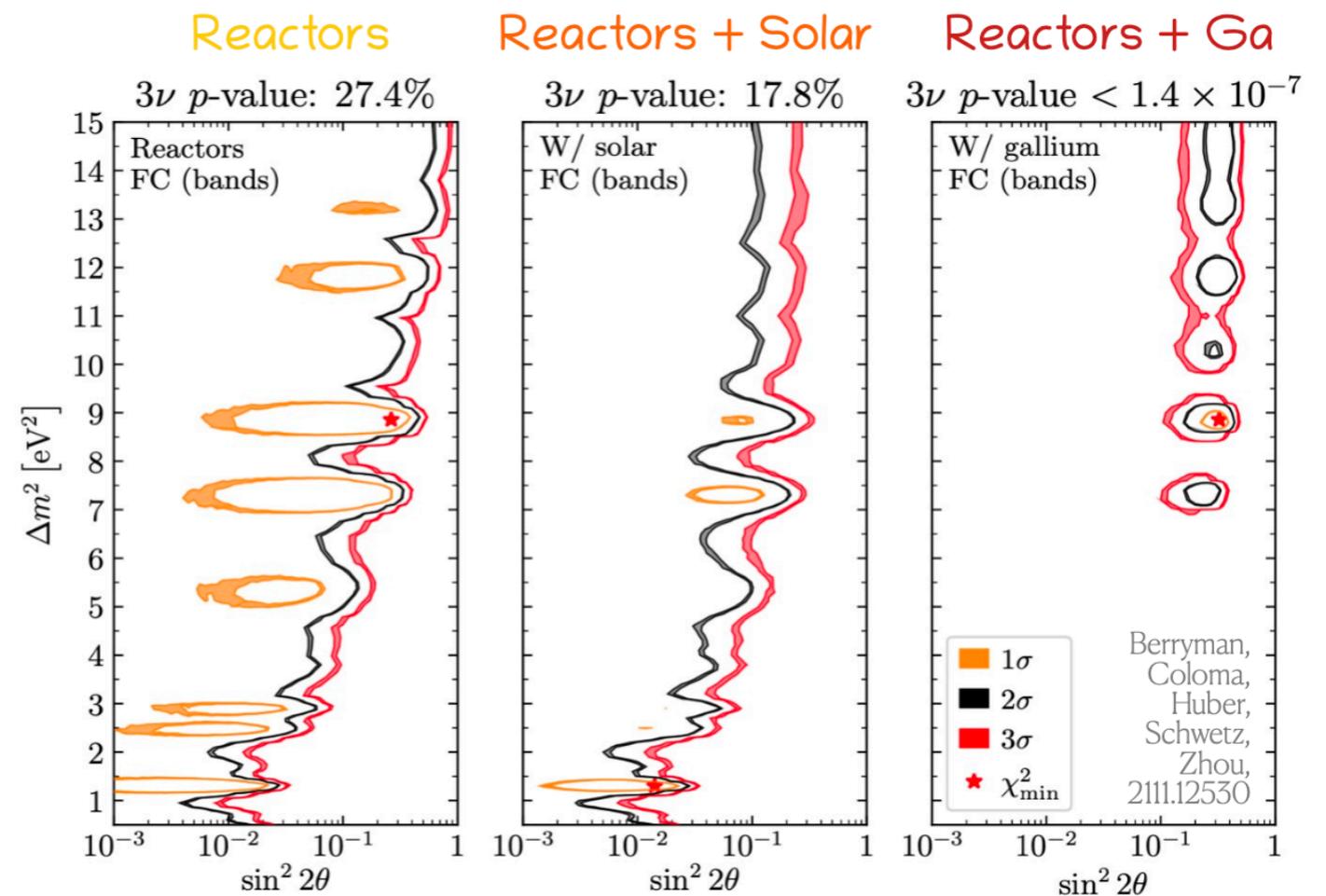


Нейтринные аномалии

Gallium experiments



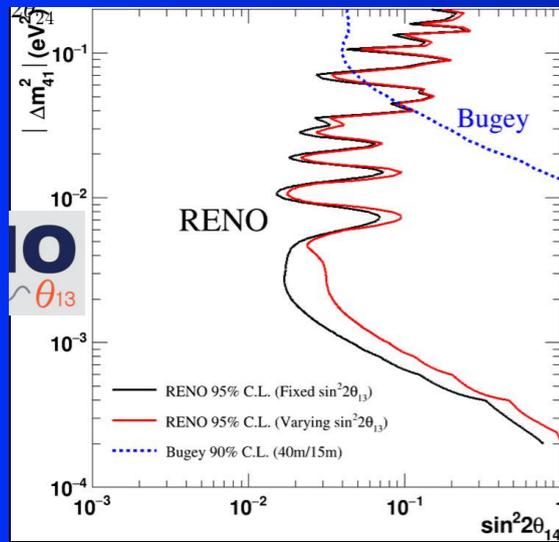
- calibration of the source, Ge extraction efficiency (?)



STERILE NEUTRINO

No evidence for sterile neutrinos

Various expts interpreted within 4 neutrino framework



Oscillation channels are related:

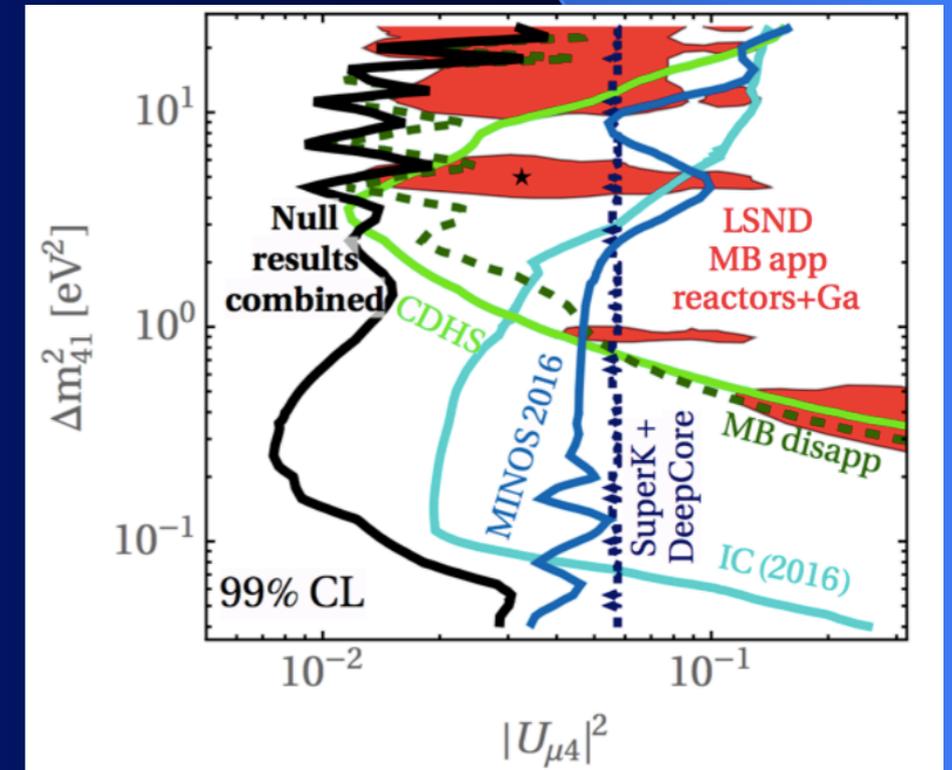
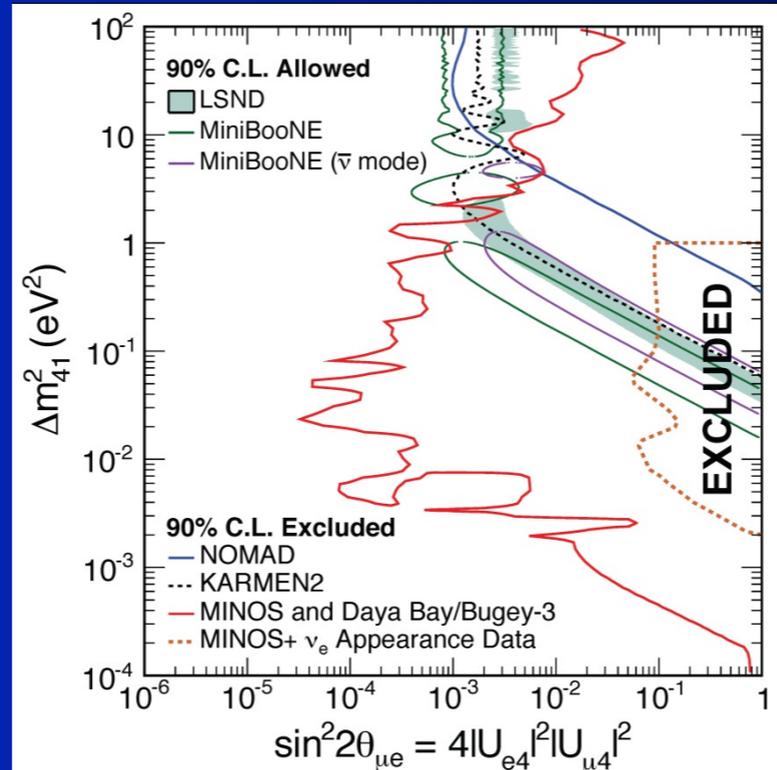
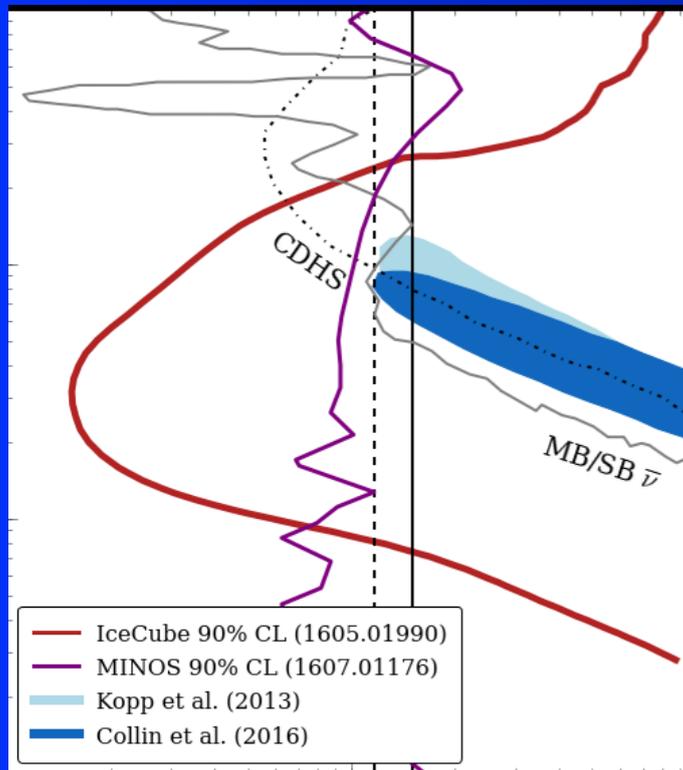
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \approx 1 - 2|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2)$$

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu} \approx 1 - 2|U_{\mu4}|^2(1 - |U_{\mu4}|^2)$$

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \approx 2|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2$$

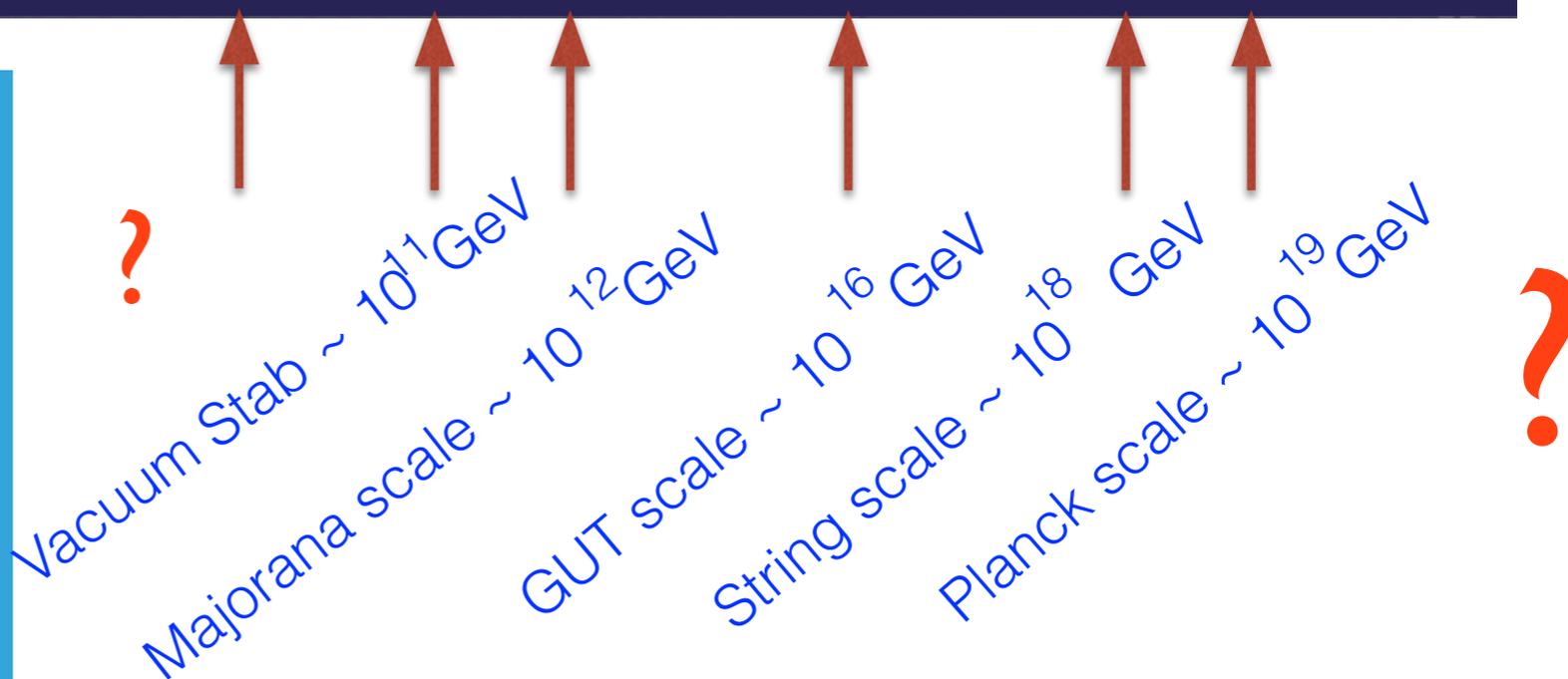
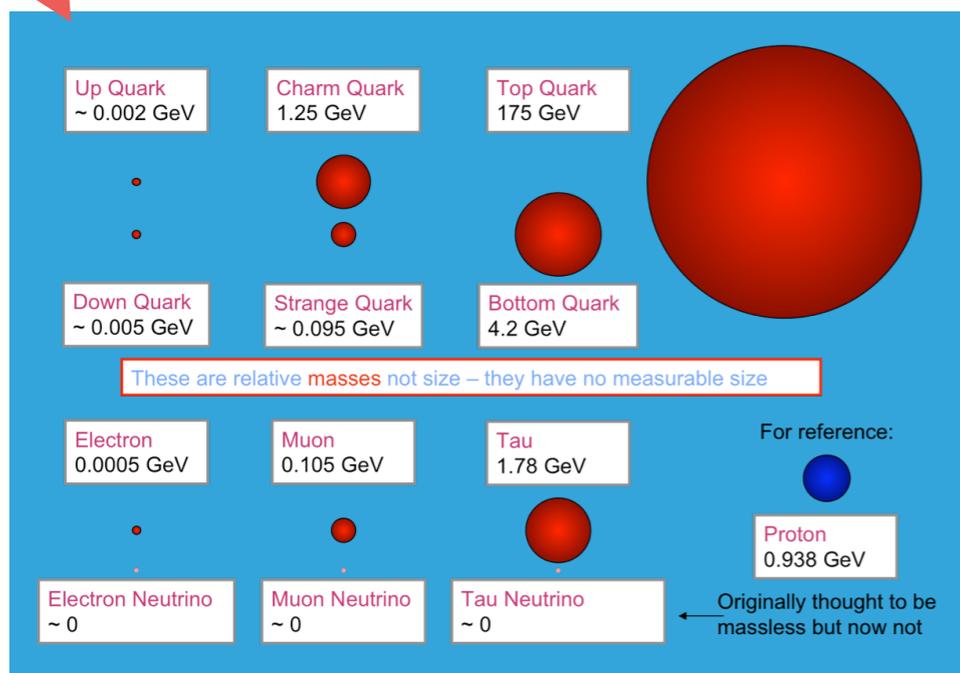
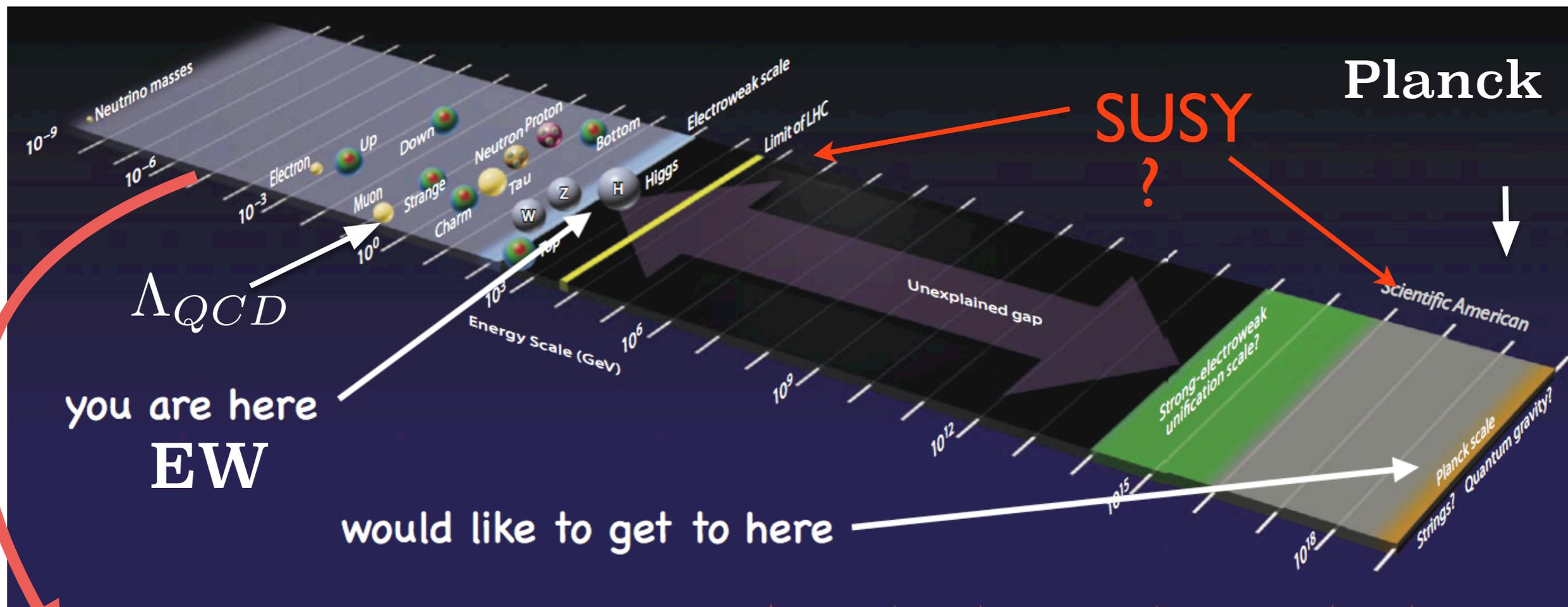
for

$$4\pi E / \Delta m_{41}^2 \ll L \ll 4\pi E / \Delta m_{31}^2$$



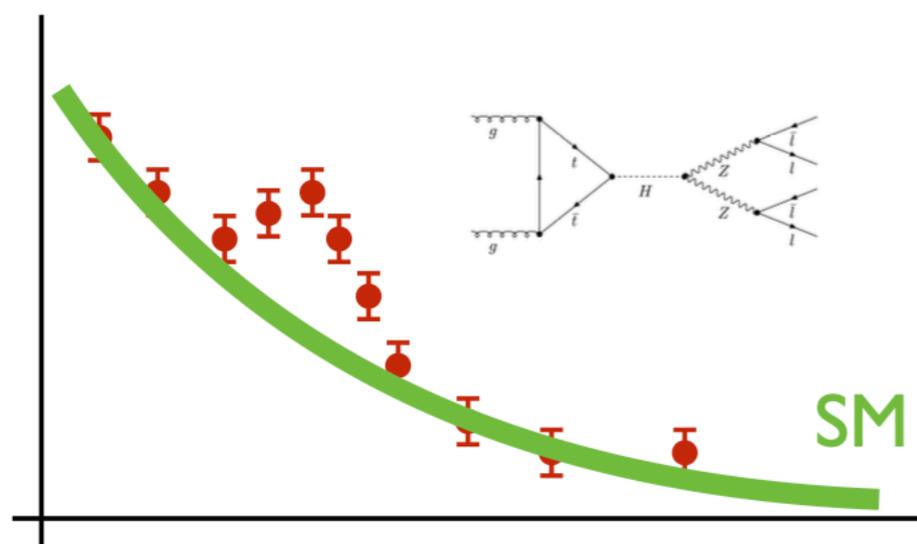
За пределами Стандартной Модели

IS THERE ANOTHER SCALE EXCEPT FOR EW AND PLANK?



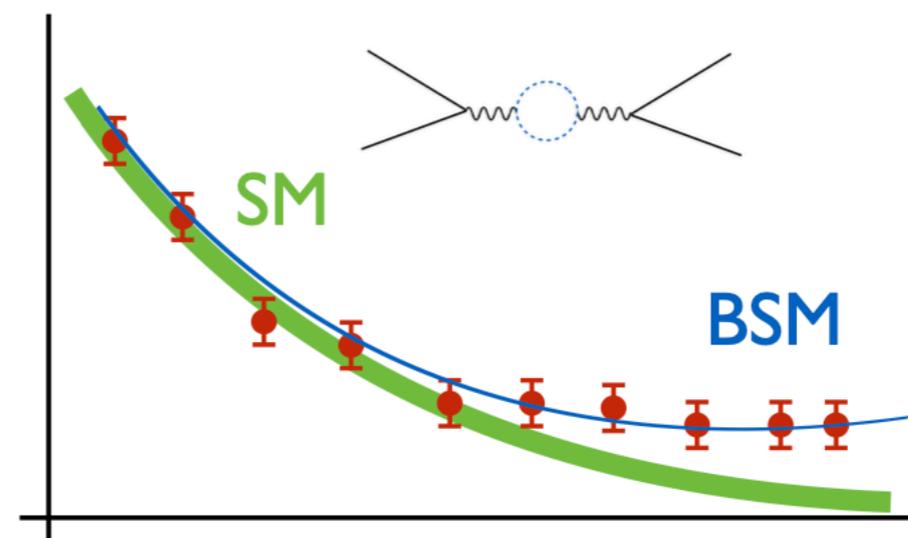
Поиски новой физики

- ▶ Still plenty of room for new discoveries : two main scenarios



- ▶ Search for (and find) new states
- ▶ Resonance needs “descriptive” TH

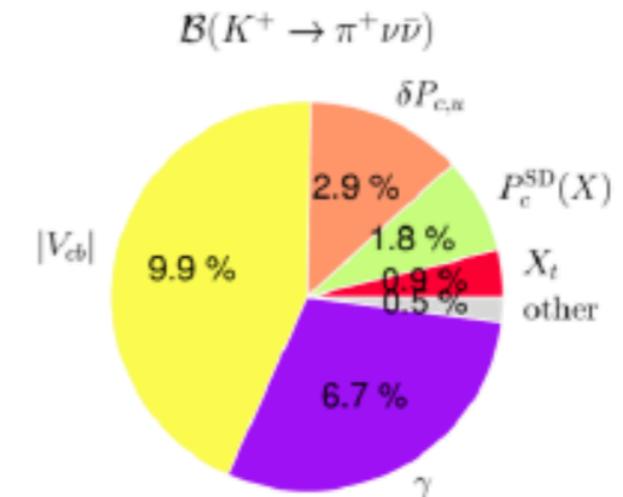
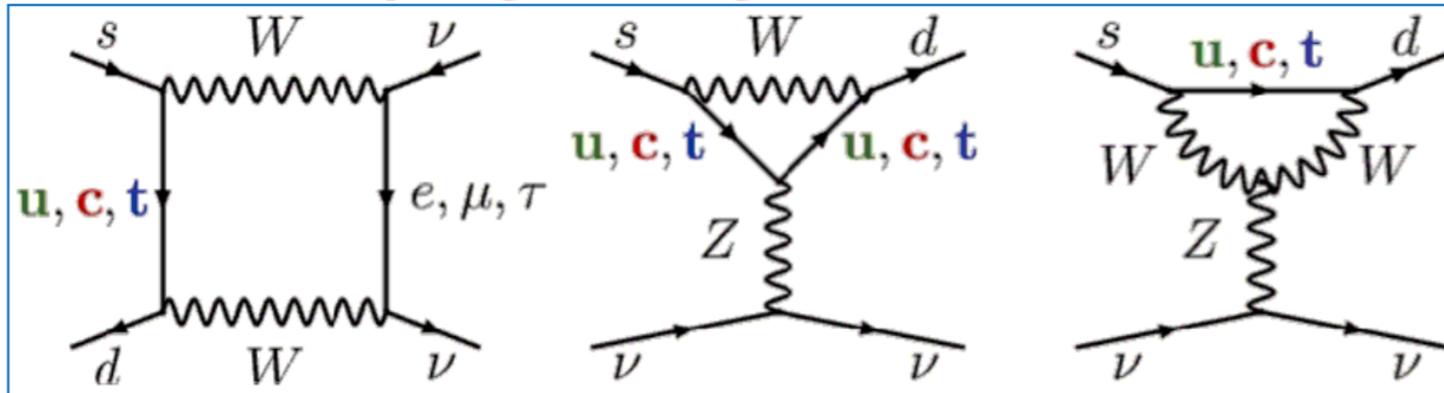
Most likely look for “new interactions”
Small deviations from SM : PRECISION
EFT description / BSM model



Редкие распады

The decays $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$

SM: box and penguin diagrams



Theoretical error budget
Buras. et. al., JHEP11(2015)033

FCNC high-order process with highest CKM suppression:

$$A \sim (m_t/m_W)^2 |V_{ts}^* V_{td}| \sim \lambda^5$$

Basically free from hadronic uncertainties

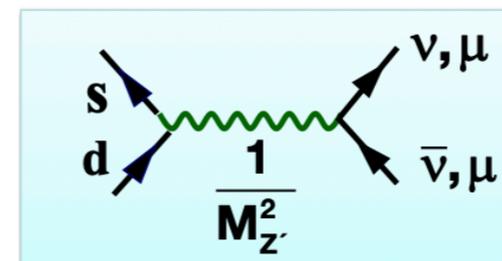
Exceptional SM precision

Sensitive to new physics, variety of BSM scenarios

SM branching ratios:
[arXiv:2109.11032]

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu} (\gamma) = (8.62 \pm 0.42) \times 10^{-11}$$

$$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu} = (2.94 \pm 0.15) \times 10^{-11}$$



[arXiv:1408.0728]

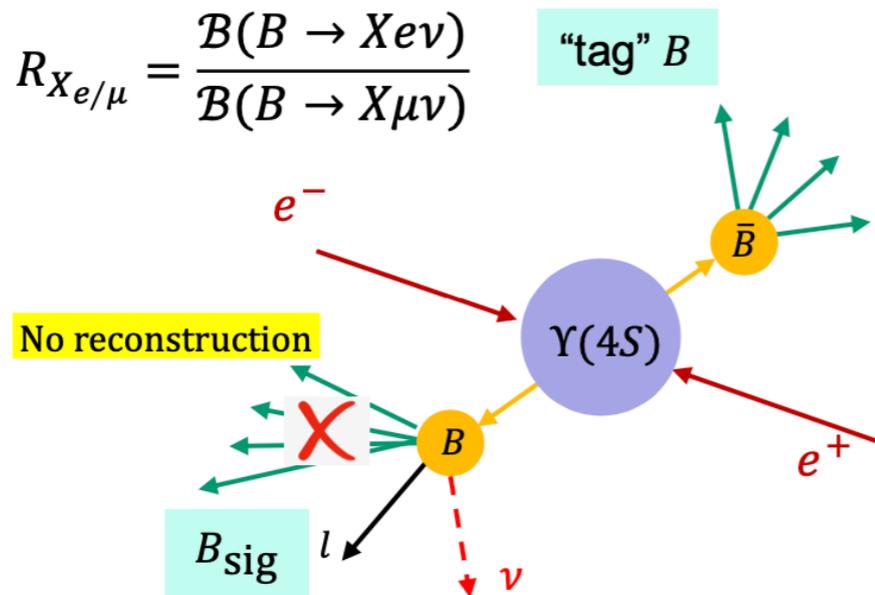
$$\Lambda_{\text{NP}}^{\text{max}} \approx 2000 \text{ TeV}$$

Lepton Flavour Universality

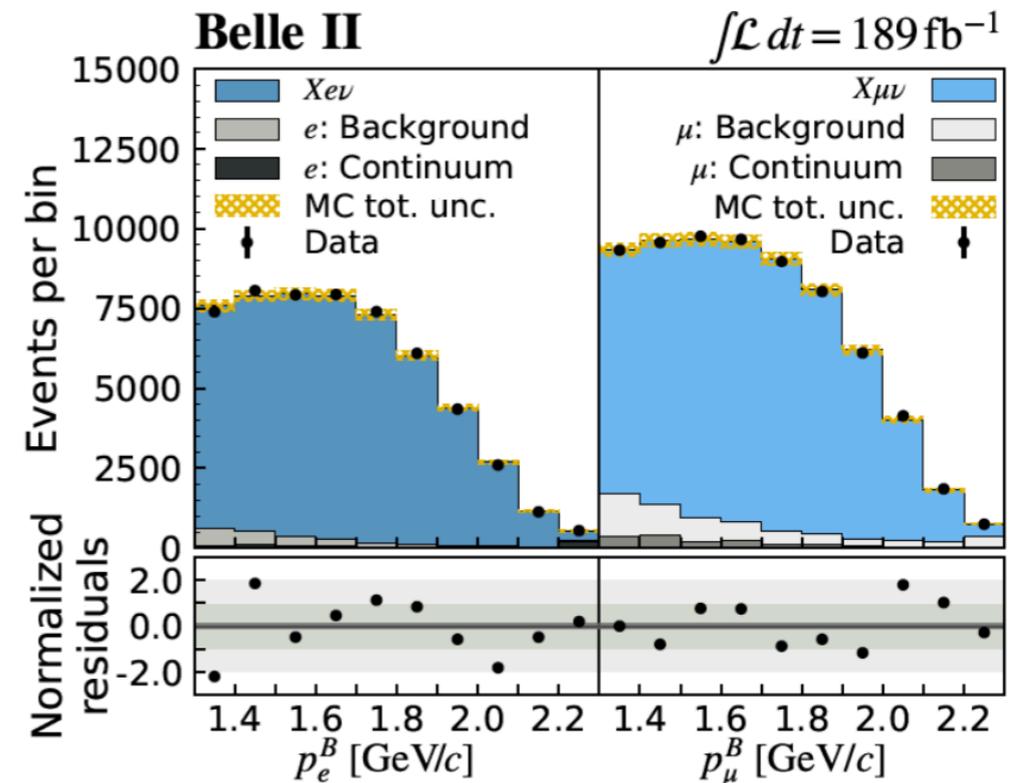
Belle II: LFU $B \rightarrow Xl\nu$ Inclusive

[Phys.Rev.Lett. 131, 051804]

$$R_{Xe/\mu} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow Xe\nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow X\mu\nu)}$$



Sample composition fit to lepton momentum spectrum in signal and control regions ("tag" B and flavor correlation used to reduce background)



Partner B meson fully reconstructed: fits to the lepton momentum > 1.3 GeV/c gives

$$R(X_{e/\mu}) = 1.007 \pm 0.009 \text{ (stat)} \pm 0.019 \text{ (syst)} \quad \text{(syst dominated by lept effic)}$$

Consistent with SM prediction: 1.006 ± 0.001
More statistics foreseen to reduce uncertainty

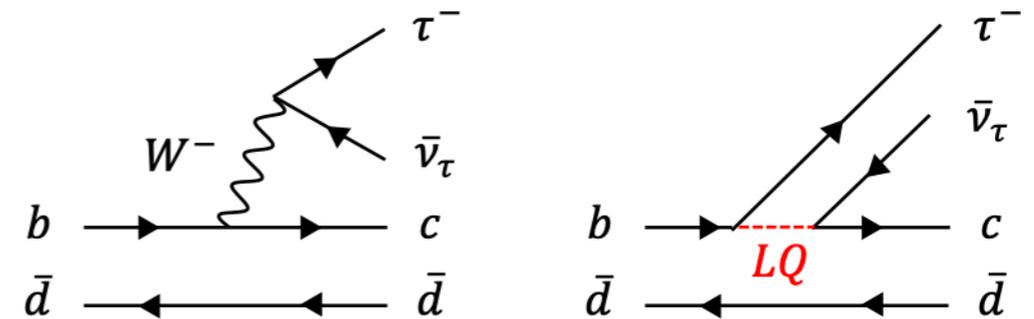
This kind of measurements is pretty much unique to Belle II

Lepton Flavour Universality

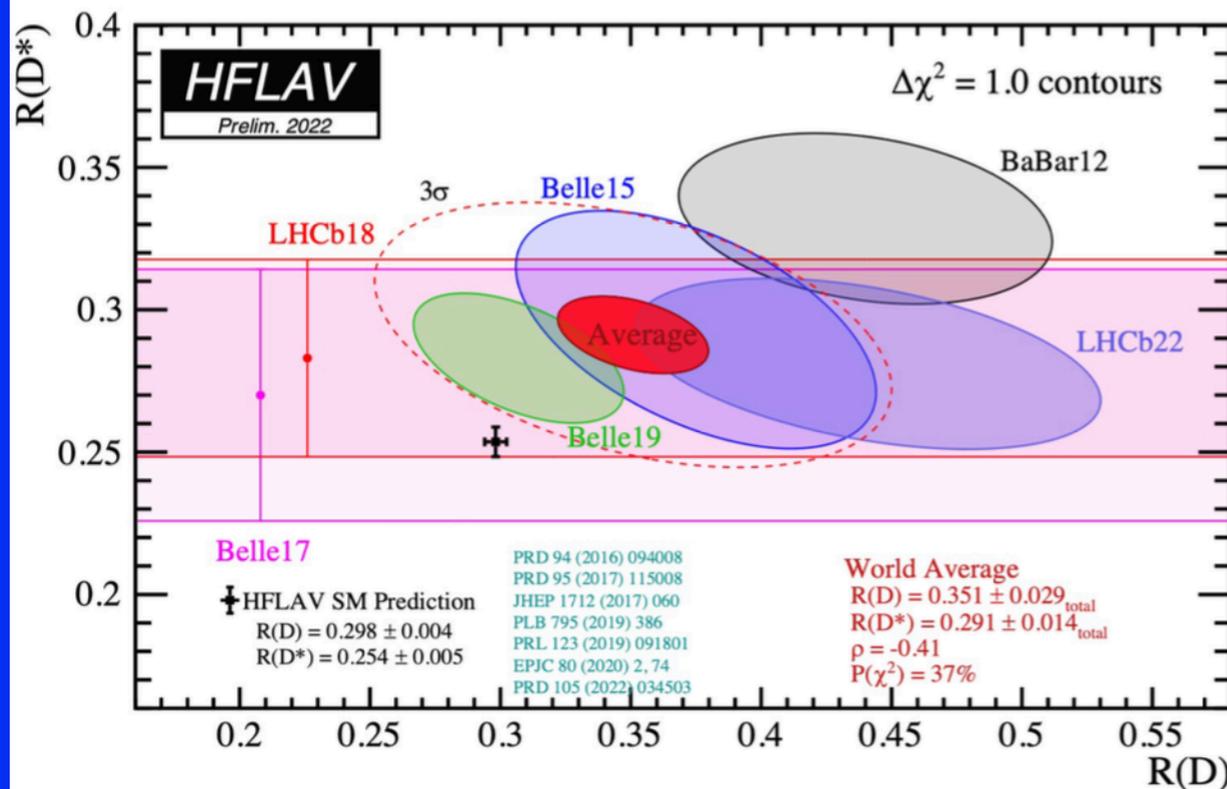
Lepton Flavour Universality with R_D , R_{D^*}

$$R_{D^*} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* l \nu)} \quad R_D = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D \tau \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D l \nu)}$$

Uncertainty from form factor and V_{cb} drop out
 Partial cancellation of theoretical uncertainties related to hadronic effects
 Small uncertainty for the SM prediction



BSM can change rate, angular and q^2 distributions



LHCb22: Result from LHCb simultaneous measurement of R_D , R_{D^*} using $\tau \rightarrow 3\pi\nu$ [arXiv:2302.02886].

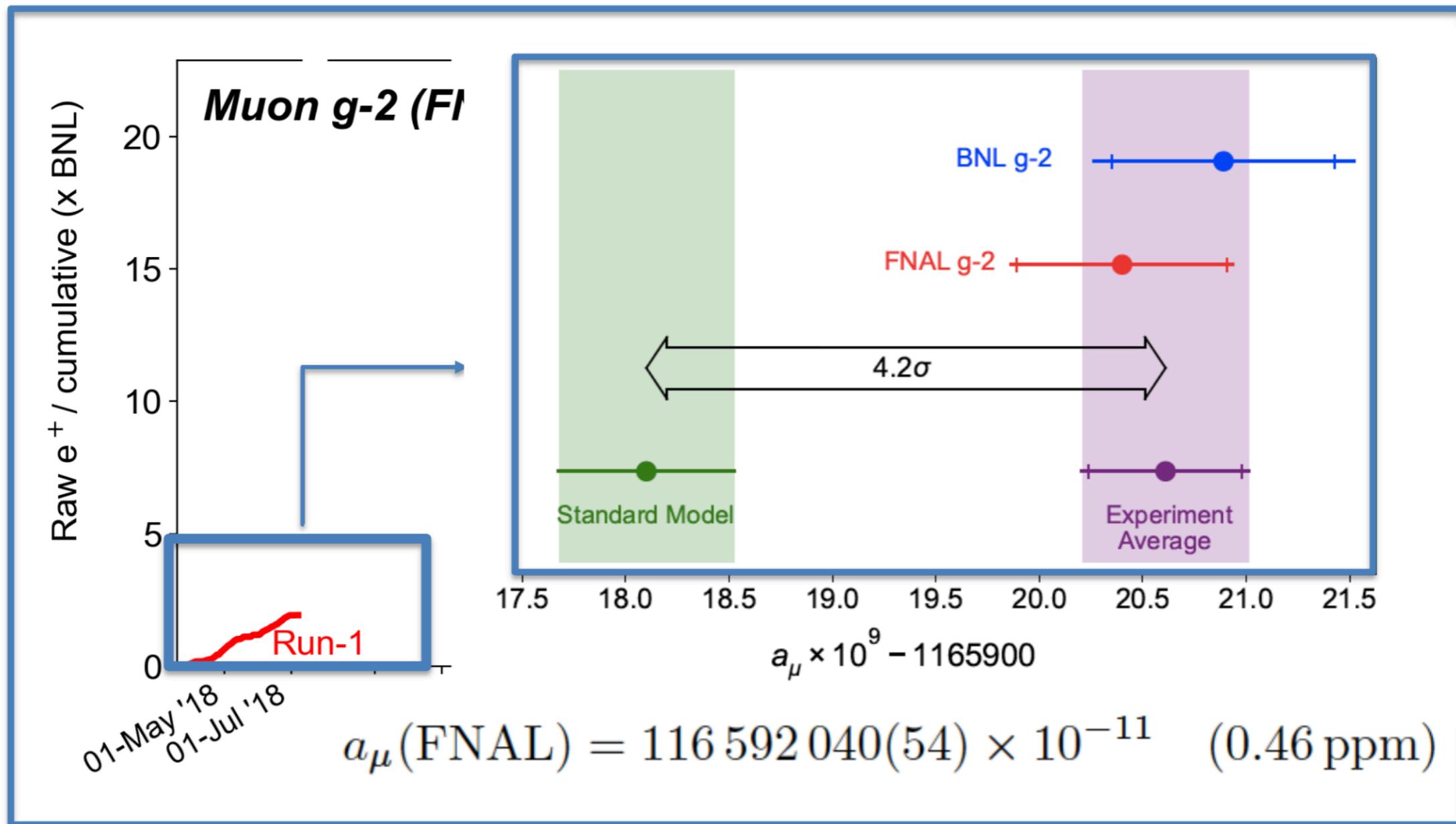
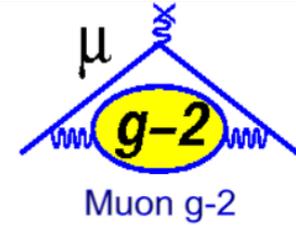
See talk by M. Sevilla

Measurement exceeded the SM predictions by 1.82σ & 2.49σ , respectively.
 2-degrees-of-freedom deviation is 3.5σ above SM.

gg-2

Эксперимент против теории

7 April 2021: We released our first result

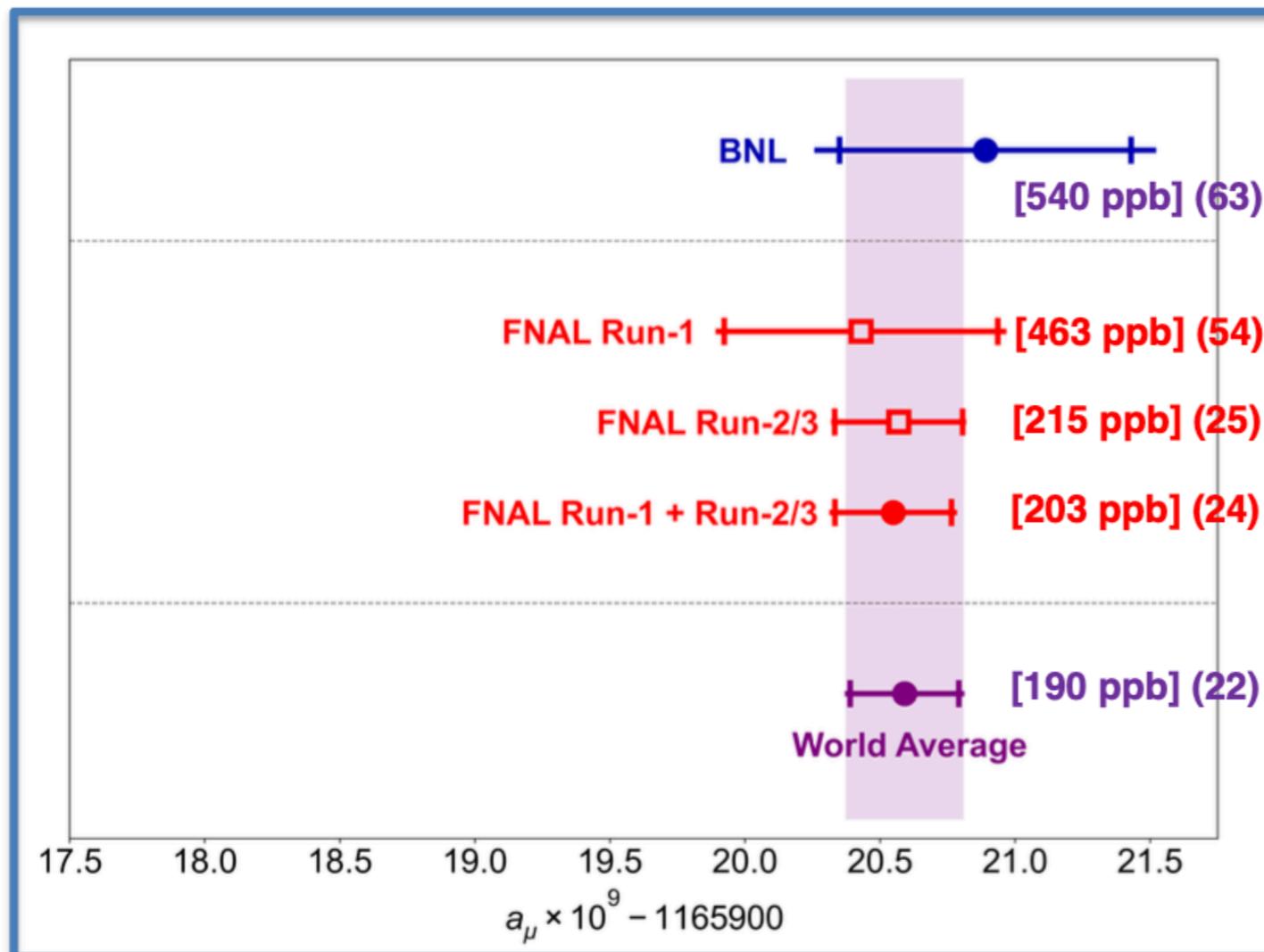


Новейшие экспериментальные данные

Run-2/3 Result: FNAL + BNL Combination



$$a_{\mu}(\text{FNAL}) = 116\,592\,055(24) \times 10^{-11} \text{ [203 ppb]}$$



$$a_{\mu}(\text{Exp}) = 116\,592\,059(22) \times 10^{-11} \text{ [190 ppb]}$$

- FNAL combination: **203 ppb** uncertainty
- Both FNAL and BNL dominated by statistical error
- Combined world average **dominated by FNAL** values.

Решеточные вычисления

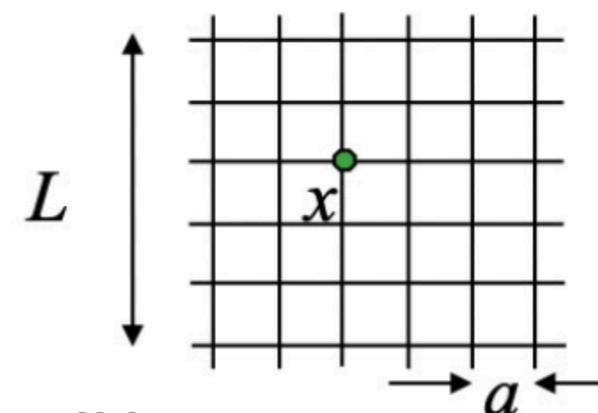
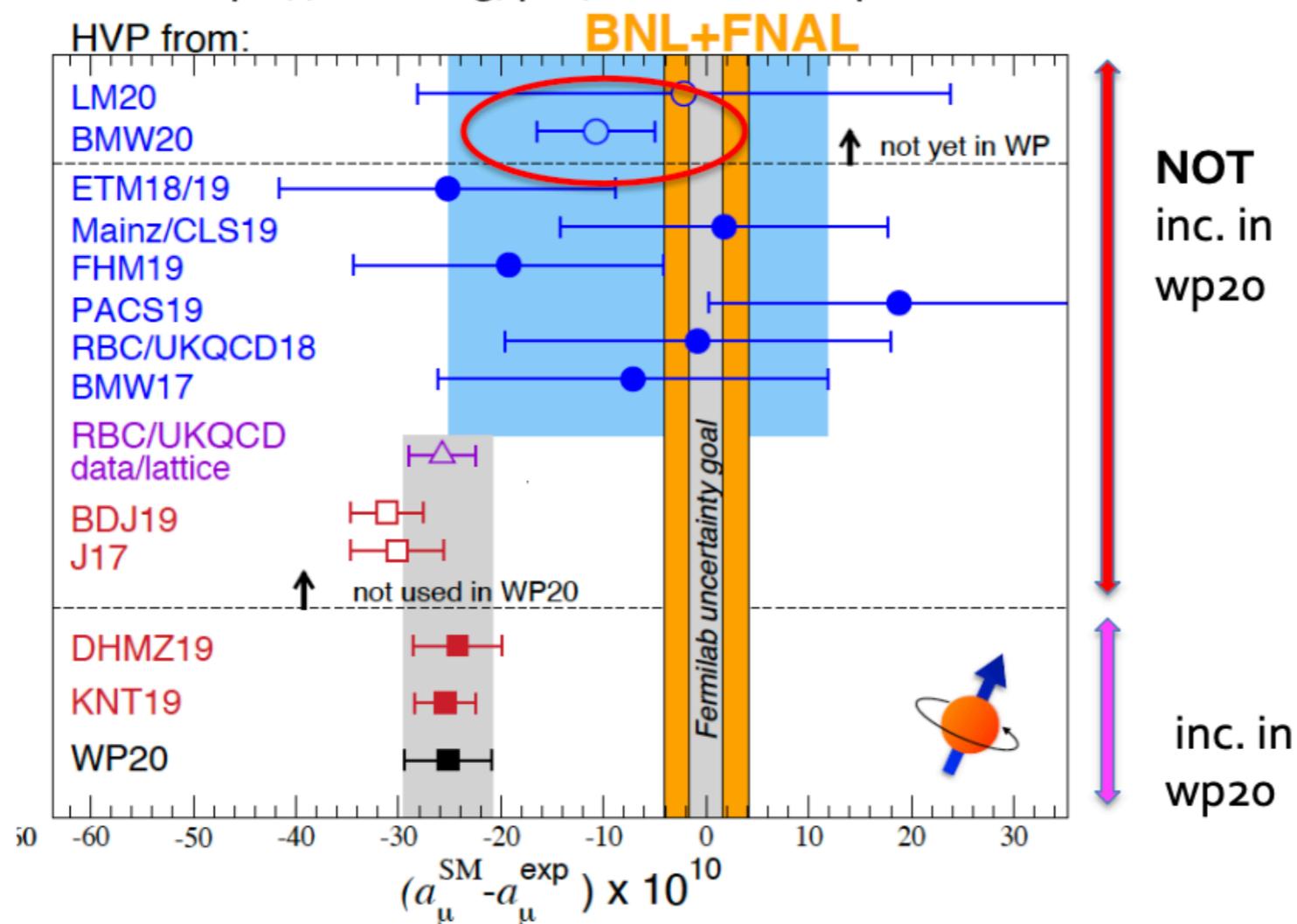
HVP Calculation: Lattice QCD Method



- **Ab-initio** calculation of HVP on lattice

G. Colangelo et al.

<https://arxiv.org/pdf/2203.15810.pdf>



- All lattice calculations were not included in wp20
- **BMW** is only high precision calculation: closer to exp. Result

e^+e^- аннигиляция в адроны

HVP Calculation: Dispersive (e^+e^-) Method



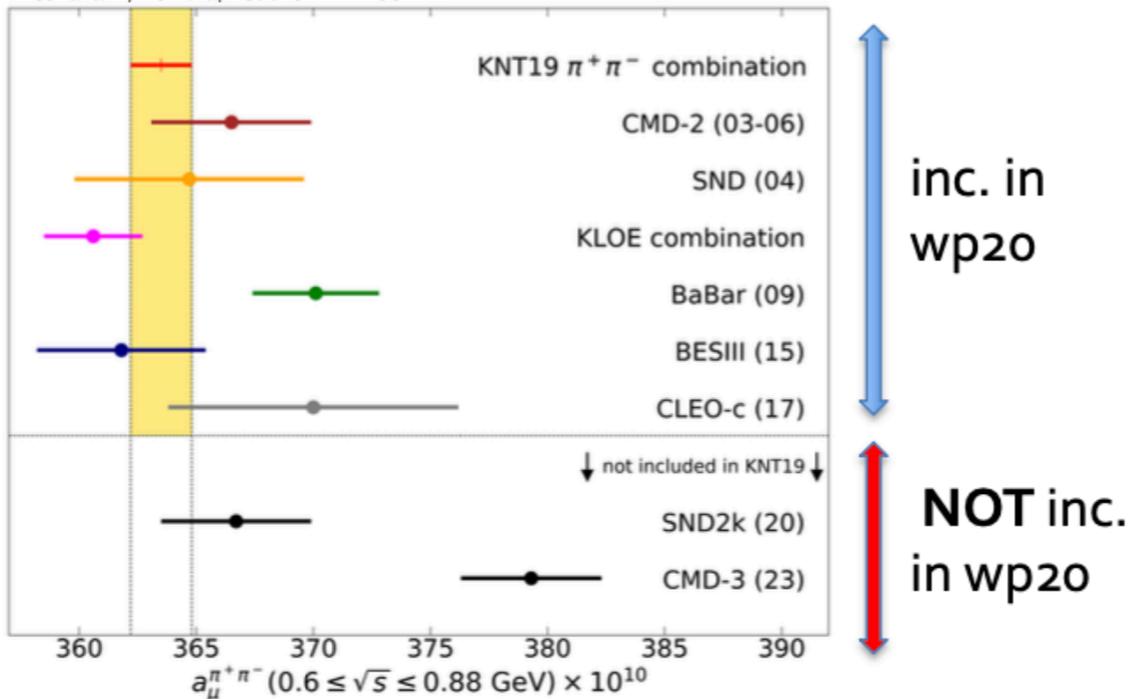
- Calculated from data for $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})$

$\text{Im} \text{had.} \sim \left| \text{had.} \right|^2 \longrightarrow a_{\mu}^{\text{HVP,LO}} = \frac{\alpha^2}{3\pi^2} \int_{s_{th}}^{\infty} \frac{K(s)}{s} R(s) ds$

Analyticity & Unitarity Hadronic R-ratio (Data Driven)

- Uses **data** from different experiments from **20+ years**
- $1/s$ weights low energy strongly: 73% from $\pi^+\pi^-$ channel

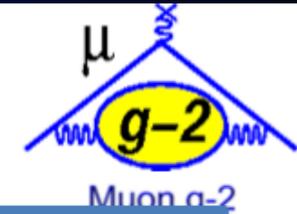
Keshavarzi, Nomura, Teubner: Priv. Comm.



- Data from **CMD-2, SND, KLOE, BaBar, BESIII** and **CLEO-C** were included in wp20
- New results from **SND2k** and **CMD-3** after wp20
- CMD-3** is different from all the other data

It seems that long standing $g-2$ problem fades away

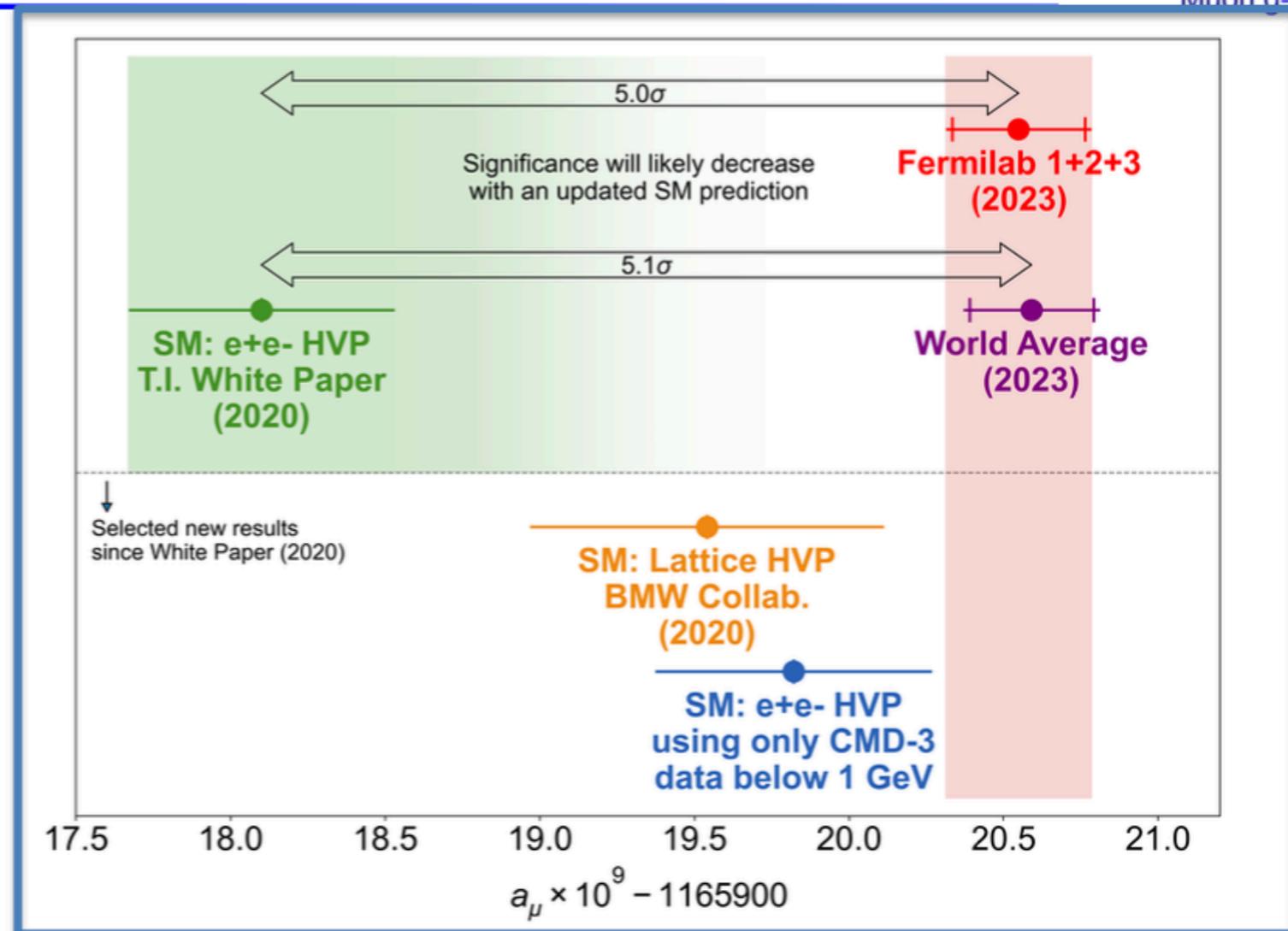
Comparison with SM prediction (2023)



Comparison with wp20

New results after 2020

Disclaimer: prediction from Lattice taken from Lattice 2023 talk; prediction from CMD3 based on our specific assumption



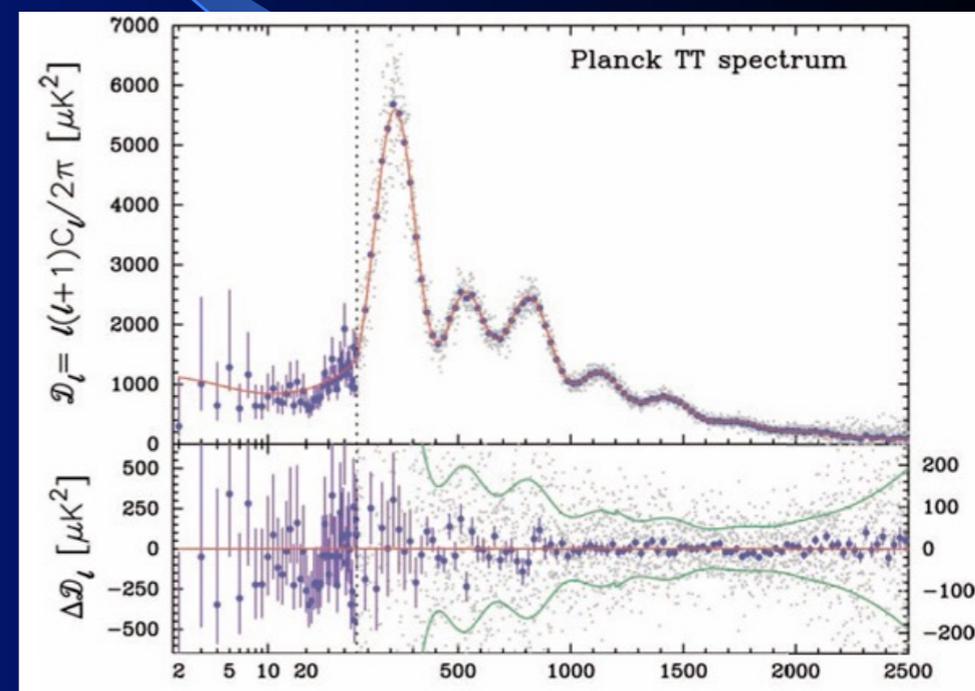
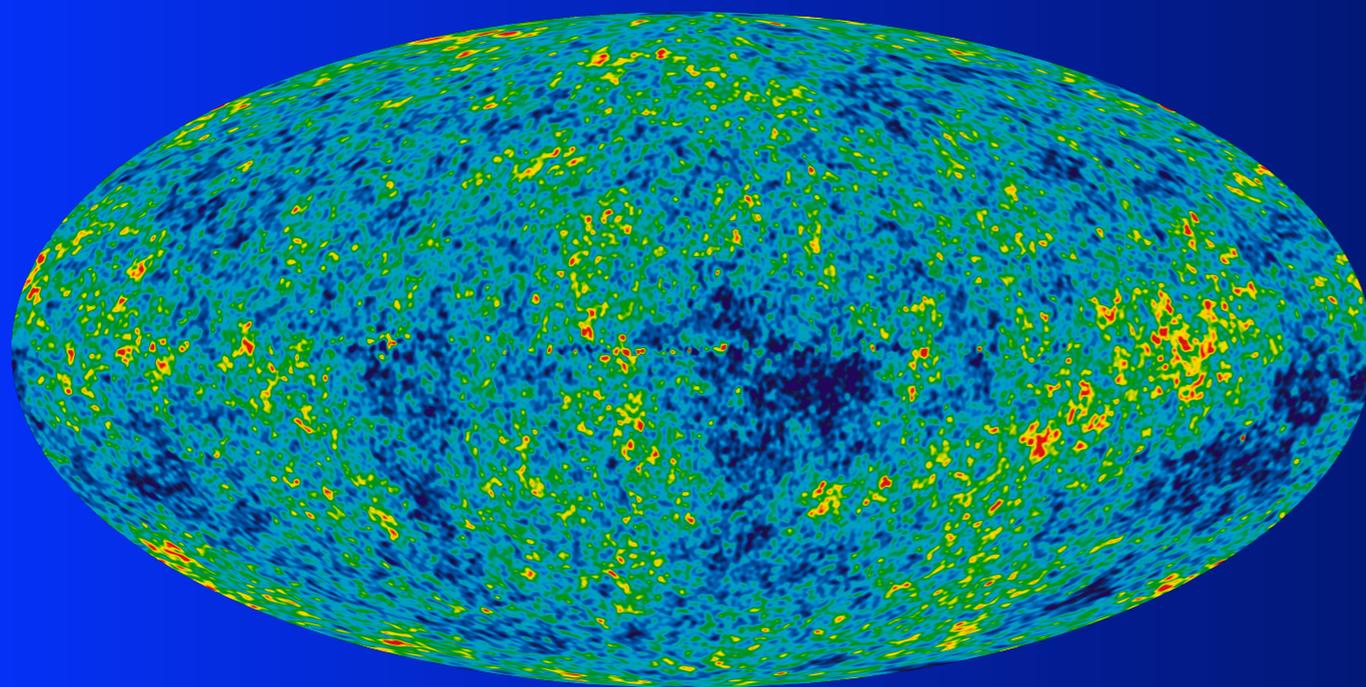
- Comparison of FNAL Run1-3 result with the Theory Initiative's calculation **wp20** is at **5 sigma**
- Waiting for a clarification of the theory

Темная материя

Реликтовое микроволновое излучение

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

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

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



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

$$\Omega = 1.02 \pm_{56} 0.02$$

Поиски частиц темной материи

Dark Matter and Axion Searches - Belina von Krosigk



4
UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

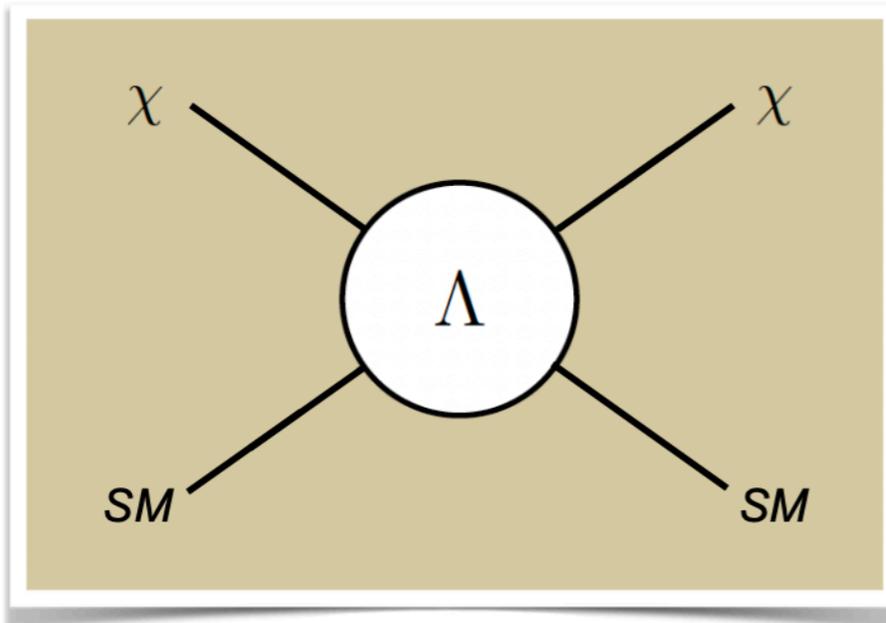
Ways to search for dark matter and axions / ALPs

ALP: axionlike particle

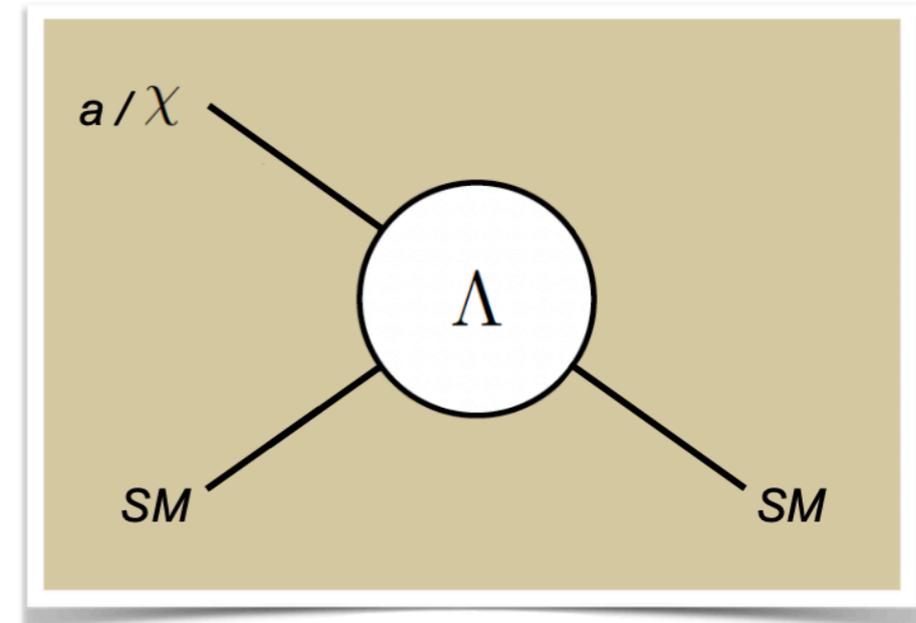
direct detection

axion experiments

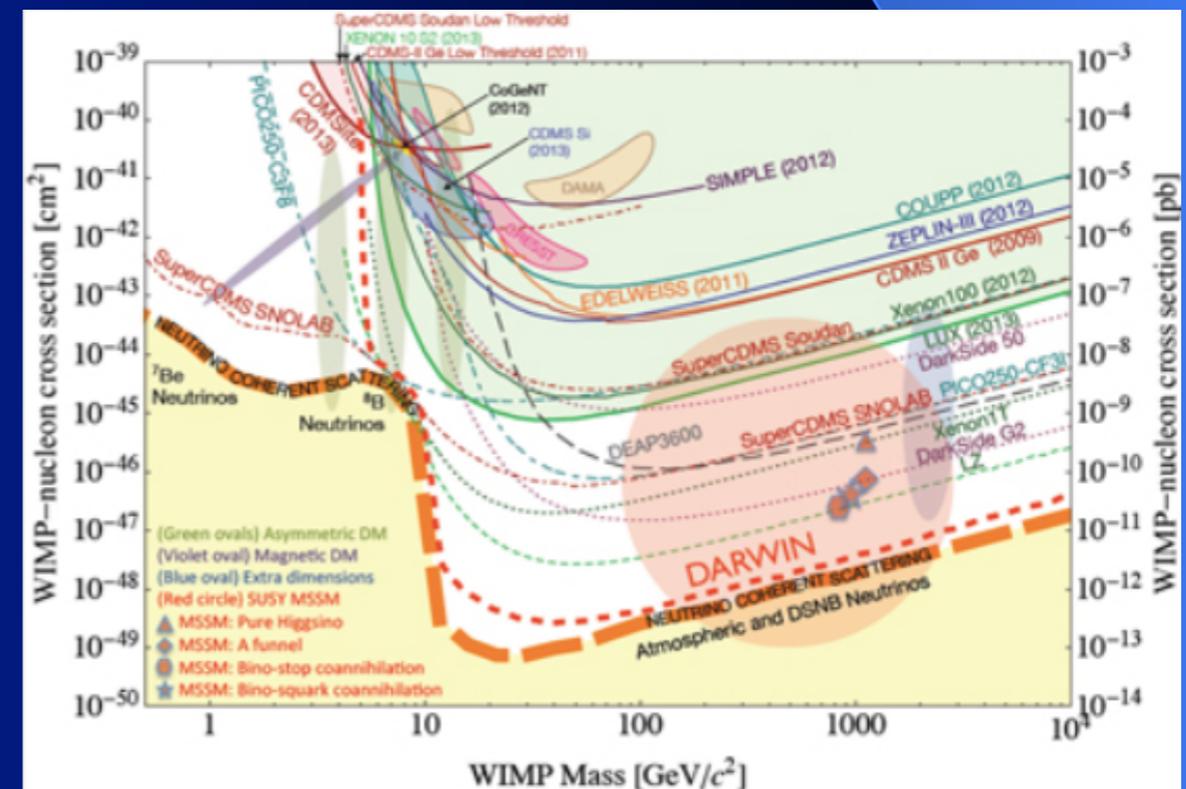
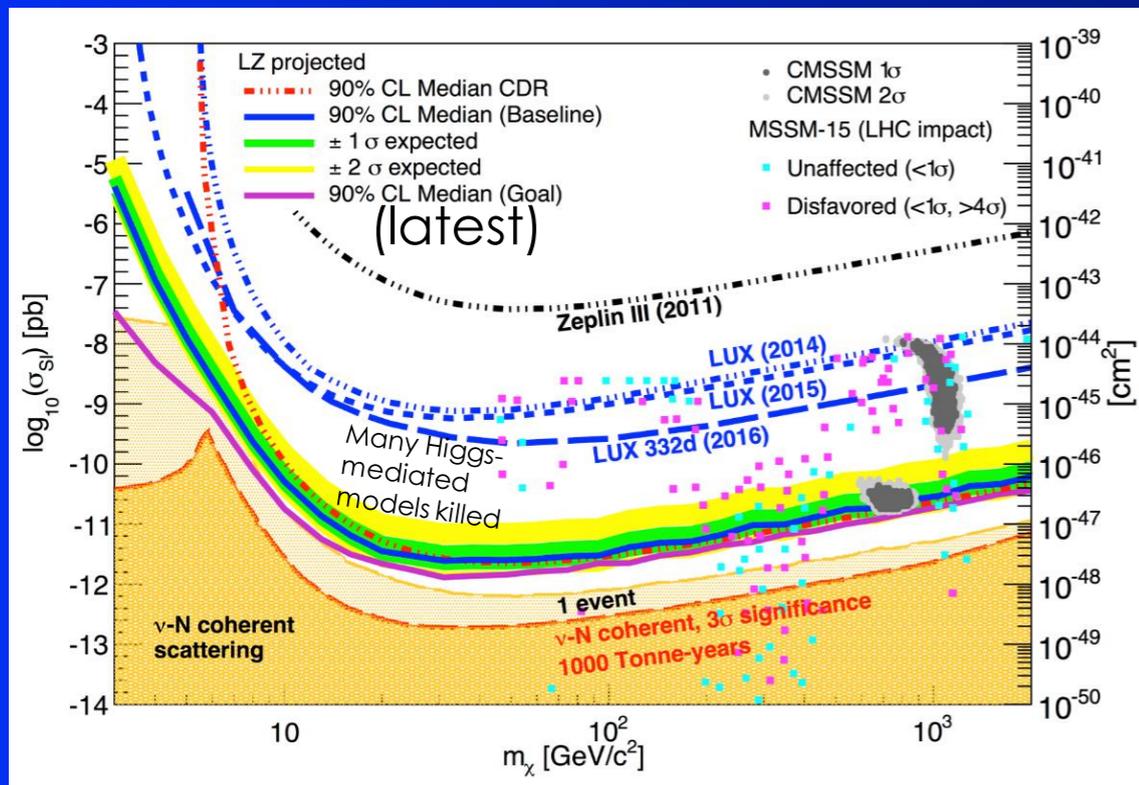
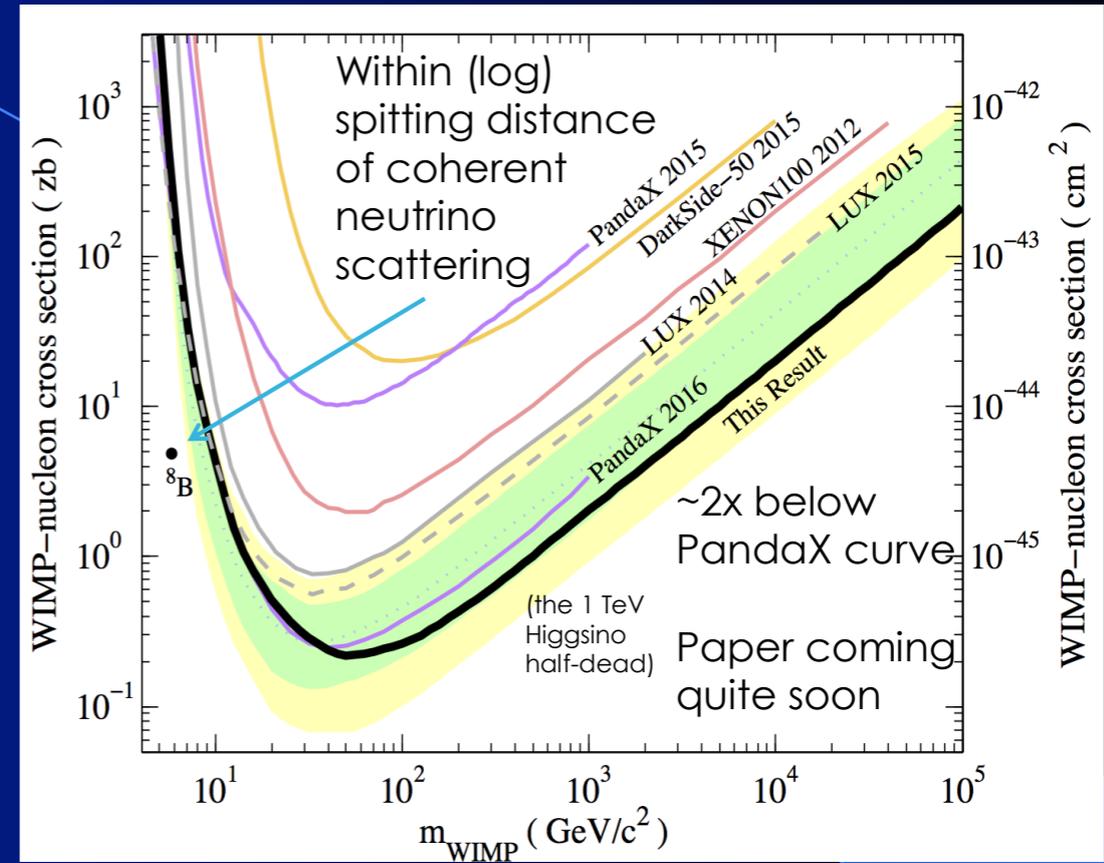
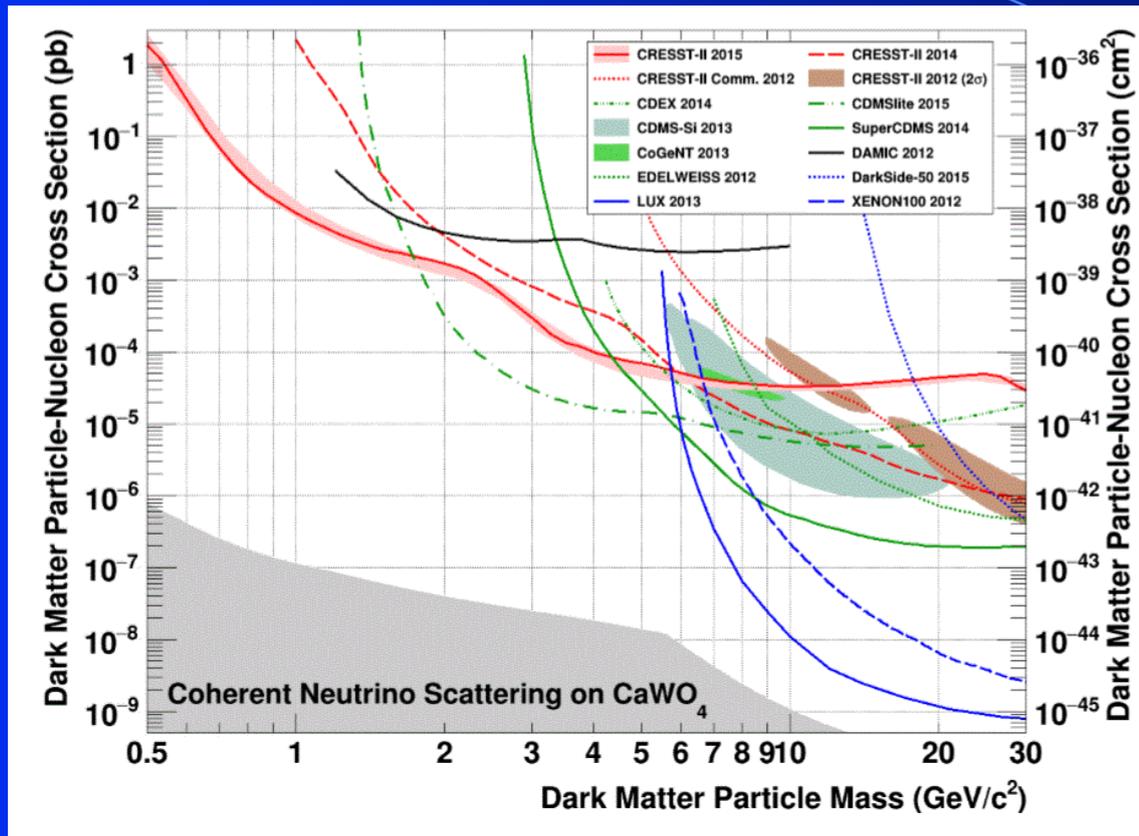
collider experiments



indirect detection

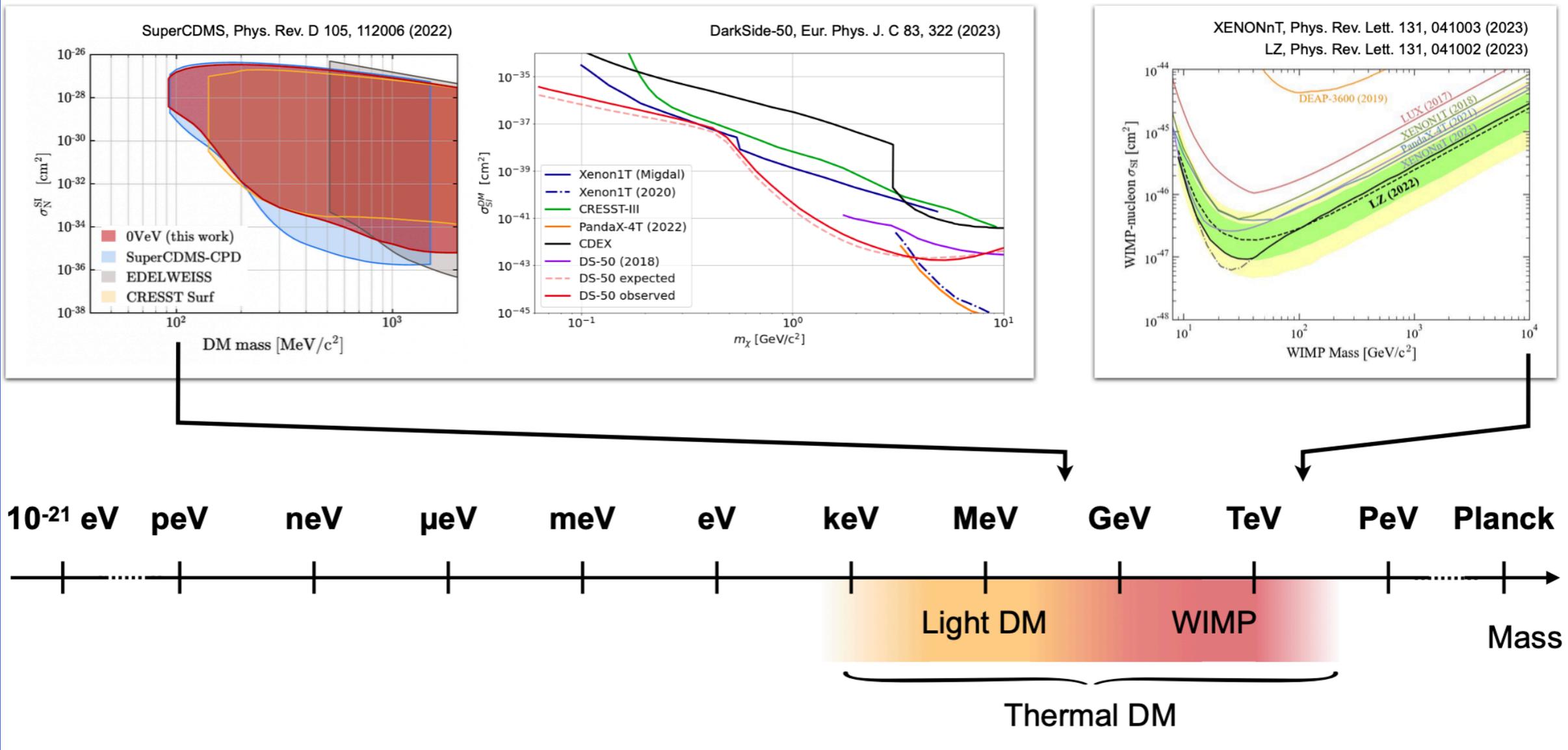


DARK MATTER: DIRECT DETECTION



Поиски частиц темной материи

Direct detection of WIMP(-like) candidates

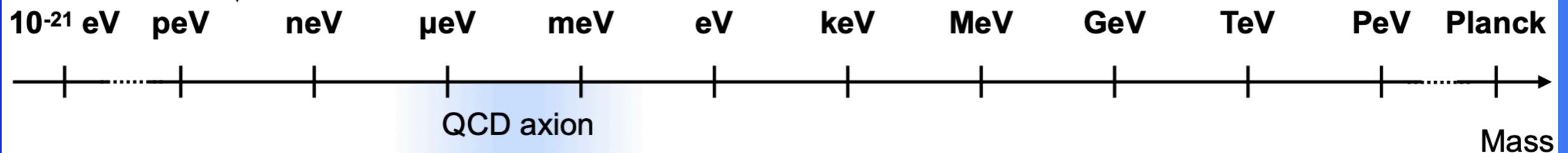
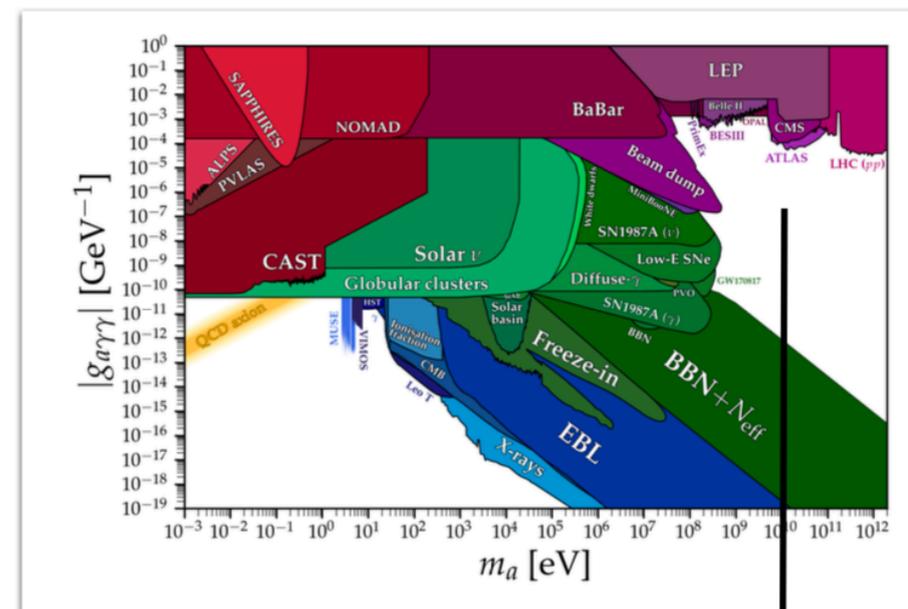
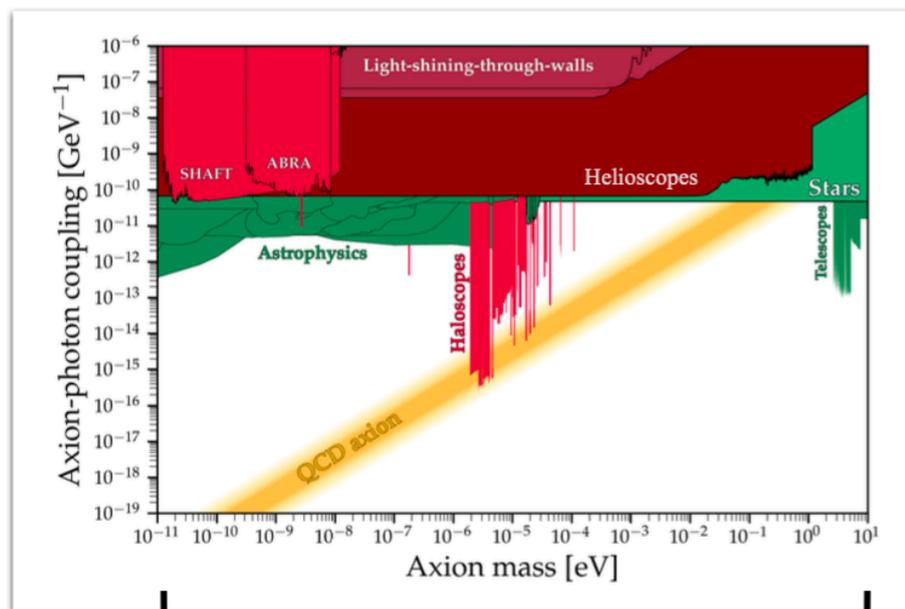


Поиски частиц темной материи



Mass ranges of some beyond SM particles

C. O'Hare, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3932430>



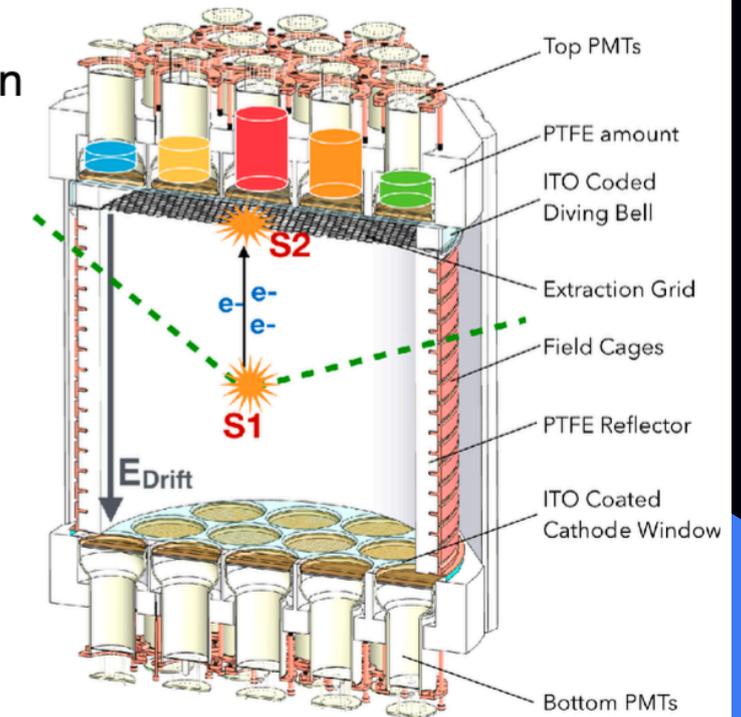
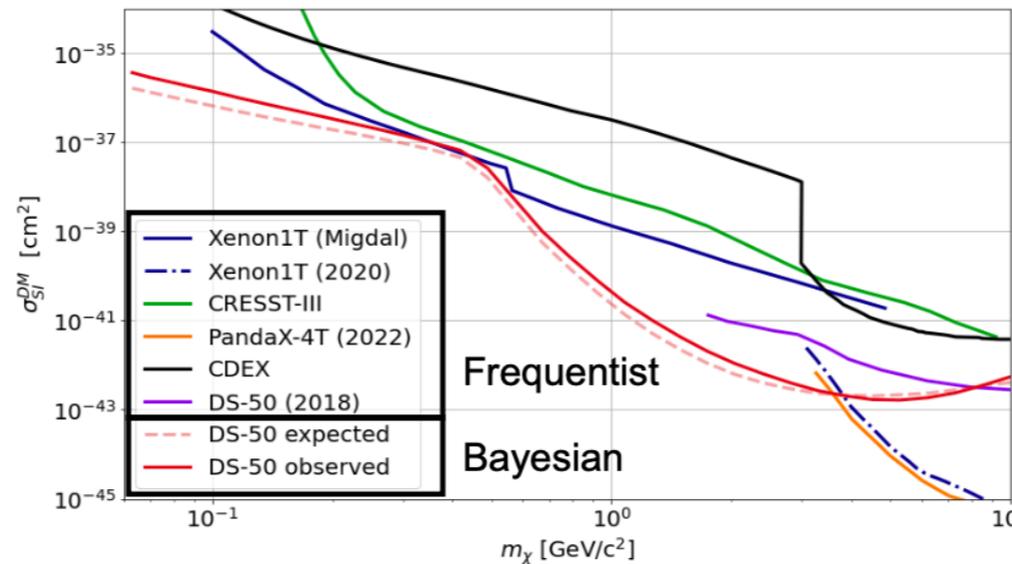
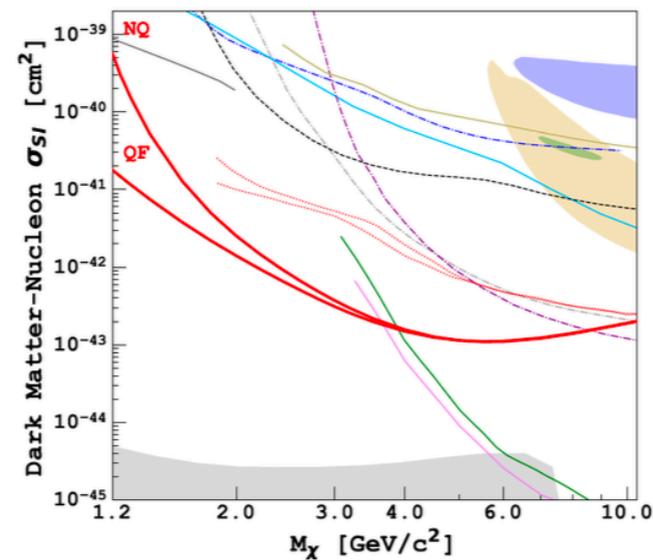
Bosonic DM (axions, ALPs, dark photons)

Поиски частиц темной материи

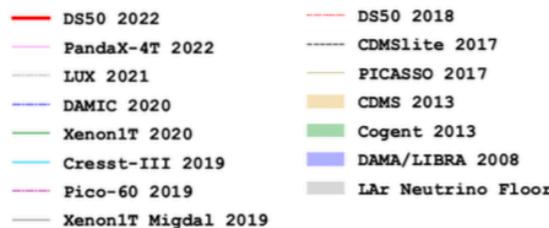


Most recent results ~1 GeV: **DarkSide-20k**

- Main unknowns: fluctuations in ionization quenching, in energy partitioning between excitons and electrons, and in ion-electron recombinations
- Results (left) confirmed using an alternative Bayesian approach (right), where the analytical calibration responses are made explicit in the likelihood



50 kg active mass of LAr



DarkSide-50, Phys.Rev.D 107 (2023) 6, 063001

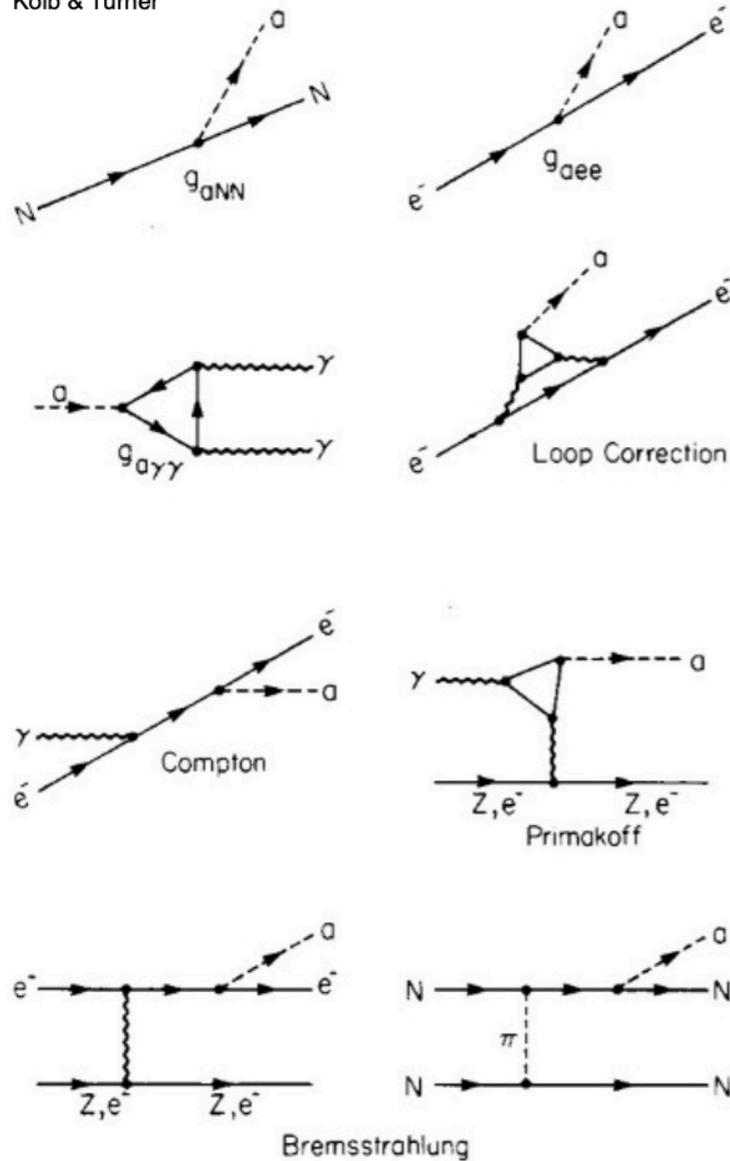
DarkSide-50, Eur. Phys. J. C 83, 322 (2023)

Поиски аксионов и аксионоподобных частиц



Axion couplings

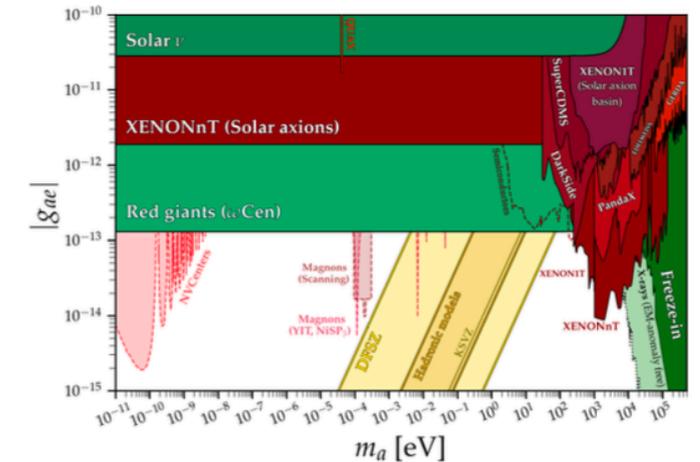
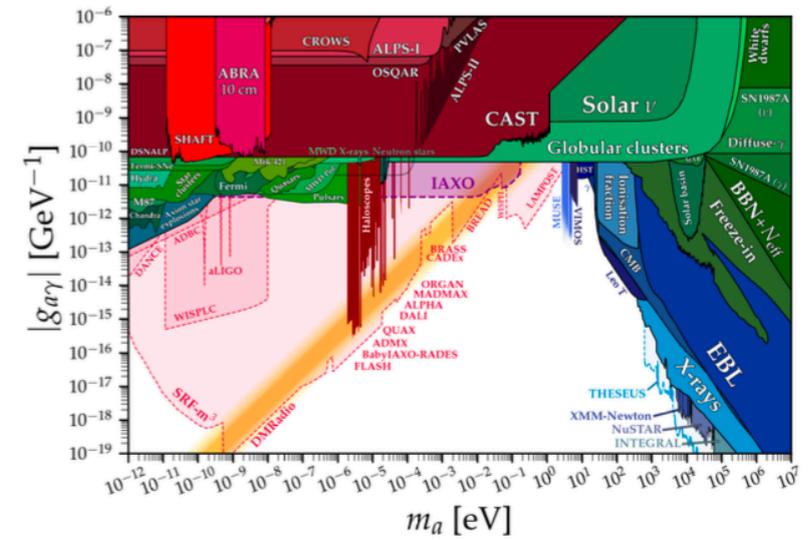
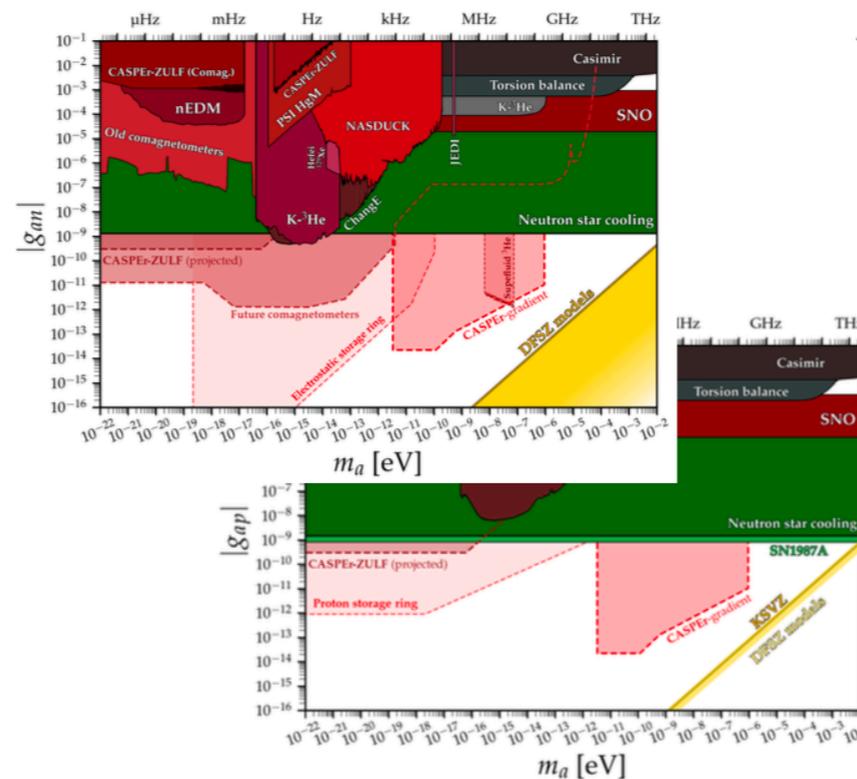
Kolb & Turner



General classes of couplings

- Axion – Photon
- Axion – Electron
- Axion – Proton / Neutron

C. O'Hare, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3932430>



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!

Будущие большие проекты в физике элементарных частиц



Future Particle Physics



Beyond SM

Energy frontier: HL LHC, FCC e^+e^- -mode,
CLIC, China colliders

Intensity Frontier: SuperBelle, BEPCIII, SHiP,
NA62, NA64, VEPP, Super c - τ -factory

Precision Frontier: $g-2$, nEDM

Under -ground, -water, -ice: Icecube, Baikal

Neutrino: JUNO, HyperK, ..., DUNE

Cosmic Rays: Pierre Auger, ..., satellites

New Dynamics in SM

EIC (electron ion collider) BNL

NICA

FAIR

JLAB

U-76

China electron-ion collider



Experimental Particle Physics



Russia & JINR

Beyond SM

Intensity & Precision Frontier:

VEPP, Super c - τ -factory, nEDM

Under -ground, -water: GVD-Baikal

Neutrino: BEST, NEUTRINO-4, DANSS, ...

Cosmic Rays: Pamir, Tian-Shan, satellites ...

New Dynamics in SM

NICA: MPD heavy-ion collisions

BM@N short-range nucleon correlations

SPD spin structure, partonic 3D-structure

exotic resonances

electron-ion collider option R&D

U-76 SPASCHARM charm and exotic resonances

