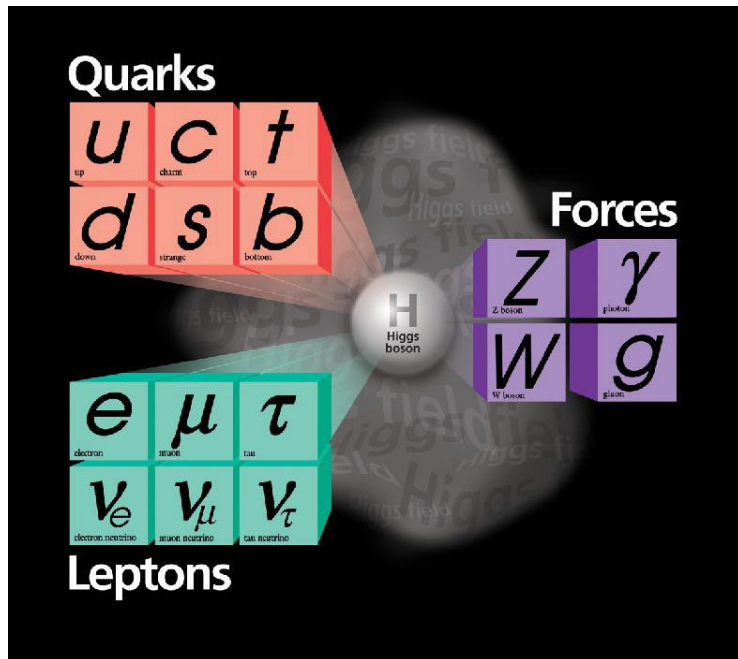


Проблемы и перспективы физики частиц

Эдуард Боос

НИИЯФ и физический факультет МГУ



The Standard Model

	Fermions			Bosons
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon
				H Higgs* boson

Source: American
Association for the
Advancement of Science;
The Economist

*Confirmation just announced

Симметрии

1. Пространственно-временные симметрии

(Лоренц и Пуанкаре инвариантность)

$x^\mu \rightarrow x'^\mu = \Lambda^\mu_\nu x^\nu + a^\mu \quad \mu, \nu = 0, 1, 2, 3 \dots$ Классификация полей по массам и спинам

2. Внутренние симметрии

(глобальная инвариантность и калибровочная инвариантность)

$\Psi^a(x) \rightarrow M^a_b \Psi^b(x)$, если M^a_b не зависит от точки – глобальная симметрия
если $M^a_b(x)$ зависит от точки – локальная симметрия

Калибровочная инвариантность позволяет ввести взаимодействия в теорию

3. Спонтанное нарушение симметрии.

Позволяет ввести в теорию масштабы и придать массы полям без нарушения калибровочной структуры взаимодействий

Размерности полей и операторов

$$\hbar = c = 1$$

$$1/\alpha_B \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

$$[\psi] = [m]^{3/2} \quad [V] = [\phi] = [m]^1$$

$$L = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \bar{\mu} \gamma_\sigma (1 - \gamma_5) \nu_\mu \bar{e} \gamma_\sigma (1 - \gamma_5) \nu_e + h.e. \quad \text{взаимодействие Ферми}$$

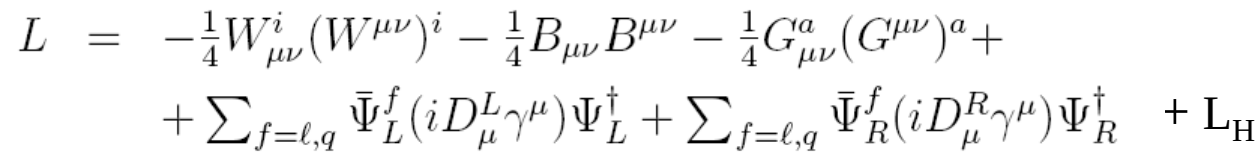
$$S = \int L(x) \cdot d^4x \quad L(x) = \sum_{i=0} C_i \cdot O_i$$

$$[C_i] = [m]^{4-i} \quad [O_i] = [m]^i$$

1. $i=0$ - $C_0 = \Lambda^4$ $\Lambda/(M_{\text{pl}})^4 \sim 10^{-128}$, $\Lambda/(v_{\text{SM}})^4 \sim 10^{-60}$ - **Cosmological constant problem**
2. $i=2$ $M^2 \phi^2$ - $v_{\text{SM}}/M_{\text{pl}} \sim 10^{-17}$ - **Hierarchy problem**
3. $i=3$ **Majorana masses, mass terms of vector like fermions**
4. $i=4$ - **Standard Model, Most of UV completions**
5. $i=5$ - **Weinberg operator** $\left(\overline{L_{L\alpha}^c} \tilde{H}^* \right) \left(\tilde{H}^\dagger L_{L\beta} \right) + \text{h.c.}$
6. $i \geq 6$ - **SMEFT (Standard Model Effective Field Theory)**



$SU(2)_L \times U(1)_Y \times SU(3)_c$



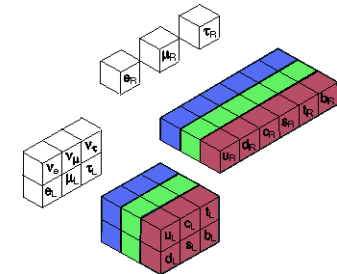
$$W_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g_2 \varepsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

$$D_\mu^R = \partial_\mu - ig_1 B_\mu \left(\frac{Y_R^f}{2} \right) - ig_S A_\mu^a t^a$$

$$i = 1, 2, 3; a = 1, \dots, 8,$$

$$Y_f = 2Q_f - 2I_f^3 \Rightarrow Y_{L_i} = -1, Y_{e_{R_i}} = -2, Y_{Q_i} = \frac{1}{3}, Y_{u_{R_i}} = \frac{4}{3}, Y_{d_{R_i}} = -\frac{2}{3}$$

СМ - элегантная теоретическая конструкция, одно из наиболее важных интеллектуальных достижений последних 50 лет



Physical Fields

$$W_{\mu}^{\pm} = (W_{\mu}^1 \mp iW_{\mu}^2) / \sqrt{2}.$$

$$W_\mu^3 = Z_\mu \cos \theta_W + A_\mu \sin \theta_W$$

$$B_\mu = -Z_\mu \sin \theta_W + A_\mu \cos \theta_W$$

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$$

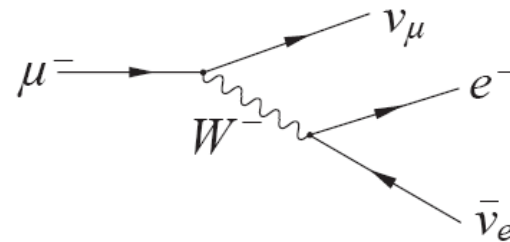
О бозоне Хиггса и спонтанном нарушении

Константа G_F извлекается с высокой точностью из данных по измерению времени жизни мюона

$$G_F = 1.166\,378\,7(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

Поскольку $m_\mu \ll M_W$, в пропагаторе W можно пренебречь импульсами и получить:

$$\frac{g_2^2}{8M_W^2} = \frac{G_F}{\sqrt{2}}$$



Но в СМ масса W бозона обусловлена механизмом Хиггса и пропорциональна значению вакуумного среднего v

$$M_W^2 = \frac{1}{4}g_2^2v^2$$

Из этих двух соотношений:

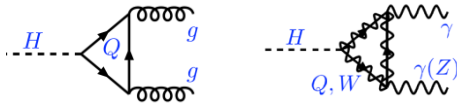
$$v = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}G_F}} = 246.22 \text{ GeV}$$

Мощь принципа калибровочной инвариантности,
 g_2 – это одна и та же калибровочная константа связи группы $SU_L(2)$

The Higgs field expectation value v is determined by the Fermi constant G_F introduced long before the Higgs mechanism appeared!

Только один свободный параметр – масса бозона Хиггса

$$L_H = \frac{1}{2}(\partial^\mu h)(\partial_\mu h) + \frac{M_h^2}{2}h^2 - \frac{M_h^2}{2v}h^3 - \frac{M_h^2}{8v^2}h^4 + \\ + \left(M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{2}M_Z^2 Z_\mu Z^\mu\right) \left(1 + \frac{h}{v}\right)^2 - \sum_f m_f \bar{f} f \left(1 + \frac{h}{v}\right)$$



$$M_W = 1/2 g_2 \cdot v \quad M_Z = 1/2 g_2 / \cos\theta_W \cdot v \\ m_f = y_f / \sqrt{2} \cdot v \quad M_H = \sqrt{(2\lambda)} \cdot v$$

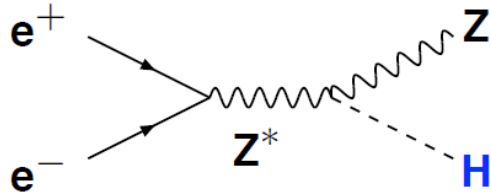
Предсказания для ширин распадов и сечений рождения по различным модам

Ограничения из условия унитарности и самосогласованности СМ

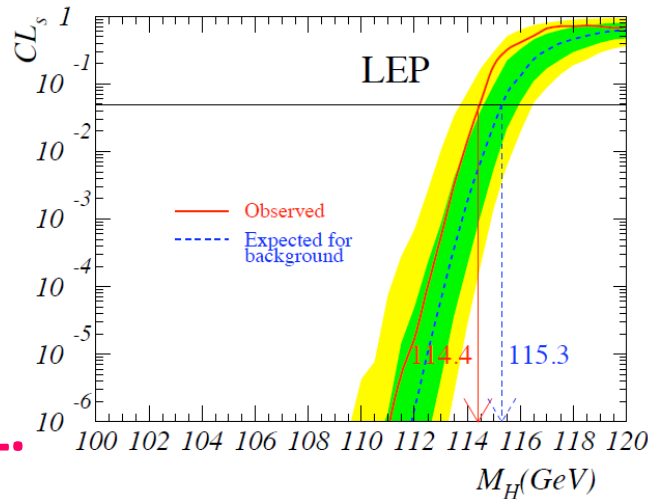
Ограничения из прямых поисков

Ограничения из сравнений петлевых вкладов с точными экспериментальными измерениями

1. Прямые поиски:



$M_H > 114.4 \text{ GeV}$ 95% C.L.

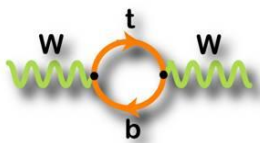


Tevatron (in gluon fusion with decay to WW):

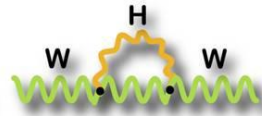
Excluded region

$M_H: 160\text{-}170 \text{ GeV}$

2. Ограничения из петлевых вкладов в массы:



$$\sim m_t^2$$



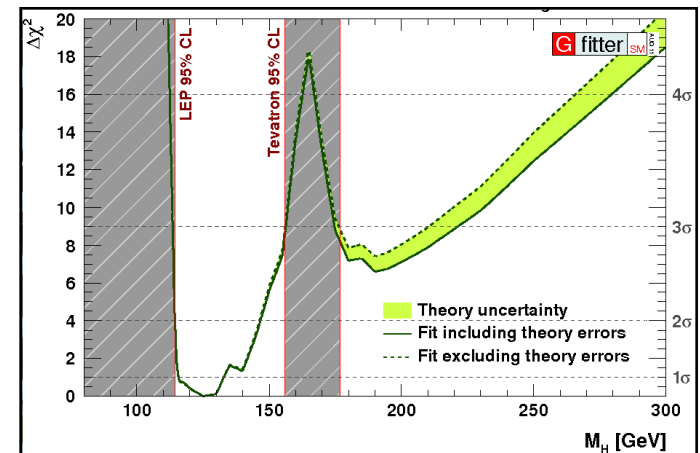
$$\sim \log(m_h^2/M_Z^2)$$

$$(\Delta r)_{\text{top}} \approx -\frac{3G_F m_t^2}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{1}{t_W^2}$$

$$(\Delta r)_{\text{Higgs}} \approx \frac{11G_F M_Z^2 c_W^2}{24\sqrt{2}\pi^2} \ln \frac{m_h^2}{M_Z^2}$$

$M_H < 155 \text{ GeV}$ 95% C.L.

Combining all direct and indirect constraints:

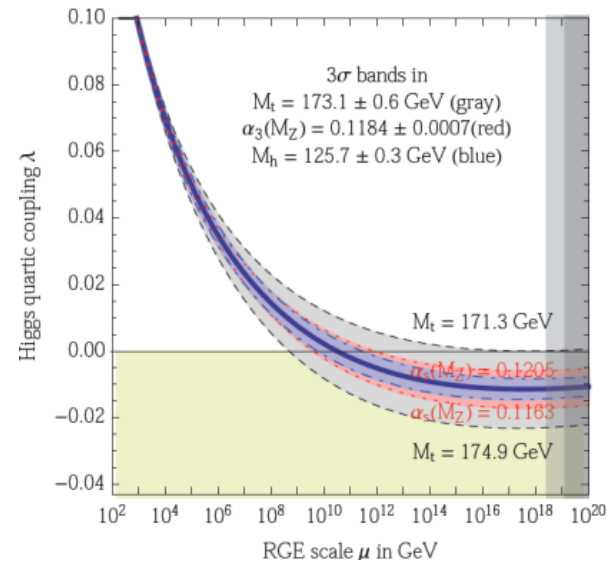
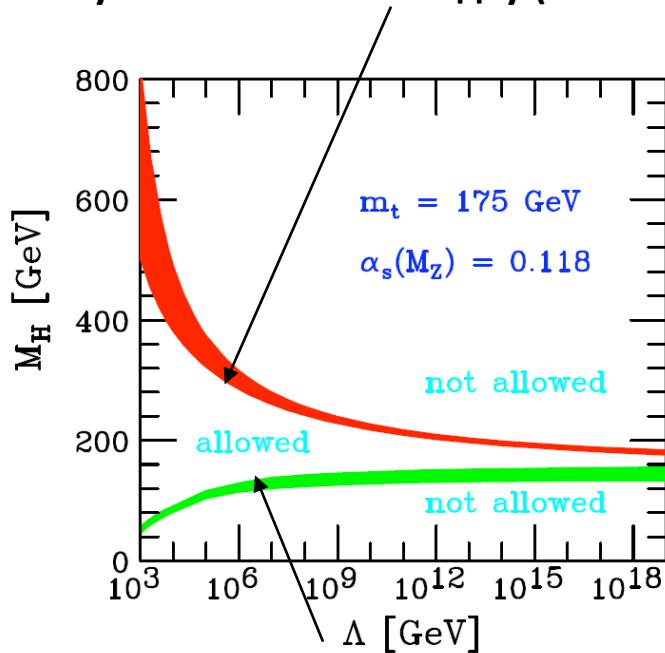


Gfitter collaboration, Aug. 2011

$M_H = 125 \pm 10 \text{ GeV}$

3. Самосогласованность СМ как квантовой теории поля

Отсутствие полюса Ландау (triviality)



Положительная констант самодействия
(vacuum stability) $\lambda(Q^2) > 0$

4. Из требования унитарности для $VV \rightarrow VV$ (V: W,Z)

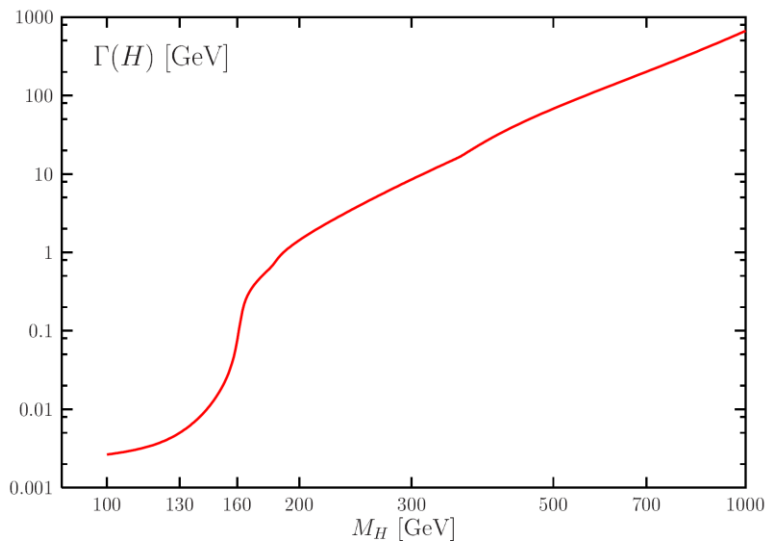
$$M_H \lesssim 710 \text{ GeV} \quad \text{if } \sqrt{s} \gg M_H$$

Либо легкий Хиггс

$$\sqrt{s} \lesssim 1.2 \text{ TeV} \quad \text{if } \sqrt{s} \ll M_H$$

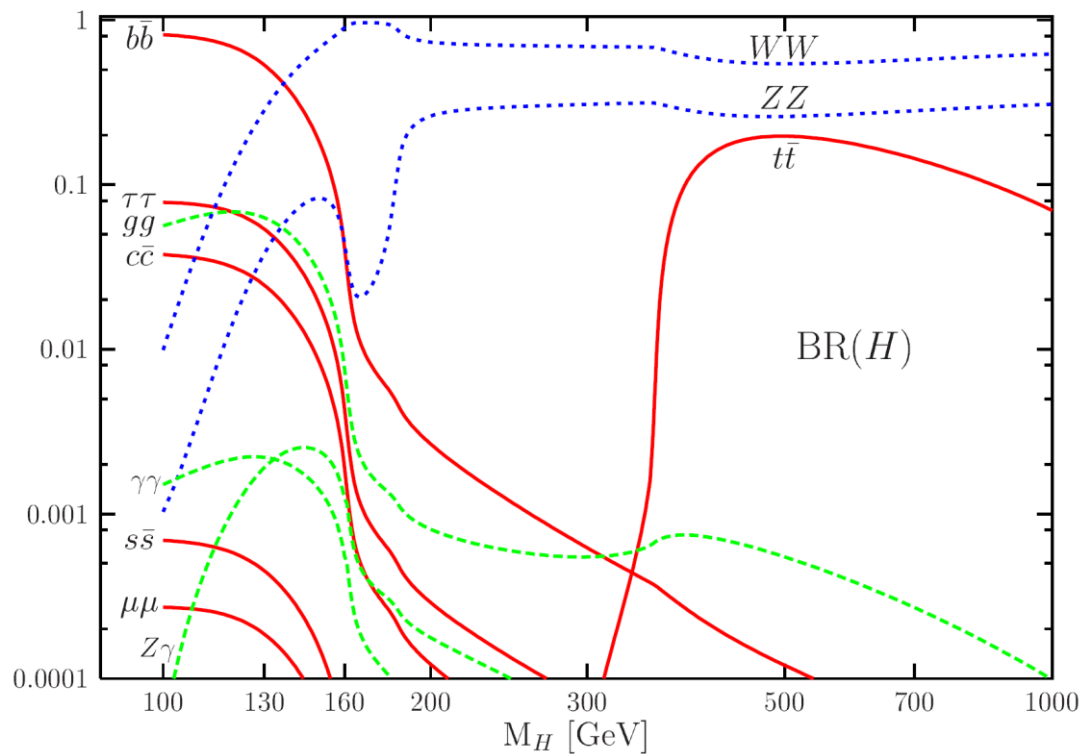
Либо «новая физика» на масштабе
 $\sim 1 \text{ TeV}$

No lose theorem!

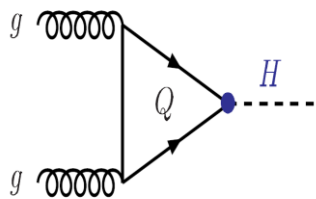


Полная ширина мала для легкого бозона
Хиггса и велика для тяжелого

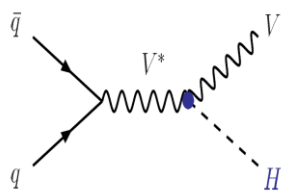
Для массы $M_H \sim 1$ TeV ширина $\Gamma_H \sim 0.5$ TeV



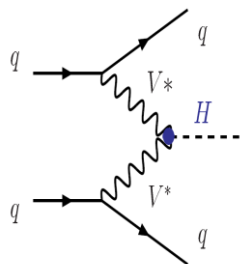
4 main SM Higgs production modes at LHC



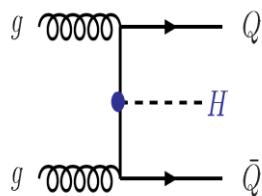
Gluon-gluon fusion



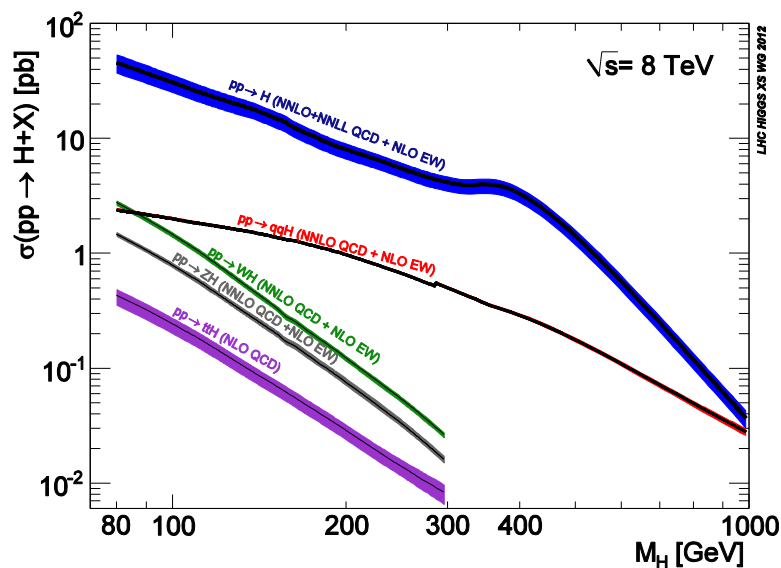
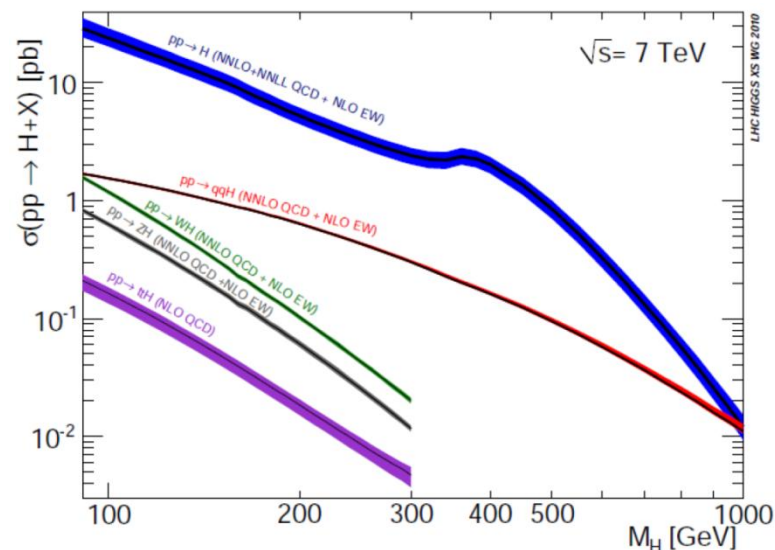
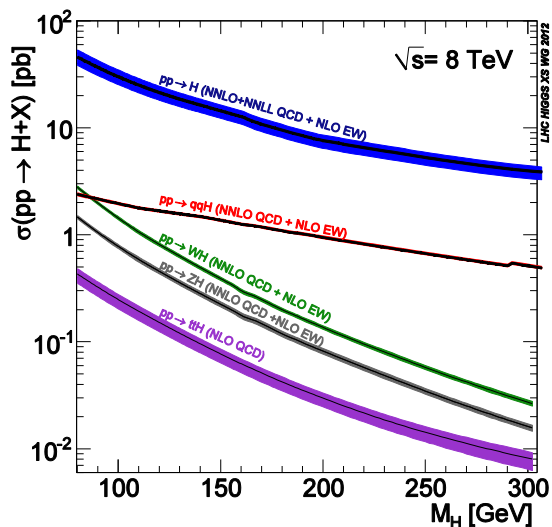
W/Z-Higgs associated



Vector boson fusion

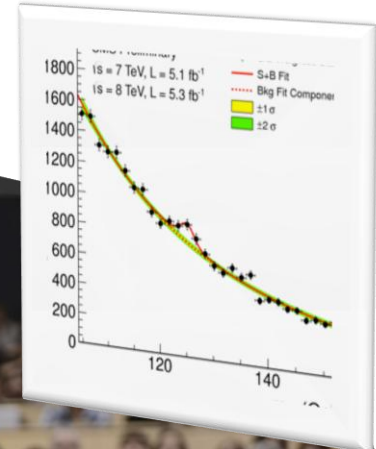
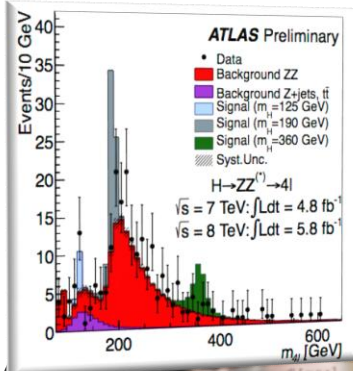


t t-bar (bb-bar) Higgs associated



Доклады на семинаре в ЦЕРН

4 июля 2012 г.

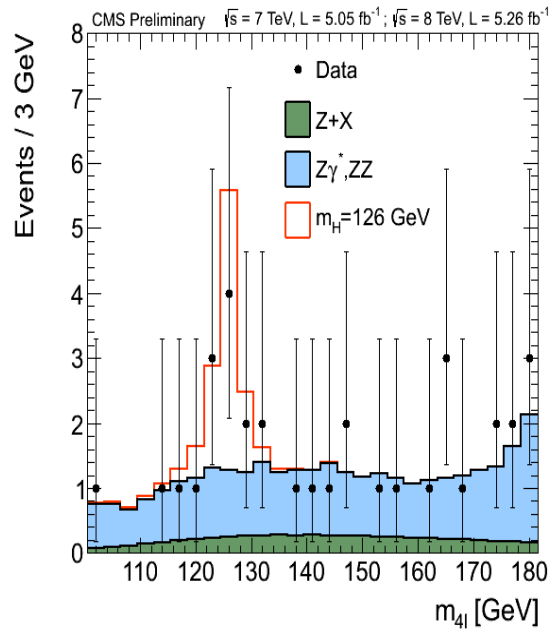


Fabiola Gianotti
ATLAS Spokesperson 2010-2012

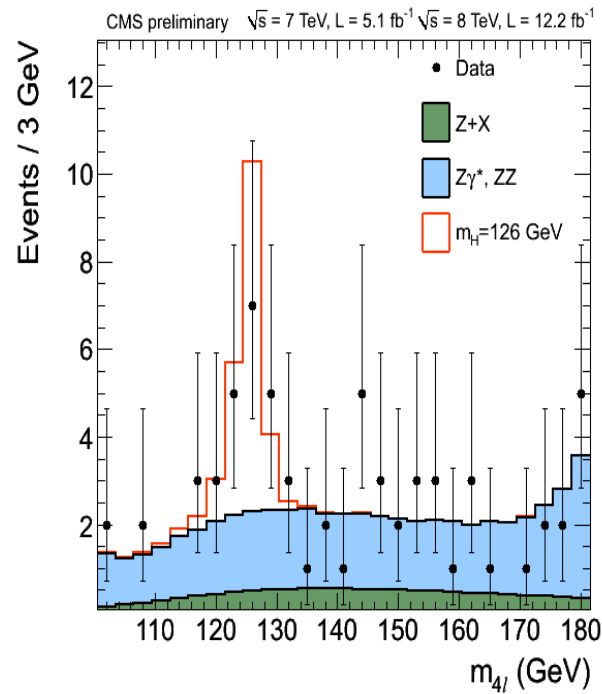
Joe Incandela
CMS Spokesperson 2012-2013

Все более четкий пик

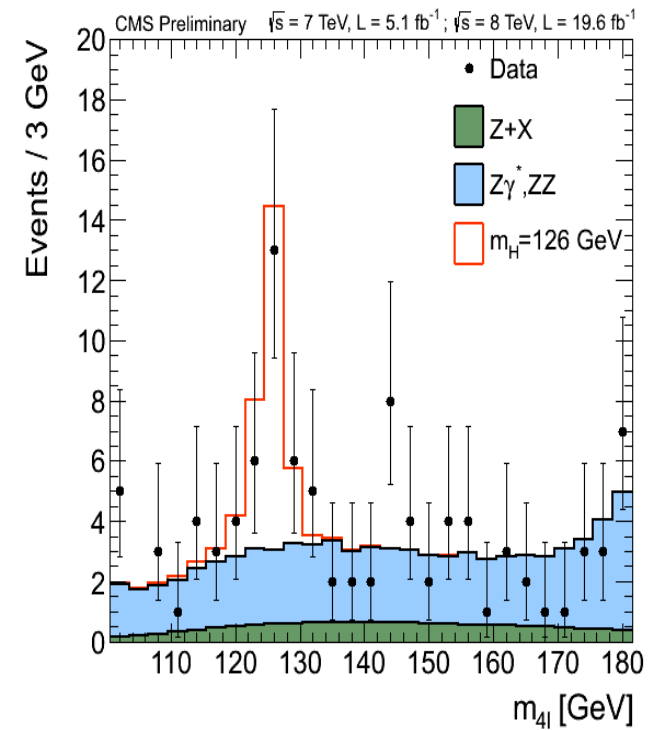
4 July



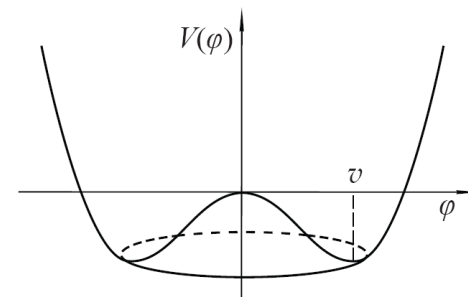
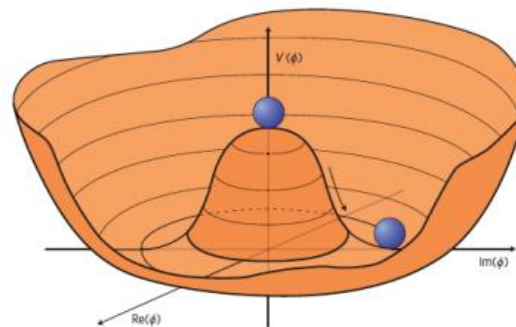
Nov 2012



RUN 1

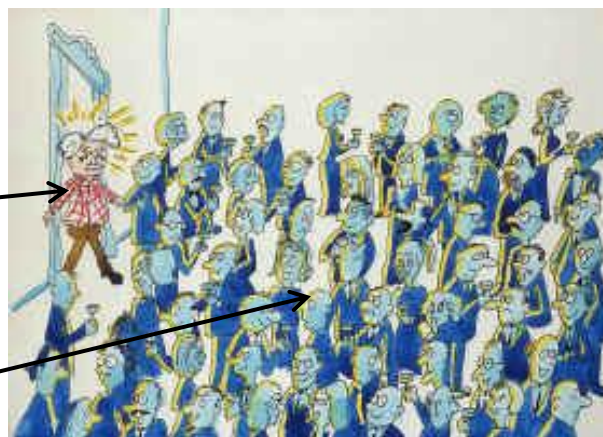


Бозоны и фермионы приобретают массу



Бозон или Фермион

Вакуум

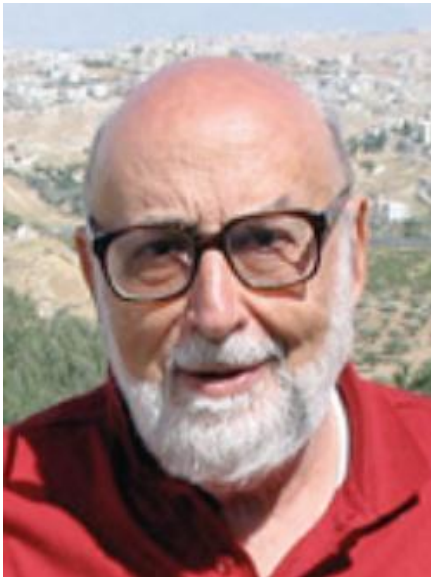


Квант возбуждения скалярного поля над вакуумом
- бозон Хиггса

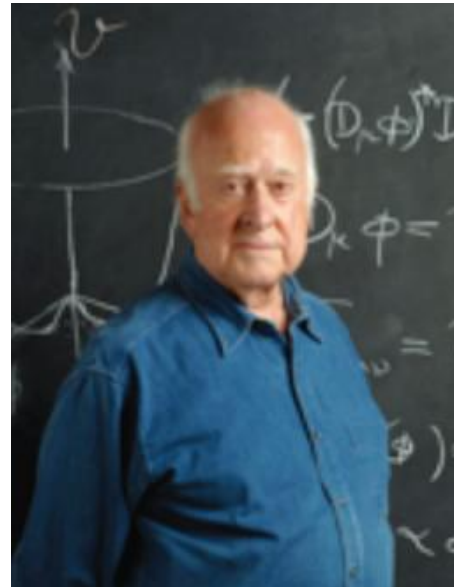


Нобелевская премия по физике 2013 года

Francios Englert



Peter Higgs



За теоретическое открытие механизма, который обогащает наше понимание происхождения массы субатомных частиц и который недавно был подтвержден открытием предсказанной фундаментальной частицы в ходе экспериментов ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере ЦЕРН

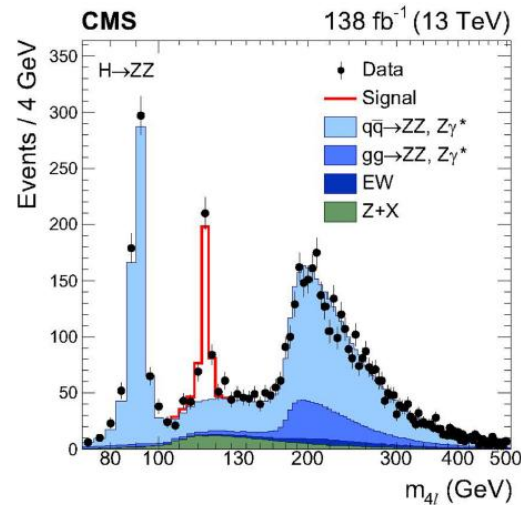
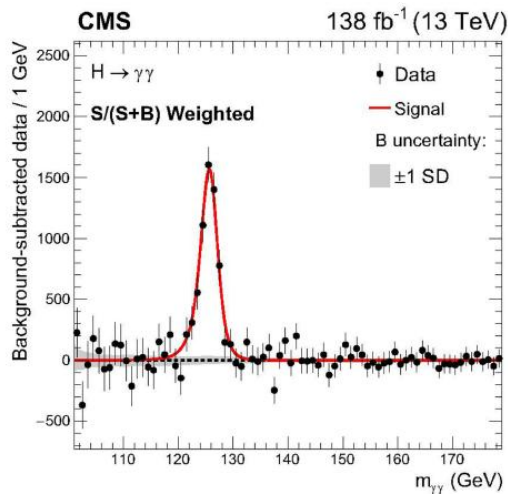
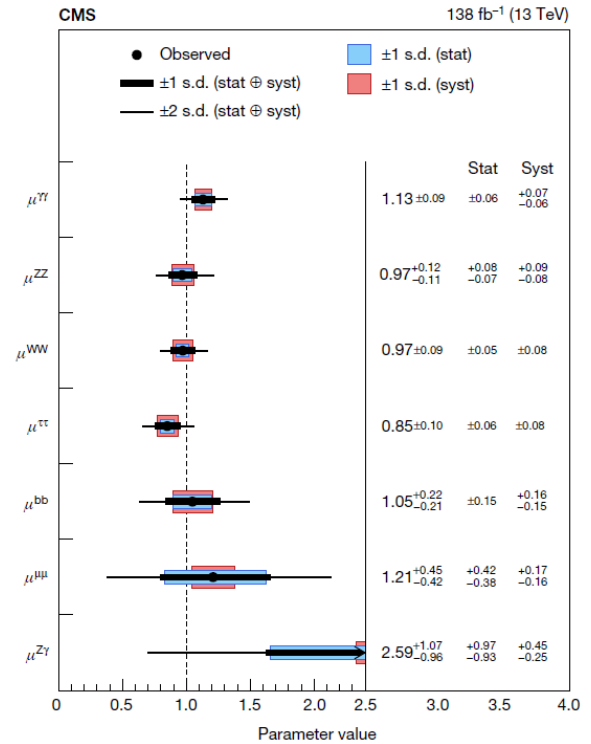
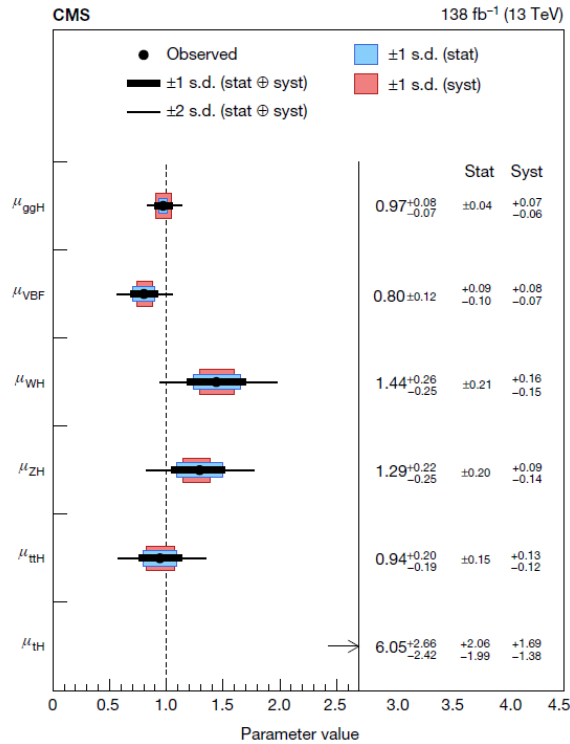
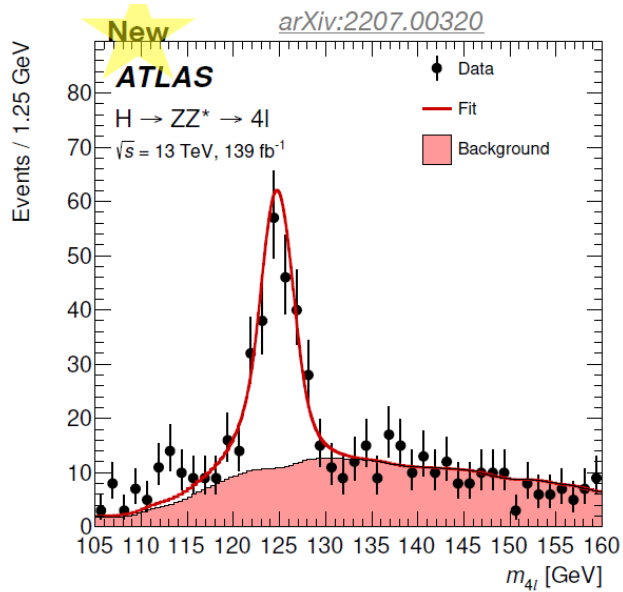


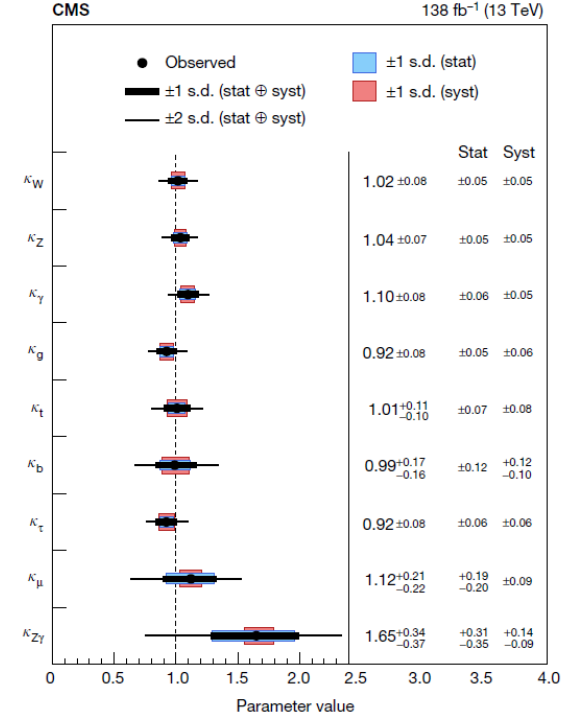
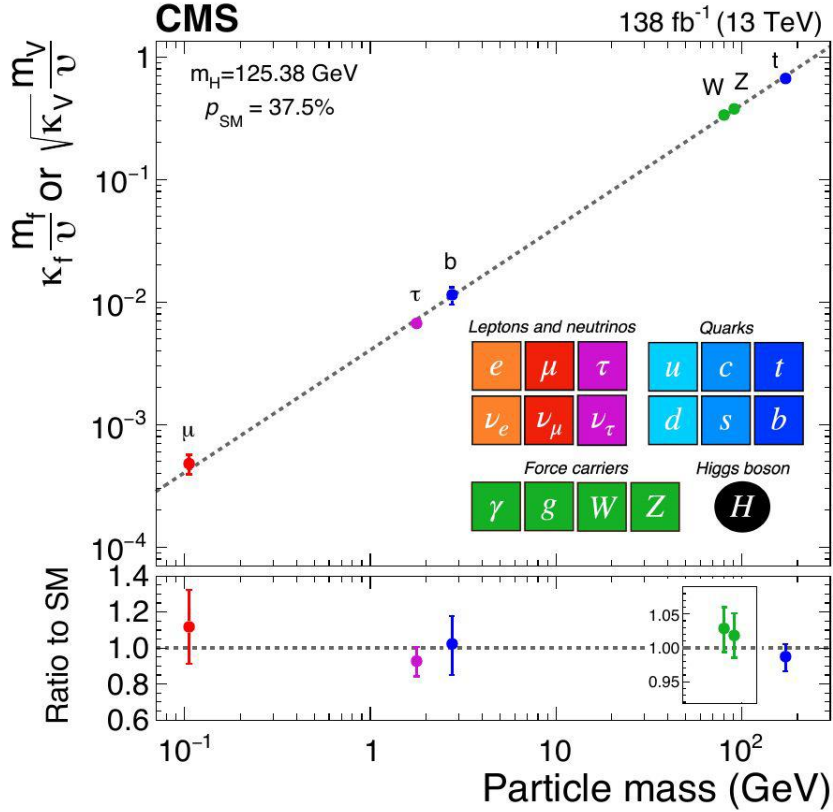
The Higgs boson is discovered

$$M_{\text{H}}^2 = 2\lambda v^2 = -2\mu^2 \sim 125 \text{ GeV}$$

$\lambda \simeq 0.13$ $\rightarrow$ a weakly-coupled theory

Some latest results

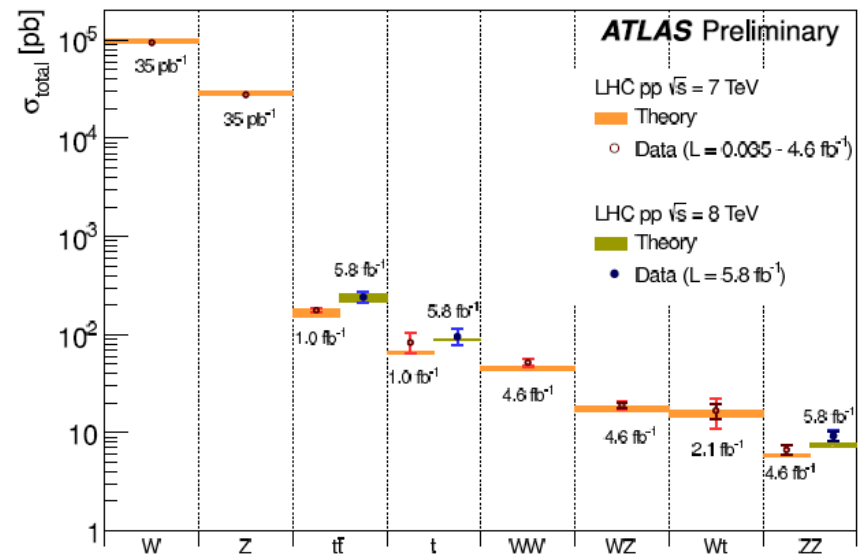
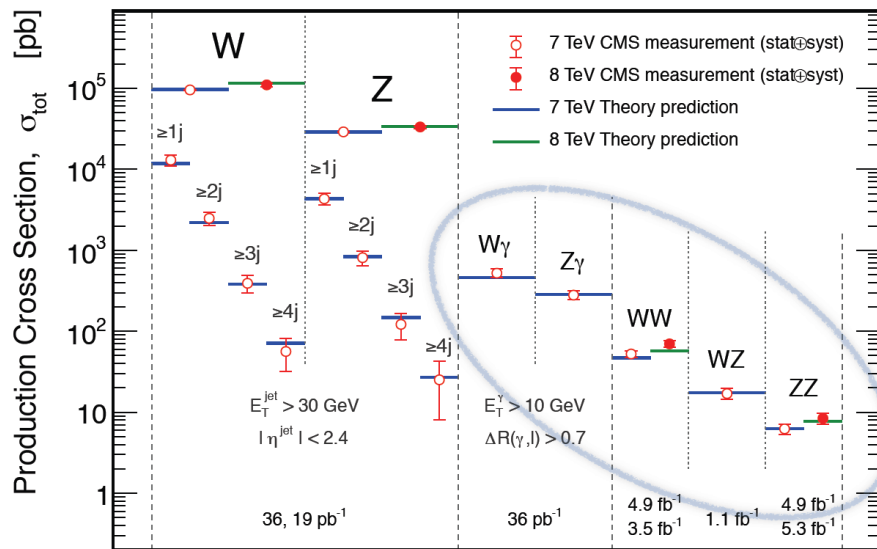
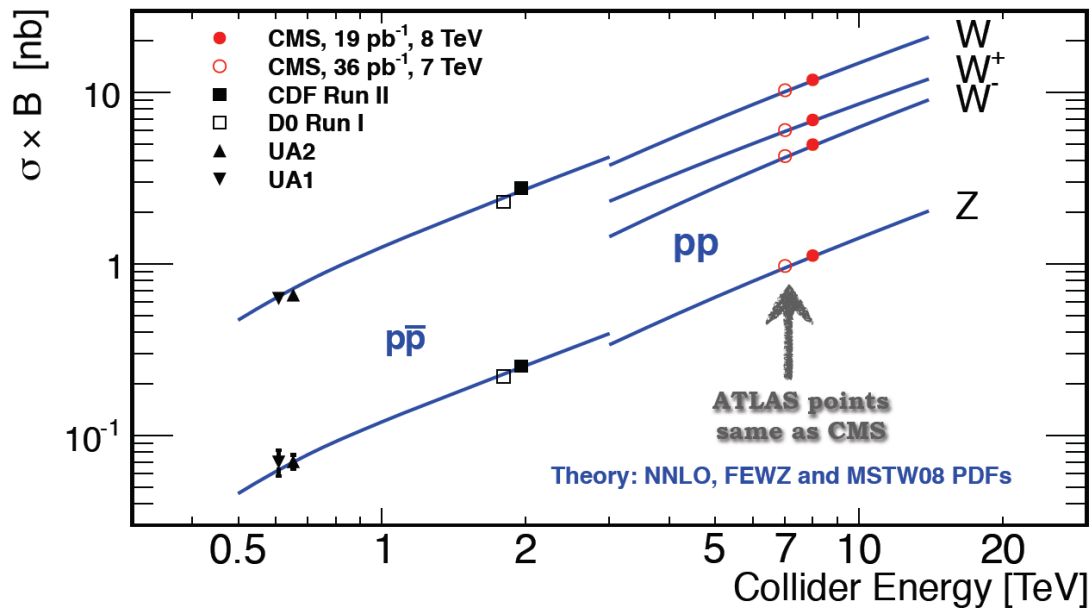




$$\mathcal{L} = \kappa_3 \frac{m_H^2}{2v} H^3 + \kappa_Z \frac{m_Z^2}{v} Z_\mu Z^\mu H + \kappa_W \frac{2m_W^2}{v} W_\mu^+ W^{-\mu} H$$

$$+ \kappa_g \frac{\alpha_s}{12\pi v} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} H + \kappa_\gamma \frac{\alpha}{2\pi v} A_{\mu\nu} A^{\mu\nu} H + \kappa_{Z\gamma} \frac{\alpha}{\pi v} A_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} H$$

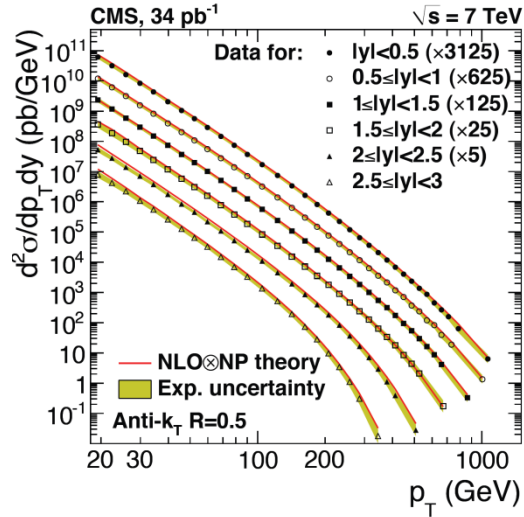
$$- \left(\kappa_t \sum_{f=u,c,t} \frac{m_f}{v} f \bar{f} + \kappa_b \sum_{f=d,s,b} \frac{m_f}{v} f \bar{f} + \kappa_\tau \sum_{f=e,\mu,\tau} \frac{m_f}{v} f \bar{f} \right) H$$



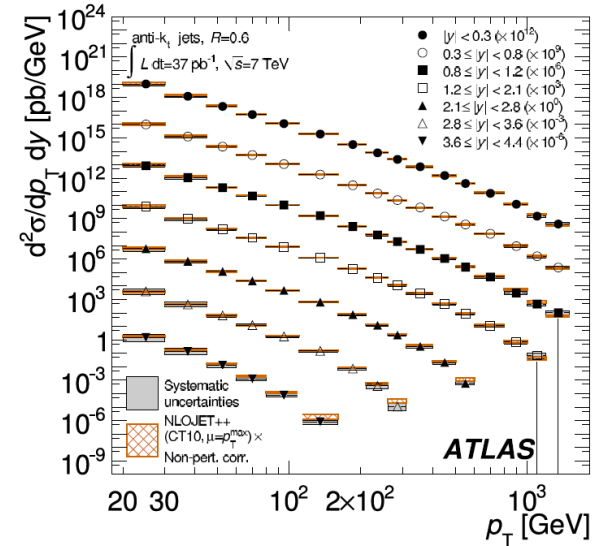
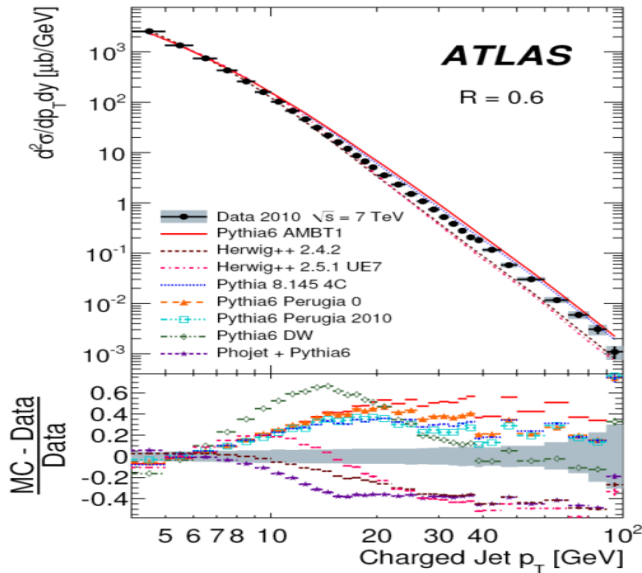
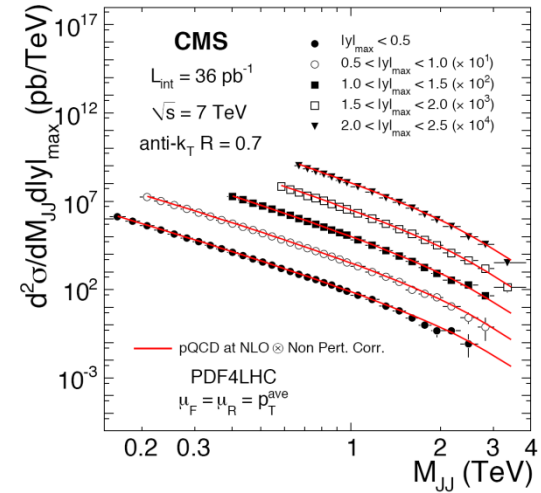
All in an agreement with the SM

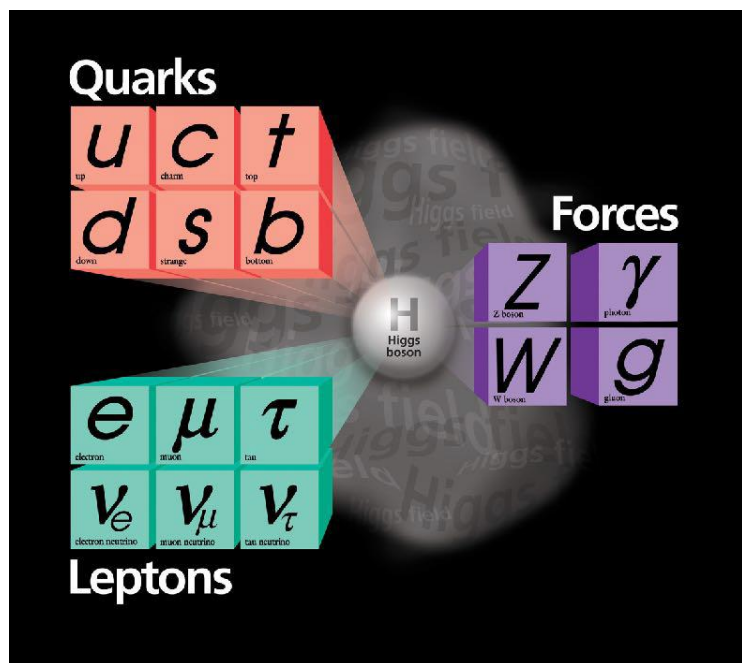
New remarkable QCD results in various kinematical regions

Double-differential inclusive jet production



Double-differential inclusive dijet production





The Standard Model

	Fermions			Bosons
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon
				H Higgs* boson

Source: American Association for the Advancement of Science; *The Economist*

*Confirmation just announced

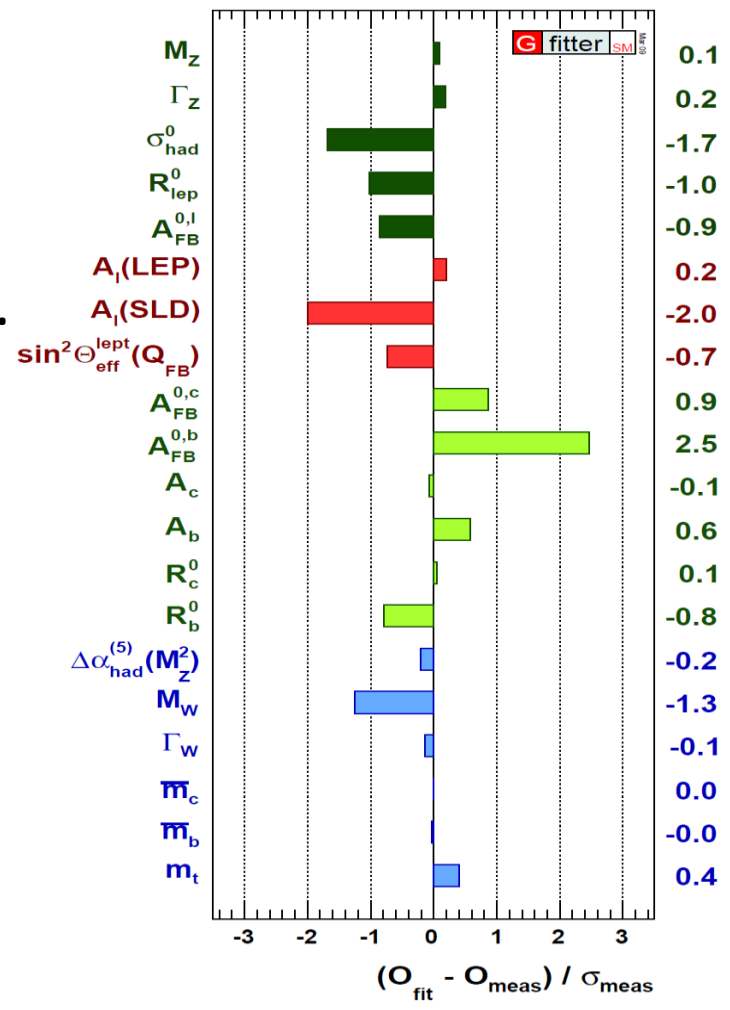
Стандартная модель - перенормируемая, свободная от киральных аномалий квантовая калибровочная теория поля со спонтанным нарушением электрослабой симметрии. **Впечатляющее согласие с большим числом экспериментальных данных.**

- Все предсказанные СМ лептоны, кварки, калибровочные бозоны и бозон Хиггса найдены экспериментально
- СМ предсказывает структуру взаимодействий и самодействий всех входящих в ее состав полей. Но не все взаимодействия пока протестированы экспериментально.

- СМ (EW part) 17 параметров:
gauge-Higgs sector - 4 параметра:
 g_1, g_2, μ^2, λ или best measured
 α_{em}, G_F, M_Z (или α_{em}, s_W, M_W) плюс M_H

В дополнение: 6 quarks masses, 3 lepton masses,
3 mixing angles, 1 phase of the CKM matrix

plus α_{QCD} $\longrightarrow$ 18 SM parameters
(+ masses and mixing parameters from neutrino sector)



Основная проблема – СМ работает слишком хорошо

Lord Kelvin (1900):

**“There is nothing more to discover in physics;
all that remains is more and more precise
measurements.”**

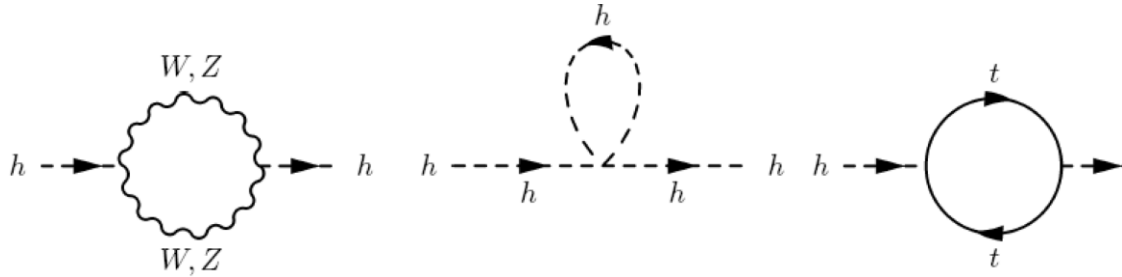
Факты, которые не находят объяснения в Стандартной Модели

- Массы и смешивания нейтрино, осцилляции нейтрино
- Темная материя во Вселенной
- Асимметрия частицы-античастицы во Вселенной, природа CP-нарушения (CP-нарушение в матрице смешивания CKM недостаточно)
Strong CP-problem (axion?)
- B-anomalies (about 4.5 σ) ???
- Muon $(g-2)_\mu$ anomaly (about 3.5 $\sigma \rightarrow$ 4.2 σ BNL) ???
- CDF W-mass anomaly (about 7 σ) ???
- Механизм Хиггса наделяет бозоны и фермионы массами.
Но по какой причине массы фермионов столь различны ?
($M_{\text{top}} \approx 173 \text{ GeV}$, $M_e \approx 0.5 \text{ MeV}$, $\Delta M_\nu \approx 10^{-3} \text{ eV}$)
- Гравитационные взаимодействия существенно слабее электрослабых.
В чем причина? Проблема иерархии масштабов
- Проблема конфайнмента в КХД

Остается множество вопросов

- Что формирует потенциал поля Хиггса?
- Что такое поколение? Почему поколений только 3?
- Какова природа кварк-лептоной аналогии?
- Элементарны ли кварки и лептоны?
- Существуют ли новые кварки и лептоны?
- Что определяет калибровочные симметрии?
- Существуют ли новые калибровочные взаимодействия?
- Почему электрослабый масштаб столь мал по сравнению с массой Планка?
- Почему столь мала космологическая постоянная? Что такое темная энергия?
- Насколько точна CPT-симметрия?
- Почему измерений пространства-времени только четыре, Существуют ли дополнительные измерения? Существует ли суперсимметрия?
-

Проблема иерархий (проблема натуральности)



Поправка не должна превышать саму массу. Проблема “малых иерархий”

$$\delta m_H^2 = \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (2m_W^2 + m_Z^2 + m_H^2 - 4m_t^2) \Lambda^2 \approx -(0.2 \Lambda)^2$$

$$\delta m_H < m_H \quad \Lambda < \sim 1 \text{ TeV}$$

Но СМ – перенормируемая теория. Рассмотрение в размерной регуляризации

$$M_H^2(\Lambda) = M_H^2(v) + C y_f^2 M_f^2 \text{Ln}(\Lambda^2/v^2) + \dots$$

В СМ нет симметрии, которая бы запрещала столь сильную зависимость массы от возможного масштаба “новой физики” $M_f^2 \sim \Lambda^2$

**Основной вопрос: Откуда следует значение электрослабого масштаба ~ 100 ГэВ?
Любой ответ требует «новую физику»**

What is a scale for New physics?

Before the LHC start we knew a scale **~ 1 TeV** from

No lose theorem!

$$|\text{Re}(a_l)| \leq \frac{1}{2}$$

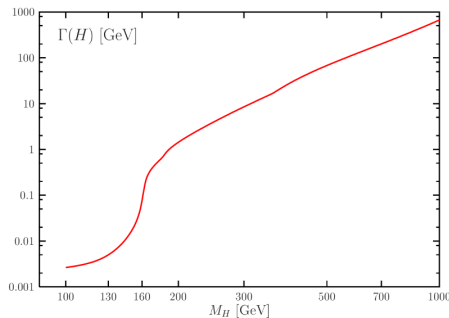
From the unitarity of $VV \rightarrow VV$ (V: W,Z) amplitudes:

Either light Higgs
or

New Physics at

$$M_H \lesssim 710 \text{ GeV}$$

$$\sqrt{s} \lesssim 1.2 \text{ TeV}$$



$\Gamma_h \sim 0.5 \text{ TeV}$
for
 $M_h \sim 1 \text{ TeV}$

The Higgs boson was found !

We do not have solid arguments for a new scale

We do not know if a new scale (if exists) would be accessible
at the LHC/FCC energies

Scales

Plank Mass $\sim 10^{19}$ GeV

Grand Unification scale $\sim 10^{15} - 10^{16}$ GeV ?

Neutrino physics (see-saw) scale $\sim 10^{13} - 10^{15}$ GeV ?

SM vacuum metastability scale $\sim 10^{10} - 10^{11}$ GeV ?

Some BSM models, some SUSY scenarios $\sim 10^3 - 10^4$ GeV ?

EW scale (v_{SM}) $\sim 10^2$ GeV

QCD scale $\sim 0.2 - 1$ GeV

(at least partly)

- Стабилизировать EWSB mechanism по отношению к петлям
- Содержать кандидатов в состав темной материи
- Содержать механизм CP-нарушения, чтобы обеспечить генерацию барионной асимметрии

И

- Включить, по-возможности, гравитацию

Supersymmetric models

(MSSM, NMSSM...)

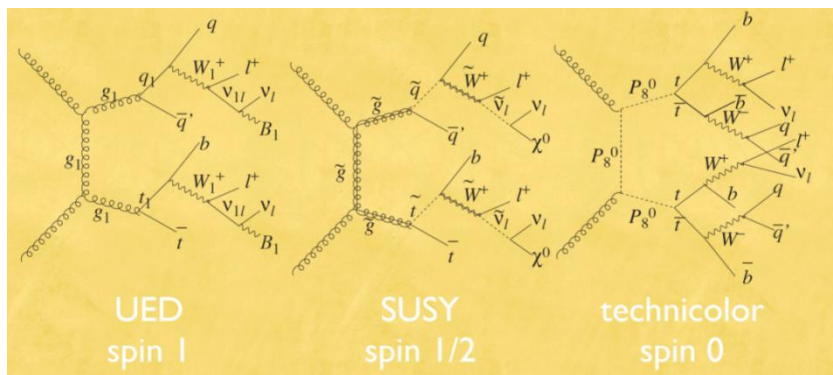
Models with extra space dimensions

(ADD, RS, UED ...)

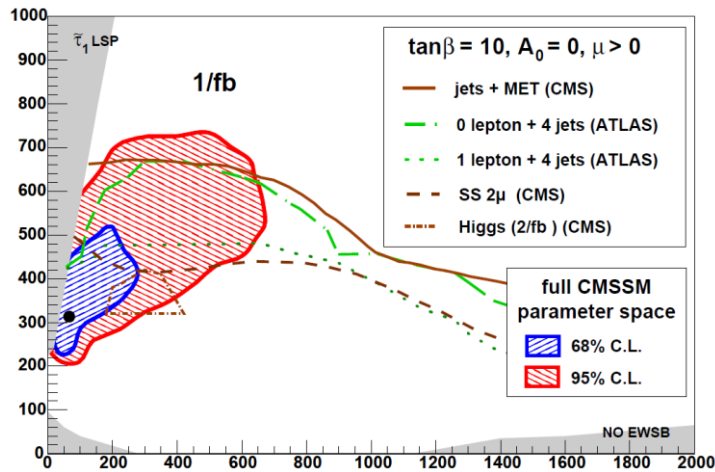
Models with new strong dynamics

(latest technicolor variants, Little Higgs...)

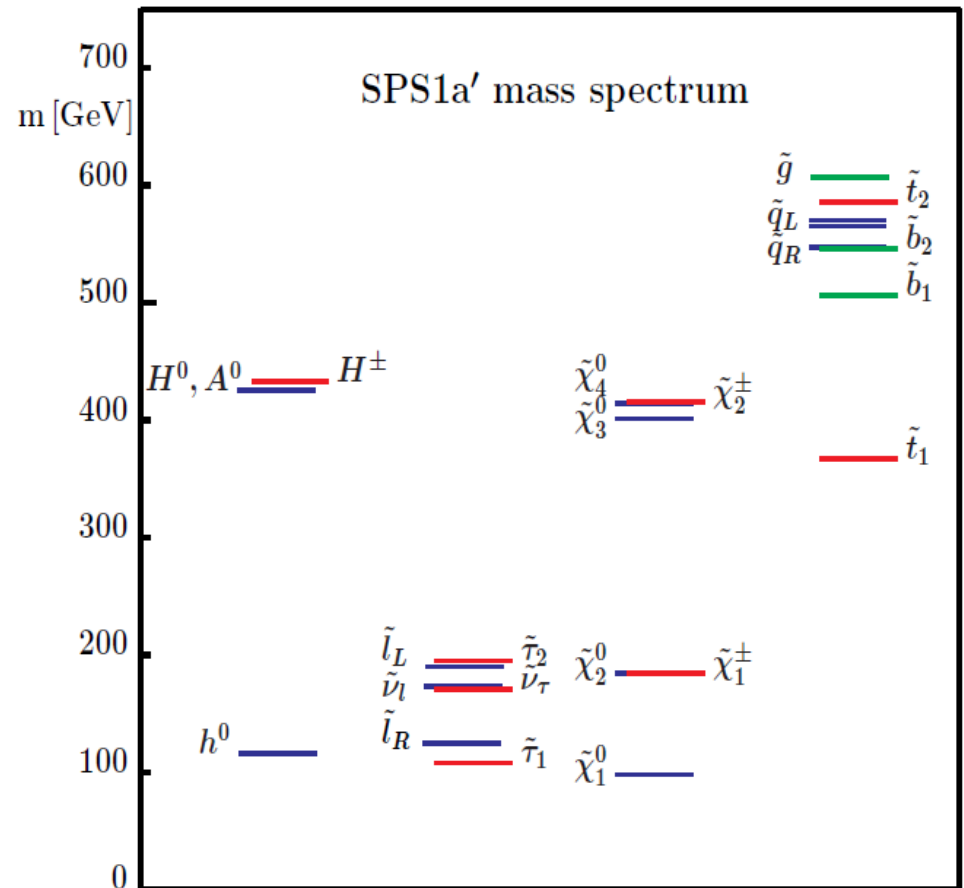
String motivated models



Supersymmetry Parameter Analysis: SPA Convention and Project



Eur.Phys.J.C 46 (2006) (hep-ph/0511344)



The 65% and 95% CL regions favoured
by $b \rightarrow s\gamma$, $(g_\mu - 2)$, WMAP data.

Possible Manifestation

- Collision energy $E >$ production thresholds

⇒ New particles, new resonances

Z' , W' , π_T , ρ_T , KK states, squarks, sleptons,
vector like fermions, excited states, leptoquarks ...

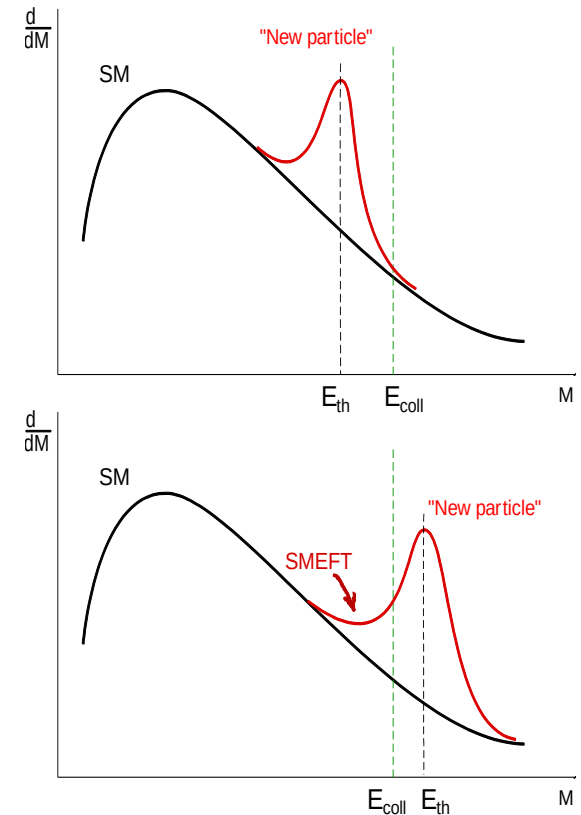
- Collision energy $E <$ production thresholds

⇒ New effective anomalous interactions of SM particles

⇒ New particle contributions via quantum loops

(modification of SM decay widths,
production cross sections, kinematical distributions)

- In all cases couplings to SM particles should be large enough



Below threshold

Precision physics

SM Effective Field Theory (SMEFT)

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{C_i^{(6)}}{\Lambda^2} O_i^{(6)} + \sum_j \frac{C_j^{(8)}}{\Lambda^4} O_j^{(8)} + \dots$$

c_i - dimensionless coefficients

O_i – operators constructed from SM fields preserving
SM gauge invariance, and (optionally) other symmetries

S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 43, 1566 (1979)

W. Buchmuller and D. Wyler, Nucl. Phys. B268, 621 (1986)

Brivio, Trott Phys.Rept. (2019)

Boos Phys.Usp. (2022)

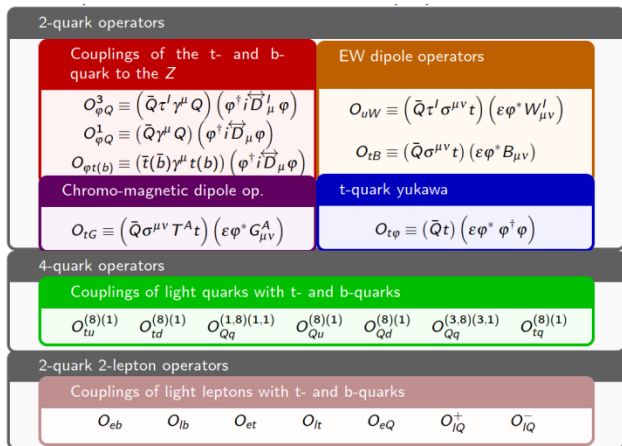
Falkowski EPJ C (2023)

Isidori, Wilsch, Wyler Rev.Mod.Phys. (2024)

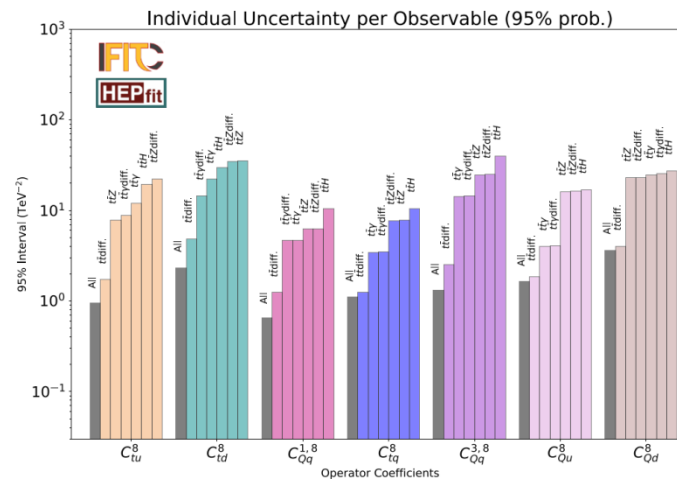
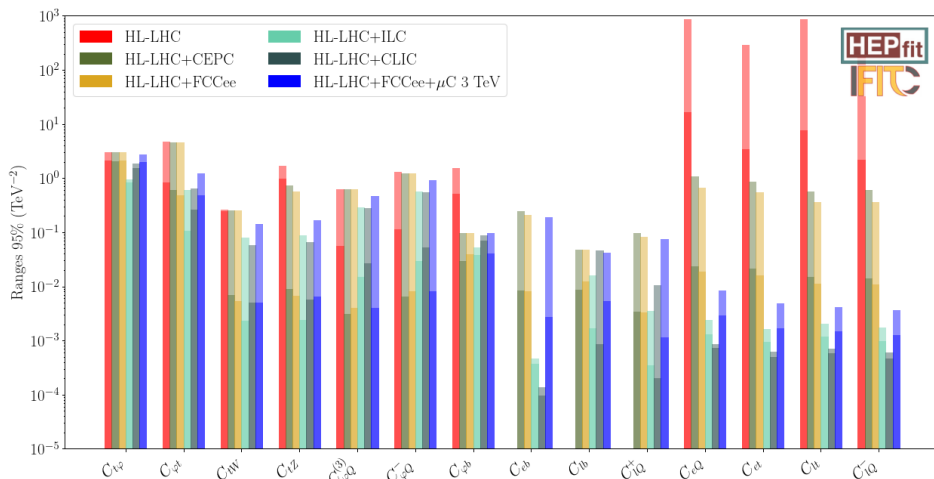
...

The top-quark sector in the global SMEFT fit

Blasa, Duc, Grojean et. al
Contribution to Snowmass 2021, 2206.08326v5



Process	Observable	$\sqrt{s}$	$\int \mathcal{L}$	Experiment
$pp \rightarrow t\bar{t}$	$d\sigma/dm_{t\bar{t}}$ (15+3 bins)	13 TeV	140 fb $^{-1}$	CMS
$pp \rightarrow t\bar{t}$	$dA_C/dm_{t\bar{t}}$ (4+2 bins)	13 TeV	140 fb $^{-1}$	ATLAS
$pp \rightarrow t\bar{t}Z$	$d\sigma/dp_T^Z$ (8 bins)	13 TeV	140 fb $^{-1}$	ATLAS
$pp \rightarrow t\bar{t}\gamma$	$d\sigma/dp_T^\gamma$ (11 bins)	13 TeV	140 fb $^{-1}$	ATLAS
$pp \rightarrow t\bar{t}H$	$d\sigma/dp_T^H$ (6 bins)	13 TeV	140 fb $^{-1}$	ATLAS
$pp \rightarrow tZq$	σ	13 TeV	77.4 fb $^{-1}$	CMS
$pp \rightarrow t\gamma q$	σ	13 TeV	36 fb $^{-1}$	CMS
$pp \rightarrow t\bar{t}W$	σ	13 TeV	36 fb $^{-1}$	CMS
$pp \rightarrow t\bar{b}$ (s-ch)	σ	8 TeV	20 fb $^{-1}$	LHC
$pp \rightarrow tW$	σ	8 TeV	20 fb $^{-1}$	LHC
$pp \rightarrow tq$ (t-ch)	σ	8 TeV	20 fb $^{-1}$	LHC
$t \rightarrow Wb$	F_0, F_L	8 TeV	20 fb $^{-1}$	LHC
$p\bar{p} \rightarrow t\bar{b}$ (s-ch)	σ	1.96 TeV	9.7 fb $^{-1}$	Tevatron
$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$	R_b, A_{FB}^{bb}	~ 91 GeV	202.1 pb $^{-1}$	LEP/SLD



**a single-parameter fit - solid bars;
the global or marginalised bounds –
full bars (shaded region in each bar)**

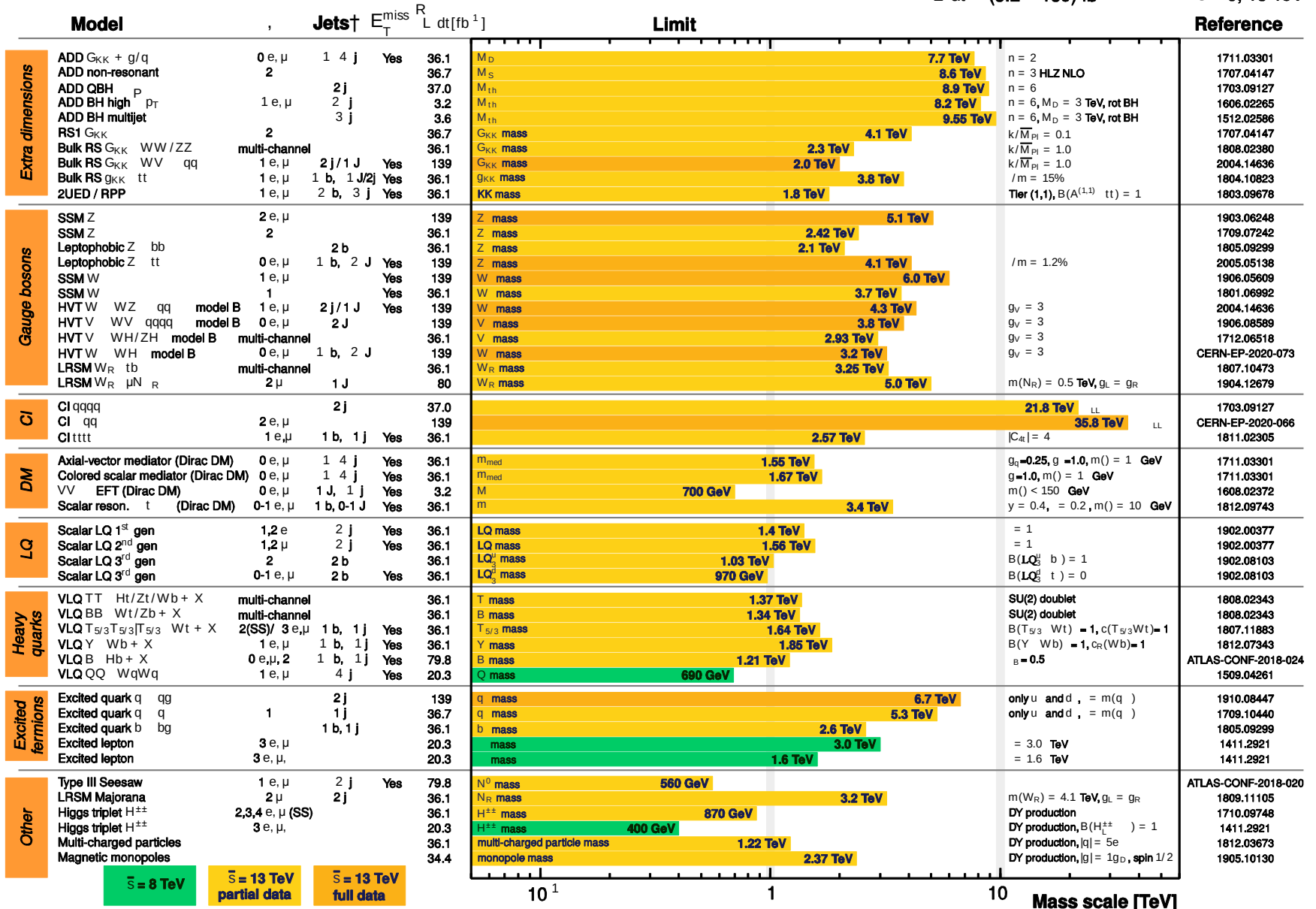
ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: May 2020

$R_{L dt} = (3.2 - 139) \text{ fb}^{-1}$

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$



$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
partial data

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
full data

10⁻¹

1

10

Mass scale [TeV]

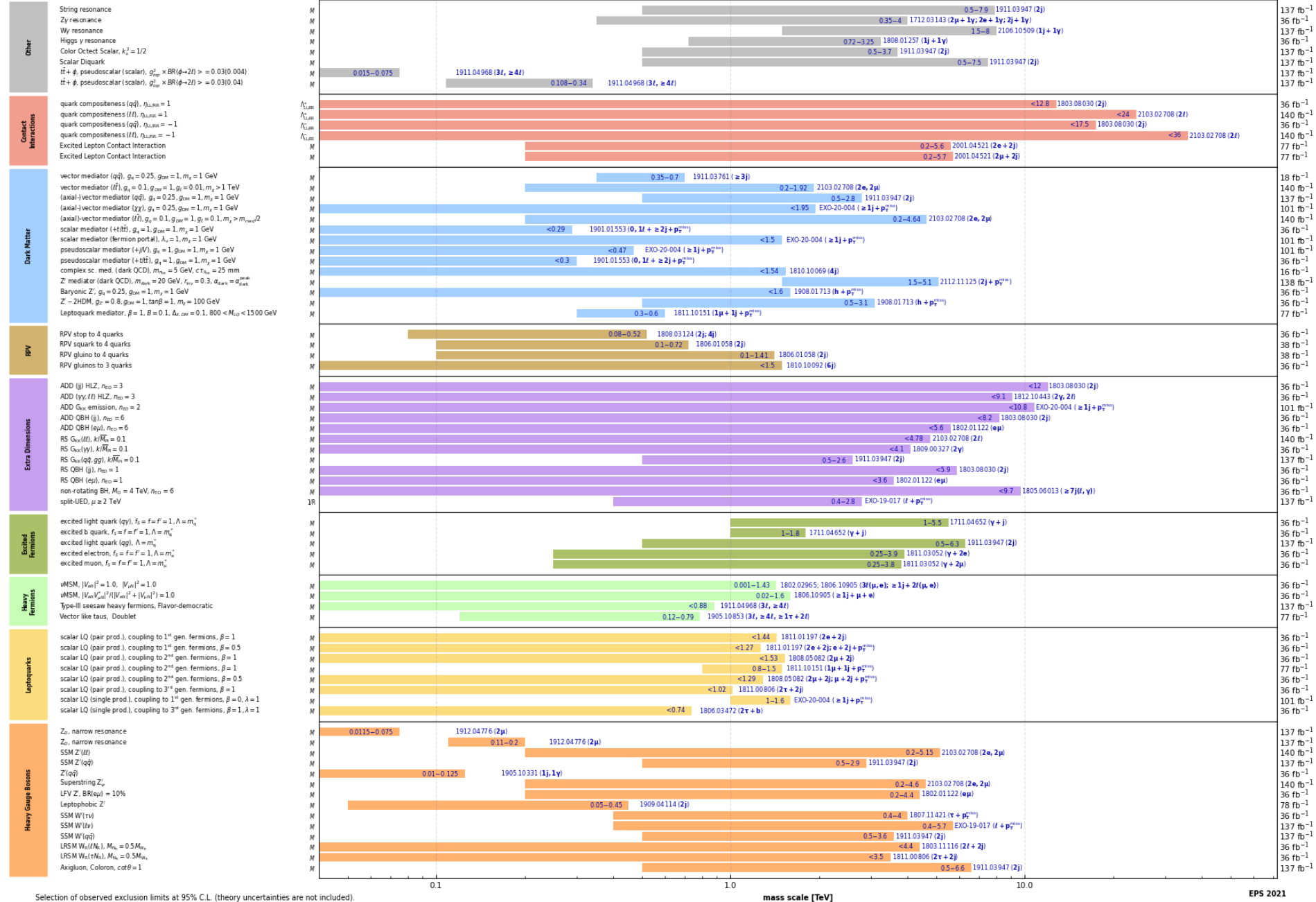
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

Overview of CMS EXO results

16-140 fb⁻¹ (13 TeV)

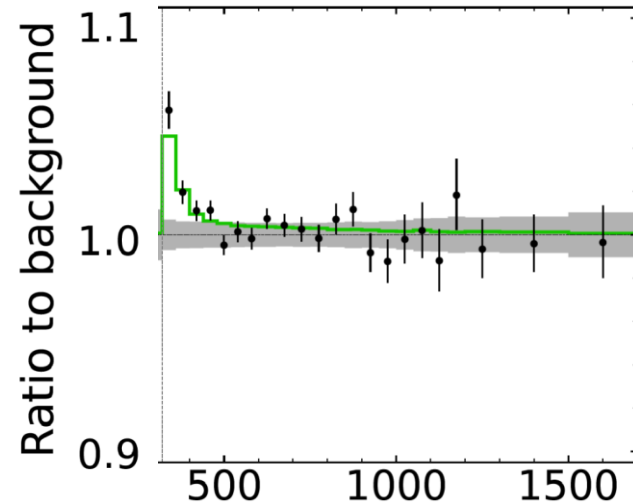
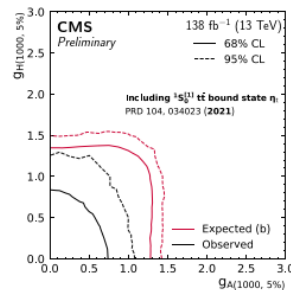
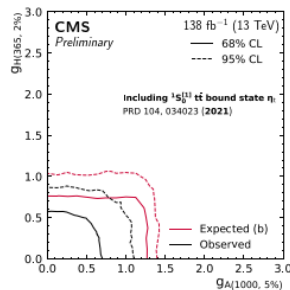
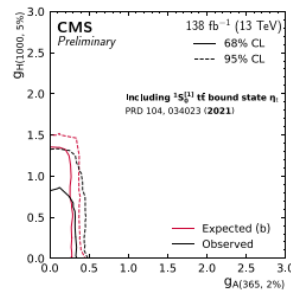
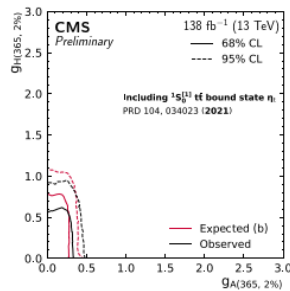
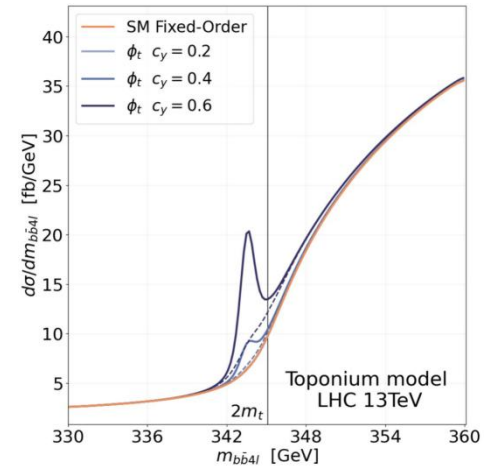
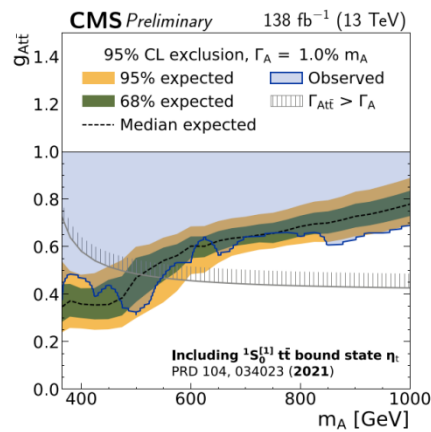
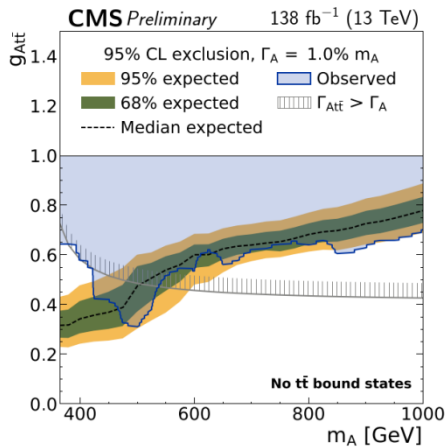
CMS preliminary



Топоний

$t\bar{t}$ bound state

$$\mathcal{L}_{\eta_t} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi_{\eta_t} \partial^\mu \phi_{\eta_t} - \frac{1}{2} m_{\eta_t} \phi_{\eta_t}^2 - \frac{1}{4} g_{gg\eta_t} \phi_{\eta_t} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu} - i g_{t\bar{t}\eta_t} \phi_{\eta_t} \bar{t} \gamma_5 t$$



ATLAS не видит пока.

Способ уменьшить пределы на массы в теориях

Portal models

Portal (mediator)

Vector (Dark Photon, A_μ)

Scalar (Dark Higgs, S)

Fermion (Sterile Neutrino, N)

Pseudo-scalar (Axion, a)

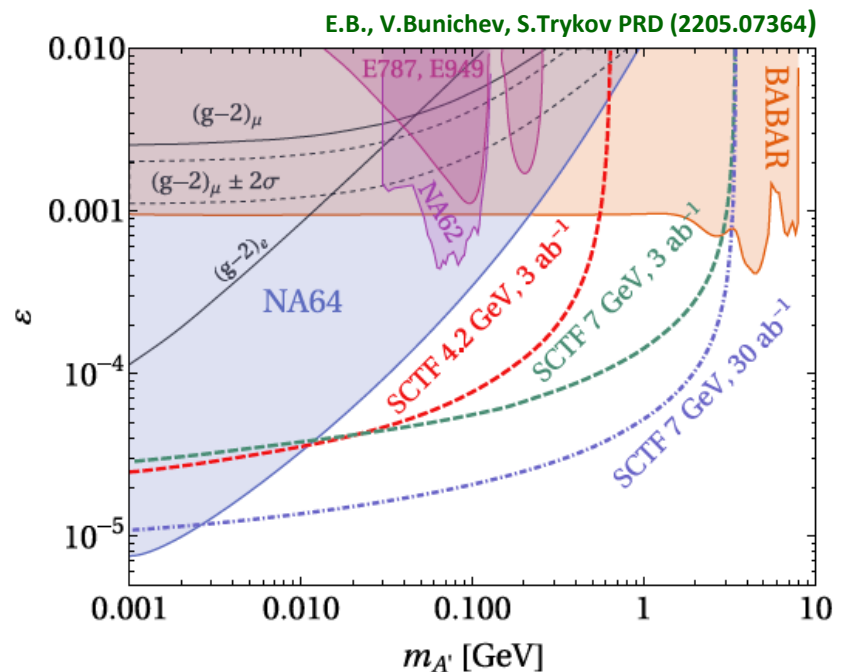
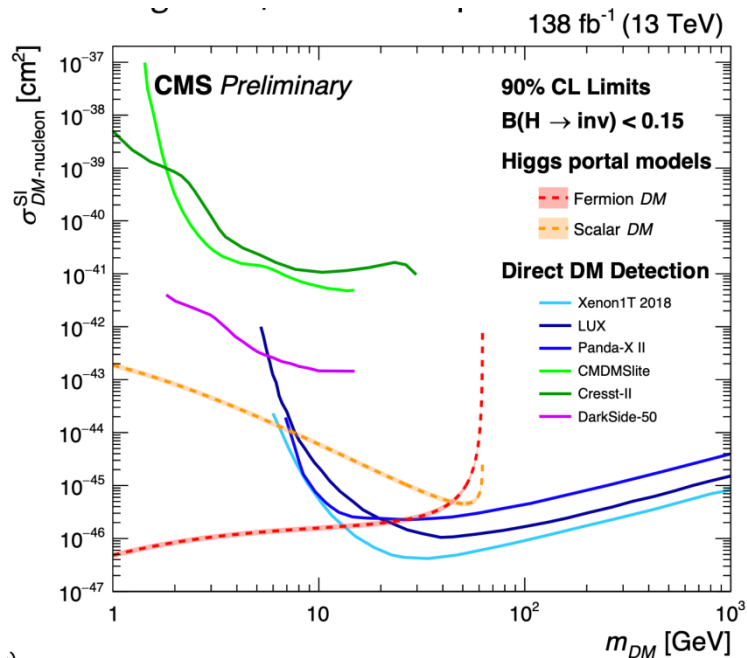
Gauge invariant interactions

$$-\frac{\varepsilon}{2\cos\theta_W}F'_{\mu\nu}B^{\mu\nu}$$

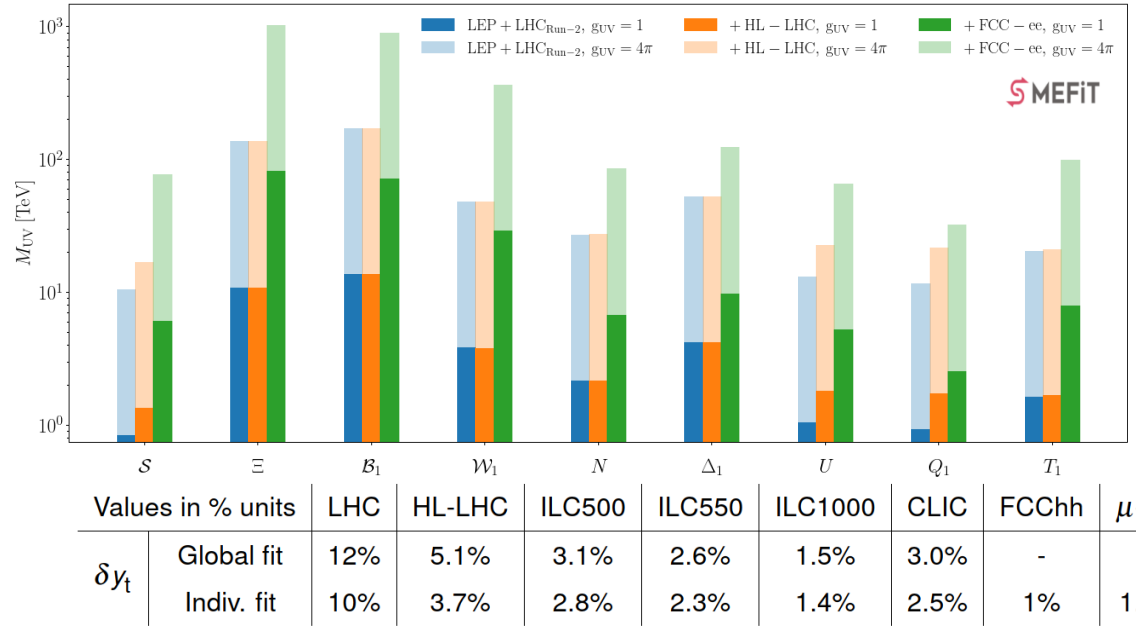
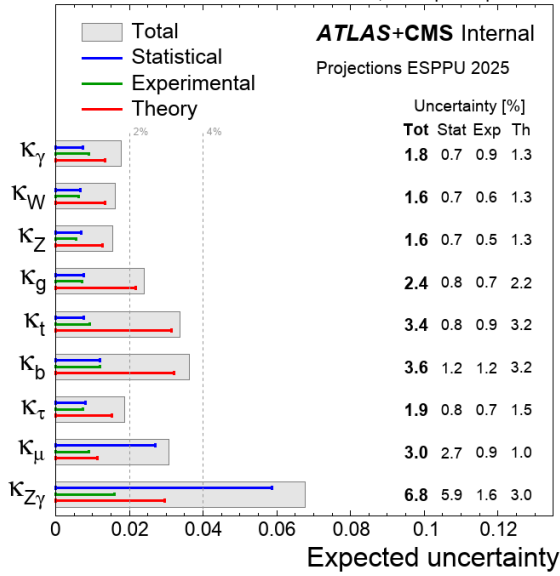
$$(\mu S + \lambda_{HS} S^2) H^\dagger H$$

$$y_N L H N$$

$$\frac{a}{f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}, \frac{a}{f_a} G_{i,\mu\nu} \tilde{G}_i^{\mu\nu}, \frac{\partial_\mu a}{f_a} \bar{\Psi} \gamma^\mu \gamma^5 \Psi$$



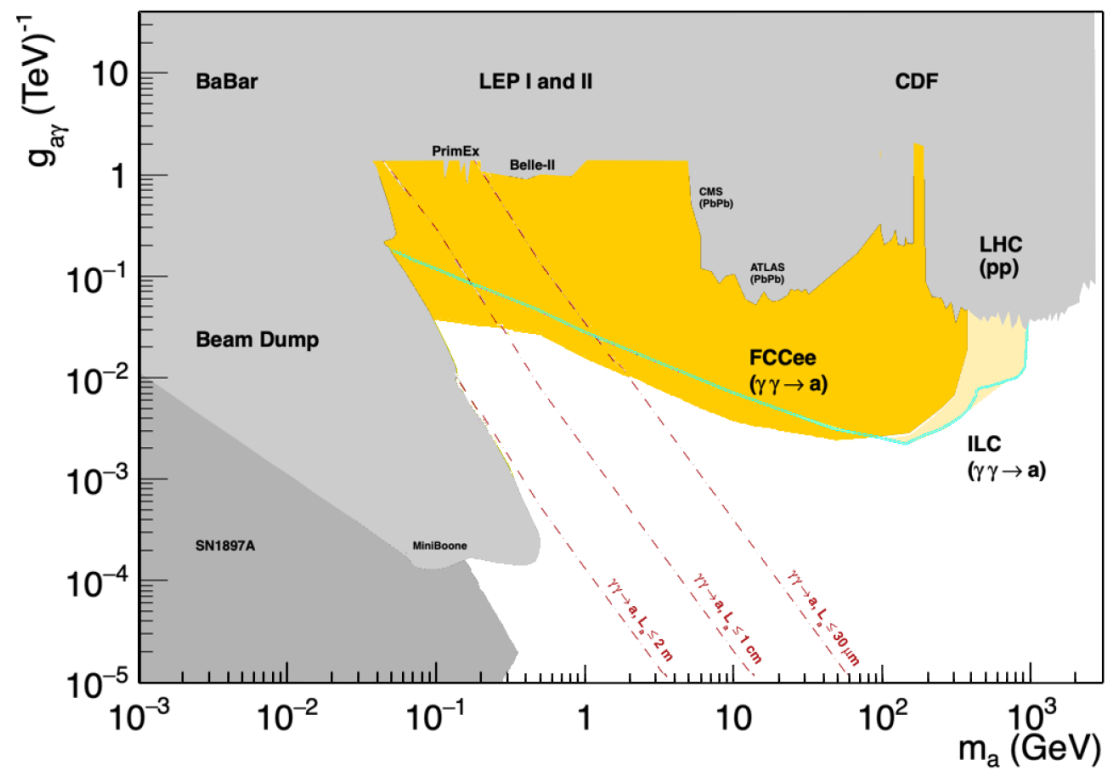
$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}, 3 \text{ ab}^{-1} \text{ per experiment}$



Decay mode relative precision	$B(W \rightarrow e\nu)$	$B(W \rightarrow \mu\nu)$	$B(W \rightarrow \tau\nu)$	$B(W \rightarrow q\bar{q})$
LEP2	1.5%	1.4%	1.8%	0.4%
LHC	1.0%	0.8%	2.1%	0.3%
future e^+e^-	3×10^{-4}	3×10^{-4}	4×10^{-4}	1×10^{-4}

CERN-2025-005

Quantity	current	ILC250	ILC-GigaZ	FCC-ee	CEPC	CLIC380
$\Delta\alpha(m_Z)^{-1} (\times 10^3)$	18*	18*		3.8 (1.2)	18*	
Δm_Z (MeV)	2.1*	0.7 (0.2)	0.2	0.004 (0.1)	0.005 (0.1)	2.1*
$\Delta\Gamma_Z$ (MeV)	2.3*	1.5 (0.2)	0.12	0.004 (0.025)	0.005 (0.025)	2.3*
$\Delta A_e (\times 10^5)$	190*	14 (4.5)	1.5 (8)	0.7 (2)	1.5 (2)	60 (15)
$\Delta A_\mu (\times 10^5)$	1500*	82 (4.5)	3 (8)	2.3 (2.2)	3.0 (1.8)	390 (14)
$\Delta A_\tau (\times 10^5)$	400*	86 (4.5)	3 (8)	0.5 (20)	1.2 (20)	550 (14)
$\Delta A_b (\times 10^5)$	2000*	53 (35)	9 (50)	2.4 (21)	3 (21)	360 (92)
$\Delta A_c (\times 10^5)$	2700*	140 (25)	20 (37)	20 (15)	6 (30)	190 (67)
$\Delta\sigma_{\text{had}}^0$ (pb)	37*			0.035 (4)	0.05 (2)	37*
$\delta R_e (\times 10^3)$	2.4*	0.5 (1.0)	0.2 (0.5)	0.004 (0.3)	0.003 (0.2)	2.5 (1.0)
$\delta R_\mu (\times 10^3)$	1.6*	0.5 (1.0)	0.2 (0.2)	0.003 (0.05)	0.003 (0.1)	2.5 (1.0)
$\delta R_\tau (\times 10^3)$	2.2*	0.6 (1.0)	0.2 (0.4)	0.003 (0.1)	0.003 (0.1)	3.3 (5.0)
$\delta R_b (\times 10^3)$	3.1*	0.4 (1.0)	0.04 (0.7)	0.0014 (< 0.3)	0.005 (0.2)	1.5 (1.0)
$\delta R_c (\times 10^3)$	17*	0.6 (5.0)	0.2 (3.0)	0.015 (1.5)	0.02 (1)	2.4 (5.0)



Заключительные замечания

- СМ модель работает даже лучше, чем ожидалось.
Очень важны вычисления и моделирование с учетом более высоких порядков
- Многие факты говорят о том, что СМ не может быть окончательной теорией
- Предложено множество вариантов расширения СМ (BSM theories and models)
Особый интерес вызывают модели с порталами (медиаторами)
- Очень важную роль играют отрицательные результаты, которые закрывают различные гипотезы, сужают допустимые области параметров новых моделей
- Отрицательные результаты мотивируют поиск новых сценариев, новые идеи
- Интенсивные поиски «новой физики» продолжаются всеми возможными способами на ускорителях, коллайдерах, в наземных и космических экспериментах



“It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong”.

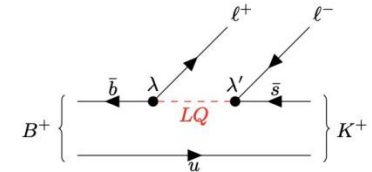
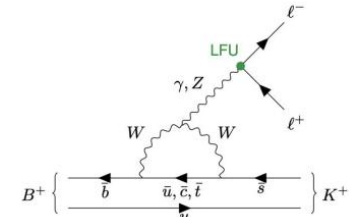
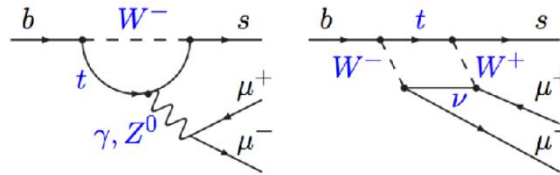
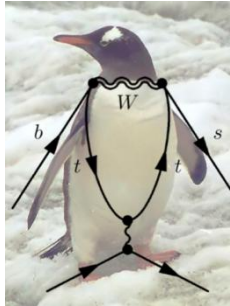
Richard P. Feynman

Спасибо за внимание

Back up slides

B-anomalies

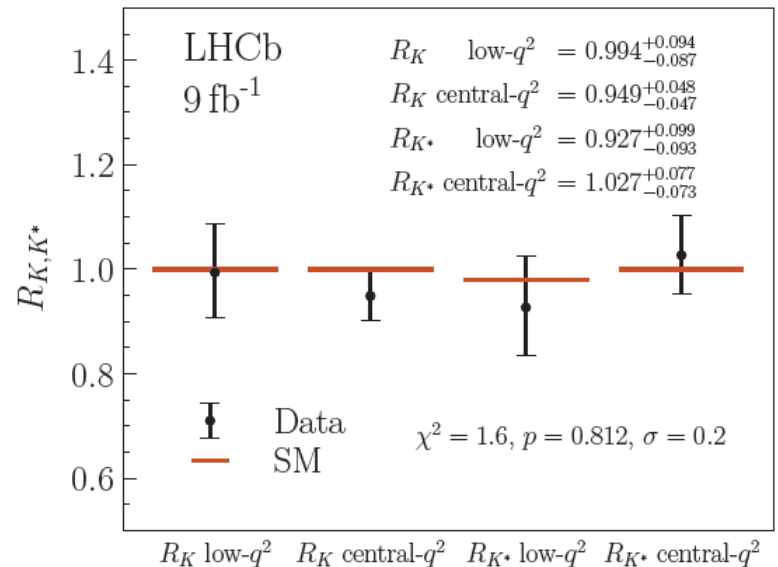
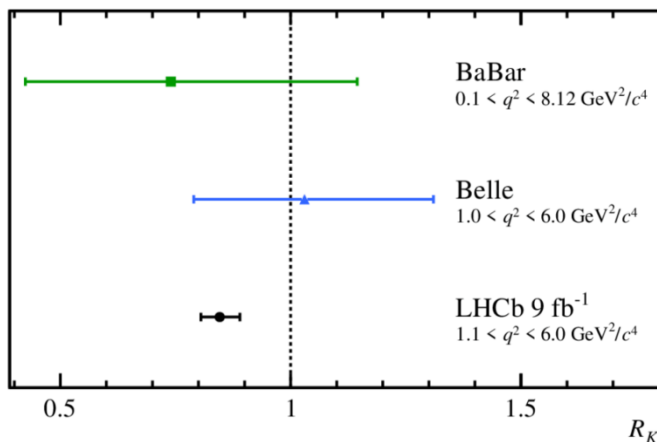
$$b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$$



$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}$$

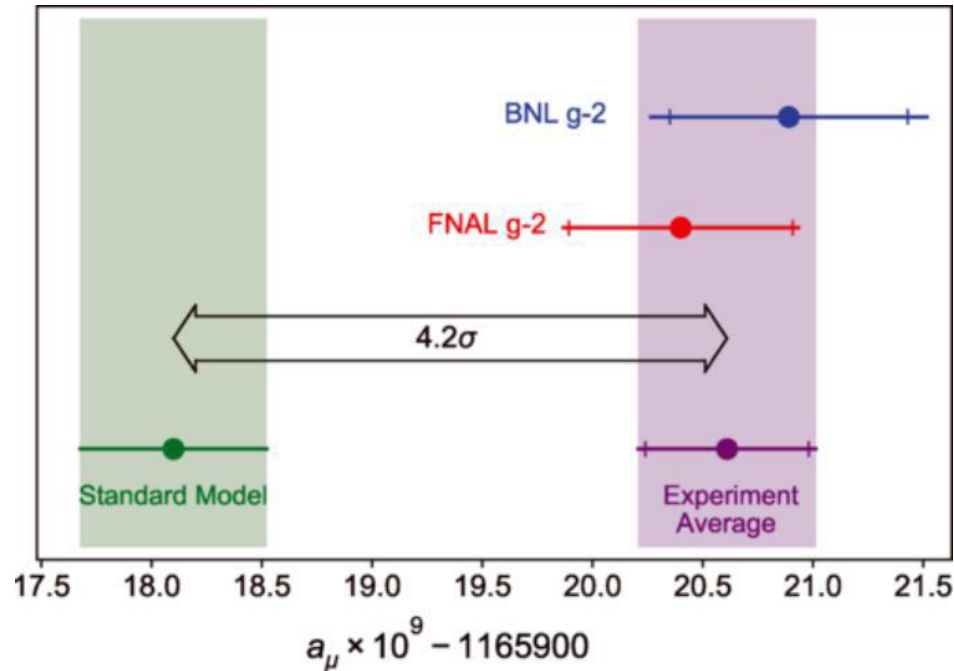
$$R_{K^*} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K^* e^+ e^-)}$$

LHCb 2212.09153



g-2 muon anomaly

E989 data from
Brookhaven National Lab(BNL)

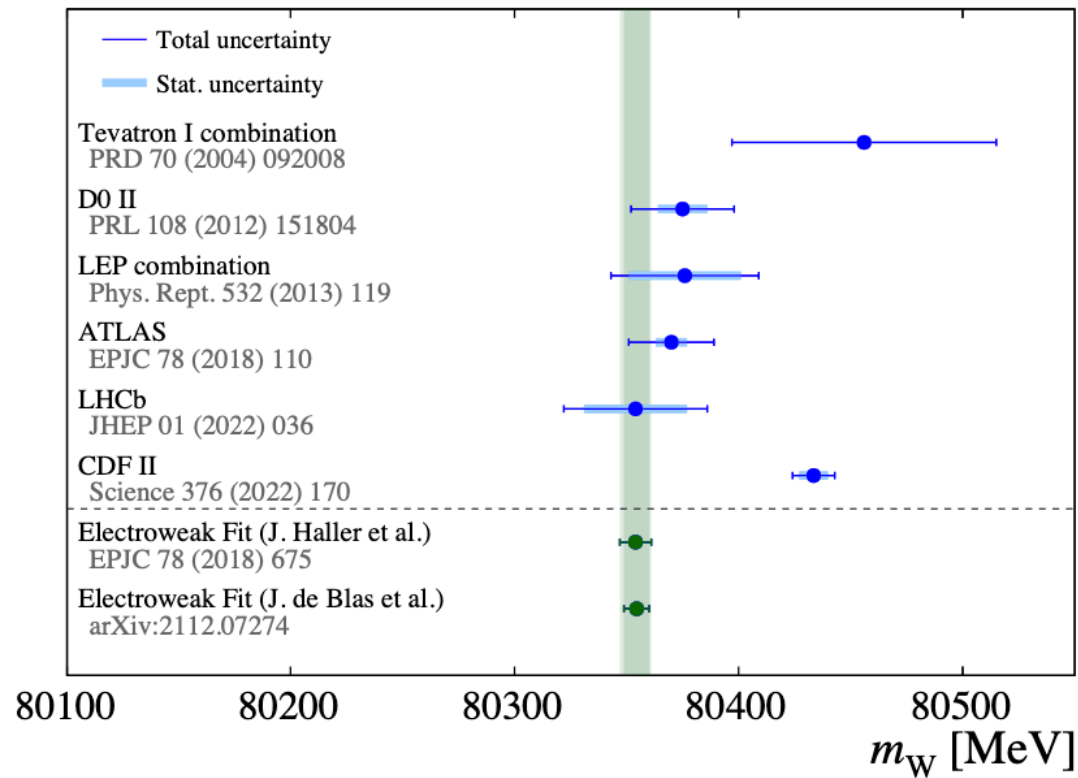


Recent CMD-3 result reduces significantly the tension for (g-2) anomaly
2302.08834 (due to measured shift in hadronic vacuum polarization)

$$\Delta a_\mu \cdot 10^9 \sim 2.9 \pm 0.7 \rightarrow 1.3 \pm 0.7 < 2 \sigma$$

W-mass CDF anomaly (~ 340 pheno refs)

LHCB-FIGURE-2022-003



?

Калибровочная инвариантность

Две основные конструкции для построения
калибровочно-инвариантных лагранжианов

Ковариантные производные

$$D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu(x)$$

$$A_\mu = A_\mu^a t^a$$

$$[t^a, t^b] = if^{abc}t^c$$

и

$a = 1, 2, 3$ for SU(2)

$a = 1, \dots, 8$ for SU(3)

Тензоры напряженности калибровочного поля

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ig[A_\mu, A_\nu]$$