

Физика за пределами Стандартной модели

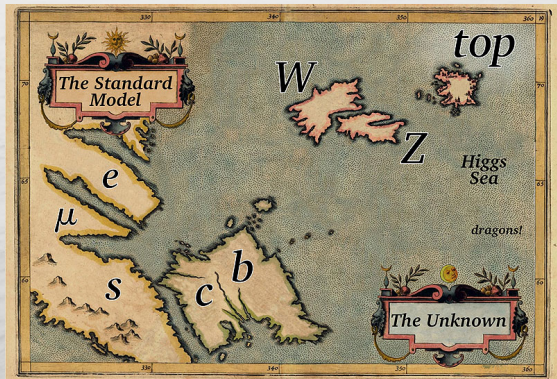
Игорь Иванов

ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Байкальская Школа по ФЭЧ и Астрофизике 2020

17 октября 2020 г.

Новая физика



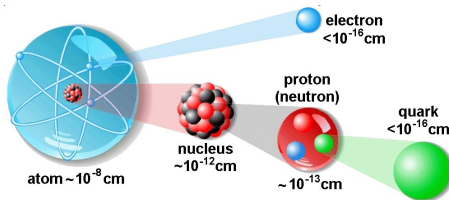
1 Стандартная модель и ее проблемы

2 Новая Физика и ее поиски

- Рекордные энергии
- Прицельные поиски
- Сверхвысокая точность

3 Планы на будущее

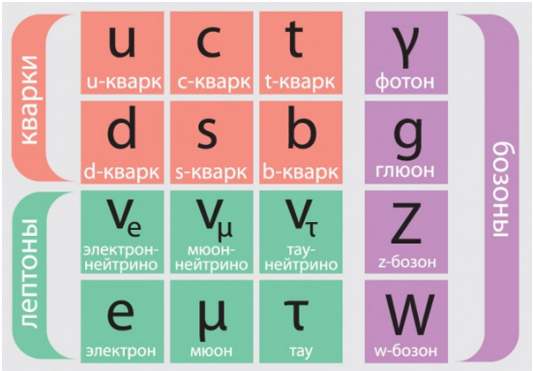
Устройство материи



Фундаментальные взаимодействия:

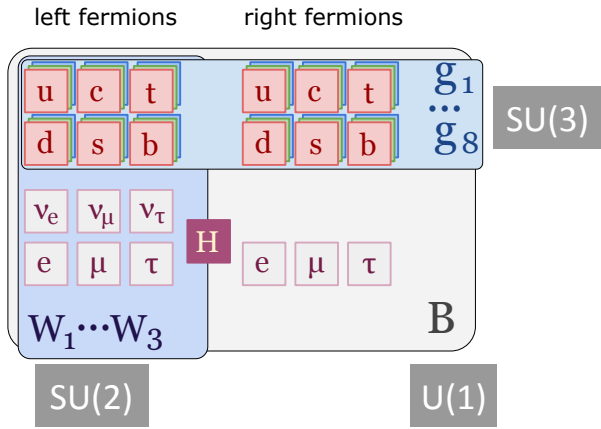
- **Электромагнитное:** частицы переносчики — фотоны γ ;
- **Сильное:** частицы переносчики — глюоны g ;
- **Слабое:** частицы переносчики — тяжелые W и Z -бозоны;
- **Гравитация:** для микромира она слишком слаба, **вычеркиваем**.

Фундаментальные частицы



Калибровочный принцип: взаимодействия не берутся с потолка, а вытекают из требования симметрии!

Фундаментальные взаимодействия в СМ

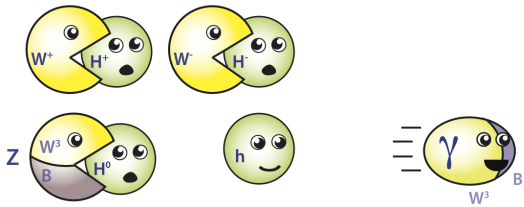


Впрочем, есть проблема: настолько симметричная теория **ВОЗМОЖНА ТОЛЬКО для безмассовых частиц**. Но в нашем мире это не так. **Что делать??**

Хиггсовский механизм

Хиггсовский механизм элегантно решает эту проблему!
Браут, Энглер, Хиггс, Гуральник, Хэген, Киббл, 1964

- Новая субстанция — хиггсовское поле.
- Уравнения-то симметричны. Но хиггсовское поле само организуется так, чтоб частично их нарушить.
- Нарушение симметрии делает частицы массивными и остается частица-отголосок механизма — бозон Хиггса.



Стандартная модель

Лагранжиан СМ (для одного поколения фермионов):

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^i W^{i\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} + |D_\mu\Phi|^2 - V(\Phi) \\ & + \sum_L i\bar{\psi}_L\gamma^\mu D_\mu\psi_L + \sum_R i\bar{\psi}_R\gamma^\mu D_\mu\psi_R \\ & - \left(y_e\bar{l}_L\Phi e_R + y_d\bar{q}_L\Phi d_R + y_u\bar{q}_L\tilde{\Phi}u_R + h.c. \right). \end{aligned}$$

Удлиненные производные

$$D_\mu = \left(\partial_\mu - ig' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \mathbb{I} - ig T^i W_\mu^i,$$

где g и g' — константы калибровочного взаимодействия, T^i — генераторы $SU(2)$ ($T_i = \sigma_i/2$ для дублетов и $T_i = 0$ для синглетов), Y — гиперзаряд.

Хиггсовский механизм

Находим минимум хиггсовского потенциала $V(\Phi)$ и раскладываем хиггсовский дублет:

$$\Phi = e^{i\sigma\xi(x)} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h \end{pmatrix}.$$

W^\pm - и Z -бозоны поглощают три поля ξ и становятся массивными:

$$D_\mu \Phi \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \partial_\mu h \end{pmatrix} - i \frac{gv}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \sqrt{2}W_\mu^+ \\ -Z_\mu/c_W \end{pmatrix}.$$

где $c_W = \cos \theta_W = g/\sqrt{g^2 + g'^2}$.

$$|D_\mu \Phi|^2 \rightarrow \frac{1}{2}(\partial_\mu h)^2 + \frac{g^2 v^2}{8c_W^2} Z_\mu Z^\mu + \frac{g^2 v^2}{4} W_\mu^- W^{+\mu}.$$

Массы W и Z :

$$m_Z = \frac{gv}{2c_W}, \quad m_W = \frac{gv}{2}.$$

Массы фермионов: одно поколение

Массы фермионов и связь с h :

$$\begin{aligned}
 -\mathcal{L}_Y^{(d)} &= y_d(\bar{q}_L\Phi d_R + \bar{d}_R\Phi^\dagger q_L) \rightarrow y_d(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \end{pmatrix} d_R + h.c. \\
 &= \frac{y_d}{\sqrt{2}}(\bar{d}_L d_R + \bar{d}_R d_L)(v+h) = \frac{y_d v}{\sqrt{2}} \bar{d}d + \frac{y_d}{\sqrt{2}} \bar{d}dh \\
 &\equiv m_d \bar{d}d + \frac{m_d}{v} \bar{d}dh.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -\mathcal{L}_Y^{(u)} &= y_u(\bar{q}_L\tilde{\Phi} u_R + \bar{u}_R\tilde{\Phi}^\dagger q_L) \rightarrow y_u(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \\ 0 \end{pmatrix} u_R + h.c. \\
 &\equiv m_u \bar{u}u + \frac{m_u}{v} \bar{u}uh.
 \end{aligned}$$

Два наблюдения: (1) $m_f \propto y_f$, (2) связь $\bar{\psi}_f\psi_f h \propto m_f$.

Массы фермионов: три поколения

Три поколения фермионов $q_{Li}, d_{Ri}, u_{Ri}, i = 1,2,3$:

$$d_i = (d, s, b) \quad u_i = (u, c, t).$$

Юкавское взаимодействие и матрицы связи:

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}_Y &= \bar{q}_{Li} \Gamma_{ij} \Phi d_{Rj} + \bar{q}_{Li} \Delta_{ij} \tilde{\Phi} u_{Rj} + h.c. \\ &\rightarrow \bar{d}_{Li} (M_d)_{ij} d_{Rj} + \bar{u}_{Li} (M_u)_{ij} u_{Rj} + h.c. \end{aligned}$$

где массовые матрицы 3×3 возникают из матриц связи:

$$(M_d)_{ij} = \Gamma_{ij} \frac{v}{\sqrt{2}}, \quad (M_u)_{ij} = \Delta_{ij} \frac{v}{\sqrt{2}}.$$

Вообще говоря, они недиагональны и комплексны, однако их можно диагонализировать.

Массы фермионов: три поколения

Дианогализация M_d и M_u :

$$V_{dL}^\dagger M_d V_{dR} = D_d = \text{diag}(m_d, m_s, m_b),$$


$$V_{uL}^\dagger M_u V_{uR} = D_u = \text{diag}(m_u, m_c, m_t),$$

Но в этом случае матрица заряженных токов становится недиагональной:

$$\bar{u}_{Li} \gamma^\mu W_\mu^+ d_{Li} \rightarrow \bar{u}_{Li} \gamma^\mu W_\mu^+ V_{ij} d_{Lj}, \quad \text{where} \quad V_{ij} = V_{uL}^\dagger V_{dL} \neq \delta_{ij}.$$

Матрица СКМ V (матрица смешивания Кабиббо-Кобаяши-Маскавы) описывает, как заряженные токи смешивают разные поколения.

Стандартная модель

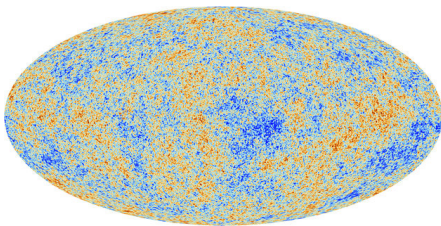
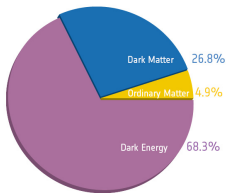
- Стандартная модель — завершена.
 Глэшоу, Салам, Вайнберг (1979)
- Ничего нельзя подправлять, все параметры зафиксированы.
- Можно делать предсказания и проверять их в эксперименте.
- СМ выдержала **тысячи проверок** за последние 50 лет!

кварки	u	c	t	γ	бозоны
	u-кварк	s-кварк	t-кварк	фотон	
d	s	b	g		
d-кварк	s-кварк	b-кварк	глюон		
лептоны	ν _e	ν _μ	ν _τ	Z	
	электрон-нейтрино	мюон-нейтрино	тау-нейтрино	z-бозон	
	e	μ	τ	W	
	электрон	мюон	тау	w-бозон	



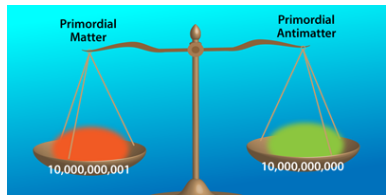
Проблемы СМ: космология

Как объяснить **темную материю**?



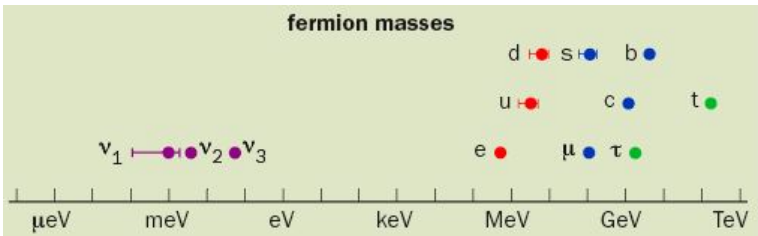
Куда пропало антивещество?

Как возник дисбаланс между частицами и античастицами в ранней вселенной?



Проблемы СМ: фермионы

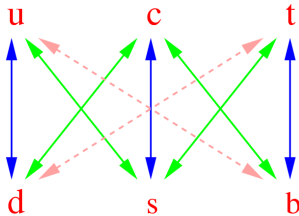
- Откуда взялись **такие массы** у кварков и лептонов?



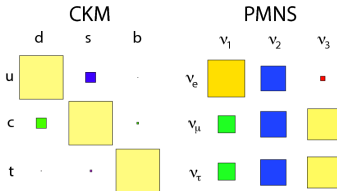
- Почему **нейтрино** такие безумно легкие?

Проблемы СМ: фермионы

- почему слабое взаимодействие **смешивает** разные фермионы?



- почему смешивание **такое разное** для кварков и нейтрино?



Вопросы без ответов

Множество вопросов «почему», на которые СМ неспособна ответить:

- Почему три поколения фермионов?
- Почему три типа взаимодействий? Почему именно таких взаимодействий?
- Почему левые и правые фермионы ведут себя так по-разному?
- Откуда возникло нарушение CP -симметрии? (\approx почему частицы и античастицы ведут себя слегка по-разному?)
- Почему все массы такие маленькие по сравнению с $M_{Pl} \sim 10^{19}$ ГэВ?
- Почему гравитация такая слабая?

Проблемы СМ

Обязана существовать **Новая Физика** — теория устройства микромира, более глубокая чем Стандартная модель!

Теоретики придумали уже ≈ 1000 вариантов Новой физики!
Но какая из них реализуется в нашем мире — мы не знаем!



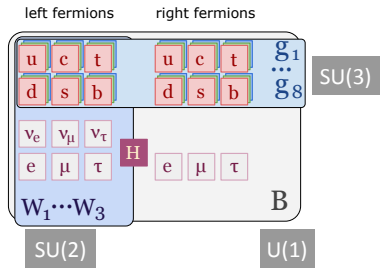
Главная задача современной ФЭЧ — **найти Новую физику.**

A complex visualization of a particle detector, likely a bubble chamber or cloud chamber, showing numerous tracks of ionizing particles. The tracks are represented by fine lines and small rectangular markers, radiating from a central point and extending outwards. The background is a light gray with a subtle grid pattern.

Примеры Новой Физики и ее экспериментальные поиски

Физика за пределами СМ

Что угодно, что отличается от



Новая физика может проявляться как:

- новые частицы или взаимодействия,
- составная природа «фундаментальных» частиц,
- эффекты сильной гравитации на коллайдерах,
- просто отличия от предсказаний СМ в сечениях, распадах, распределениях.

Три стратегии

Три основных пути:

- **Рекордные энергии**: изучаем все основные процессы на **максимальных энергиях**, ищем **любые отклонения** от фона,
- **Прицельные поиски**: ищем новые явления в **конкретных** процессах, предсказанные моделями Новой физики,
- **Сверхвысокая точность**: измеряем СМ процессы с максимальной точностью и ищем мельчайшие **отклонения** от предсказаний СМ.

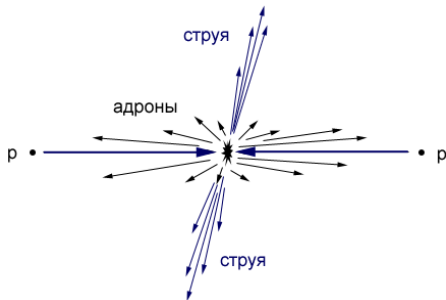
Гипотетические векторные бозоны W' или Z'

Дополнительные калибровочные взаимодействия → новые тяжелые W' - и Z' -бозоны, взаимодействующие с кварками:

$$Z'_\mu \left(g_u^L \bar{u}_L \gamma^\mu u_L + g_u^R \bar{u}_R \gamma^\mu u_R + g_d^L \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + g_d^R \bar{d}_R \gamma^\mu d_R \right),$$

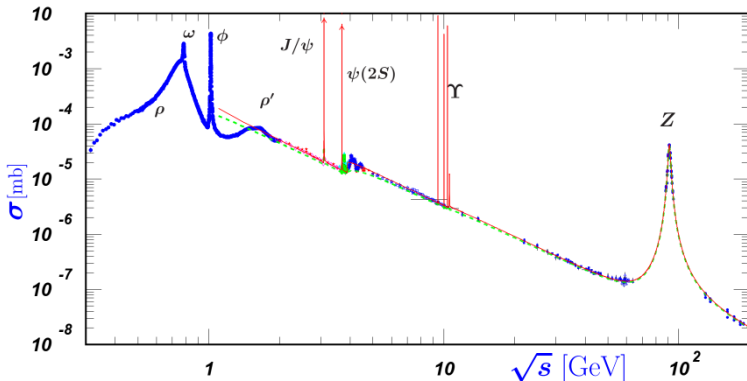
где коэффициенты связи $g_{u,d}^{L,R}$, вообще говоря, независимы.

Процесс $q\bar{q} \rightarrow Z'/W' \rightarrow q\bar{q} \Rightarrow$ **двухструйные события** на LHC



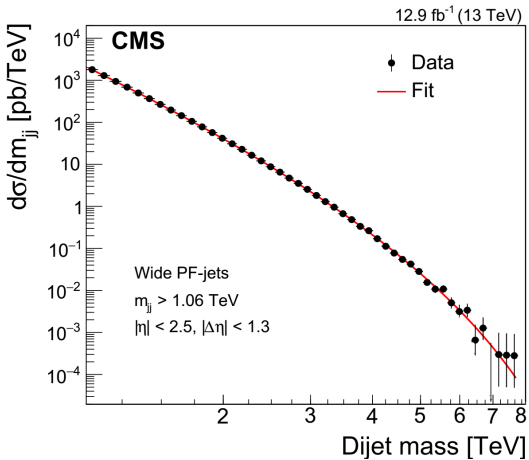
Пример: Z-пик

Пример: Z-пик в сечении $e^+e^- \rightarrow$ адроны:



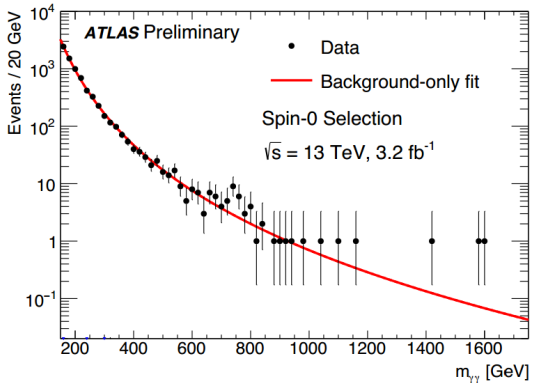
Двухструйные события

CMS, [arXiv:1611.03568](https://arxiv.org/abs/1611.03568): распределение по инвариантной массе двух струй



Двухфотонная сенсация при 750 ГэВ

15 декабря 2015: ATLAS и CMS показали предварительные данные по рождению двух фотонов.

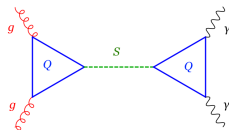


В распределении $M_{\gamma\gamma}$ намечается всплеск при 750 ГэВ!!!

Двухфотонная сенсация при 750 ГэВ

Теоретики ринулись объяснять ее: > 400 статей за полгода.

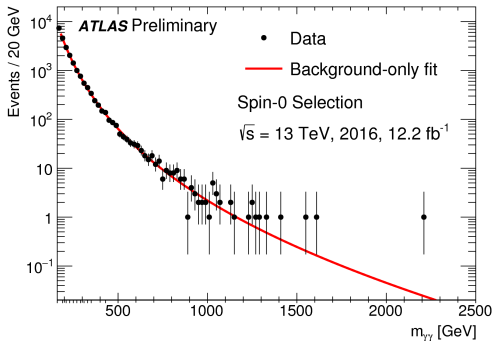
В глазах теоретиков этот всплеск выглядит как



Обескураживающие результаты 2016 года

Август 2016: статистика в 4 раза больше.

Всплеск при 750 ГэВ **исчез!**



Бурные дебаты
среди теоретиков

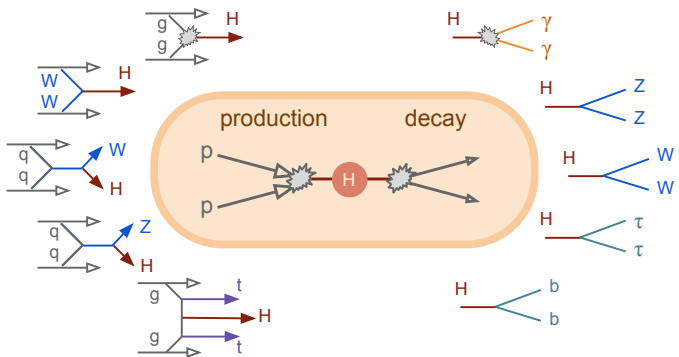




Прицельные поиски

Рождение и распад бозона Хиггса

2012: началась хиггсовская эра.



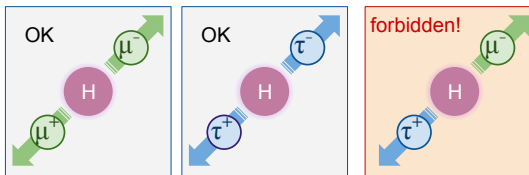
В СМ хиггсовский бозон связывает лишь **одинаковые частицы**.

«Невозможный» распад бозона Хиггса

В Стандартной модели:

$$\bar{\ell}_L i \Gamma_{ij} \Phi l_{Rj} + h.c. \rightarrow (M_\ell)_{ij} \bar{\ell}_L i l_{Rj} \left(1 + \frac{h}{v} \right) + h.c.$$

Диагонализация M_ℓ диагонализует также $\bar{\ell}_i l_j h$ -взаимодействие.



Распад на лептоны разного сорта $H \rightarrow \mu\tau$ запрещен в СМ!

«Невозможный» распад бозона Хиггса

Но он возможен в **многохиггсовских моделях** Новой Физики.

N хиггсовских дублетов Φ_a , $a = 1, \dots, N$

$$\sum_a \Gamma^{(a)}_{ij} (\bar{\ell}_{Li} \times \underbrace{\text{Higgs}_a}_{v_a} \times \ell_{Rj}) + h.c.$$

Массовая матрица лептонов:

$$M_\ell = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_a \Gamma^{(a)} v_a.$$

Однако диагонализация M_ℓ **уже не означает** диагонализацию $\Gamma^{(a)}$ по отдельности \rightarrow распад $H(125) \rightarrow \bar{\mu}\tau$ становится возможен!

Достоверное обнаружение \Rightarrow открытие Новой Физики \Rightarrow



«Невозможный» распад бозона Хиггса

Сеанс Run 1: поиск распада $H \rightarrow \mu\tau$ на ATLAS и CMS.

- CMS [arXiv:1502.07400]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84_{-0.37}^{+0.39})\%$.
- ATLAS [arXiv:1508.03372]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$.
- Общая статистическая значимость: отклонение от нуля на 2.6σ .

Ажиотаж среди теоретиков: намек на **новые бозоны Хиггса?!**

Опубликовано ≈ 200 теоретических статей в 2015–2016 годах.

Сеанс Run 2: все намеки исчезли. Текущее ограничение сверху:

- CMS [1712.07173]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$.
- ATLAS [1907.06131]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.28\%$.

«Невозможный» распад бозона Хиггса

Сеанс Run 1: поиск распада $H \rightarrow \mu\tau$ на ATLAS и CMS.

- CMS [arXiv:1502.07400]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84_{-0.37}^{+0.39})\%$.
- ATLAS [arXiv:1508.03372]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$.
- Общая статистическая значимость: отклонение от нуля на 2.6σ .

Ажиотаж среди теоретиков: намек на **новые бозоны Хиггса?!**

Опубликовано ≈ 200 теоретических статей в 2015–2016 годах.

Сеанс Run 2: все намеки исчезли. Текущее **ограничение сверху**:

- CMS [1712.07173]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$.
- ATLAS [1907.06131]: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.28\%$.

Сверхвысокая точность

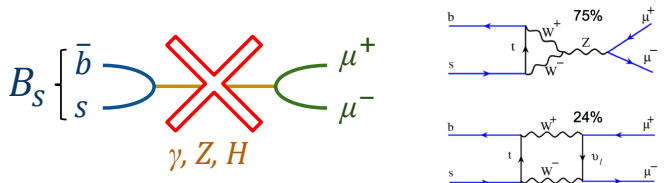


Распады $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Распады $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ исключительно редки в СМ:

$$\text{Br}_{SM}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.66 \pm 0.23) \cdot 10^{-9},$$

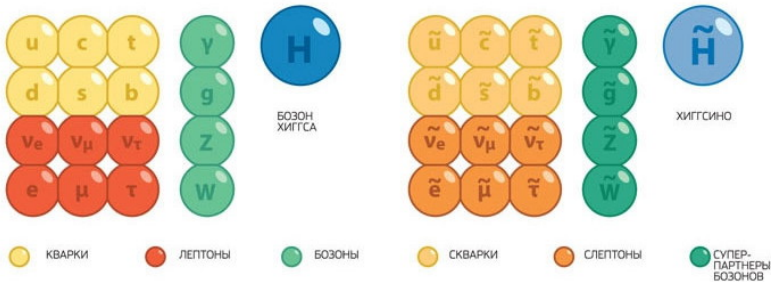
$$\text{Br}_{SM}(B \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.06 \pm 0.09) \cdot 10^{-10}.$$



Причины: (1) петли, (2) малость V_{ts} , (3) киральное подавление (W, Z связаны с левыми μ^- и правыми μ^+ , не подходит для распада скаляра!)

Суперсимметрия

МИНИМАЛЬНАЯ СУПЕРСИММЕТРИЧНАЯ СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

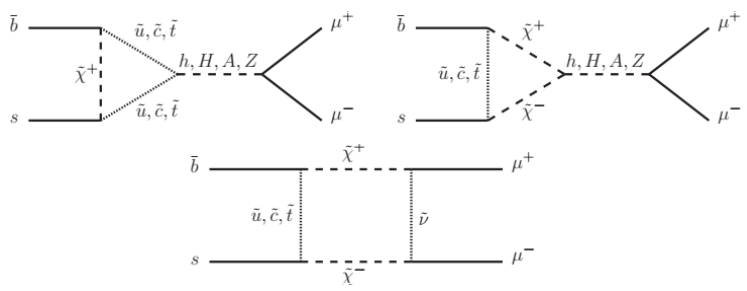


Суперсимметрия — поразительная, но все еще гипотетическая возможность устройства нашего мира.

Вариантов суперсимметричных теорий — огромное множество

→ **нет конкретных предсказаний.**

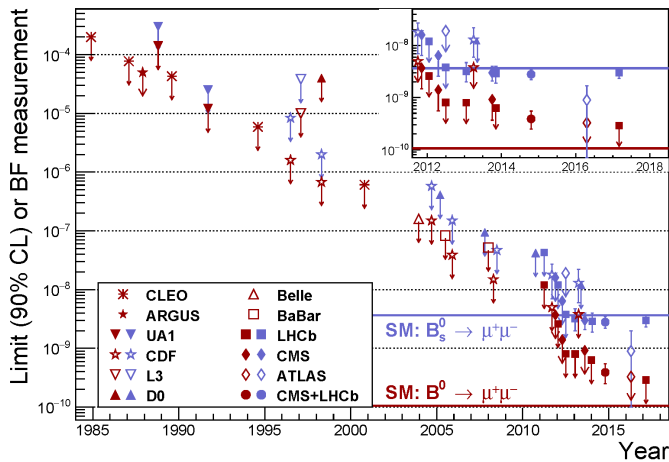
Суперсимметрия



Многочисленные частицы-суперпартнеры влияют на распад $B_s \rightarrow \mu\mu$.

Нет кирального подавления \rightarrow суперсимметричный вклад может быть сильнее, чем СМ!

Распады $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$



Драма 2011 года: сенсация от CDF $Br(B_s \rightarrow \mu\mu) = (18 \pm 10) \cdot 10^{-9}$; почти сразу опровергнута CMS и LHCb.

Распады $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Путь к открытию:

- 2012: первые намеки от LHCb,
- 2013: указание на существование от LHCb+CMS,
- 2014: полноценное открытие LHCb+CMS.

LHCb [[arXiv:1703.05747](https://arxiv.org/abs/1703.05747)]:

$$\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0 \pm 0.6^{+0.3}_{-0.2}) \cdot 10^{-9},$$

$$\text{Br}(B \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.4 \cdot 10^{-10}.$$

Согласуются с ожиданиями СМ.



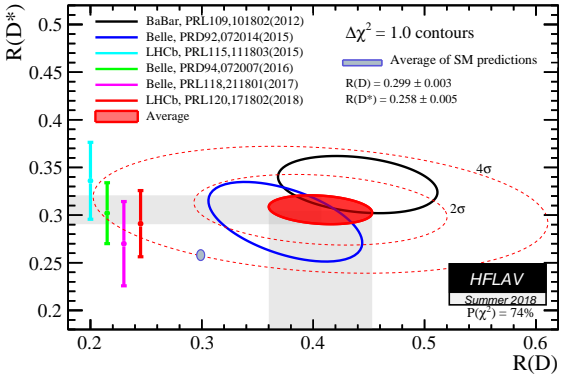
Полулептонные распады B -мезонов

Неожиданное **нарушение лептонной универсальности** в распадах B -мезонов:

$$R_{D^{(*)}} = Br(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau \bar{\nu}) / Br(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \mu \bar{\nu}).$$

LHCb+BaBar+Belle в сравнении со СМ:

общее отклонение (R_D, R_{D^*}) достигает $\sim 4\sigma$!



Полулептонные распады B -мезонов

Несколько подозрительных отклонений в редких распадах $b \rightarrow sll$:

- LHCb (2015): [1512.04442]: $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$, расхождение на уровне 3.4σ .
- LHCb (2015): [1506.08777]: $B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$, расхождение на уровне 3.5σ .
- LHCb (2014): [1406.6482]: еще одно нарушение лептонной универсальности $Br(B \rightarrow K\mu\mu)/Br(B \rightarrow Kee)$: отклонение на 2.6σ ,

Все отклонения — **в одинаковом направлении!**

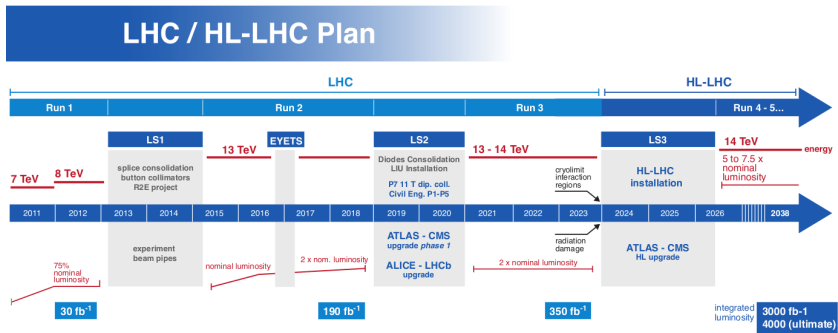
Самая большая надежда на открытие Новой Физики.

Но!! большинство результатов — **все еще на статистике Run 1** → с нетерпением ждем результаты LHC Run 2 и детектора Belle II!



Планы на будущее

Расписание LHC



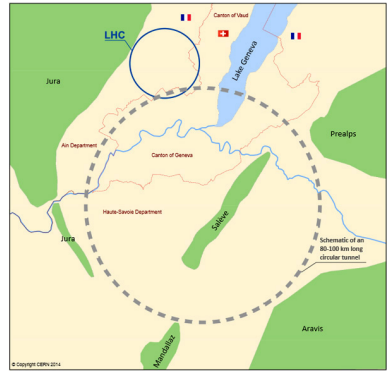
credit: HiLumi, HL-LHC Project

- Одобренная программа LHC + HL-LHC: до 2038 года.
- Пока накоплено **всего 5%** от полной статистики!
- Пока громких открытий нет, но все может круто измениться на **HL-LHC!**

Жизнь после LHC

Возможный коллайдер после LHC: Future Circular Collider

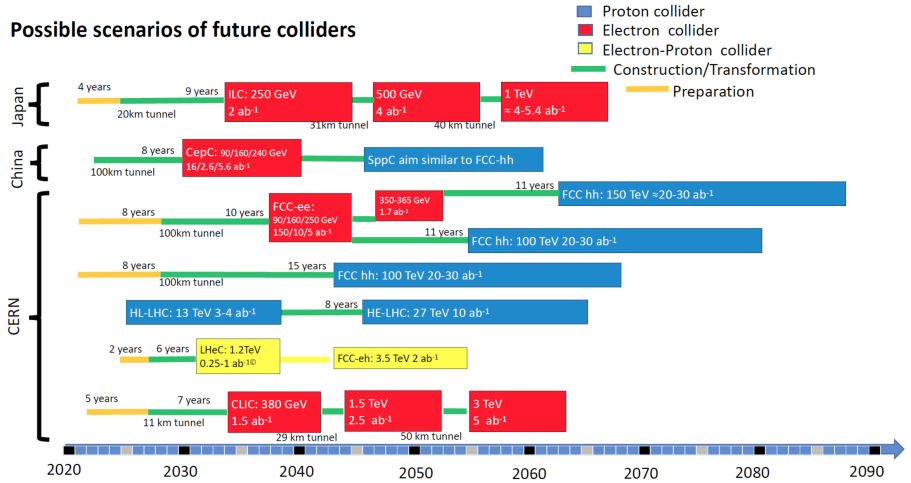
- окружность: 98 км
- энергия столкновений: 100 TeV ($7 \times E_{LHC}$),
- инт. светимость: 20–30 ab^{-1} ($10 \times L_{LHC}$),
- B в диполях: 16 Т ($2 \times B_{LHC}$),
- потери на синхротронное излучение: мегаватты ($1000 \times P_{LHC}$),
- технологии: конец 2030-х годов.



Подробная информация: FCC CDR, <https://fcc-cdr.web.cern.ch>

Жизнь после LHC

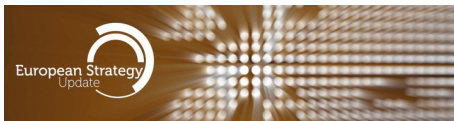
Possible scenarios of future colliders



credit: S. Bethke, talk at the ESPP Symposium, Granada, 2019

EPPS Update 2018-2020

European Particle Physics Strategy Update (2018–2020): обсуждение того, куда двигаться ФЭЧ в ближайшие десятилетия.



Сводка всех предложений: **Physics Briefing Book, arXiv:1910.11775**

Одобрена Советом ЦЕРНа **19 июня 2020 года**

Главные приоритеты:

- Доскональное изучение свойств **хиггсовского бозона** → строительство **хиггсовской фабрики** (e^+e^- коллайдера на 250 ГэВ)
- Развитие новых **ускорительных технологий** (магниты на 16 Т, кильватерное ускорение, и т.д.).
- Строительство **нового адронного коллайдера** на 100 ТэВ.



Путешествие продолжается!