

Введение в физику частиц — 3

Научная программа ЛНС

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Школа ОИЯИ-ЦЕРН для учителей физики

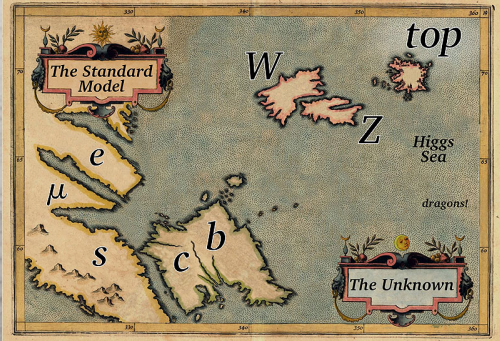
4-11 ноября 2018 г.



INVESTIGADOR
FCT



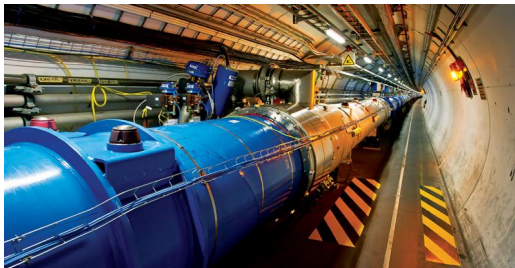
Новая физика



Стандартная модель

В поисках Новой Физики

Наш флагман: **Большой адронный коллайдер** (LHC), самый мощный «микроскоп», когда-либо построенный человеком.



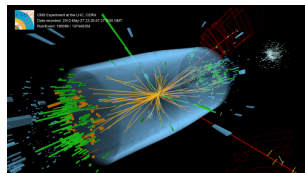
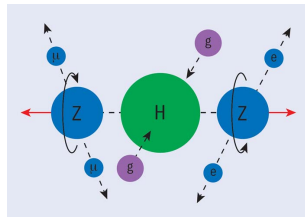
- 1 Открытие бозона Хиггса
- 2 Слепые поиски
- 3 Прицельные поиски
- 4 Сверхвысокая точность
- 5 Планы на будущее

Открытие бозона Хиггса

A visualization of a particle detector, likely the ATLAS or CMS detector at CERN. It shows a complex structure of concentric cylindrical layers and a central region where particle tracks are visible. The tracks are represented by thin white lines radiating from a central point, with some thicker lines indicating specific paths. The overall appearance is that of a large, intricate scientific instrument.

Открытие бозона Хиггса

- Хиггсовский бозон — **частица-отголосок хиггсовского механизма**.
- Очень нестабилен и сразу распадается на фотоны, электроны, мюоны, адроны...
- По следам распада детектор восстанавливает «картину происшествия».
- Накапливают статистику → строят распределения → сверяются с теоретическими предсказаниями.



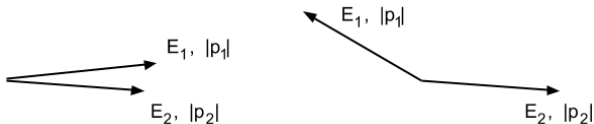
Инвариантная масса

Масса одной частицы неизменна: $mc^2 = \sqrt{E^2 - (pc)^2}$

Для пары частиц с энергиями E_1 и E_2 и импульсами \vec{p}_1 и \vec{p}_2 можно ввести аналогичную величину:

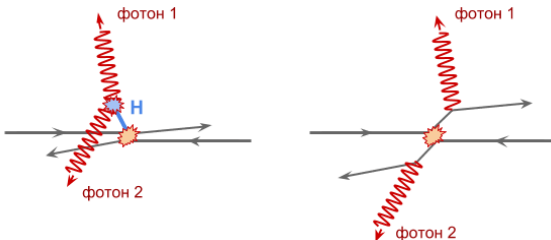
$$M_{12}c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 c^2}.$$

Инвариантная масса пары частиц показывает, насколько энергично они разлетаются.



Инвариантная масса

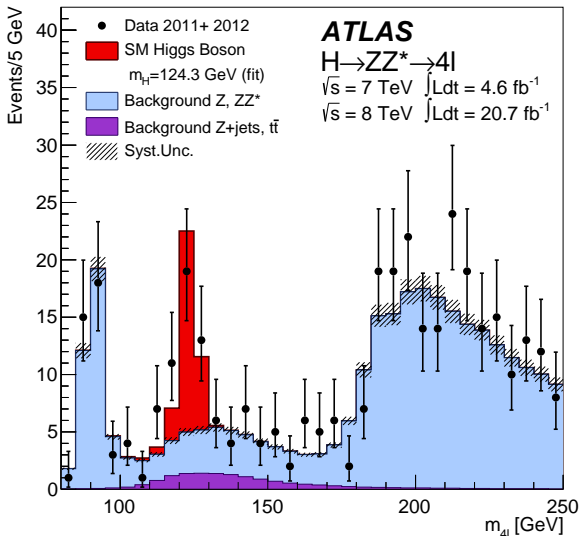
Инвариантная масса как «метка» происхождения частиц.



Два фотона могут родиться в результате распада бозона Хиггса (сигнал), а могут и независимо (фон).

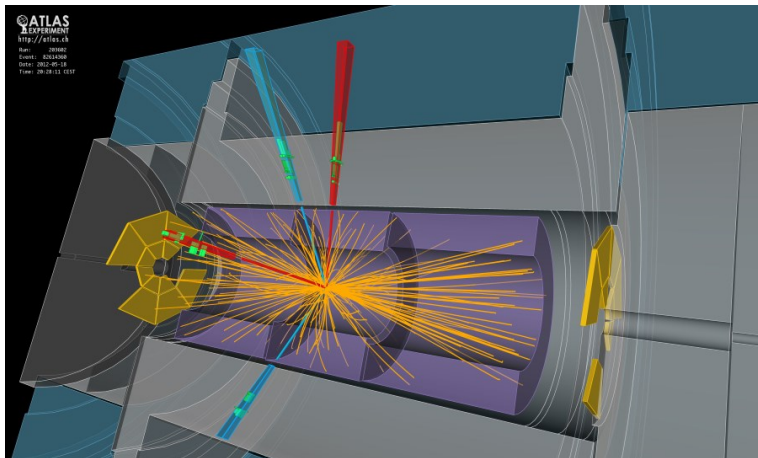
В каждом конкретном событии отличить сигнал от фона трудно. Но если накопить большую статистику и построить распределение по инвариантной массе, то **виден хиггсовский сигнал**.

Открытие бозона Хиггса

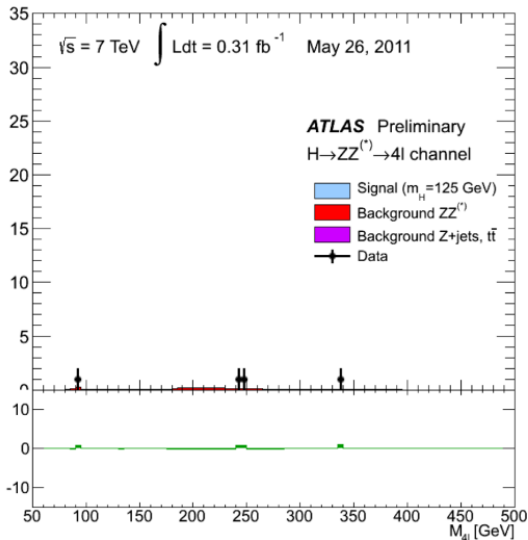


Открытие бозона Хиггса

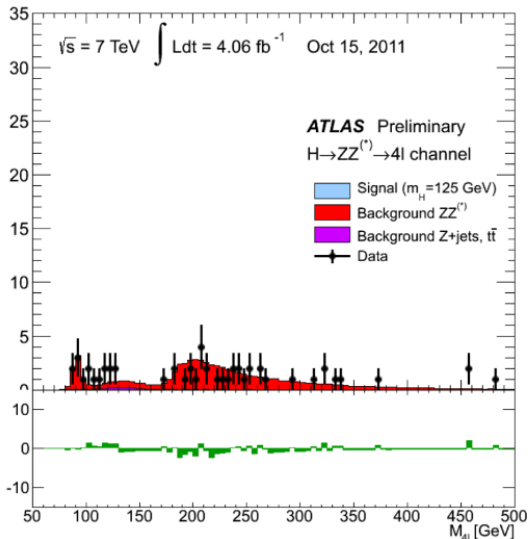
Кандидат в событие $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e^+2e^-$



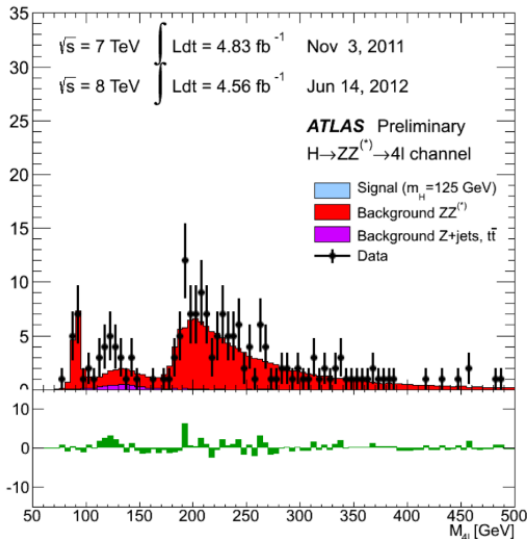
Открытие бозона Хиггса



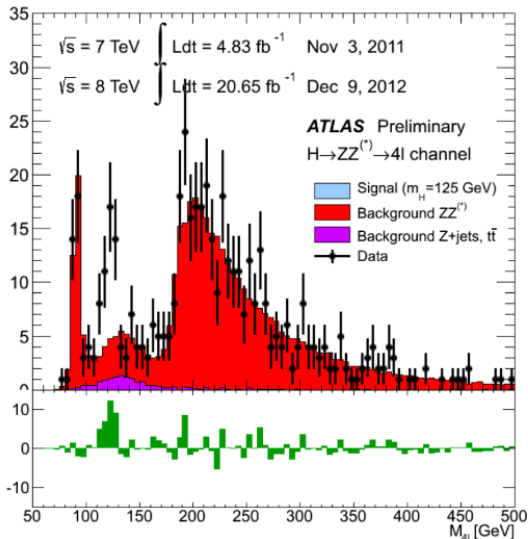
Открытие бозона Хиггса



Открытие бозона Хиггса



Открытие бозона Хиггса



Открытие бозона Хиггса

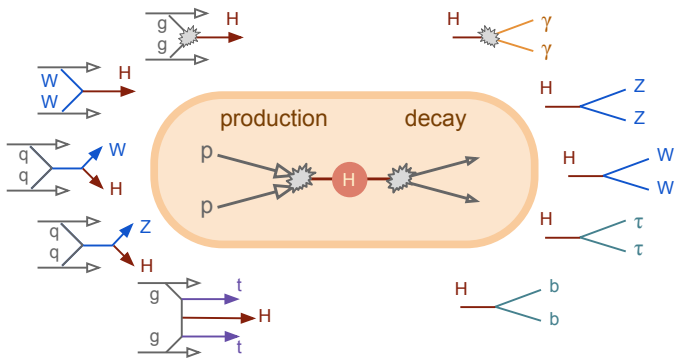
4 июля 2012 г.: ATLAS+CMS объявили о **полноценном открытии!**



Это «**третий тип частиц**»: не частицы материи, не частицы-переносчики сил, а нечто **фундаментально новое**.

Рождение и распад бозона Хиггса

2012: началась хиггсовская эра.



Как ищут Новую Физику

Три основных пути:

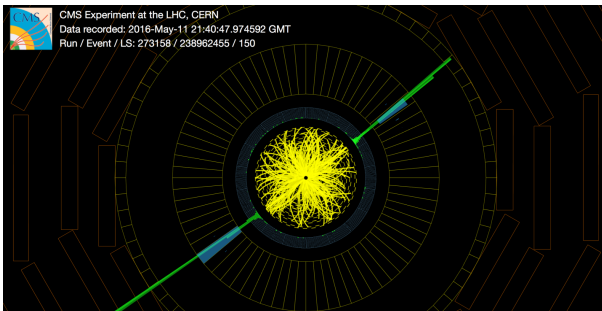
- **Слепые поиски**: изучаем все основные процессы на **максимальных энергиях**, ищем **любые отклонения** от фона,
- **Прицельные поиски**: ищем новые явления в **конкретных** процессах, предсказанные моделями Новой физики,
- **Сверхвысокая точность**: измеряем СМ процессы с максимальной точностью и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

Слепые поиски



Столкновения при высоких энергиях

Типичный вид события:

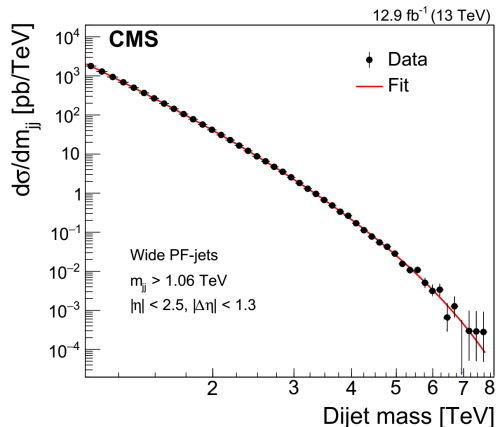
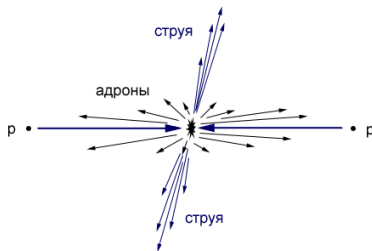


Одиночное событие еще ни о чем не рассказывает. Необходимо:

- (1) набрать статистику и изучать **распределения**,
- (2) сравнить результаты с теорией или моделью.

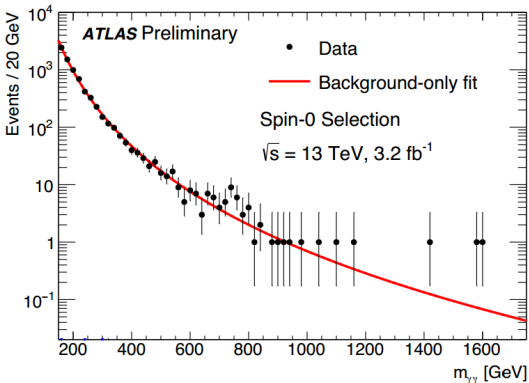
Двухструйные события

Пример от CMS (2016): рождение двух адронных струй, [распределение по инвариантной массе](#)



Двухфотонная сенсация при 750 ГэВ

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

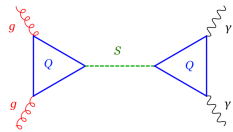


В распределении $M_{\gamma\gamma}$ намечается всплеск при 750 ГэВ!!!

Двухфотонная сенсация при 750 ГэВ

Теоретики ринулись объяснять ее: > 400 статей за полгода.

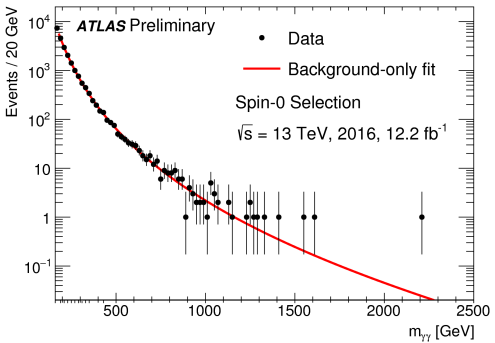
В глазах теоретиков этот всплеск выглядит как



Обескураживающие результаты 2016 года

Август 2016: статистика в 4 раза больше.

Всплеск при 750 ГэВ **исчез!**



Бурные дебаты
среди теоретиков

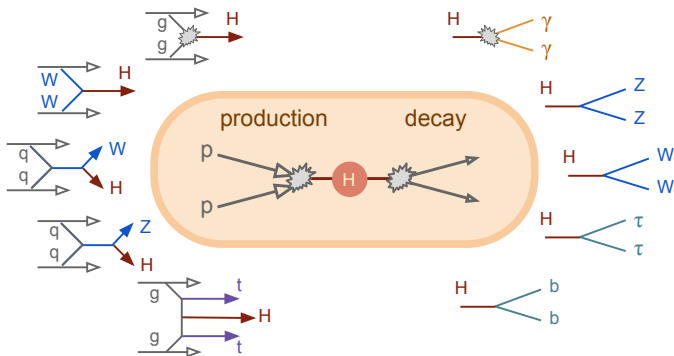


Прицельные поиски



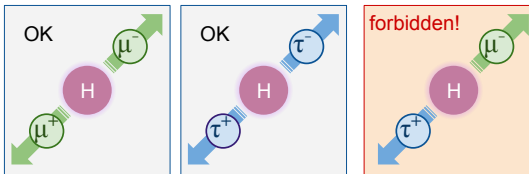
Рождение и распад бозона Хиггса

2012: началась хиггсовская эра.



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

«Невозможный» распад бозона Хиггса



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

Но он возможен в моделях Новой Физики с **несколькими бозонами Хиггса** → конкретное предсказание целого класса моделей.

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: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84_{-0.37}^{+0.39})\%$.
- ATLAS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$.
- 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**: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$.

«Невозможный» распад бозона Хиггса

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

- CMS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84_{-0.37}^{+0.39})\%$.
- ATLAS: $Br(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$.
- 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**: $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$.

Сверхвысокая точность

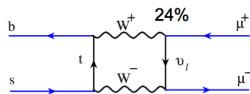
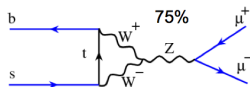
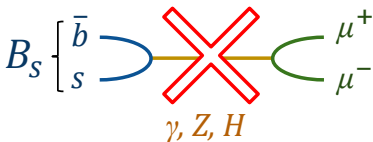


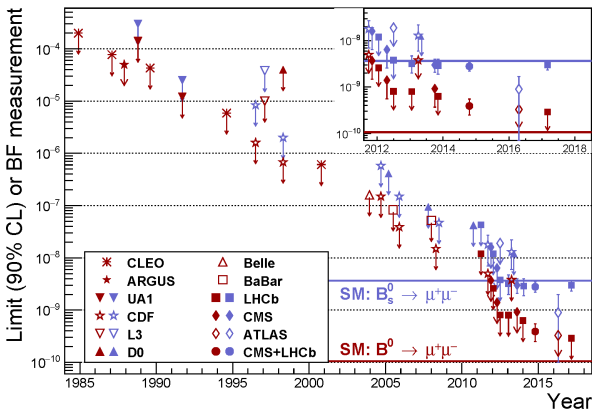
Распады $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$

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

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

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



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

Драма 2011 года: сенсация от CDF $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu\mu) = (18 \pm 10) \cdot 10^{-9}$; 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.

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

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

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

Оба значения согласуются с ожиданиями СМ.



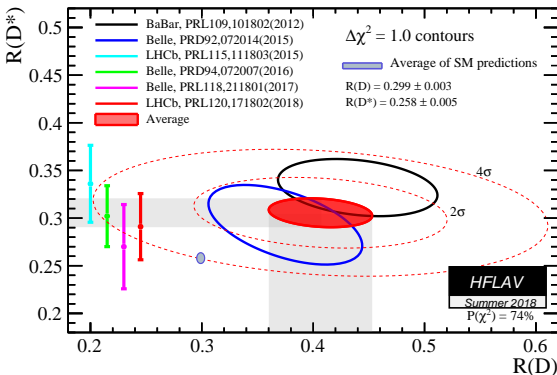
Полулептонные распады B -мезонов

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 подозрительный отклонений в редких распадах $b \rightarrow sll$:

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

Все отклонения — **в одинаковом направлении!**

Самая большая надежда на открытие Новой Физики.

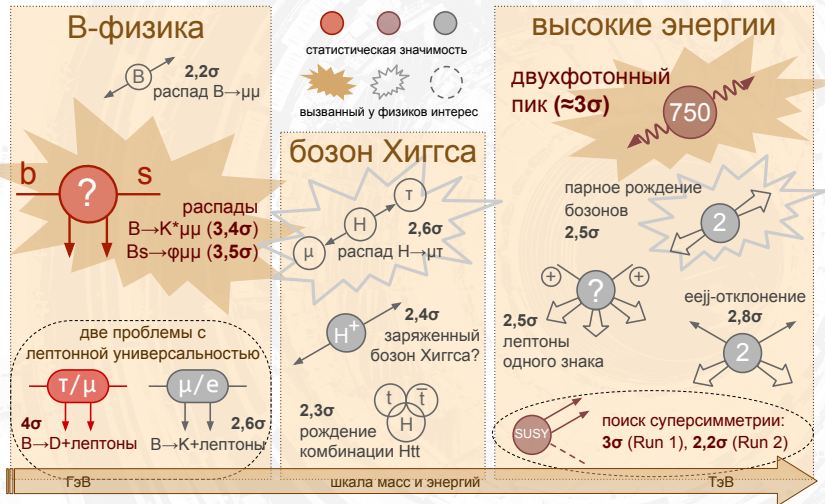
Но!! большинство результатов — **все еще на статистике Run 1** → с нетерпением ждем результаты LHC Run 2 и детектора Belle II!



загадки коллайдера

январь 2016

отклонения от Стандартной модели более чем на 2σ , обнаруженные на LHC



Новая физика

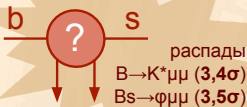


загадки коллайдера

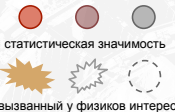
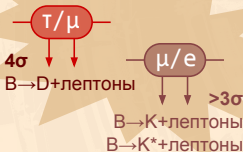
январь 2018

отклонения от Стандартной модели более чем на 2σ , обнаруженные на LHC

В-физика



проблемы с
лептонной универсальностью



бозон Хиггса

отклонений
не видно

высокие энергии

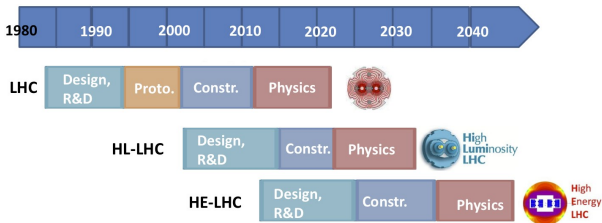
отклонений
не видно

ГэВ

шкала масс и энергий

ТэВ

Расписание LHC

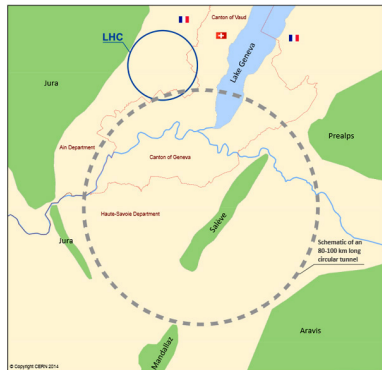


- Одобренная программа LHC: [до 2037 года](#).
- Сейчас проанализировано **всего 1-2%** от всей будущей статистики LHC!
- Пока громких открытий нет, но все может круто измениться в ближайшие годы (LHC Run 3) или на этапе [HL-LHC](#)!

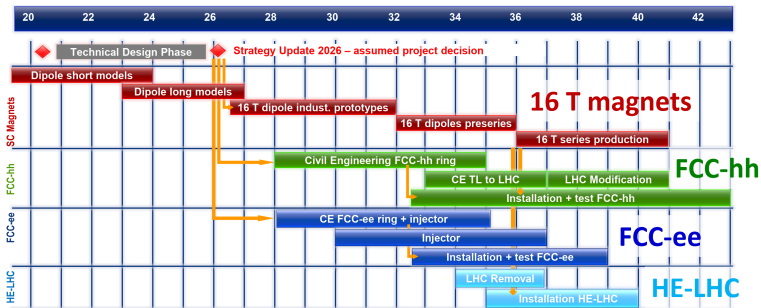
Жизнь после LHC

Возможный коллайдер после LHC: Future Circular Collider

- окружность: 98 km
- энергия столкновений:
100 TeV ($7 \times E_{LHC}$),
- интегральная светимость:
 $20\text{--}30 \text{ ab}^{-1}$ ($10 \times L_{LHC}$),
- магнитное поле в диполях:
16 T ($2 \times B_{LHC}$),
- потери на синхротронное излучение:
мегаватты ($1000 \times P_{LHC}$),
- готовность технологий:
конец 2030-х годов.



Жизнь после LHC



FCC заработает в 2040-х годах, но уже сейчас кипит работа:

- очерчена научная программа: <https://cds.cern.ch/record/2270978>
- первоначальный технический отчет (CDR) — в конце 2018 года.



Путешествие продолжается!

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

Проект ведет Игорь Иванов

загадки коллайдера январь 2017
отклонения от Стандартной модели более чем на 2 σ , обнаруженные на LHC

B-физика
распады $B \rightarrow C^* \gamma$ (3,4 σ)
 $B_s \rightarrow \mu \mu$ (2,5 σ)

бозон Хиггса
распад на фотоны
распад на глюоны

высокие энергии
поиск суперсимметрии на ATLAS: 3,3 σ

© «Элементы» elementy.ru/LHC

Результаты LHC

Загадки Большого адронного коллайдера

НОВОСТИ LHC

Топ-кварки рождаются и в протон-ядерных столкновениях

05.10

На конференции TOP2017 представлены новые результаты по физике топ-кварка

04.10

ATLAS и CMS уверенно видят основной распад бозона Хиггса

03.10

ВСЕ НОВОСТИ

Следите за ним с нами на сайте elementy.ru/LHC