

Открытие новой фундаментальной частицы – бозона Хиггса – на Большом адронном коллайдере

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН;
физический факультет МГУ

И
Я
И

И
Н
Р



Семинар в ЦЕРНе 4 июля 2012 г..

Джо Инкандела (эксперимент CMS) и Фабиола Джанотти (эксперимент ATLAS):

Открыта частица, свойства которой согласуются с теоретическими предсказаниями для бозона Хиггса.

Статистическая значимость результата – 5 стандартных отклонений для каждого эксперимента [вероятность случайной флуктуации – 0,00006%], официальный уровень открытия в физике частиц.

Генеральный директор ЦЕРНа Рольф Хойер:

“I think we have it”, “Думаю, он у нас в руках”.

Март 2013: подтверждение открытия на более высокой статистике; новые каналы распада

Речь идет не просто об открытии очередной элементарной частицы, а о начале изучения нового сектора физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.

План доклада

- Об открытии
 - Что открыли
 - Как открыли
 - Почему не открыли раньше
 - Где открыли: Большой адронный коллайдер
 - Кто открыл
- Зачем нужен бозон Хиггса
 - Симметрии микромира и запрет на массу
 - Нарушенные симметрии
 - А нужен ли элементарный бозон Хиггса?
- Что дальше
- Заключение

Что открыли

Современная теория элементарных частиц и их взаимодействий – Стандартная модель

Надежно описывает законы Природы, свойства элементарных частиц вплоть до расстояний 10^{-16} см, энергий 100 ГэВ

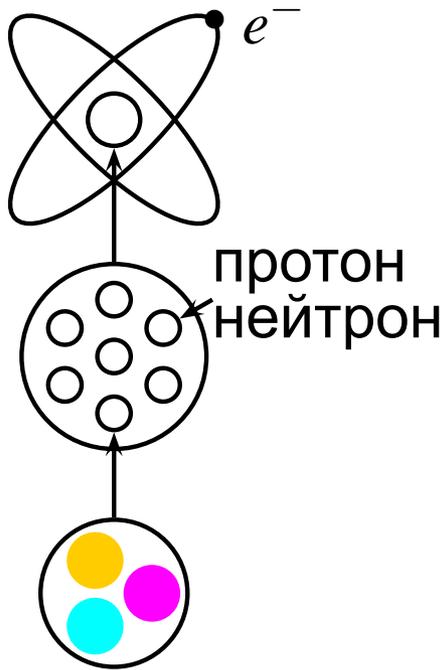
Проверена в многочисленных экспериментах.

Точность – 0.1%, а часто гораздо лучше.

Все элементарные частицы Стандартной модели

ЛЕПТОНЫ

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$



кварки

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

три семейства частиц

+ АНТИЧАСТИЦЫ

e^+ : позитрон, ...

$\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...

\bar{u} : антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия: фотон, глюоны, W , Z (гравитон) + бозон Хиггса: был недостающим звеном

Характеристика частицы – **спин**, целый или полуцелый в единицах \hbar

фермионы: полуцелый спин

e, μ, τ, ν , кварки: спин $\frac{1}{2} \cdot \hbar$

бозоны: целый спин

фотон, глюоны, W -, Z -бозоны: спин $1 \cdot \hbar$, гравитон: спин $2 \cdot \hbar$

Известные до сих пор бозоны отвечают за взаимодействия.

Фотон \longleftrightarrow электромагнитные.

Глюоны \longleftrightarrow силы между кварками в протоне.

Главная роль поля Энглера–Браута–Хиггса – обеспечить массы всем частицам.

Бозон Хиггса – квант этого поля. И в этом его уникальность.

Теория: спин бозона Хиггса должен быть равен нулю!

Бозон Хиггса – тяжелый

Единица измерения энергии = массы ($E = mc^2$):

$$1 \text{ ГэВ} \approx \text{масса протона} \cdot c^2$$

$$1 \text{ ТэВ} = 1000 \text{ ГэВ}$$

$c = 1$ в дальнейшем; энергия = масса.

Масса наиболее тяжёлой известной элементарной частицы — t -кварка: $m_t = 172 \text{ ГэВ}$

Масса новой частицы H : $m_H = 125 \text{ ГэВ}$
(точность измерений массы и других свойств H пока невысока)

Как открыли

Все частицы распадаются, если это разрешено законом сохранения энергии и другими законами сохранения.

Стабильны только электрон, протон и нейтрино (с оговорками).

Бозон Хиггса нестабилен. Предсказание теории о времени жизни

$$\tau_H = 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ секунд}$$

Для сравнения: время жизни t -кварка – в 500 раз меньше

Прямо измерить τ_H на Большом адронном коллайдере невозможно. Известно только, что $\tau_H > 10^{-24}$ с.

Бозон Хиггса открыт по его распадам на два фотона
(2 распада из 1000),

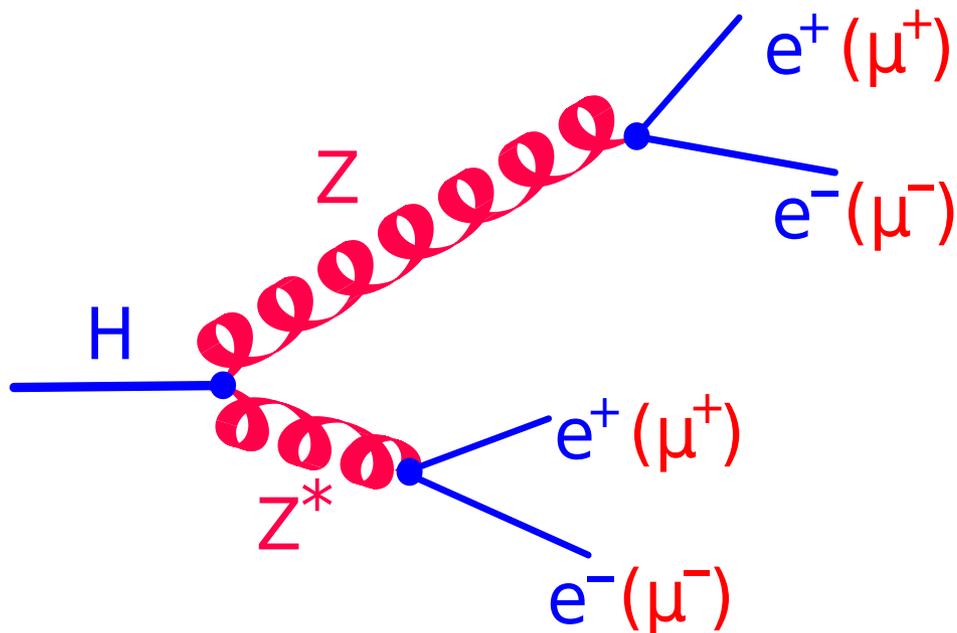
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

и распадам (1 распад из 10 000, подавление фона 10^{-12} !)

$$H \rightarrow e^+e^-e^+e^-$$

$$H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$

$$H \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$

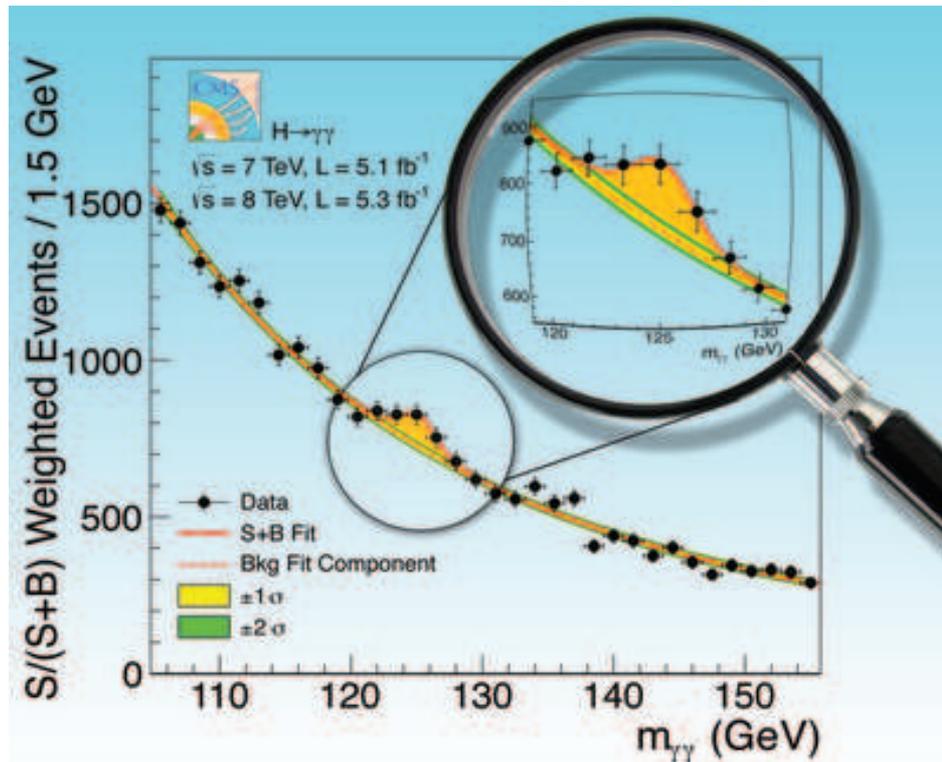




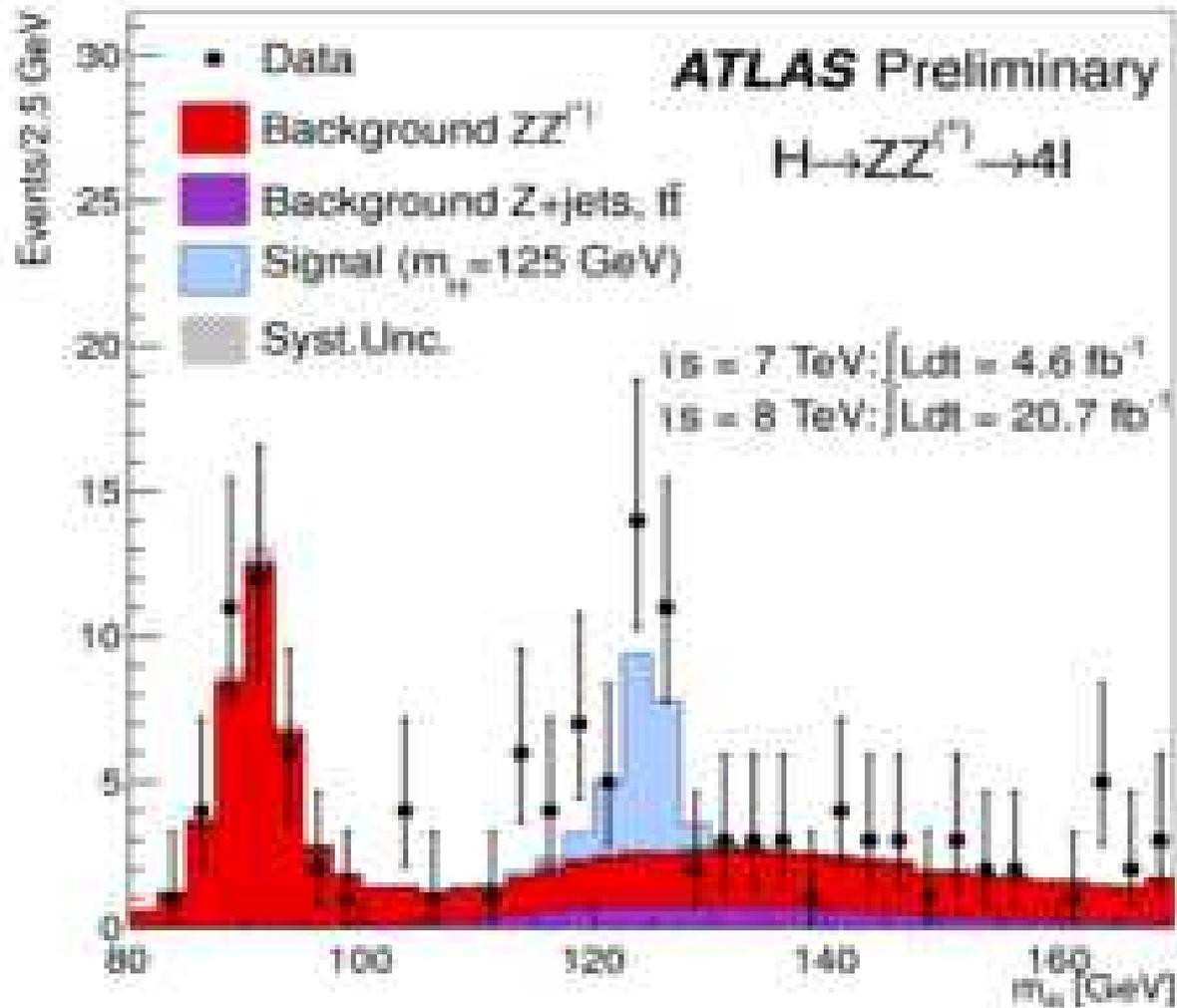
Сохранение энергии и импульса в распаде $H \rightarrow \gamma\gamma \implies$
комбинация импульсов двух фотонов и угла между ними

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{p_1 p_2 (1 - \cos \theta)}$$
 – равна m_H .

Фотоны рождаются и без всякого бозона Хиггса, но при $m_{\gamma\gamma} \approx m_H$ их должно быть больше



$H \rightarrow 4l$



Новая частица – бозон

Распад $H \rightarrow \gamma\gamma$.

Сохранение углового момента \implies спин H равен 0.

Спин $1 \cdot \hbar$ запрещен теоремой Ландау

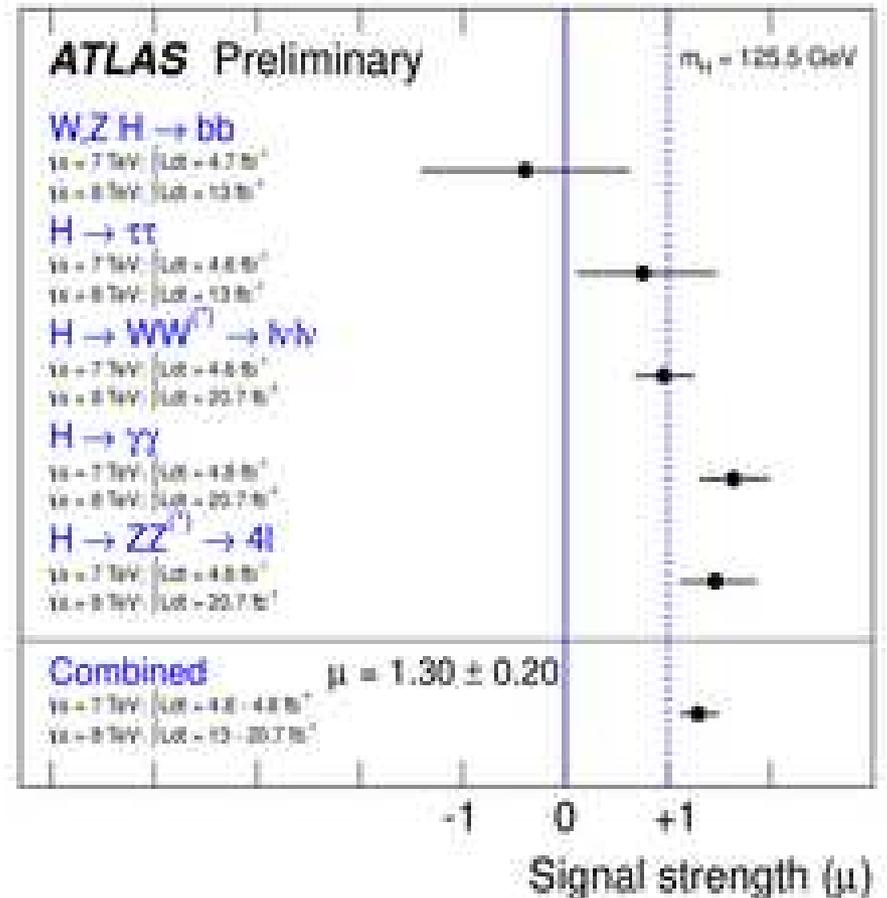
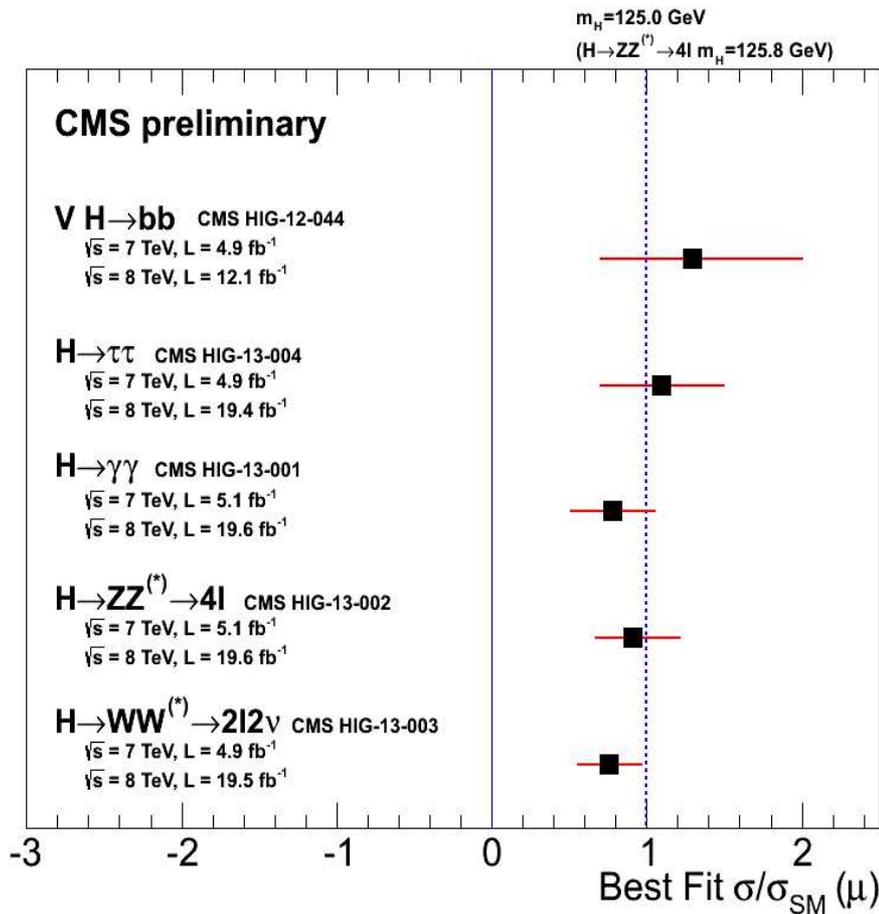
Измерение угловых распределений: отвергает спин $2\hbar$.

NB. Теория: спин бозона Хиггса должен быть равен нулю!

Известно пока не очень много.

Точность не очень высокая.

То, что известно, согласуется со Стандартной моделью



Отношение измеренного числа событий к предсказаниям Стандартной модели

Почему не открыли раньше

- $E = mc^2$: новые тяжёлые частицы могут рождаться в столкновениях частиц при высоких энергиях

- Соотношение неопределенностей $\Delta p \cdot \Delta x \simeq \hbar$
 $p = E/c$ при высоких энергиях.

Высокие энергии (импульсы) \longleftrightarrow малые расстояния:

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{E}$$

Энергии **100 ГэВ** соответствует длина 10^{-16} см

NB: размер протона = 10^{-13} см

- Взаимодействия на малых расстояниях r происходят редко, вероятность $\propto r^2$

Энергия $E \iff$ Масса $M \sim E \iff$ Расстояние $r \sim 1/E \iff$
Вероятность взаимодействия $\propto 1/E^2$

Чтобы открыть новые тяжелые частицы и новые взаимодействия на сверхмалых расстояниях, нужны пучки частиц высокой энергии и высокой интенсивности (светимости)

Максимальная энергия столкновений
до Большого адронного коллайдера:

Тэватрон в Фермилабе, США,

протон-антипротонный коллайдер,

встречные пучки протонов и антипротонов, 1×1 ТэВ
(2 ТэВ в сумме)

для открытия бозона Хиггса не хватило энергии и светимости

закончил работать в октябре 2011 года

Где открыли

Большой адронный коллайдер, Large Hadron Collider (LHC/БАК):

протон–протонный коллайдер в ЦЕРНе, 7×7 ТэВ,
в сумме 14 ТэВ.

Начал работать в 2010 году при энергии 3.5×3.5 ТэВ
2012 г.: энергия протонов 4×4 ТэВ.

NB: Протоны состоят из кварков и глюонов \longleftrightarrow

Энергия элементарного столкновения на LHC/БАК

$$E \lesssim \frac{14}{6} \text{ ТэВ} \sim 2.5 \text{ ТэВ.}$$

На Тэватроне $E \lesssim 350$ ГэВ.

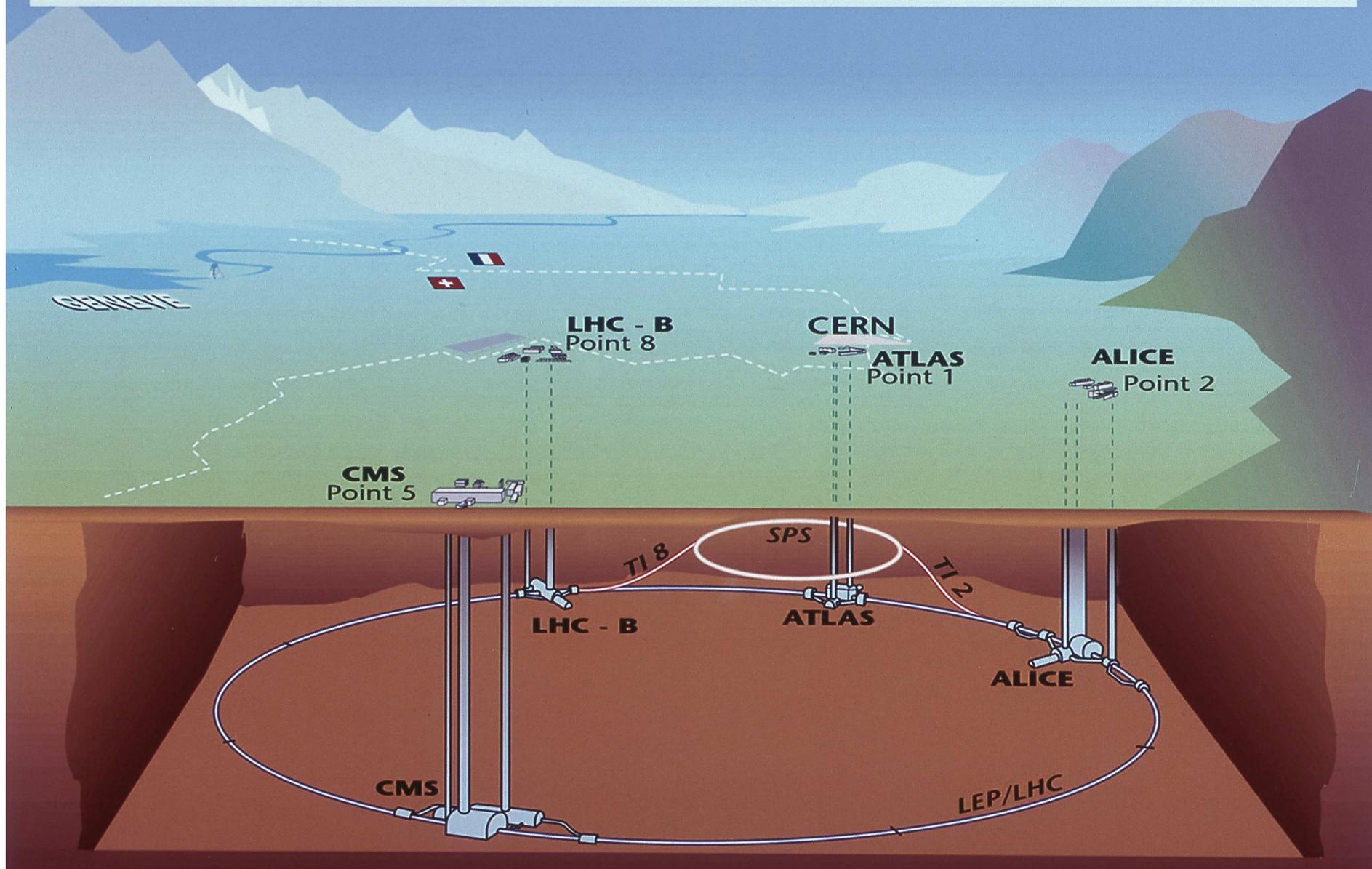
ЛНС/БАК

- Длина кольца – 27 км
- 1600 сверхпроводящих магнитов
(магнитное поле поворачивает протоны в кольцо;
проектное поле – 8.3 Тесла, сейчас около 6 Тесла)
- 96 тонн жидкого гелия при температуре 1.9 К.



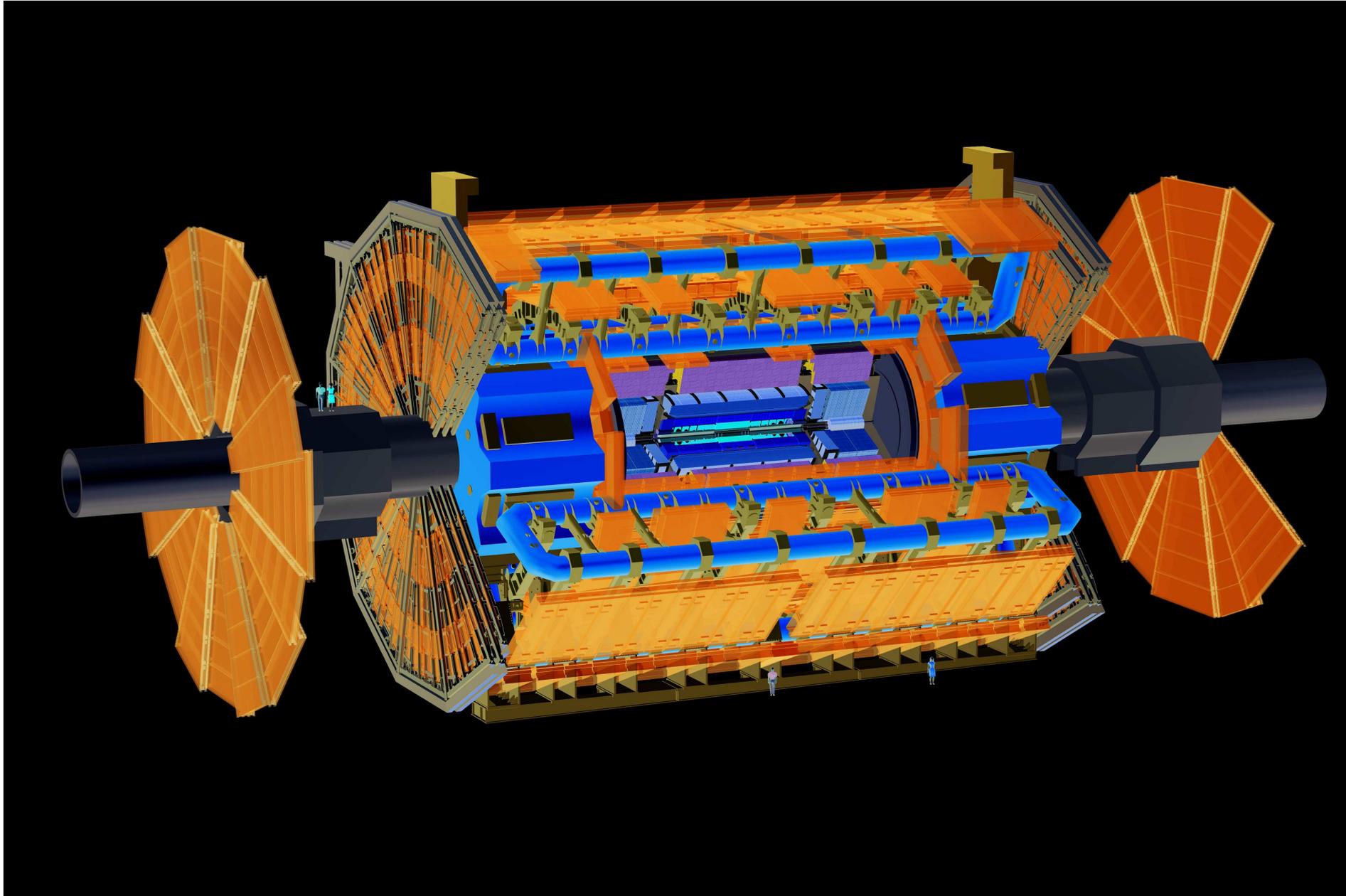
Четыре детектора

Overall view of the LHC experiments.

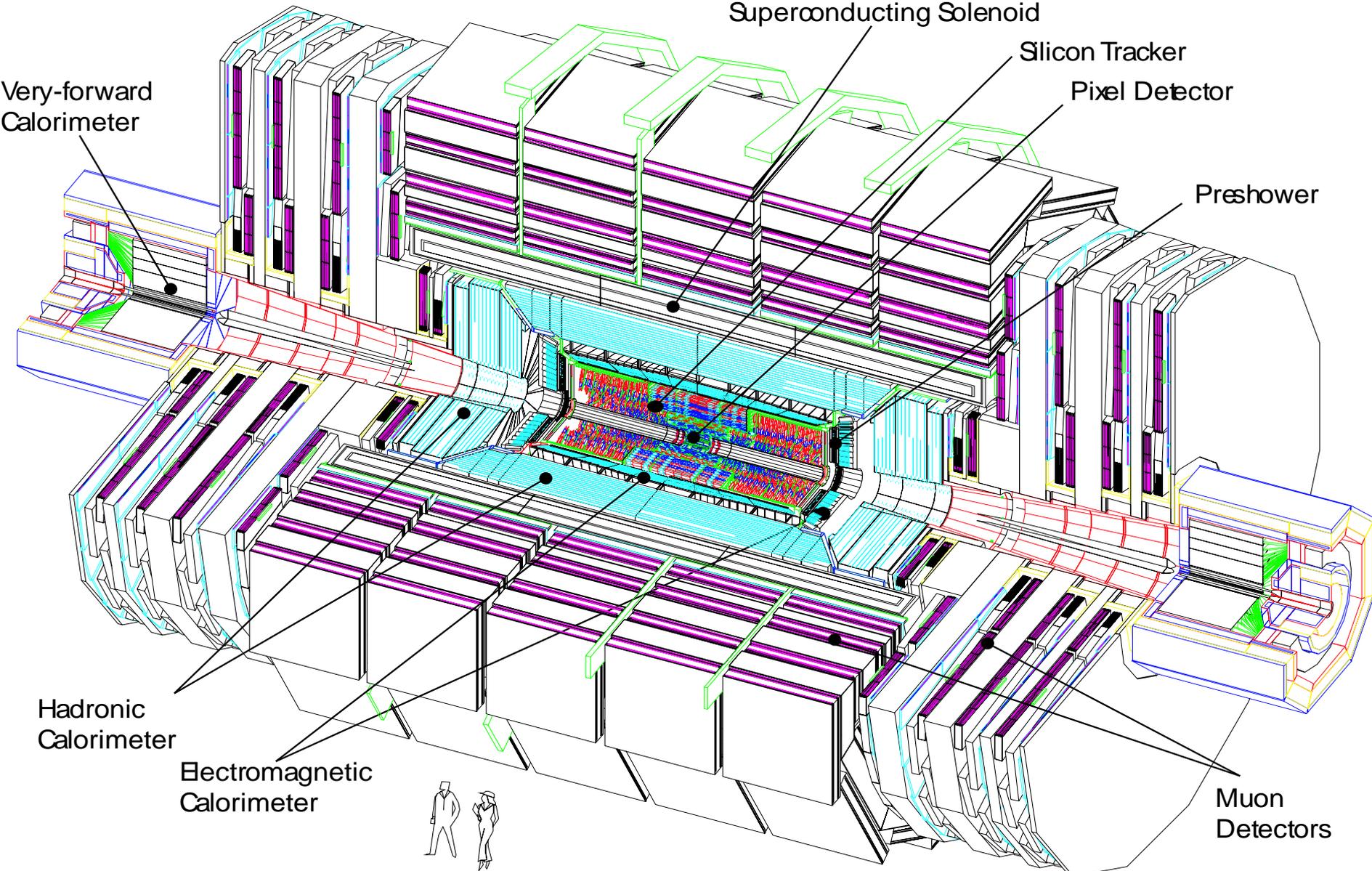


Что такое детекторы ЛHC/БАК ?

ATLAS



CMS



Very-forward Calorimeter

Superconducting Solenoid

Silicon Tracker

Pixel Detector

Preshower

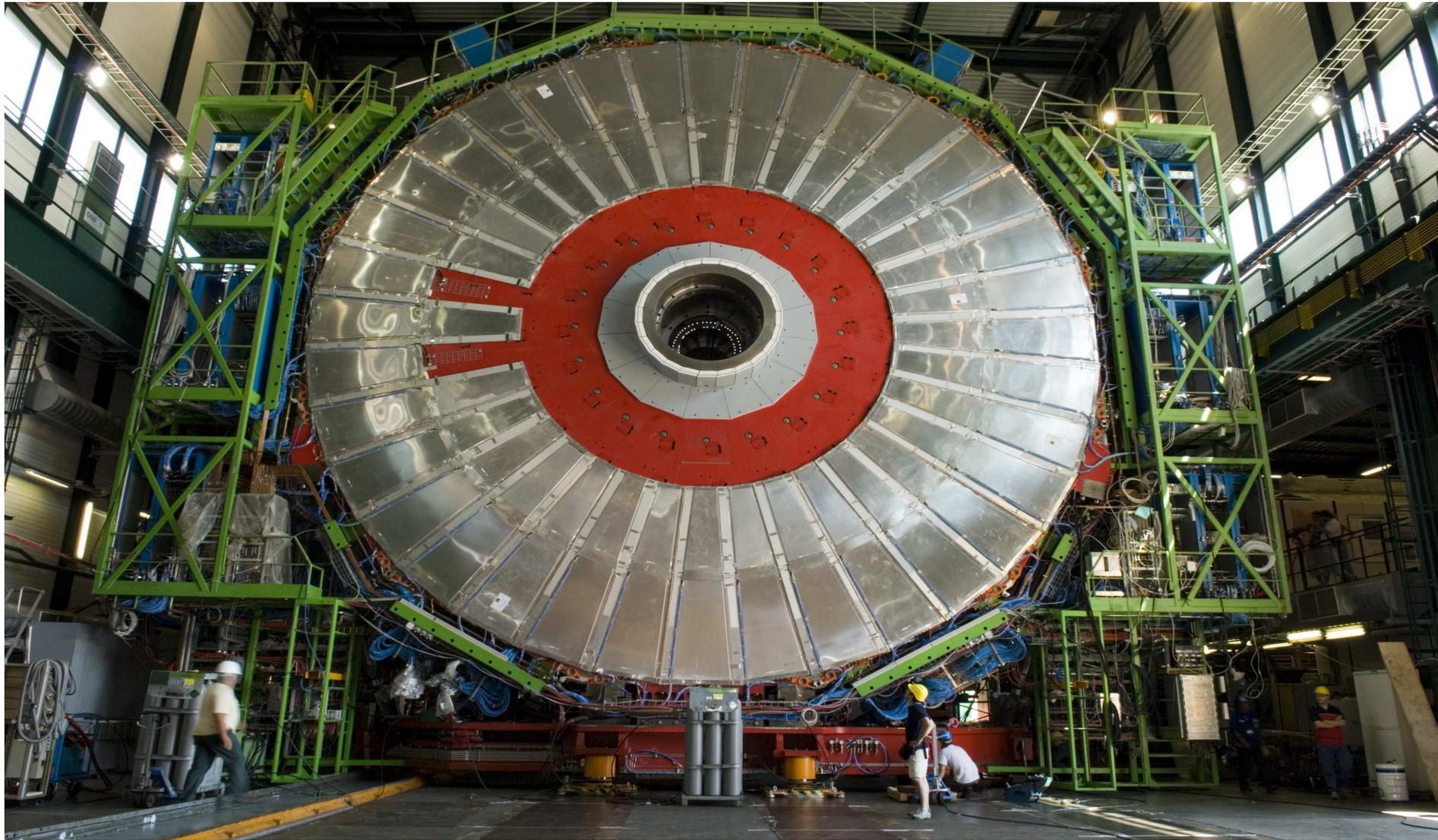
Hadronic Calorimeter

Electromagnetic Calorimeter

Muon Detectors

Compact Muon Solenoid

CMS с торца



Что видят детекторы?

Детектируются все заряженные частицы и фотоны.

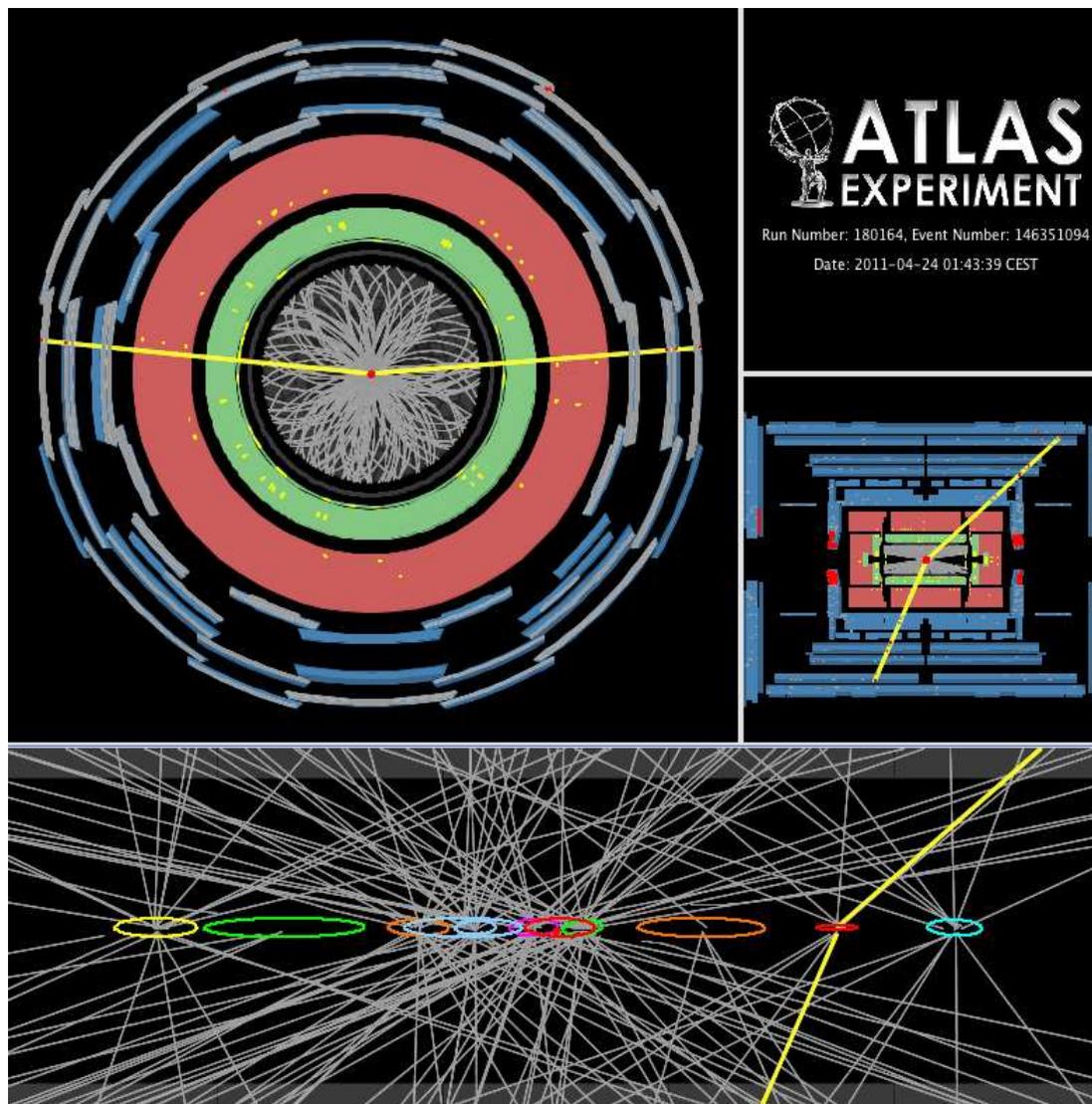
Определяется тип частицы – электрон/фотон, мюон, адрон (протон, нейтрон, мезон).

Измеряется энергия и направление движения каждой частицы.



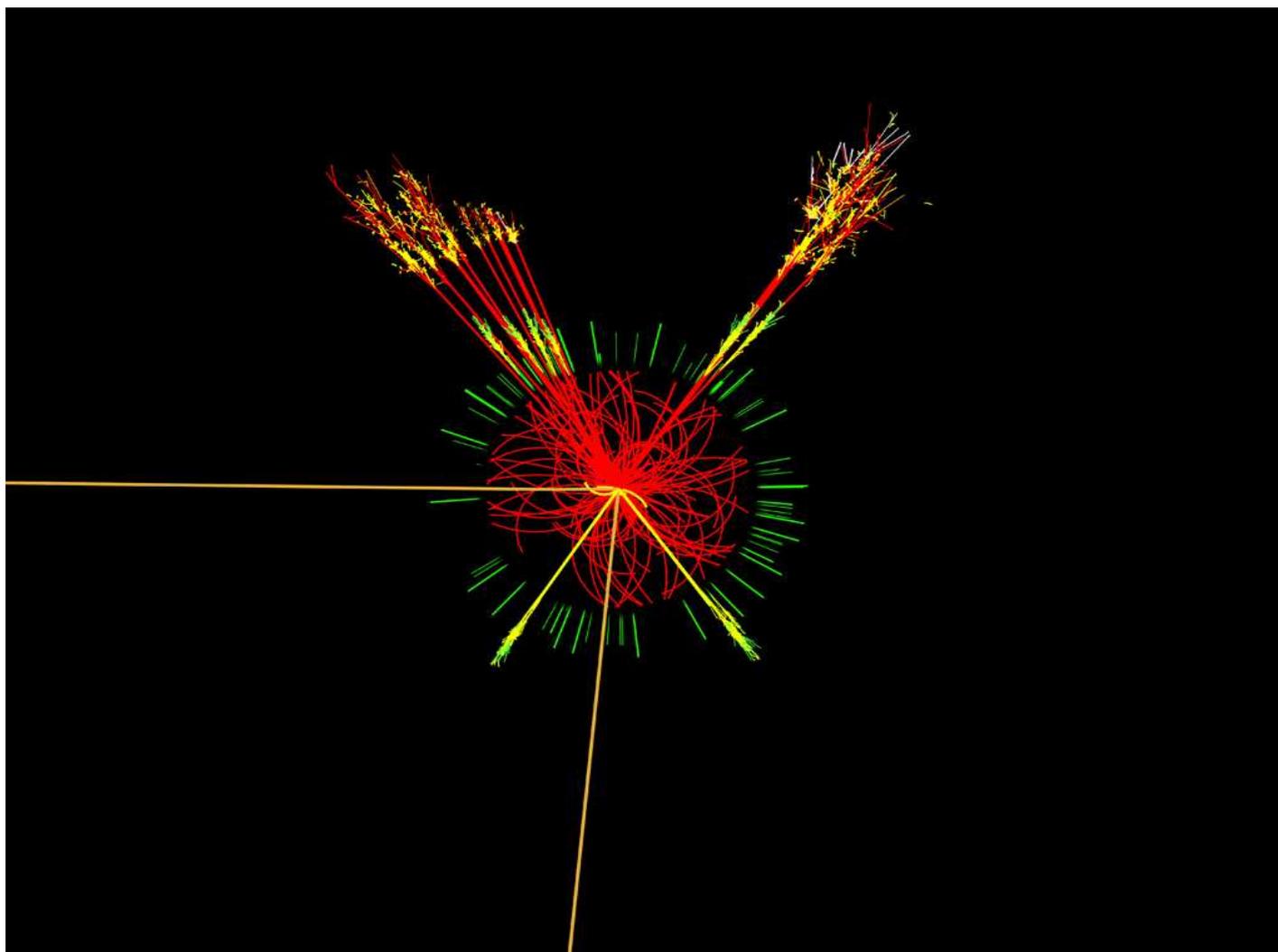
$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$, красные линии

Центральный вершинный детектор определяет положение точки столкновения протонов



А так выглядит событие с рождением бозона Хиггса и распадом

$$H \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$$



Россия внесла и вносит большой, общепризнанный вклад,
как интеллектуальный, так и материальный/финансовый



Москва, Новосибирск, Дубна, Троицк, Протвино, С.-Петербург...

Трудная судьба

- Начало разработки – 1984 г.
- Решение о строительстве – конец 1994 г. с планируемым запуском в 2005 г.
- 2001 г.: выявлена недооценка стоимости проекта. Финансовый кризис ЦЕРНа.
- 27 марта 2007: авария в криогенной системе.
- сентябрь 2008 г.: первые протоны в кольце.
- 19 сентября 2008 г.: крупная авария в системе питания, приведшая к разгерметизации криогенной системы и выбросу 6 тонн жидкого гелия. Сдвиг запуска на 2009 г. Решение о первом этапе работы с энергией 3.5×3.5 ТэВ (при проектной энергии 7×7 ТэВ).

- 23 ноября 2009 г.: первые столкновения протонов, 2010 г.: постепенное улучшение параметров.
- 2011 г.: набор данных при энергии 3.5×3.5 ТэВ
- 2012 г.: набор данных при энергии 4×4 ТэВ
В 6 раз больше данных, чем в 2011 г.
- 2013 г.: Остановка, переделка систем, подготовка к повышению энергии
- 2015 г.: начало работы при энергии 6.5×6.5 ТэВ или 7×7 ТэВ
- Продолжительность работы — 15 – 20 лет

И все же более счастливая судьба, чем у УНК (3×3 ТэВ, Протвино, Россия, закрыт в середине 90-х) и SSC (20×20 ТэВ, Техас, США, закрыт в 1993 г.)

Кто открыл

- ATLAS: 3500 физиков, в том числе ок. 200 из российских институтов и университетов; 38 стран; 174 организации
- CMS: 3000 физиков, в том числе ок. 150 из России; 41 страна; 179 университетов и институтов



Зачем нужен бозон Хиггса?

- Всякая элементарная частица – квант некоторого поля.
 - Например, фотон \longleftrightarrow электромагнитное поле

Вопрос формулируем так:

Зачем нужно новое поле?

Краткий ответ:

симметрии теории микромира запрещают элементарным частицам иметь массы, а новое поле нарушает эти симметрии и обеспечивает существование масс частиц.

Расшифруем...

Внутренняя симметрия электродинамики

Калибровочная инвариантность

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{\partial \alpha}{\partial x^\mu}$$

- Запрещает фотону иметь массу. Уравнение массивного фотона:

$$\frac{\partial F^{\mu\nu}}{\partial x^\mu} + m_\gamma^2 A^\nu = 0$$

инвариант не инвариант

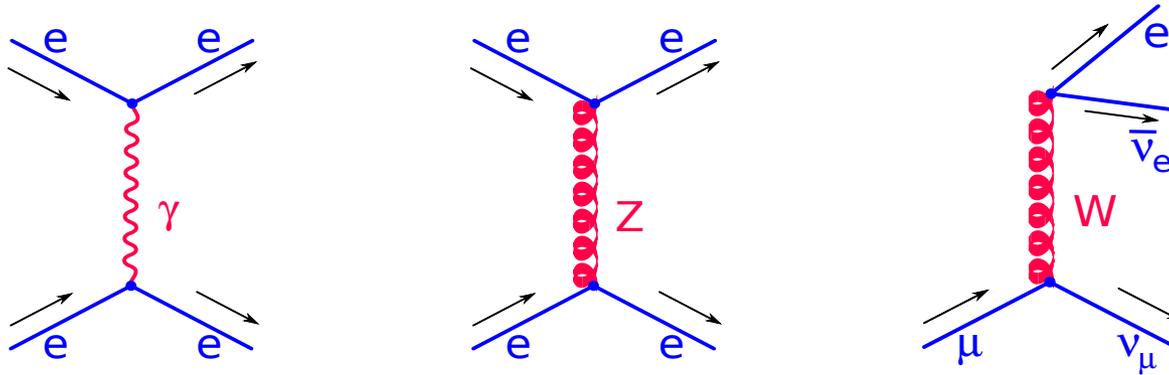
- Приводит к сохранению электрического заряда
- Близкие аналоги фотона: **W- и Z-бозоны**

Но они имеют массы!

$$m_W = 81 \text{ ГэВ} , \quad m_Z = 90 \text{ ГэВ}$$

Что-то не то ...

Взаимодействия всех частиц с W - и Z -бозонами (слабые взаимодействия) хорошо изучены



Они устроены в принципе так же, как взаимодействия с фотоном.

Внутренняя симметрия этих взаимодействий **запрещает всем частицам иметь массы.**

А массы есть!

[Это и хорошо: безмассовые электроны летали бы со скоростью света \implies ни атомов, ни веществ, ни нас с вами...]

В чем дело?

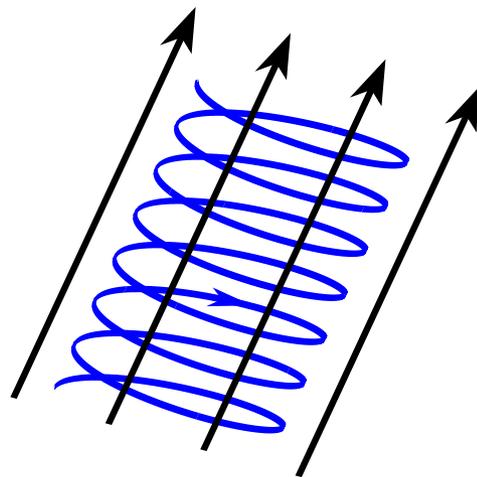
Нарушенные симметрии

- Законы сохранения и симметричные запреты **не действуют**, если **симметрия нарушена**

Пример: однородный образец железа = магнит.

Магнитное поле внутри магнита **нарушает симметрию** относительно пространственных вращений.

Электрон внутри магнита движется по спирали. Его **угловой момент не сохраняется**.



Экспериментатор внутри магнита решил бы, что в пространстве есть выделенное направление.

А теоретик бы так не решил.

Физики внутри магнита.

Теоретик: “Вращательная симметрия в пространстве есть, но она **нарушена** пронизывающим все магнитным полем \implies запрет на несохранение углового момента не действует. **Квант нового поля – фотон.**”

Экспериментатор: построил ускоритель, столкнул электроны, открыл в их столкновениях фотон.

Физики, изучающие микромир.

Энглер–Браут (1964 г.) и чуть позже Хиггс (1964 г.):

“Внутренняя симметрия в микромире есть, но она **нарушена** разлитым в **вакууме** новым полем \implies запрет на существование масс не действует. Частицы спина 1 автоматически имеют массы” (сейчас W, Z). “Новое поле не нарушает пространственно-временные симметрии \implies новое поле – **скалярное**”

Хиггс (1964 г.): “**Квант нового поля – новая частица**” (бозон Хиггса). “**Ее спин равен 0**”

Экспериментаторы на ЛНС/БАК: так и есть!

А нужен ли элементарный бозон Хиггса?

С теоретической точки зрения – не обязательно.

- Физика конденсированных сред:

Множество примеров нарушения симметрии

и почти всегда нет ничего похожего на элементарный бозон Хиггса

- Сверхпроводимость: выталкивание магнитного поля из сверхпроводника (эффект Мейсснера) \iff фотон в толще сверхпроводника имеет массу.

Внутренняя симметрия электродинамики нарушена.

Прямой аналог массивных W - и Z -бозонов в вакууме.

Никакого элементарного скалярного поля в сверхпроводнике нет, есть электроны и кристаллическая решетка. Аналога бозона Хиггса нет.

Эффективная теория сверхпроводимости
Гинзбурга–Ландау \approx теория Энглера–Браута–Хиггса

Поле Гинзбурга–Ландау \approx поле Энглера–Браута–Хиггса

Но! поле Гинзбурга–Ландау – **составное**

В физике частиц составные скалярные поля известны.

Пример – поле π -мезонов, состоящих из пары кварк-антикварк

π -мезон выглядит при низких энергиях как точечный,
описывается (псевдо)скалярным полем.

Возможно, поле Энглера–Браута–Хиггса – **составное**

NB: простейшие теории такого типа отвергнуты
экспериментом. И все же...

Дополнительный аргумент: внутренние трудности теории

- Энергетические масштабы взаимодействий

- сильные (связывают кварки в протоне)

$$\text{масса протона } m_p \sim 1 \text{ ГэВ}$$

- взаимодействия W , Z -бозонов (слабые)

$$m_W, m_H \sim 100 \text{ ГэВ}$$

- гравитационные

$$M_{Pl} \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$$

m_p, m_W близки между собой, но далеки от гравитационного масштаба M_{Pl} . Почему?

- Масштаб 100 ГэВ определяется массой бозона Хиггса m_H .

Соображения естественности

- В Стандартной модели требуется чрезвычайно тонкая настройка параметров, чтобы обеспечить

$$m_H \ll M_{Pl}$$

- Тонкая настройка не требуется, если Стандартная модель расширяется при энергиях

$$E \sim 1 \text{ ТэВ}$$

до теории с улучшенным поведением при высоких энергиях.

- Главное теоретическое основание ожидать “новой физики” при энергиях порядка 1 ТэВ.

Если это верно, то “новая физика” будет открыта на LHC/БАК

Какая новая физика?

Гипотез много:

- Составной бозон Хиггса, что-то вроде π -мезона \implies
много новых **составных** частиц с массами несколько ТэВ,
вроде протона, ρ -мезона и т.д.
- Суперсимметрия \implies
много новых **элементарных** частиц с массами
в области ТэВ
- Дополнительные измерения пространства
- Новые свойства гравитационных взаимодействий

Вполне возможно, природа устроена совсем не так, как о ней думают теоретики \implies **неожиданные открытия**

Что дальше?

- Прямые поиски новой физики на LHC/БАК
- Изучение свойств бозона Хиггса

В минимальной версии Стандартной модели с одним бозоном Хиггса его свойства однозначно предсказываются.

Чем больше масса частицы, тем сильнее с ней взаимодействует бозон Хиггса, тем чаще она рождается в распадах бозона Хиггса.

Программа исследований
свойств новой частицы
на LHC/БАК

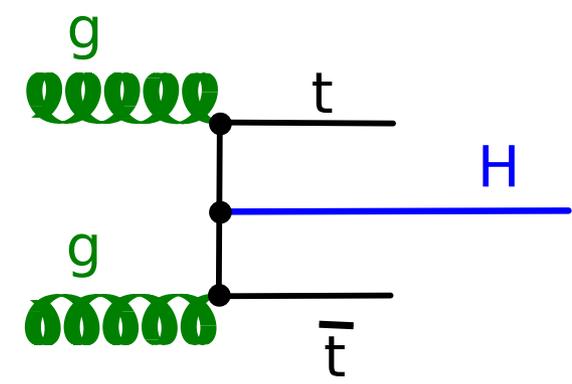
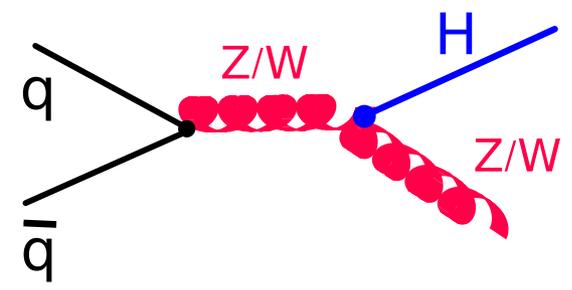
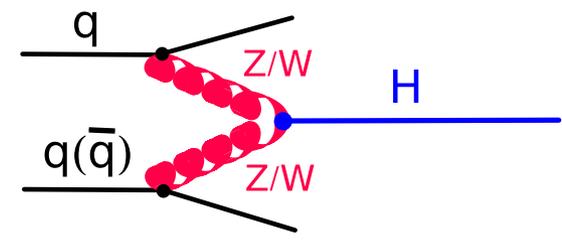
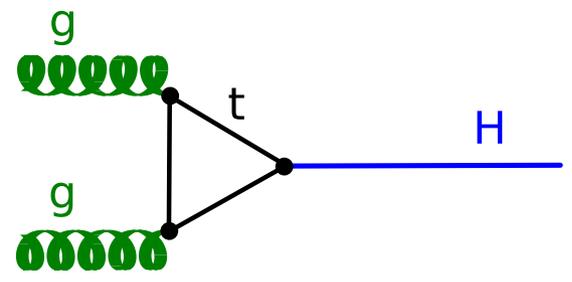
● Распады:

$H \rightarrow WW, H \rightarrow ZZ, H \rightarrow t\bar{t}$ запрещены законом сохранения энергии ($m_H = 125$ ГэВ, $m_W = 81$ ГэВ, $m_Z = 90$ ГэВ, $m_t = 172$ ГэВ).

- $H \rightarrow b\bar{b}$, $m_b = 4$ ГэВ \implies вероятность $\approx 50\%$
(трудно: b -кварков и так много рождается на LHC/БАК. Вроде видят на Tevatron'е и начинают видеть на LHC/БАК)
- $H \rightarrow \tau\bar{\tau}$, $m_\tau = 1,8$ ГэВ \implies вероятность $\approx 6\%$
- $H \rightarrow \mu^+\mu^-$, $m_\mu = 0,105$ ГэВ \implies вероятность $\approx 0,02\%$
- $H \rightarrow \gamma\gamma$,
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-e^+e^-, e^+e^-\mu^+\mu^-, \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-,$
- $H \rightarrow WW^* \rightarrow e^+e^- \nu\nu, e^+\mu^-\nu\nu, \mu^+\mu^-\nu\nu$
- $H \rightarrow Z\gamma$ И Т.Д.

● Рождение:

- $pp \rightarrow H +$ легкие кварки низких энергий
- $pp \rightarrow H +$ пара кварков высоких энергий
- $pp \rightarrow H + W, pp \rightarrow H + Z$
- $pp \rightarrow H + t\bar{t}$



Все это позволит узнать, как устроен новый сектор физики элементарных частиц.

Пока точность невысока, но она будет постепенно улучшаться.

Любое отклонение от предсказаний минимальной Стандартной модели = новая физика

Пока отклонений нет.

Точности LHC/БАК в любом случае не хватит.
Будет нужен новый e^+e^- -коллайдер.

Итак,

- Последние 30 – 35 лет: время запланированных открытий в физике частиц

- Теоретическое уточнение и экспериментальное подтверждение Стандартной модели
- Измерение её параметров (масс частиц, констант взаимодействий и т.д.)
- **Открыто недостающее звено: бозон Хиггса**

- Открытие – самое начало пути

Пока больше вопросов, чем ответов.

- Каковы свойства нового бозона?
- Один ли он, или их несколько?
- Стоит ли за ним новая физика?
- Если стоит, то какая?

- Подсказка: внутренние трудности теории (+ космологические данные + нейтринные осцилляции) свидетельствуют о неполноте Стандартной модели

Запланированные открытия закончились

ФИЗИКА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СНОВА
СТАЛА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ НАУКОЙ

НОВЫЕ ОТКРЫТИЯ ВПЕРЕДИ