

# Введение в физику частиц — 3

## Поиск Новой Физики на LHC

Игорь Иванов

CFTP, Instituto Superior Técnico, Lisbon  
ЛЯП ОИЯИ, Дубна

Школа ОИЯИ-ЦЕРН для учителей физики

3-10 ноября 2019 г.



INVESTIGADOR  
FCT

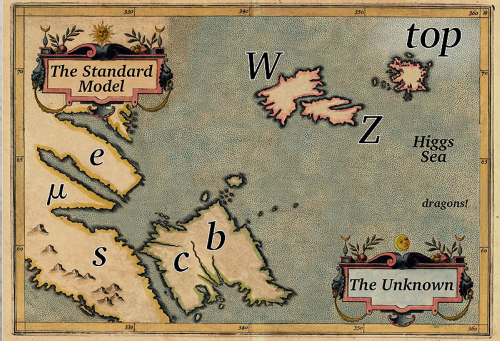


GOVERNO DA REPÚBLICA  
PORTUGUESA



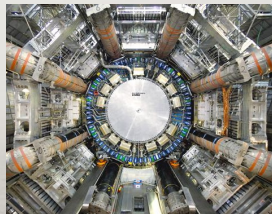
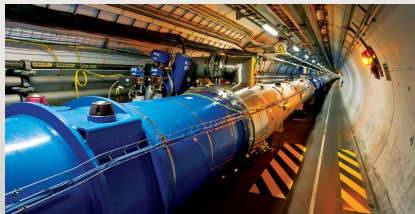


# Новая физика



# Стандартная модель


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



source: CERN

### LHC как технологическое чудо света

- Задуман в **1980-х**, построен в **2008**, проработает до **2038**.
- Окружность **27 км**, размеры детекторов **20–40 м**, миллионы компонентов работают одновременно.
- энергия  $pp$  столкновений: **14 TeV** (Тэватрон  $\times 7$ );  
темп столкновений: **40 млн раз в секунду**;  
объем полученных данных: **сотни петабайт**.



1 Открытие бозона Хиггса

2 Поиски Новой Физики

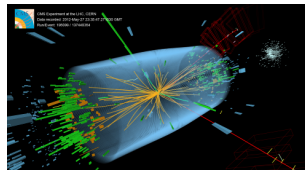
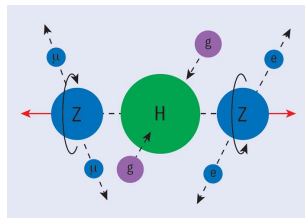
3 Планы на будущее

# Открытие бозона Хиггса

A complex visualization of particle tracks and energy deposits, likely from a particle detector like ATLAS or CMS. The image shows a central point from which numerous tracks radiate outwards, some appearing as thin white lines and others as thicker, more prominent paths. The background is a light gray with a subtle grid pattern, and the overall aesthetic is scientific and technical.

# 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.



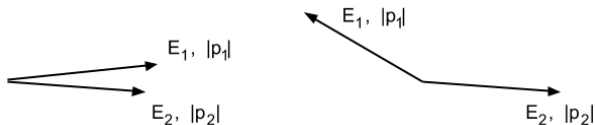
# Инвариантная масса

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:

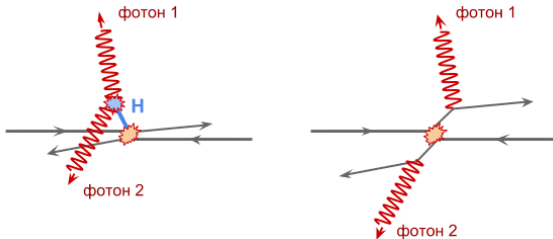
$$M_{12}c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 c^2}.$$

**Инвариантная масса пары частиц** показывает, насколько энергично они разлетаются.



# Инвариантная масса

Инвариантная масса как «метка» происхождения частиц.



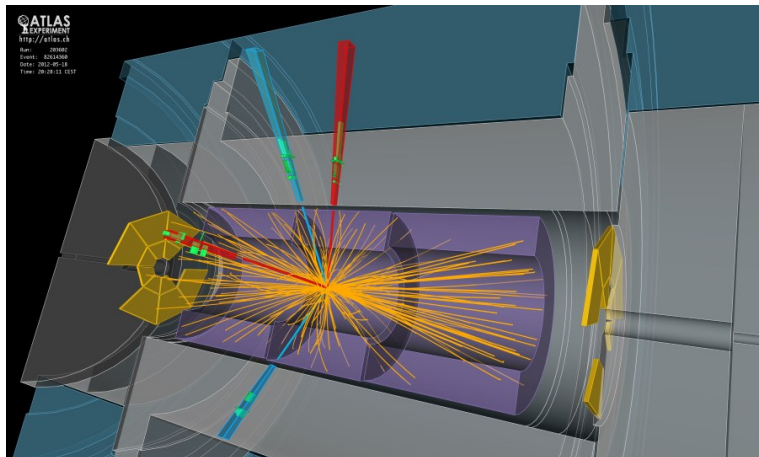
Два фотона могут родиться в результате распада бозона Хиггса (сигнал), а могут и независимо (фон).

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

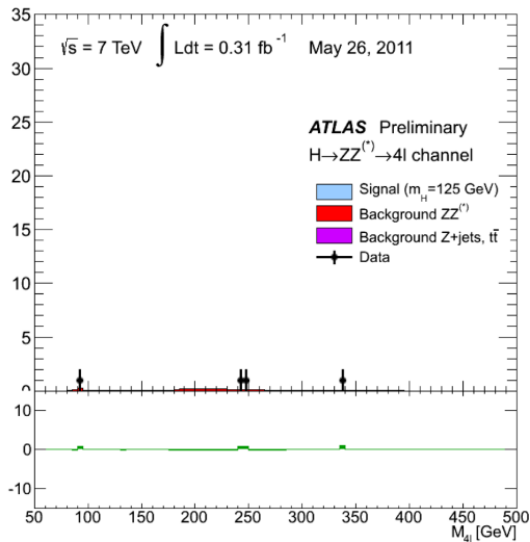


# Открытие бозона Хиггса

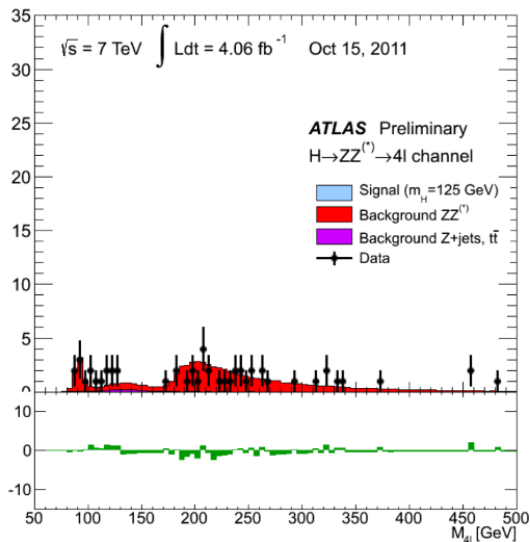
Кандидат в событие  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e^+2e^-$



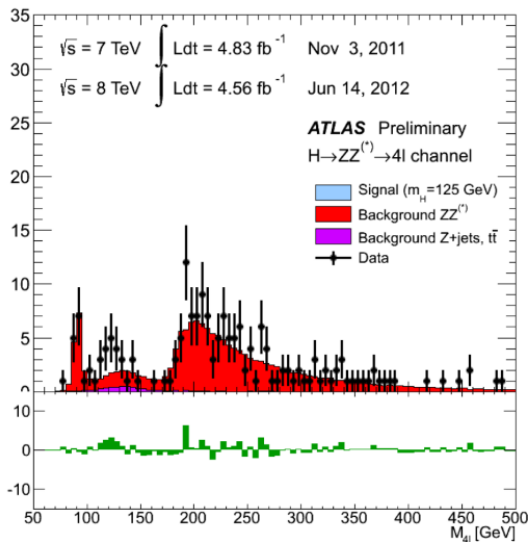
# Открытие бозона Хиггса



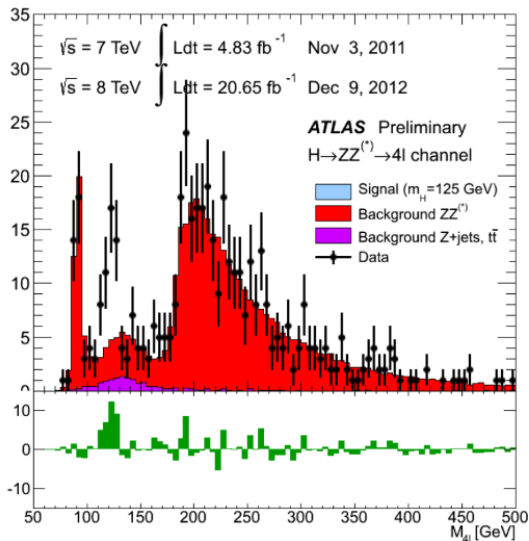
# Открытие бозона Хиггса



# Открытие бозона Хиггса



# Открытие бозона Хиггса



# Открытие бозона Хиггса

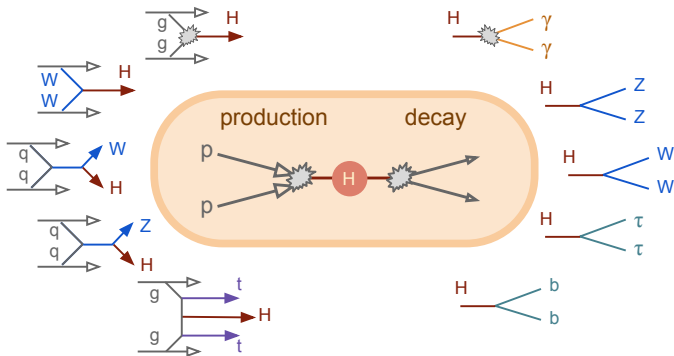
4 июля 2012 г.: ATLAS+CMS объявили о **полноценном открытии!**



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

# Рождение и распад бозона Хиггса

2012: началась хиггсовская эра.



# Поиски Новой физики



# Как искать Новую физику



## Поиски вслепую

ищем **любые отклонения от фона** при максимальных энергиях

## Прицельные поиски

ищем **специфические явления**, предсказанные теоретическими моделями Новой физики

## Сверхвысокая точность

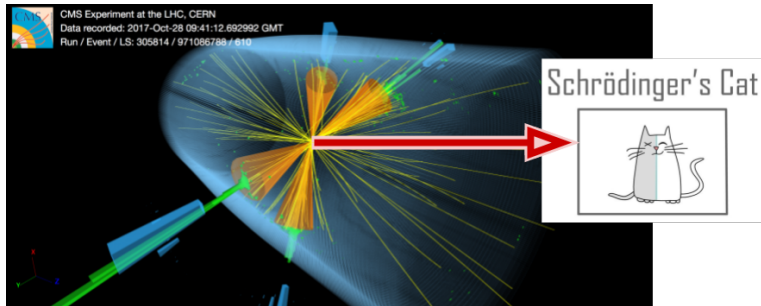
измеряем СМ процессы с максимальной точностью и ищем **отклонения** от предсказаний СМ.

# Поиски вслепую



# Столкновения при высоких энергиях

$pp$  столкновения порой приводят к «жестким» столкновениям

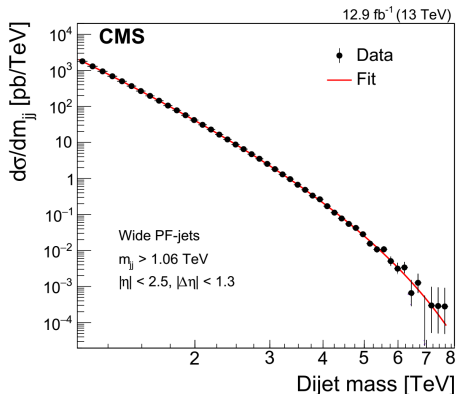
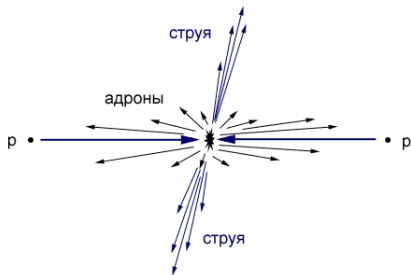


Но одиночное событие обычно еще ни о чем не говорит. Надо:

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

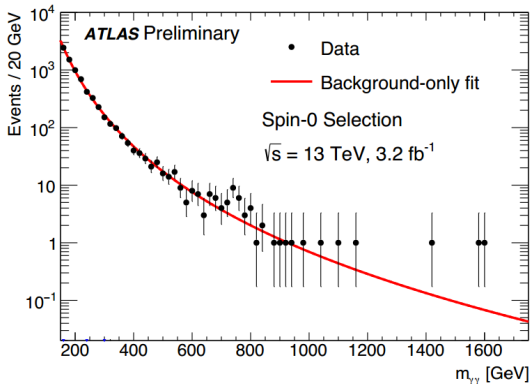
# Двухструйные события

Пример от CMS (2016): события с рождением 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.

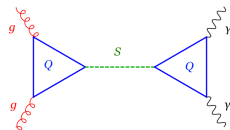


В распределении  $M_{\gamma\gamma}$  намечается **всплеск при 750 ГэВ!!!**

# Двухфотонная сенсация при 750 ГэВ

Теоретики ринулись объяснять ее: > 400 статей за полгода.

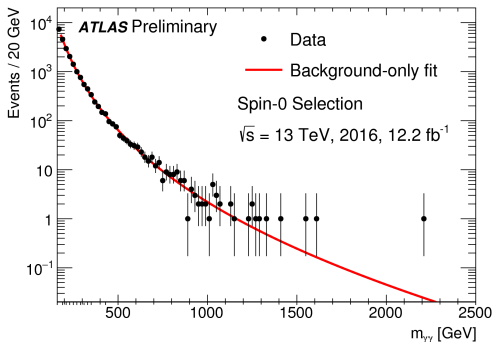
В глазах теоретиков этот всплеск выглядит как



# Обескураживающие результаты 2016 года

Август 2016: статистика в 4 раза больше.

Всплеск при 750 ГэВ **исчез!**



Бурные дебаты  
среди теоретиков



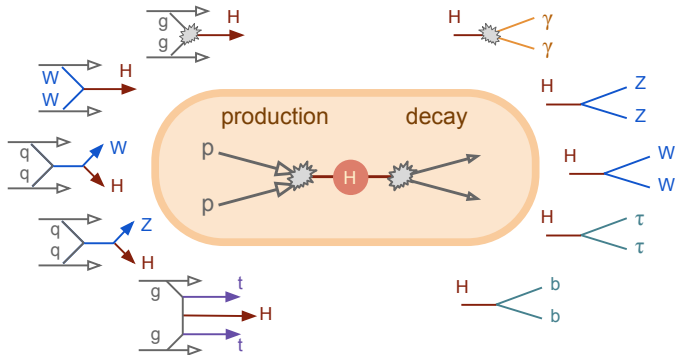


# Прицельные поиски



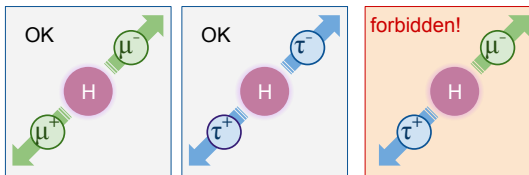
# Рождение и распад бозона Хиггса

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  $\rightarrow$  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  $2.6\sigma$ .

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

Опубликовано  $\approx 200$  теоретических статей в 2015–2016 годах.

Сеанс Run 2: все намеки исчезли.



Текущее **ограничение сверху**:  $Br(H \rightarrow \mu\tau) < 0.25\%$ .

Но не стоит торопиться с выводами: подобные отрицательные результаты **не закрывают** саму модель, они лишь ограничивают численные значения параметров.

# Сверхвысокая точность

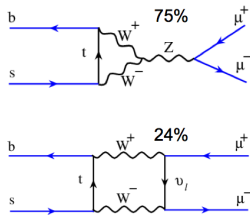
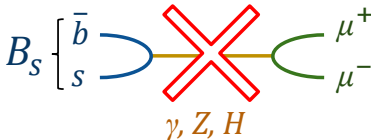


# Распады $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$

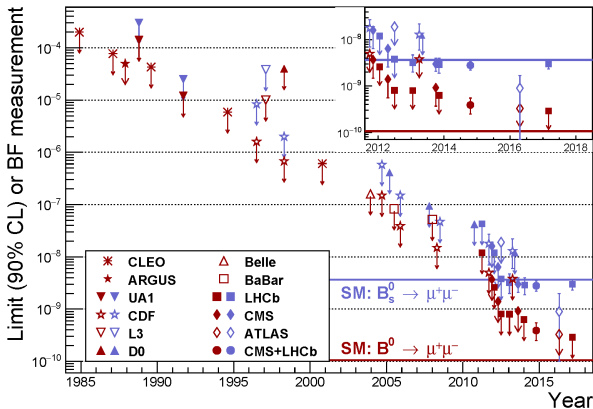
Распады  $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  исключительно редки в СМ:

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

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



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



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

Нынешний результат LHCb (2017):

$$\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0 \pm 0.6_{-0.2}^{+0.3}) \cdot 10^{-9},$$
$$\text{Br}(B \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.4 \cdot 10^{-10}.$$

Оба значения согласуются с ожиданиями СМ.




# Полулептонные распады $B$ -мезонов

Несколько подозрительный отклонений в других распадах  $B$ -мезонов:

- $\bar{B} \rightarrow D^{(*)}\tau\bar{\nu} / \bar{B} \rightarrow D^{(*)}\mu\bar{\nu}$ , нарушение лептонной универсальности на уровне  $\approx 4\sigma$ ;
- $B \rightarrow K\mu\mu / B \rightarrow K\ee$ : нарушение лептонной универсальности,  $2.6\sigma$
- $B \rightarrow K^*\mu^+\mu^-$ : расхождение со СМ на  $3.4\sigma$
- $B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ : расхождение со СМ на  $3.5\sigma$ .

Все отклонения примерно **в одинаковом направлении!**

Самая большая надежда на открытие Новой Физики.

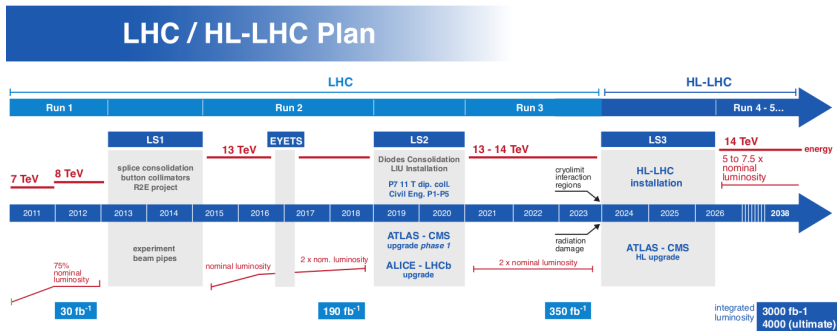
 Большинство результатов — **на статистике Run 1**  
→ с нетерпением ждем результаты LHC Run 2 и детектора Belle II!





# Планы на будущее

# Расписание LHC

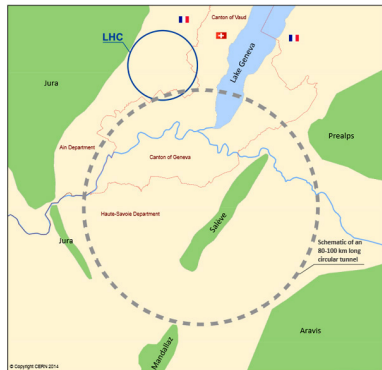


credit: HiLumi, HL-LHC Project

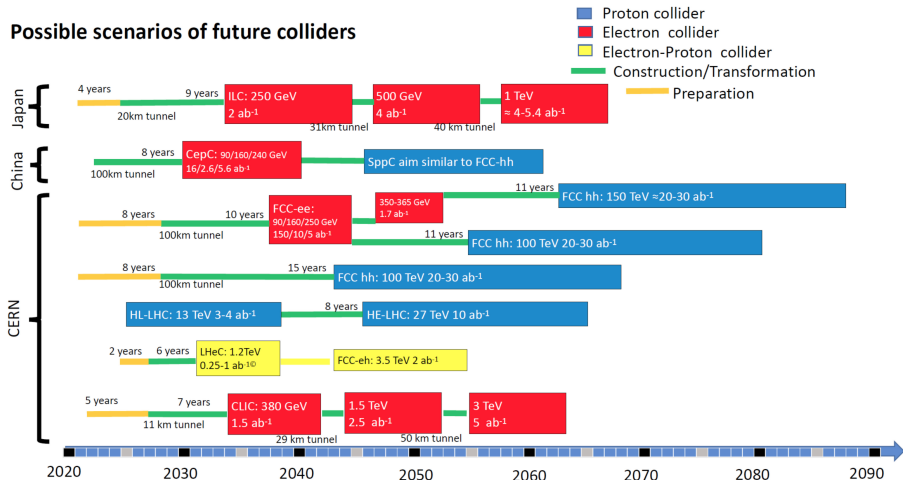
- Одобренная программа LHC + HL-LHC: до 2038 года.
- Пока накоплено всего 5% от полной статистики!
- Пока громких открытий нет, но все может круто измениться на HL-LHC!

## Возможный коллайдер после LHC: Future Circular Collider

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



## Possible scenarios of future colliders



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



Путешествие продолжается!

# БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

Проект ведет Игорь Иванов

**загадки коллайдера** январь 2017

отклонения от Стандартной модели более чем на 2 $\sigma$ , обнаруженные на LHC

**B-физика**  
 распад  $B \rightarrow K^* \mu \mu$  (3,4 $\sigma$ )  
 $B_s \rightarrow \mu \mu$  (3,5 $\sigma$ )  
 две проблемы с лептонной универсальностью  
 поиск нарушения CP

**бозон Хиггса**  
 рождение и распады  
 рождение  $H \rightarrow \gamma \gamma$   
 распад  $H \rightarrow \gamma \gamma$   
 рождение комбинации  $H \rightarrow \gamma \gamma$

**высокие энергии**  
 рождение одного фотона  
 поиск суперсимметрии на ATLAS: 3,3 $\sigma$

© «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](http://elementy.ru/LHC)