

Статус и проблемы стандартной модели физики элементарных частиц

А.Б. Арбузов

ЛТФ ОИЯИ, Дубна

16 июля 2022 г.

Shots to prevent cancer show
early promise p. 126

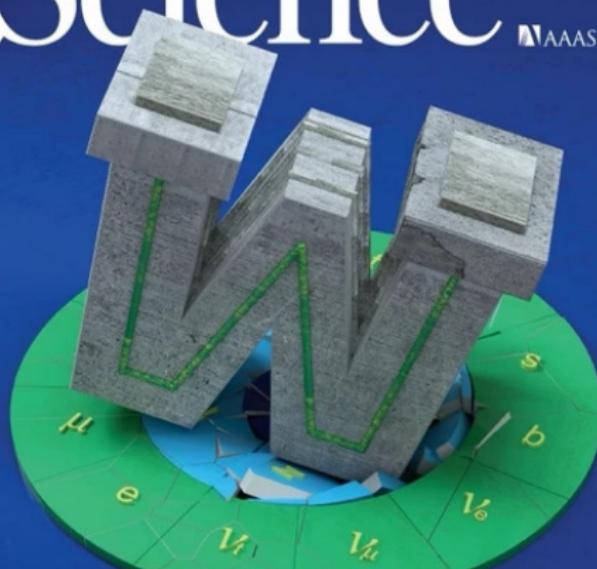
Visualizing a key step in
cytokine signaling pp. 139 & 163

Silk-wrapped food wins
B&I Science Prize p. 146

Science

\$15
8 APRIL 2022
science.org

AAAS



HEAVYWEIGHT

W boson mass measures higher than expected pp. 125, 136, & 170

Что такое стандартная модель?

СМ это:

- ▶ — самая успешная из всех физических моделей в истории
- ▶ — написана на языке квантовой теории поля
- ▶ — основана на принципах симметрии
- ▶ — минимальная модель
- ▶ — модель с огромной предсказательной способностью

Однако мы не понимаем, **почему** она так хорошо работает . . .

Вопросы к СМ:

- ▶ Является ли СМ фундаментальной?
- ▶ Если нет, где границы ее применимости?
- ▶ Поля и взаимодействия СМ фундаментальные?
- ▶ Можно ли объединить СМ с гравитацией?
- ▶ Дает ли СМ указания, где искать “**новую физику**”?

Частицы (поля) СМ

QUARKS		GAUGE BOSONS	
mass → charge → spin →	≈2.3 MeV/c ² 2/3 1/2 up	≈1.275 GeV/c ² 2/3 1/2 charm	≈173.07 GeV/c ² 2/3 1/2 top
	u	c	t
	≈4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 down	≈95 MeV/c ² -1/3 1/2 strange	≈4.18 GeV/c ² -1/3 1/2 bottom
	d	s	b
	≈0.511 MeV/c ² -1 1/2 electron	≈105.7 MeV/c ² -1 1/2 muon	≈1.777 GeV/c ² -1 1/2 tau
	e	μ	τ
	≈<2.2 eV/c ² 0 1/2 electron neutrino	≈<0.17 MeV/c ² 0 1/2 muon neutrino	≈<15.5 MeV/c ² 0 1/2 tau neutrino
	ν _e	ν _μ	ν _τ
			≈80.4 GeV/c ² ±1 1 W boson
			W

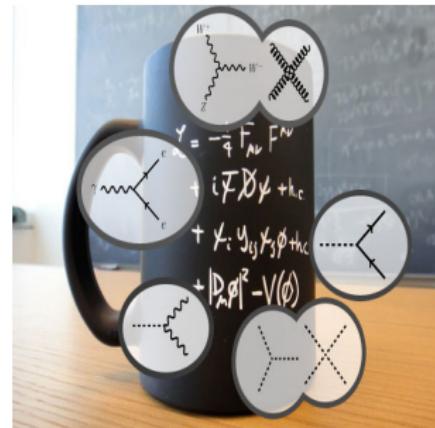
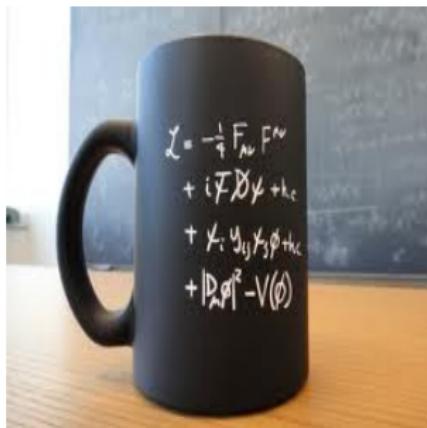
Courtesy to [Wikipedia](#)

Взаимодействия в СМ

Сколько в Природе фундаментальных взаимодействий?

Сколько взаимодействий в стандартной модели?

Для ответа надо посмотреть на лагранжиан СМ.



Лагранжиан СМ

Полный лагранжиан СМ очень длинный и сложный:

Exercise 1.1.1.1.a: Given locality, causality, Lorentz invariance, and known physical data, since 1860, show that the Lagrangian describing all observed physical processes (seas gravity) can be written:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}g_{\mu}^{\alpha}g_{\nu}^{\beta}\partial_{\mu}u_{\alpha}^{\beta} - g_{\mu}^{\beta}\partial_{\nu}u_{\alpha}^{\beta} + g_{\nu}^{\alpha}\partial_{\mu}u_{\beta}^{\beta} + g_{\nu}^{\alpha}\partial_{\mu}G^{\alpha\beta}G^{\mu\beta} - \frac{1}{2}g_{\mu}^{\beta}f^{\alpha\gamma\delta}f^{\mu\nu\sigma}g_{\nu}^{\beta}g_{\sigma}^{\alpha} + \\
 & \frac{1}{2}g_{\mu}^{\alpha}(\tilde{g}_{\nu}^{\beta}\partial_{\mu}u_{\alpha}^{\beta}) + g_{\nu}^{\alpha}\partial_{\mu}u_{\alpha}^{\beta}Z_{\mu}^{\beta} + \frac{M^2}{M^2W_n^2}Z_{\mu}^{\alpha}Z_{\mu}^{\beta} - \frac{1}{2}g_{\mu}^{\alpha}\partial_{\nu}A_{\mu}A_{\nu} - \frac{1}{2}\partial_{\mu}H\partial_{\mu}H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2H^2 - \partial_{\mu}\phi^{\dagger}\partial_{\mu}\phi^{\dagger} - M\phi^{\dagger}\phi^{\dagger} - \frac{1}{2}\partial_{\mu}\phi^{\dagger}\phi^{\dagger} - \frac{1}{2}M\phi^{\dagger}\phi^{\dagger} - \beta_h[M\phi^2 + \\
 & 2M^2H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)] - \frac{2\pi^2}{g^2}[(W_{\mu}^0\partial_{\mu}W_{\mu}^0 - W_{\mu}^0\partial_{\mu}W_{\mu}^+ + \\
 & W_{\mu}^+\partial_{\mu}W_{\mu}^+) - 2g_{\mu}^{\alpha}S_{\mu}^{\alpha}[A_{\mu}^0(W_{\mu}^0W_{\mu}^0 - W_{\mu}^0W_{\mu}^+) - A_{\mu}^0(W_{\mu}^+W_{\mu}^+ + \\
 & W_{\mu}^-\partial_{\mu}W_{\mu}^+) + A_{\mu}^0(W_{\mu}^+W_{\mu}^- - W_{\mu}^-\partial_{\mu}W_{\mu}^+) - \frac{1}{2}g_{\mu}^{\alpha}W_{\mu}^+W_{\mu}^- + \\
 & \frac{1}{2}g_{\mu}^{\alpha}W_{\mu}^+W_{\mu}^- + g_{\mu}^{\alpha}Z_{\mu}^{\alpha}(Z_{\mu}^{00}W_{\mu}^0 + Z_{\mu}^{0+}W_{\mu}^+) - Z_{\mu}^{00}Z_{\mu}^{0+}W_{\mu}^- + \\
 & g_{\mu}^{\alpha}S_{\mu}^{\alpha}[A_{\mu}^0W_{\mu}^+ - A_{\mu}^0A_{\mu}^0W_{\mu}^+] + g_{\mu}^{\alpha}S_{\mu}^{\alpha}[A_{\mu}^0Z_{\mu}^{\alpha}W_{\mu}^+ - \\
 & W_{\mu}^+W_{\mu}^+] - 2A_{\mu}^0Z_{\mu}^{\alpha}W_{\mu}^+W_{\mu}^-] - g\alpha[H^2 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + ((\phi^0)^2H^2\phi^+\phi^- - \phi^0\phi^0H^2)] - \\
 & gMW_n^2W_n^2H - \frac{1}{4}g\frac{m_h^2}{Z_h^2}Z_h^2Z_h^0H - \frac{1}{4}gW_n^+W_n^0\phi^0\phi^+ - \phi^-\partial_{\mu}H) - W_n^-(H\partial_{\mu}\phi^+ - \\
 & W_n^-(\phi^0\partial_{\mu}\phi^+ - \phi^-\partial_{\mu}\phi^0)] + \frac{1}{2}gW_n^+(\partial_{\mu}\phi^0 - \phi^-\partial_{\mu}H) - W_n^-(H\partial_{\mu}\phi^+ - \\
 & \phi^+\partial_{\mu}H) + \frac{1}{2}g\frac{1}{Z_h^2}(Z_h^0(H\partial_{\mu}\phi^0 - \phi^-\partial_{\mu}H) - g\frac{m_h^2}{Z_h^2}MZ_h^0(W_n^+\phi^- - W_n^-\phi^+) + \\
 & igS_{\mu}^{\alpha}M_A^{\alpha}[(W_n^+\phi^- - W_n^-\phi^+) - i\frac{1}{2}\frac{m_h^2}{Z_h^2}Z_h^0(\phi^+\partial_{\mu}\phi^- - \phi^-\partial_{\mu}\phi^+) + \\
 & igS_{\mu}^{\alpha}A_{\mu}^0(\phi^+\partial_{\mu}\phi^- - \phi^-\partial_{\mu}\phi^+) - \frac{1}{4}g^2W_n^+W_n^0H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2\frac{1}{Z_h^2}Z_h^0Z_h^2[H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_{\phi}^2 - 1)\phi^+\phi^-] - \frac{1}{2}\frac{g^2}{Z_h^2}Z_h^0\phi^0(W_n^+\phi^- + \\
 & W_n^-\phi^+) - \frac{1}{2}g\frac{1}{Z_h^2}Z_h^0H(W_n^+\phi^- - W_n^-\phi^+) + \frac{1}{2}g^2S_{\mu}^{\alpha}A_{\mu}^0(W_n^+\phi^- + \\
 & W_n^-\phi^+) + \frac{1}{2}g^2S_{\mu}^{\alpha}(\partial_{\mu}A_{\mu}^0W_n^+\phi^- - W_n^-\phi^+) - g\frac{1}{Z_h^2}(Z_{\mu}^{0+} - 1)Z_h^0A_{\mu}^0\phi^+ - \\
 & g\frac{1}{Z_h^2}A_{\mu}^0A_{\mu}^0\phi^+\phi^- - e^2(\gamma\partial_{\mu} + m_e^2)e^{\mu} - e^2(\gamma\partial_{\mu} + m_e^2)e^{\mu} - \bar{e}_j^2(\gamma\partial_{\mu} + m_e^2)\bar{e}_j^{\mu} - \\
 & \bar{e}_j^2(\gamma\partial_{\mu} + m_e^2)\bar{e}_j^{\mu} + igS_{\mu}^{\alpha}A_{\mu}^0[-(\bar{e}_j^2\gamma^{\mu}\bar{e}^{\nu}) + \frac{1}{2}(\bar{e}_j^2\gamma^{\mu}\bar{e}^{\nu})^2 - \frac{1}{4}(\bar{e}_j^2)^2d_j^{\mu}d_j^{\nu}] + \\
 & \frac{ie}{4e_0}Z_{\mu}^0[\bar{e}_j^2\lambda^{\mu\nu}(1 + \gamma^5)\bar{e}^{\mu} + (\bar{e}_j^2\gamma^{\mu}\bar{e}_j^{\nu})^2 - 1 - \gamma^5]\bar{e}^{\nu}) + (ig_{\mu}^{\alpha}\gamma^{\mu}(1 + \gamma^5)\bar{e}^{\nu}) + \\
 & 1 - \gamma^5)\bar{e}_j^{\mu} + (\bar{e}_j^2\gamma^{\mu}(1 - \frac{1}{2}s_{\phi}^2 - \gamma^5)\bar{e}^{\nu})] + \frac{ie}{2\sqrt{2}}W_n^+[(\bar{e}^{\mu}\gamma^{\mu}(1 + \gamma^5)\bar{e}^{\nu}) + (\bar{e}_j^2C_{\mu\nu}^{\alpha}(1 + \\
 & \gamma^5)\bar{e}_j^{\mu})] + \frac{ie}{2\sqrt{2}}W_n^-[(\bar{e}^{\mu}\gamma^{\mu}(1 + \gamma^5)\bar{e}^{\nu}) + \phi^-(\bar{e}^2(1 + \gamma^5)\bar{e}^{\nu})] - \\
 & \frac{ie}{2\sqrt{2}}\frac{m_h^2}{M}[H(\bar{e}^{\mu}\bar{e}^{\nu}) + i\phi^0(\bar{e}^{\mu}\gamma^5\bar{e}^{\nu})] + \frac{ie}{2\sqrt{2}}\frac{m_h^2}{M}[\bar{e}_j^2(C_{\mu\nu}^{\alpha}(1 - \gamma^5)d_j^{\mu}) + \\
 & m_a^2(\bar{e}_j^2C_{\mu\nu}^{\alpha}(1 + \gamma^5)d_j^{\mu}] + \frac{ie}{2M^2}\frac{m_h^2}{M}\phi^-[im_a^2(\bar{e}_j^2C_{\mu\nu}^{\alpha}(1 + \gamma^5)u_j^{\mu} - m_a^2(\bar{e}_j^2C_{\mu\nu}^{\alpha}(1 - \\
 & \gamma^5)u_j^{\mu}) - \frac{ie}{2M^2}H(\bar{e}_j^2u_j^{\mu}) - \frac{ie}{2M^2}H(\bar{e}_j^2d_j^{\mu}) + \frac{ie}{2M^2}\phi^0(\bar{e}_j^2\gamma^5u_j^{\mu}) - \\
 & \frac{ie}{2M^2}\phi^0(\bar{e}_j^2\gamma^5d_j^{\mu}) + \bar{X}^+(\beta^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\beta^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\beta^2 - \\
 & \frac{M^2}{M^2})X^0 + \bar{Y}\partial_{\mu}Y + ig_{\mu}^{\alpha}W_n^+(\partial_{\mu}\bar{X}^0X^- - \partial_{\mu}\bar{X}^+X^0) + ig_{\mu}^{\alpha}W_n^+(\partial_{\mu}\bar{Y}X^- - \\
 & \partial_{\mu}\bar{Y}X^+) + ig_{\mu}^{\alpha}W_n^-(\partial_{\mu}\bar{X}^-X^0 - \partial_{\mu}\bar{X}^0X^+) + ig_{\mu}^{\alpha}W_n^-(\partial_{\mu}\bar{Y}X^- - \\
 & \partial_{\mu}\bar{Y}X^+) + ig_{\mu}^{\alpha}Z_{\mu}^{\alpha}(\partial_{\mu}\bar{X}^+X^+ - \partial_{\mu}\bar{X}^-X^-) + igS_{\mu}^{\alpha}A_{\mu}^0(\partial_{\mu}\bar{X}^+X^+ - \\
 & \partial_{\mu}\bar{X}^-X^-) - \frac{ig}{2gM}[X^+X^0\phi^+ - X^-X^0\phi^-] + \frac{1}{2g}igM[X^0X^- \phi^+ - X^0X^+ \phi^-] + \\
 & \frac{1}{2s_{\phi}^2}igM[S_{\mu}^{\alpha}X^0\phi^+ - X^0X^0\phi^+] + \frac{1}{2g}igM[X^+X^0\phi^0 - \bar{X}^-X^0\phi^0]
 \end{aligned}$$

Но этот длинный лагранжиан является просто результатом замен переменных в коротком!

Принципы и симметрии СМ

Принципы (помним, что СМ \subset КТП):

- ▶ соответствие: кв. механика, КЭД, модель Ферми ...
- ▶ минимальность: только известное и/или необходимое
- ▶ унитарность: $0 \leq P \leq 1$ и $P(\Omega) = 1$
- ▶ перенормируемость: конечные предсказания
- ▶ СИММЕТРИИ !

Симметрии:

- ▶ симметрия по группе Лоренца
- ▶ симметрия СРТ
- ▶ калибровочные симметрии: $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
- ▶ глобальная симм. у бозона Хиггса (спонтанно нарушена)
- ▶ непонятые симм.: между поколениями, сокращение аномалий, конформная etc.)

Parameters in the SM

Let us count:

- ▶ + 3 gauge charges (g_1, g_2, g_s)
- ▶ + 2 parameters in the Higgs potential
- ▶ + 9 Yukawa couplings for charged fermions
- ▶ + 4 parameters in the CKM matrix
- ▶ + 1 strong CP phase in QCD ($\theta \sim 0$)

So the canonical SM contains 19 free parameters

- + 4 (or 6?) parameters of the PMNS matrix
- + 3 Yukawa couplings for neutrinos

N.B.1. $g_s \leftrightarrow \Lambda_{QCD}$, but Λ_{QCD} is not in \mathcal{L}_{QCD}

N.B.2. There is only one dimensionful parameter in the SM.

Input parameters: experimental values

[Particle Data Group 2022]

- The fine structure constant:

$$\alpha^{-1}(0) = 137.035999084(21) \text{ from } (g-2)_e$$

- The SM predicts $M_W = M_Z \cos \theta_W \Rightarrow M_W < M_Z$

$$M_Z = 91.1876(21) \text{ GeV from LEP1/SLC}$$

$$M_W = 80.377(12) \text{ GeV from LEP2/Tevatron/LHC}$$

- The Fermi coupling constant:

$$G_{\text{Fermi}} = 1.1663788(6) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \text{ from muon decay}$$

- The top quark mass:

$$m_t = 172.69(30) \text{ GeV from Tevatron/LHC}$$

- The Higgs boson mass:

$$M_H = 125.25(17) \text{ GeV from ATLAS \& CMS}$$

- ...

The anomalous magnetic moment of electron

The Dirac equations predict **gyromagnetic ratio** $g_f = 2$ in the fermion magnetic moment

$$\vec{M} = g_f \frac{e}{2m_f} \vec{S}$$

One-loop QED vertex correction gives (J. Schwinger '1948) the **anomalous magnetic moment**

$$a_f \equiv \frac{g_f - 2}{2} \approx \frac{\alpha}{2\pi} = 0.001\ 161\ \dots$$

The Harvard experiment:

$$a_e^{\text{exp}} = 1\ 159\ 652\ 180.73\ (28) \cdot 10^{-12} \quad [0.24\text{ppb}]$$

The SM (T. Kinoshita et al.):

$$a_e^{\text{SM}} = 1\ 159\ 652\ 181.643\ (25)_{8th}(23)_{10th}(16)_{EW+had.}(763)_{\delta\alpha} \cdot 10^{-12}$$

N.B.1. $a_f \neq 0$ is a pure **quantum loop** effect

N.B.2. $a_e^{\text{exp}} \equiv a_e^{\text{SM}} \Rightarrow \alpha^{-1}(0) = \dots$

The anomalous magnetic moment of muon

E821 experiment at BNL (2006) \oplus Muon g-2 at Fermilab (2021):

$$a_\mu^{\text{exp}} = 116\ 592\ 061\ (41) \cdot 10^{-11} \quad [0.5\text{ppm}]$$

$$a_\mu^{\text{SM}} = 116\ 591\ 804\ (51) \cdot 10^{-11} \quad [0.5\text{ppm}]$$

$$\Delta a_\mu \equiv a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}} = 257\ (65) \cdot 10^{-11} \quad [\sim 4.2\sigma]$$

Theory (the SM): $a_\mu = a_\mu(\text{QED}) + a_\mu(\text{hadronic}) + a_\mu(\text{weak})$

$$a_\mu(\text{QED}) = 116\ 584\ 718\ 845\ (9)(19)(7)(30) \cdot 10^{-14} \quad [5 \text{ loops}]$$

$$a_\mu(\text{hadronic}) = a_\mu(\text{had. vac.pol.}) + a_\mu(\text{had. l.b.l.})$$

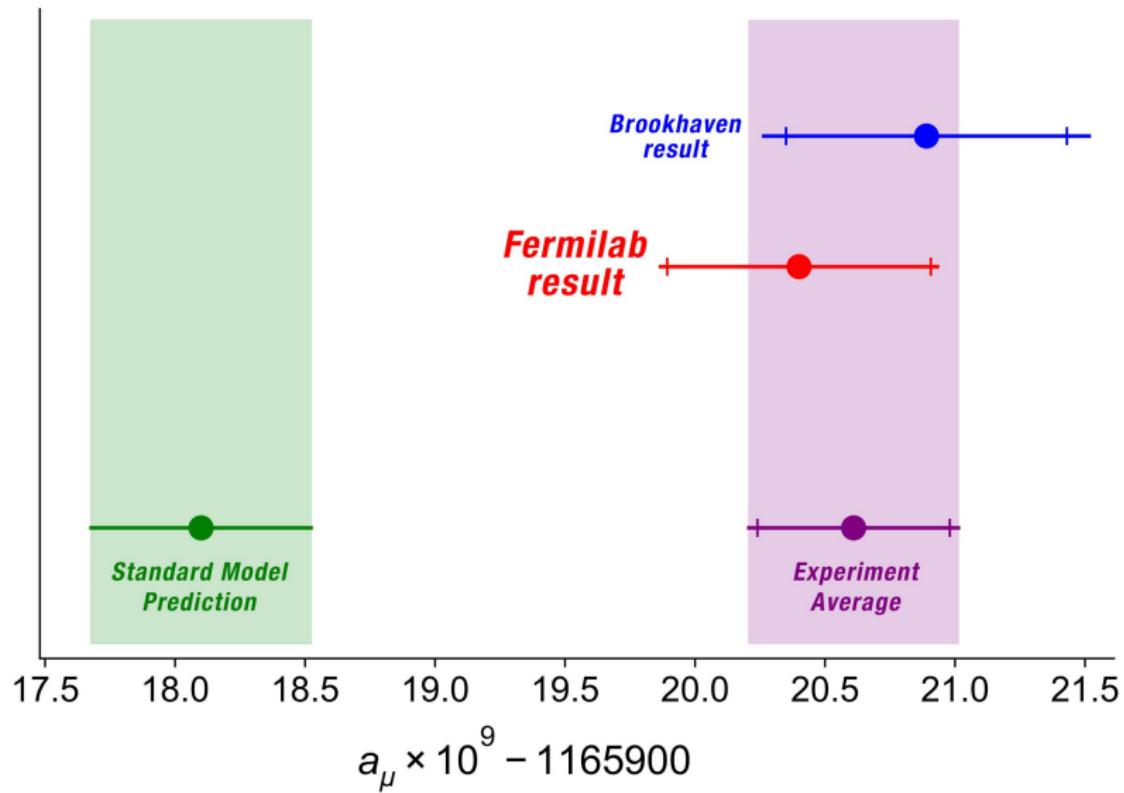
$$= 6949\ (37)(21) \cdot 10^{-11} + 116\ (40) \cdot 10^{-11}$$

$$a_\mu(\text{weak}) = 154\ (2) \cdot 10^{-11} \quad [2 \text{ loops}]$$

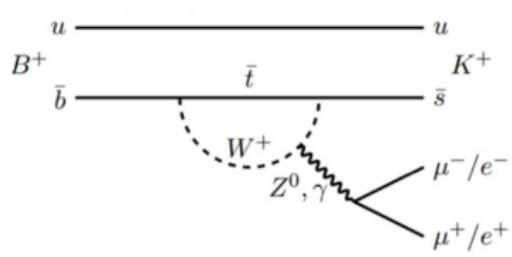
N.B.1. $\Delta a_\mu \sim 2 \times a_\mu(\text{weak})$, how can it come from new physics?

N.B.2. Here “weak” = EW - “pure QED”

Recent results



R_K and R_D anomalies



$$R_{D^{(*)}} = \frac{\text{Br}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{\text{Br}(B \rightarrow D^{(*)} l \nu)}, \quad R_{K^{(*)}} = \frac{\text{Br}(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{\text{Br}(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)}$$

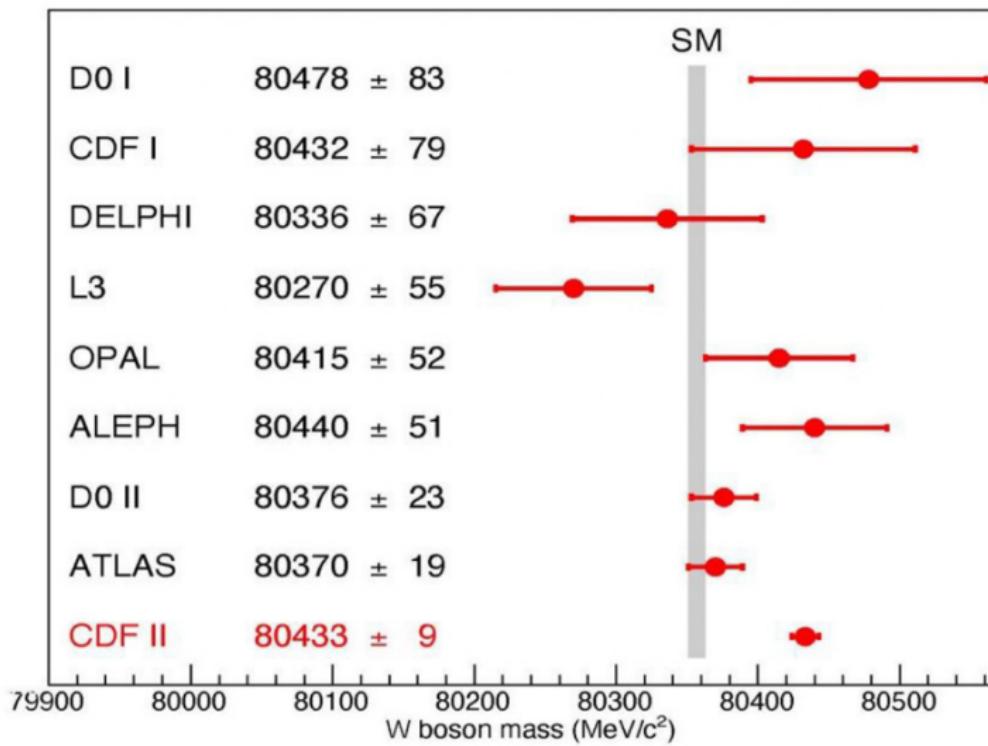
There are some **anomalies**

$$\begin{aligned} R_D^{\text{exp}} &= 0.339 \pm 0.030, & R_D^{\text{SM}} &= 0.248 \pm 0.001 \\ R_{D^*}^{\text{exp}} &= 0.295 \pm 0.014, & R_{D^*}^{\text{SM}} &= 0.289 \pm 0.004 \end{aligned} \quad (1)$$

$$|R_{D^{(*)}}^{\text{exp}} - R_{D^{(*)}}^{\text{SM}}| \sim 3.1 \cdot \sigma, \quad |R_{K^{(*)}}^{\text{exp}} - R_{K^{(*)}}^{\text{SM}}| \sim 2.5 \cdot \sigma$$

N.B. Remind the 5-sigma rule

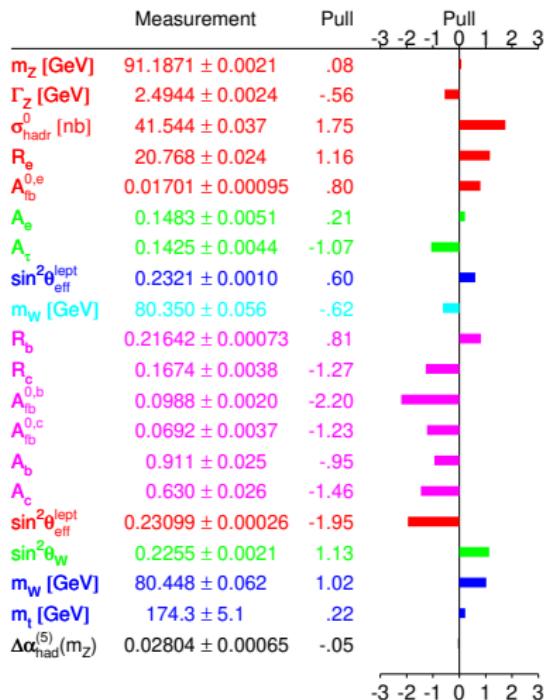
W boson mass puzzle



“SM” = fit of experimental data within the Standard Model

Experimental tests of the SM at the LEP era

Stanford 1999

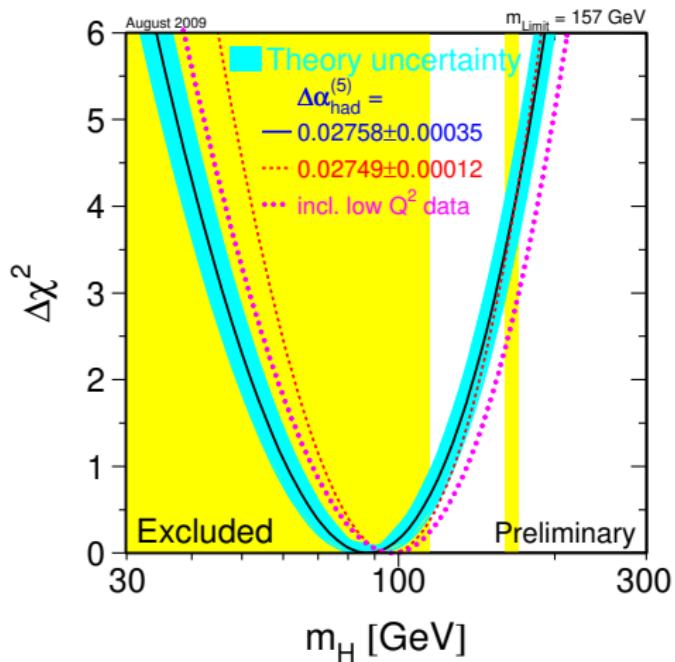


Pulls for **pseudo-observables**. The pull is defined as the difference between the measurement

and the SM prediction calculated for the central values of the fitted SM IPS [$\alpha(M_Z^2) = 1/128.878$,

$\alpha_s(M_Z^2) = 0.1194$, $M_Z = 91.1865$ GeV, $m_t = 171.1$ GeV] divided by the experimental error.

Blue-band plot 2009

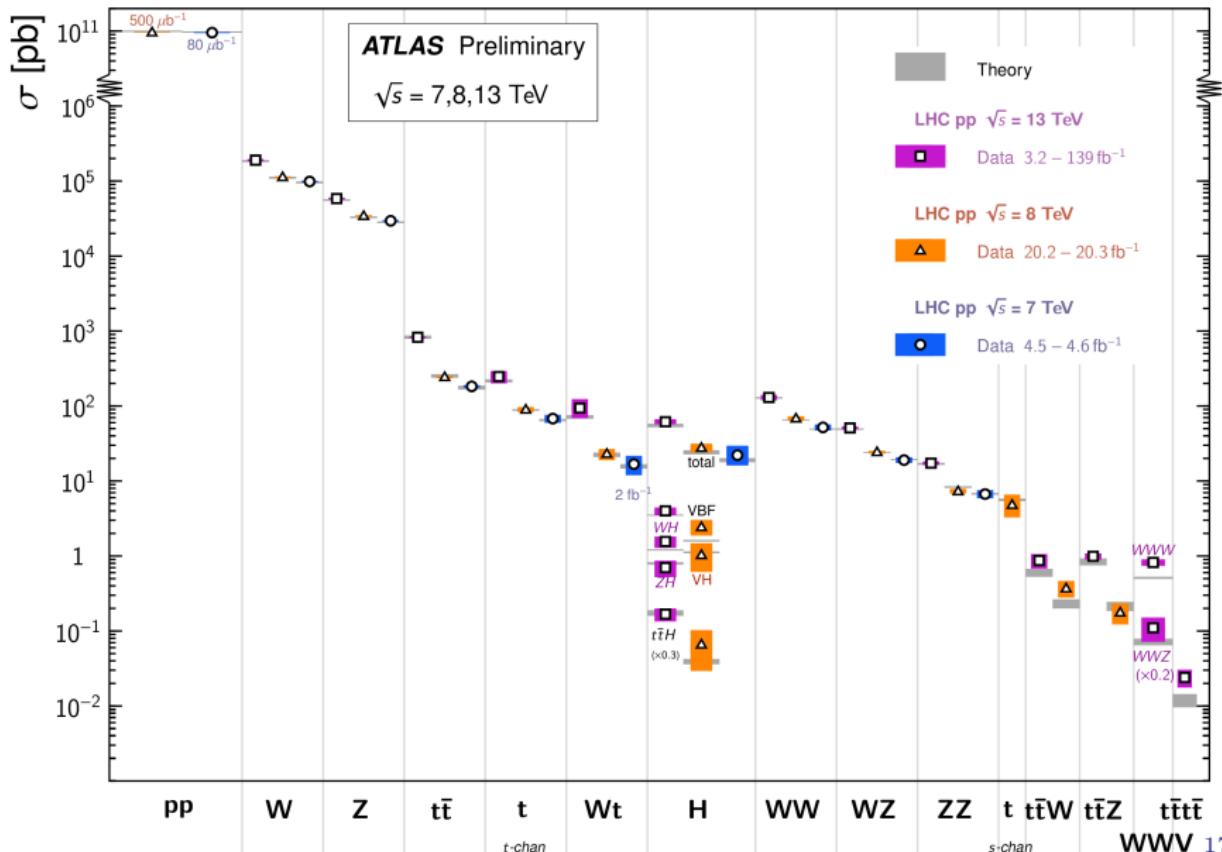


The same curve but for state of the analysis on **August 2009**. The 95% CL exclusion limits on M_H from the direct searches at LEP-II (up to 114 GeV) and the Tevatron (160 GeV to 170 GeV) are shown.

Сечения процессов СМ на БАК

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: February 2022



Standard Model at the ElectroWeak and Planck Scales

State-of-art analysis requires:

Measured value of the Higgs boson mass indicates that the SM can be extrapolated to a very high (e.g. Planck) scale.

I. Three-loop evolution equations of all SM parameters

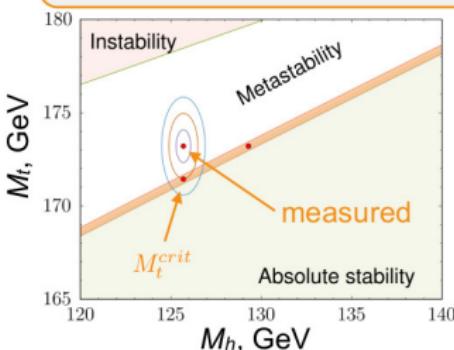
Bednyakov, Pikelner, Velizhanin,

- JHEP 1301 (2013), Phys.Lett. B722 (2013), Nucl.Phys. B875 (2013),
- Nucl.Phys. B879 (2014), Phys.Lett. B737 (2014) (with flavor mixing)

and boundary values from

2. Relations between observables and the parameters:

- **Bednyakov**, Phys.Lett. B741 (2015)
- **Kniehl, Pikelner, Veretin**, Nucl.Phys. B896 (2015)

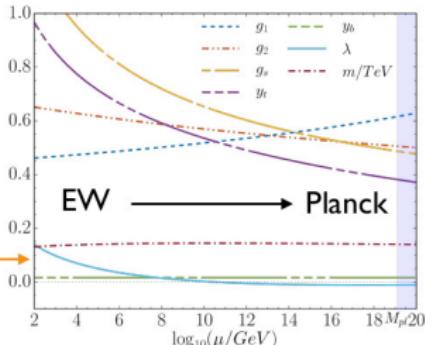


- Higgs self-coupling $\lambda(\mu) > 0$ tests the SM vacuum stability.
- Crucial dependence on physical masses of **Top-quark** and **Higgs boson** - M_t and M_H

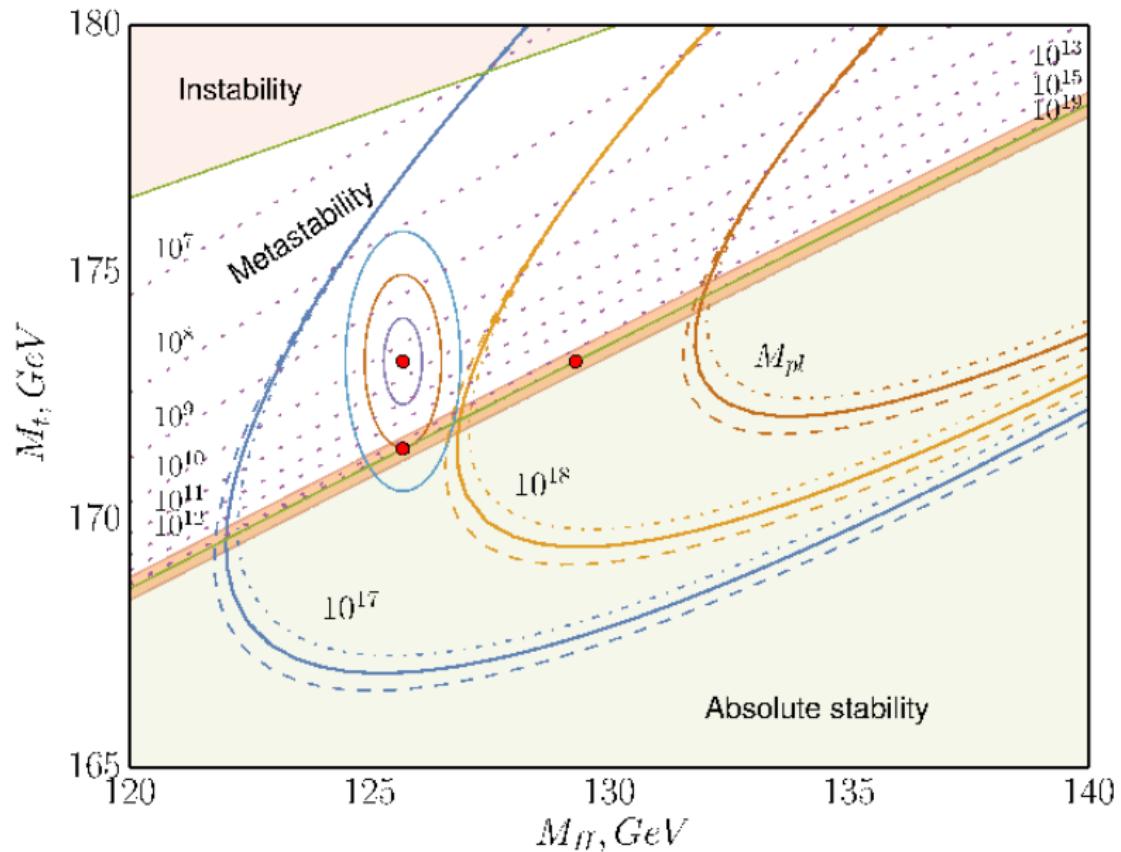
For a fixed value of $M_h=125.7$ GeV
absolute SM stability leads to a bound on the measured

$$M_t < M_t^{crit} = 171.44_{-0.17}^{+0.36} \text{ GeV}$$

theoretical uncertainty - decreased by 10-20 % due to 3 loops



Relation between EW and Planck scales?



Проблема натуральности

The most serious, actually the only one real theoretical problem of the SM is the **naturalness = fine-tuning = hierarchy** problem,

Note that all **but one** masses in the SM are generated due to the spontaneous symmetry breaking in the Higgs sector. While the Higgs mass itself has been introduced **by hands** (of Peter Higgs et al.) from the beginning. The tachyon mass term breaks the scale invariance (the conformal symmetry) **explicitly**.

So the running of all but one masses is suppressed by the classical symmetries \Rightarrow they have only logarithmic UV cut-off dependence, but the Higgs mass gets the quadratic divergence:

$$M_H^2 = (M_H^0)^2 + \frac{3\Lambda^2}{8\pi^2 v^2} \left[M_H^2 + 2M_W^2 + M_Z^2 - 4m_t^2 \right]$$

It is **unnatural** to have $\Lambda \gg M_H$.

The most **natural** option would be $\Lambda \sim M_H$, e.g. everything is defined by the EW scale. But this is not the case of the SM...

Достоинства СМ

- ▶ Перенормируема \Rightarrow конечные предсказания
- ▶ Предсказания согласуются с опытом
- ▶ Использованы принципы симметрии
- ▶ Минимальность
- ▶ Все частицы СМ найдены
- ▶ Структура взаимодействий известна
- ▶ Все параметры определены
- ▶ Есть источник нарушения СР-симметрии
- ▶ Можно описать массы и смешивание нейтрино
- ▶ ...

Проблемы СМ

A: не (очень) понятые свойства СМ

- ▶ Происхождение симметрий
- ▶ Происхождение масштабов энергии
- ▶ Происхождение трех поколений фермионов
- ▶ Происхождение масс нейтрино
- ▶ Отсутствие СР-нарушения в КХД
- ▶ Проблемы натуральности и тривиальности
- ▶ Вклад в энергию вакуума
- ▶ Конфайнмент в КХД; ...

B: феноменология

- ▶ Асимметрия вещества и анти-вещества
- ▶ Темная материя, темная энергия, инфляция
- ▶ $(g - 2)_\mu$, R_K , M_W , ...

Заключение

СМ построена на основе фундаментальных (?) принципов но с учетом наблюдаемых фактов

Наиболее **важной задачей** сейчас является определение границ применимости СМ

Любой вид **новой физики** должен соблюсти соответствие СМ

СМ содержит **механизмы** генерации масс частиц, но не показывает источник **происхождения** соответствующих масштабов энергии

СМ не может быть **теорией всего**, есть огромный океан для новых открытий!

Спасибо!

И

Удачи!