

Открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере

В. А. Рубаков

Институт ядерных исследований РАН;
кафедра физики частиц и космологии
физического факультета МГУ



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.

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; спин 0.

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

План

● Бозон Хиггса открыт

- Что открыли
- Где открыли
- Как открыли

● Зачем нужен бозон Хиггса

- Симметрии микромира и запрет на массу
- Нарушенные симметрии

● Что дальше: “новая физика”

- Внутренняя трудность теории: проблема масштаба энергий
- Сценарии “новой физики”
- “Будем искать!”

● 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.

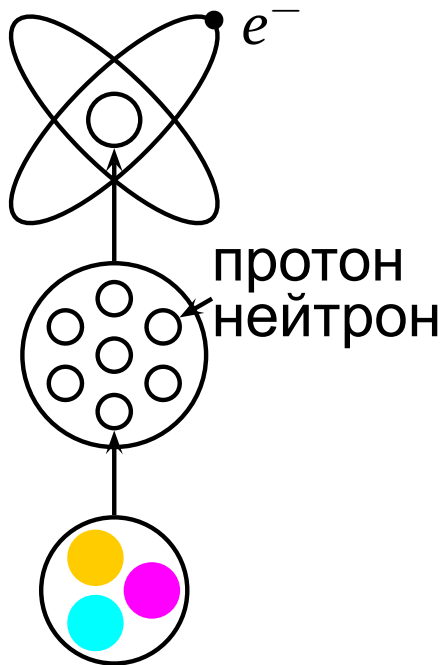
Точность – 0.1%, а часто гораздо лучше.

Стандартная модель физики частиц:

апрель 2013

ЛЕПТОНЫ

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



три семейства частиц

кварки

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

+ АНТИЧАСТИЦЫ

e^+ : позитрон, ...

$\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...

$\bar{u}$: антикварки, ...

+ фотон, глюоны, W , Z [+ гравитон] + **БОЗОН ХИГГСА**

Новая частица – бозон

Элементарные частицы имеют внутренний угловой момент, 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 $2 \cdot \hbar$

Свойства бозонов и фермионов сильно различаются.

Принцип Паули для фермионов: на одном уровне в атоме может находиться не более одного электрона с заданным направлением спина (всего два: спин вверх, спин вниз).

Для бозонов принцип Паули не действует. Много фотонов в одном состоянии – электромагнитная волна.

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: $m_t = 173 \text{ ГэВ}$

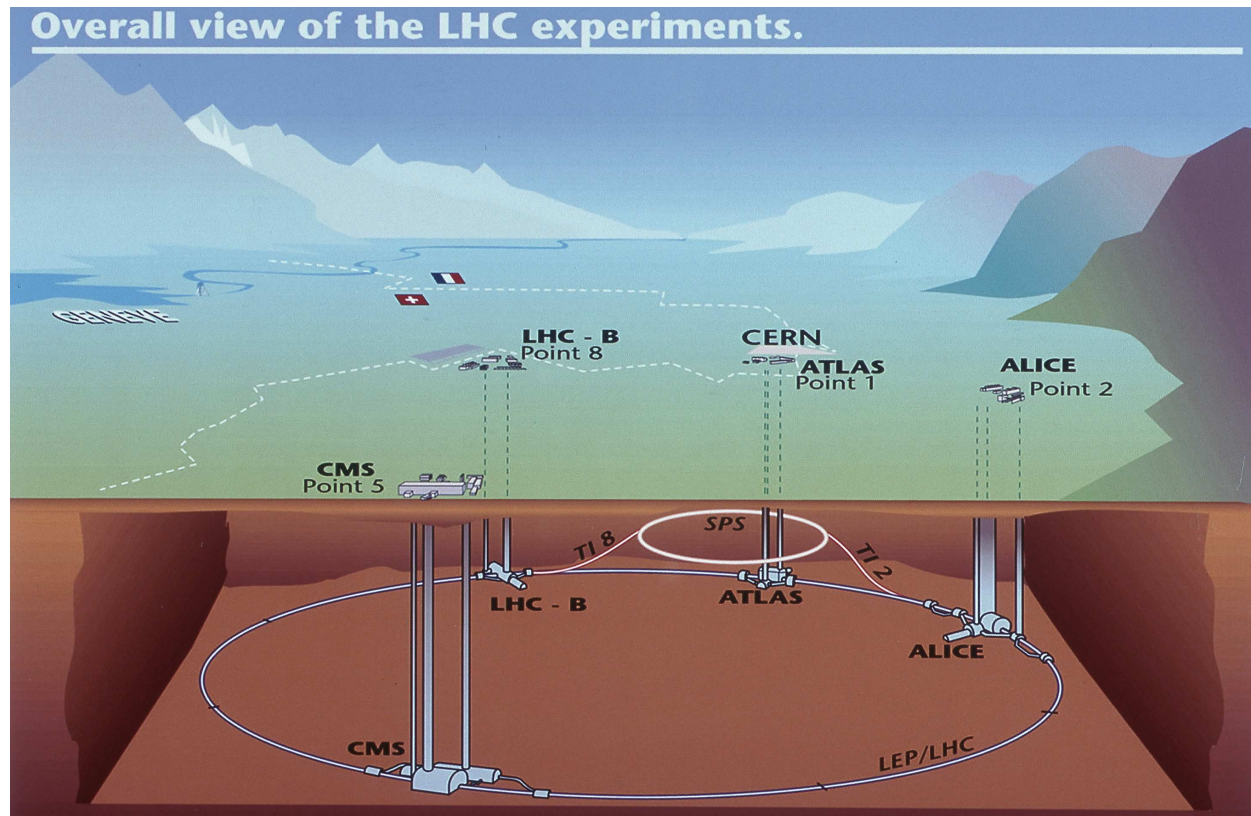
Масса новой частицы H : $m_H = 125 \text{ ГэВ}$
(точность измерений массы и других свойств H пока невысока)

Именно потому, что масса бозона Хиггса велика, для его открытия понадобился Большой адронный коллайдер (еще одна причина — бозон Хиггса редко рождается)

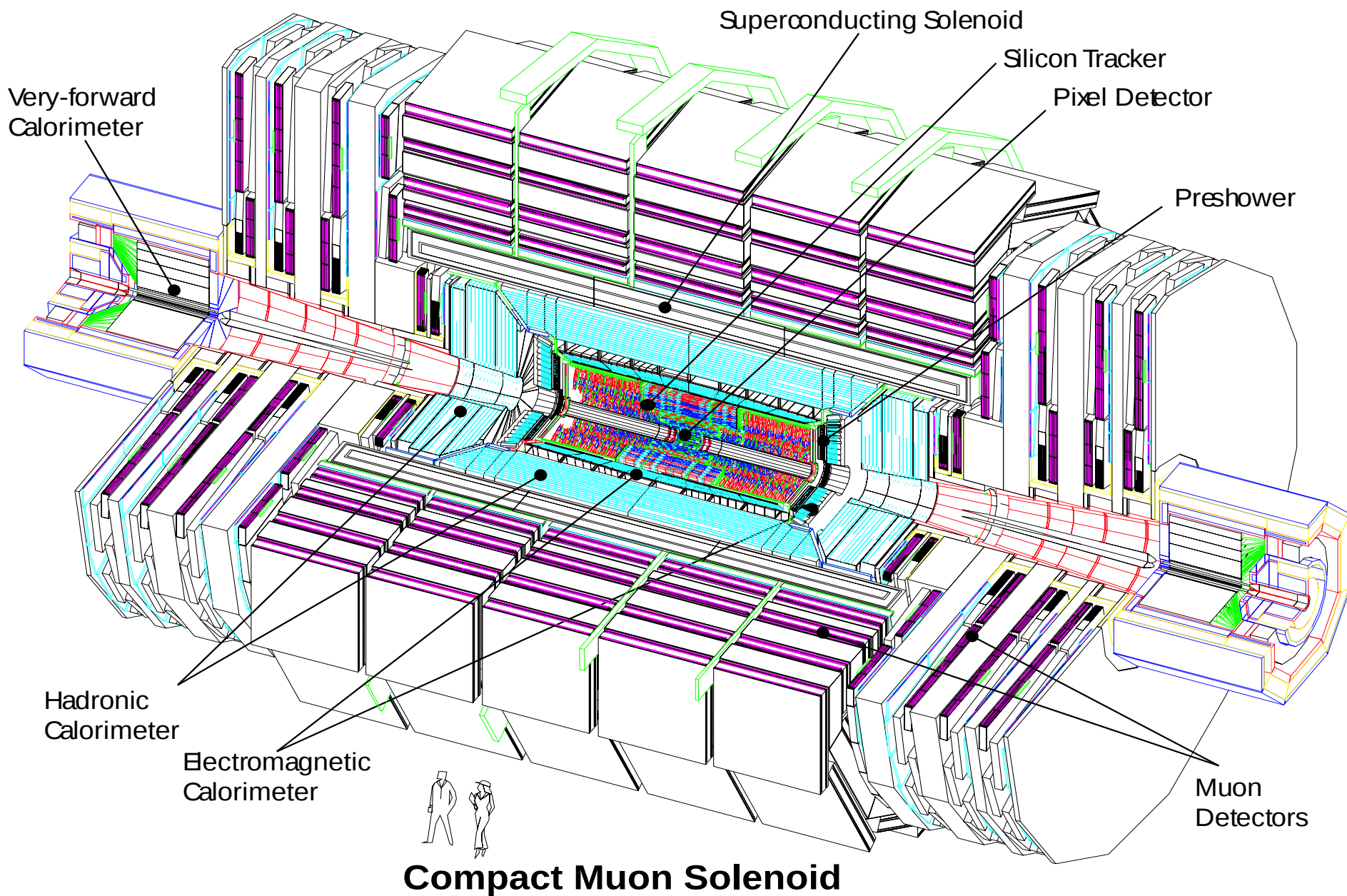
Бозон Хиггса – нейтральный, нет электрического заряда.

ЛНС/БАК

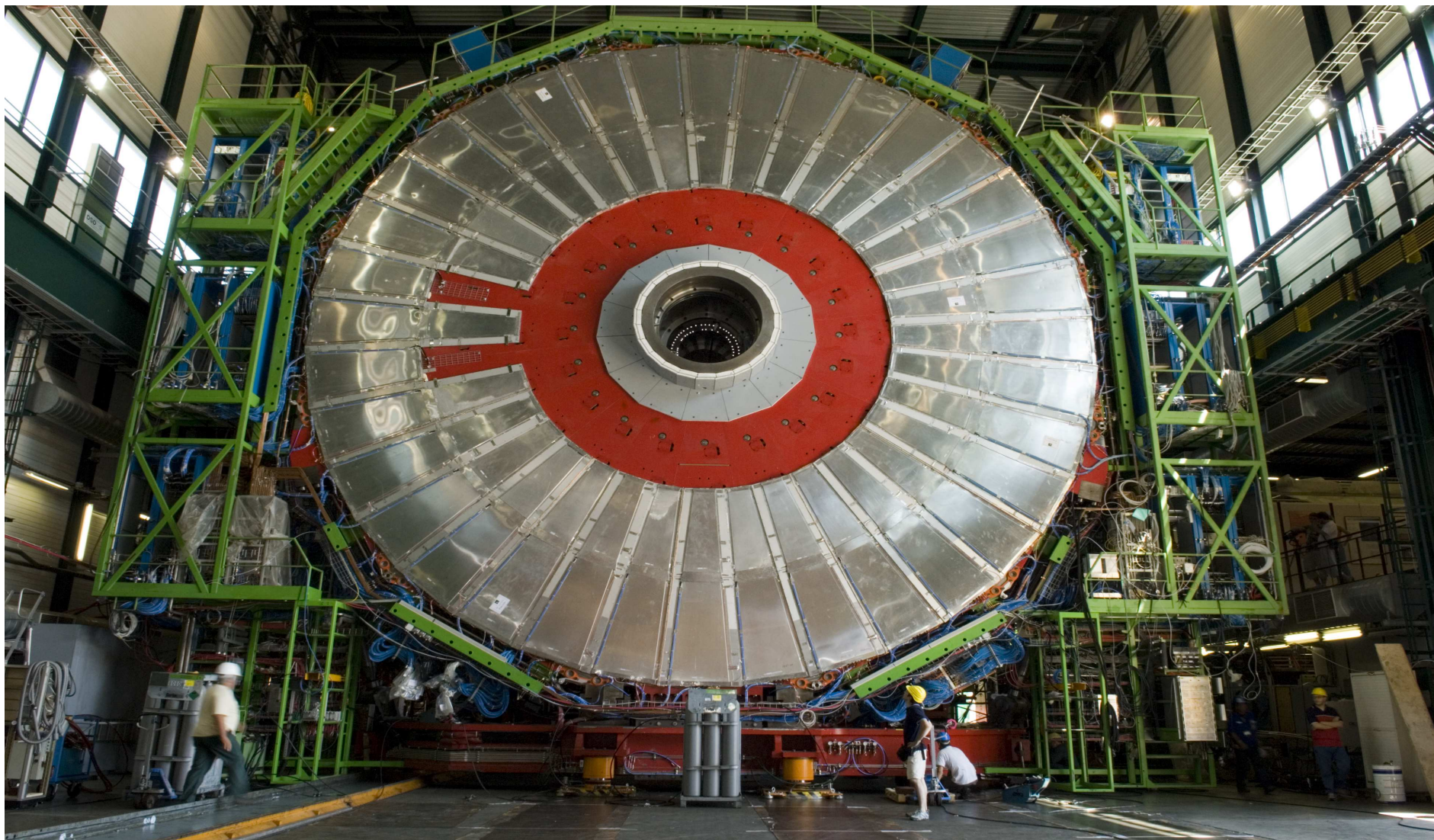
- Длина кольца – 27 км
- 1600 сверхпроводящих магнитов
- Столкновения протонов с энергиями 4×4 ТэВ в 2012 г.
Проектная энергия 7×7 ТэВ, в сумме 14 ТэВ
- Четыре детектора



CMS



CMS с торца



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



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

$$\tau_H = 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ секунд}, \quad c\tau_H = 5 \cdot 10^{-12} \text{ см}.$$

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

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

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

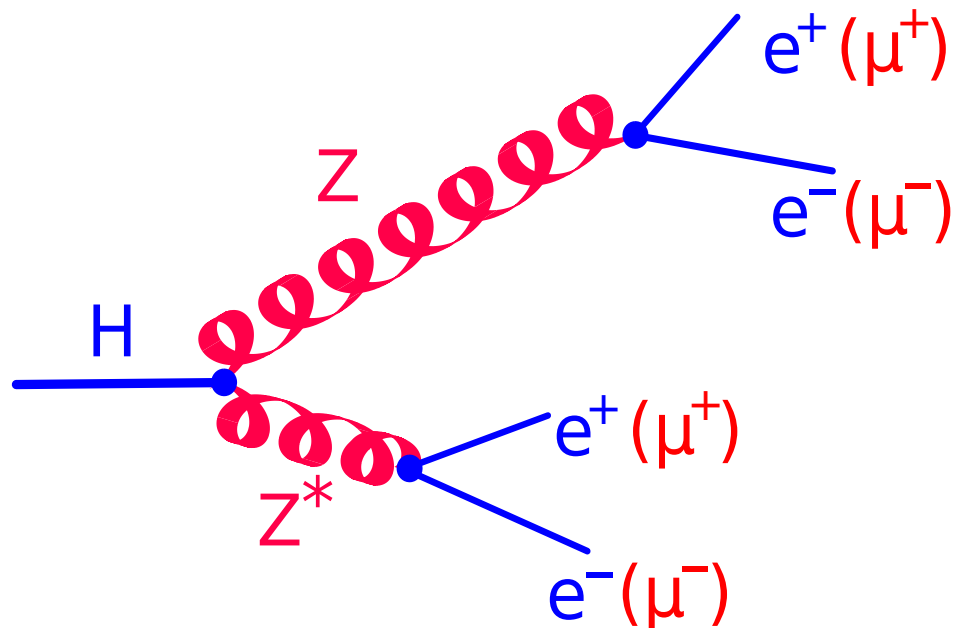
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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

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

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

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



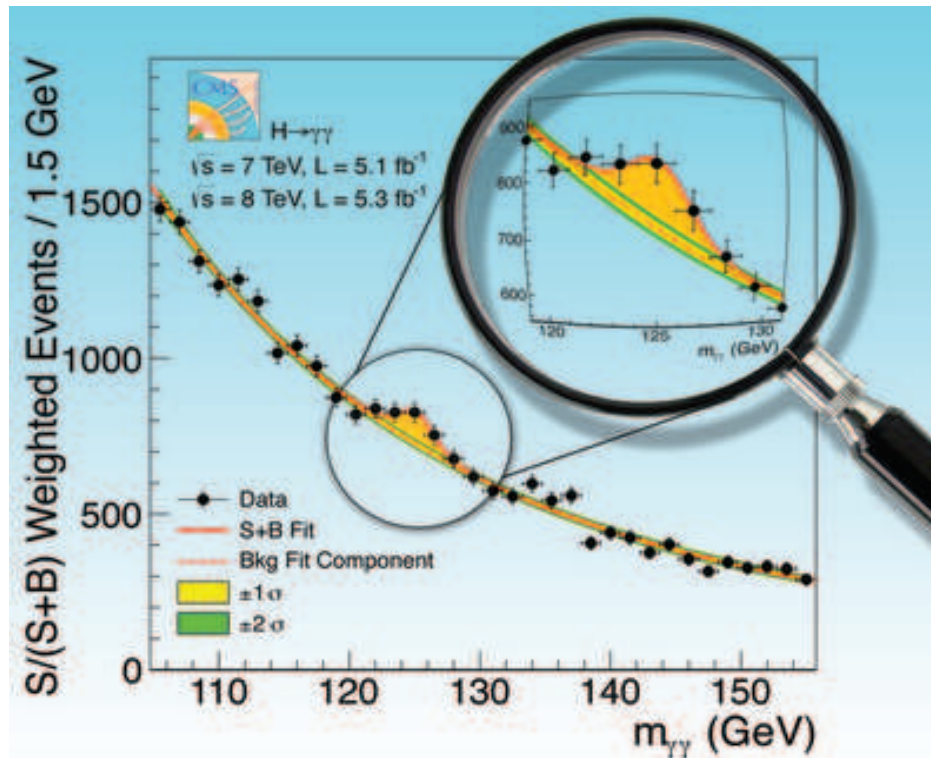
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Сохранение энергии и импульса в распаде $H \rightarrow \gamma\gamma \Rightarrow$
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

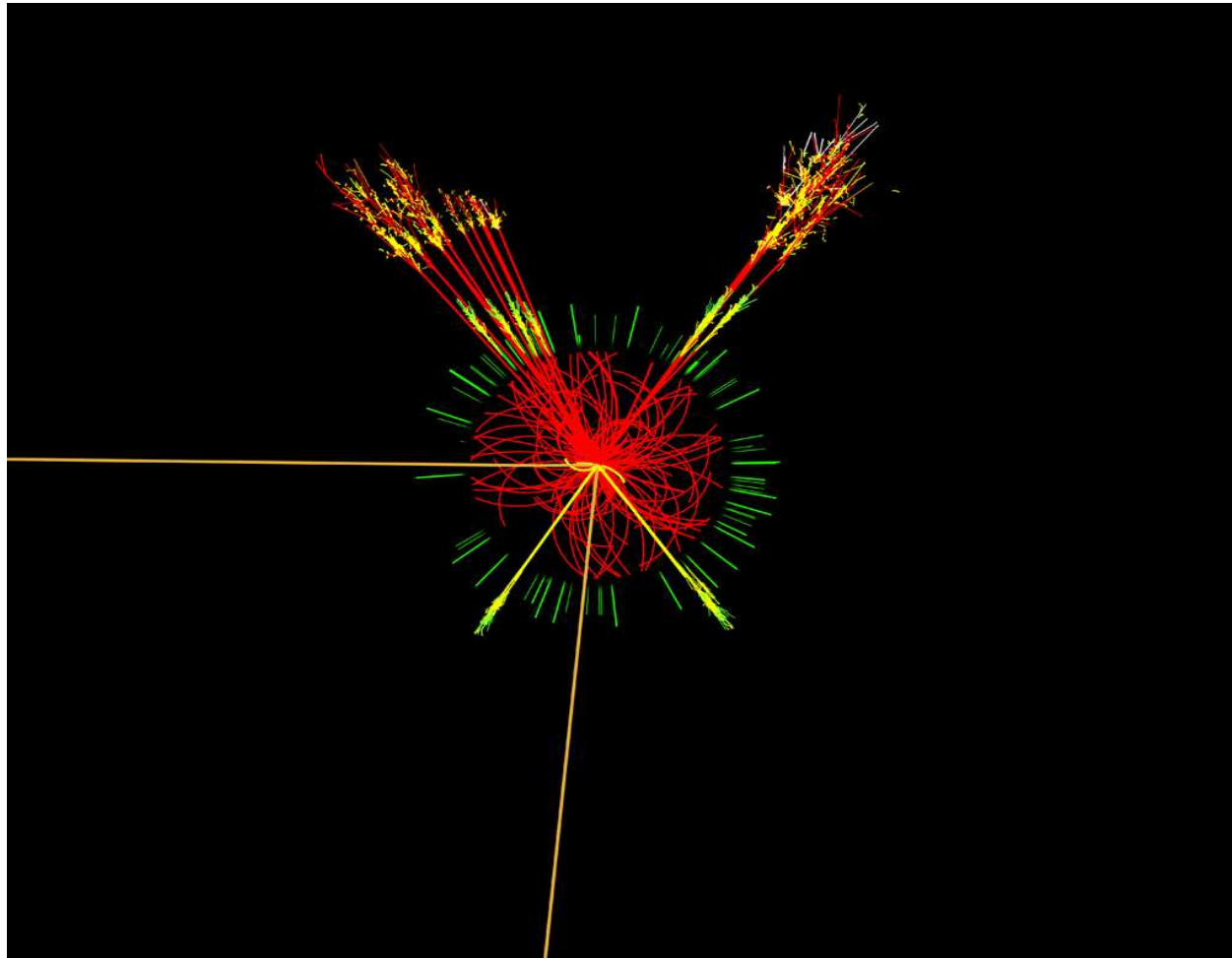


CMS

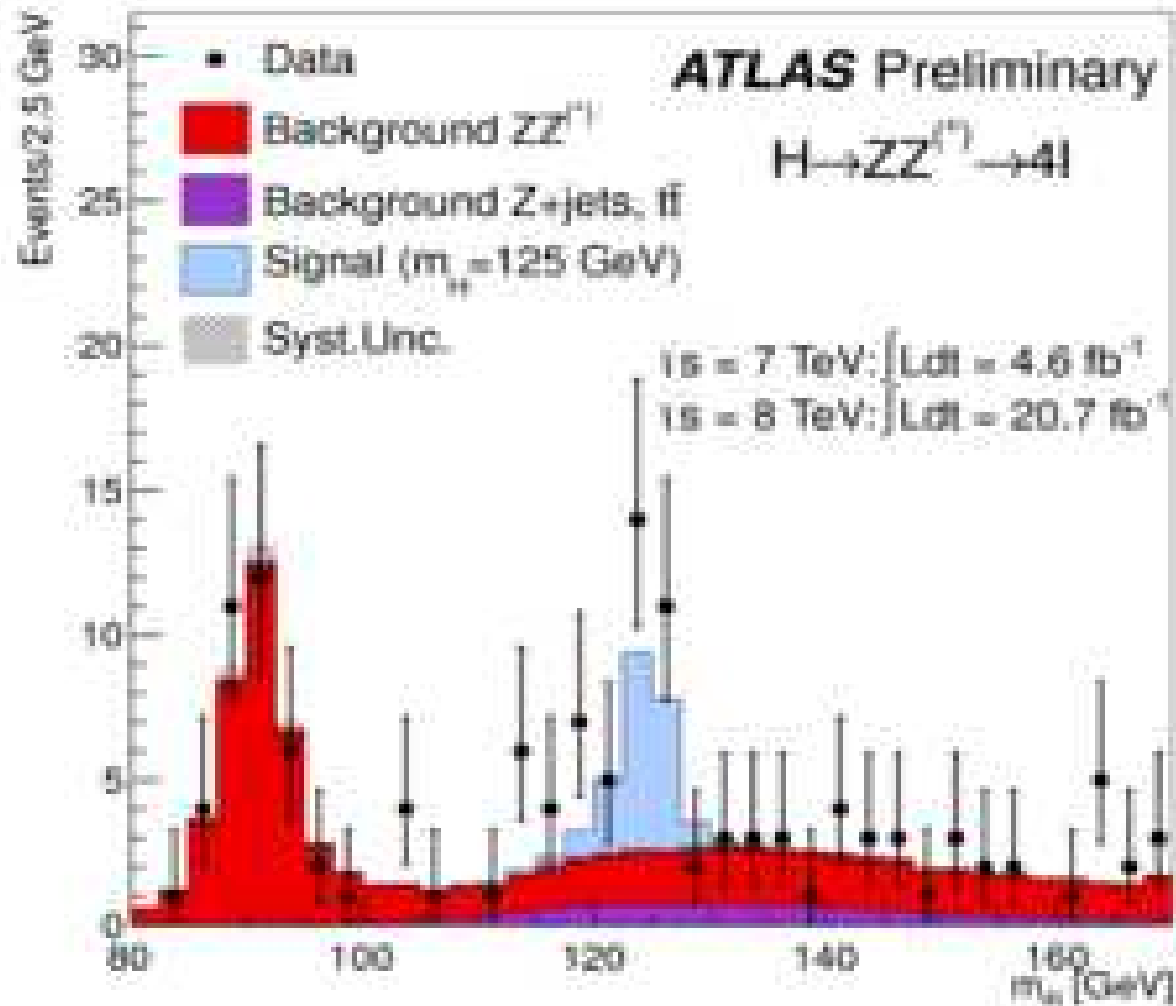
$$H \rightarrow 4l$$

Событие с рождением бозона Хиггса и распадом

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



$$H \rightarrow 4l$$



ATLAS

Новая частица – бозон

Распад $H \rightarrow \gamma\gamma$.

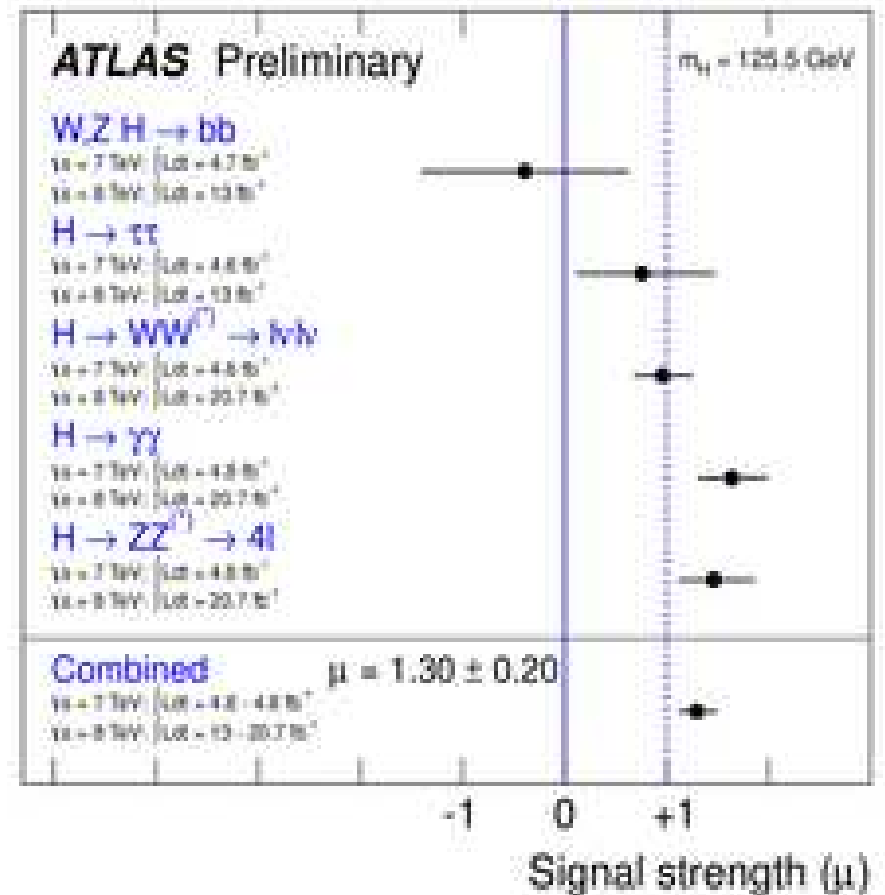
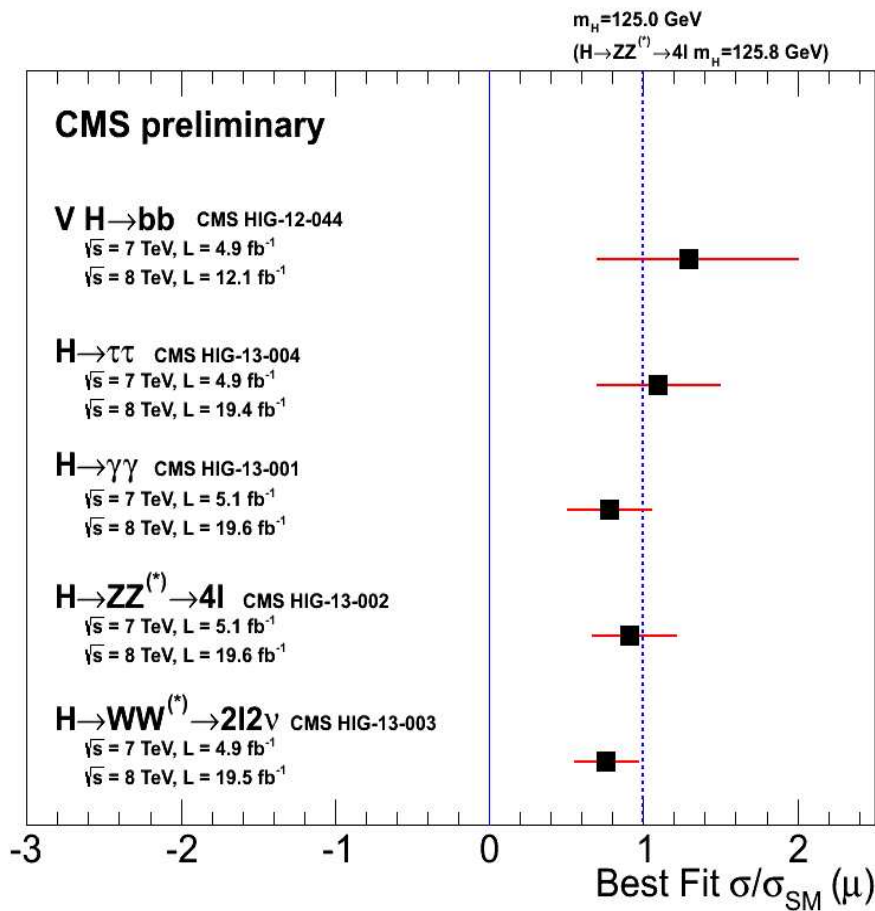
Сохранение углового момента $\Rightarrow$ спин H равен 0.

Спин $1 \cdot \hbar$ запрещен теоремой Ландау

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

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

Известно пока не очень много.
Точность не очень высока.
То, что известно, согласуется со Стандартной моделью



Отношение измеренного числа событий к предсказаниям
Стандартной модели

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

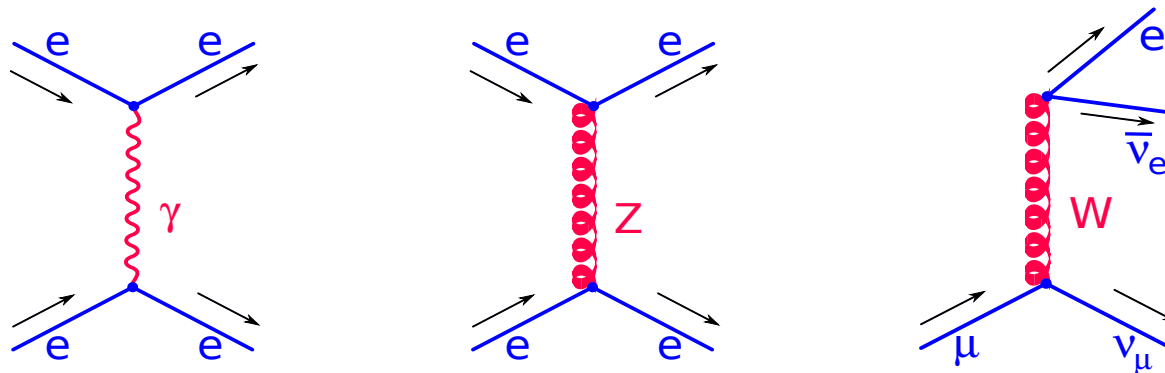
- Запрещает фотону иметь массу.
- Приводит к сохранению электрического заряда
- Близкие аналоги фотона: W - и Z -бозоны

Но они имеют массы!

$$m_W = 80 \text{ ГэВ} , \quad m_Z = 91 \text{ ГэВ}$$

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.

Взаимодействие электрона с $Z \iff Z$ -заряд электрона

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

Мир с безмассовыми электронами:

- Правый электрон (спин вдоль импульса, спиральность $+$), **левый** электрон (спин против импульса, спиральность $-$) – **разные частицы**. Взаимодействия с γ, Z, W не меняют спиральности.
- Z-заряды **левого** и **правого** электрона **разные**
- С W взаимодействует только **левый** электрон.

Для массивного электрона такое невозможно:
левый электрон в одной системе отсчета = **правый** в другой

Запрет на массу электрона и всех других фермионов
(μ , τ , кварков)

А массы есть!

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

В чем дело?

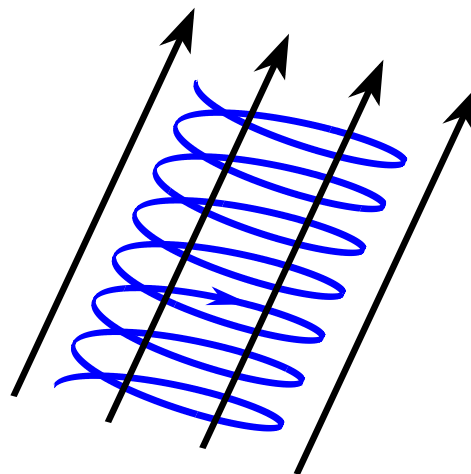
Нарушенные симметрии

- Законы сохранения и симметриейные 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.

Сходство и различие

Физика внутри магнита

Физика микромира

Симметрия вращений
пространства

Внутренняя симметрия

Нарушена в
образце железа

Нарушена в вакууме

Нарушение магнитным
полем $\vec{B}$

Нарушение новым
полем H

поле $\vec{B}$ – вектор,
выделяет направление
в пространстве,
квант имеет спин $1 \cdot \hbar$

поле H – скаляр,
не выделяет направления
в пространстве,
квант имеет спин 0

Итак,

симметрии теории микромира

запрещают элементарным частицам иметь массы,

а новое поле нарушает эти симметрии

и обеспечивает существование масс частиц.

Энглер и Браут ' 1964;
Хиггс ' 1964

Внутренняя трудность теории: проблема масштаба энергий

- Энергетические масштабы взаимодействий

- сильные (связывают кварки в протоне)

масса протона $m_p \sim 1$ ГэВ

- взаимодействия W , Z -бозонов (слабые)

$m_W, m_H \sim 100$ ГэВ

- гравитационные

$M_{Pl} \sim 10^{19}$ 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 .

Хуже того:

- На свойства элементарных частиц и состоящих из них систем оказывает влияние **вакуум**.

Соотношение неопределенностей квантовой физики:
 $\Delta t \cdot \Delta E \sim \hbar$. В вакууме постоянно рождаются и уничтожаются **виртуальные частицы**

Взаимодействия с ними приводят к “**радиационным поправкам**”. Известный пример — лэмбовский сдвиг энергий электронов в атомах $E = mc^2 \implies$ поправка к массе атома

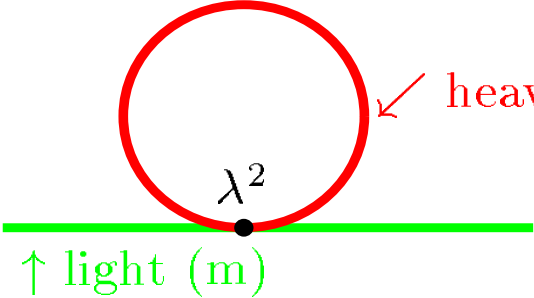
В электродинамике эффекты невелики (но измерены с фантастической точностью).

- А как насчет масс элементарных частиц?

Почти все радиационные поправки к массам запрещены симметриями.

Кроме массы бозона Хиггса!

В Стандартной модели m_H получает ОГРОМНЫЕ радиационные поправки


$$\Rightarrow \delta m^2 \sim \underbrace{\lambda^2}_{10^2} \cdot \underbrace{M^2}_{10^{-1}} \cdot \underbrace{1}_{10^{16}}$$

- Они стремятся подтянуть m_H к M_{Pl}
- 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.

Распространенная точка зрения:

“Новая физика” на масштабе энергий несколько ТэВ
(но не десяток ТэВ!)

Какая новая физика? – область гипотез.

Сценарий 1: суперсимметрия

Суперсимметрия:

симметрия между бозонами (целый спин) и фермионами (полуцелый спин)

- Все частицы Стандартной модели имеют суперпартнёров с массами в области сотен ГэВ — нескольких ТэВ

кварк ($s = 1/2$) $\iff$ скварк ($s = 0$)

электрон ($s = 1/2$) $\iff$ сэлектрон ($s = 0$)

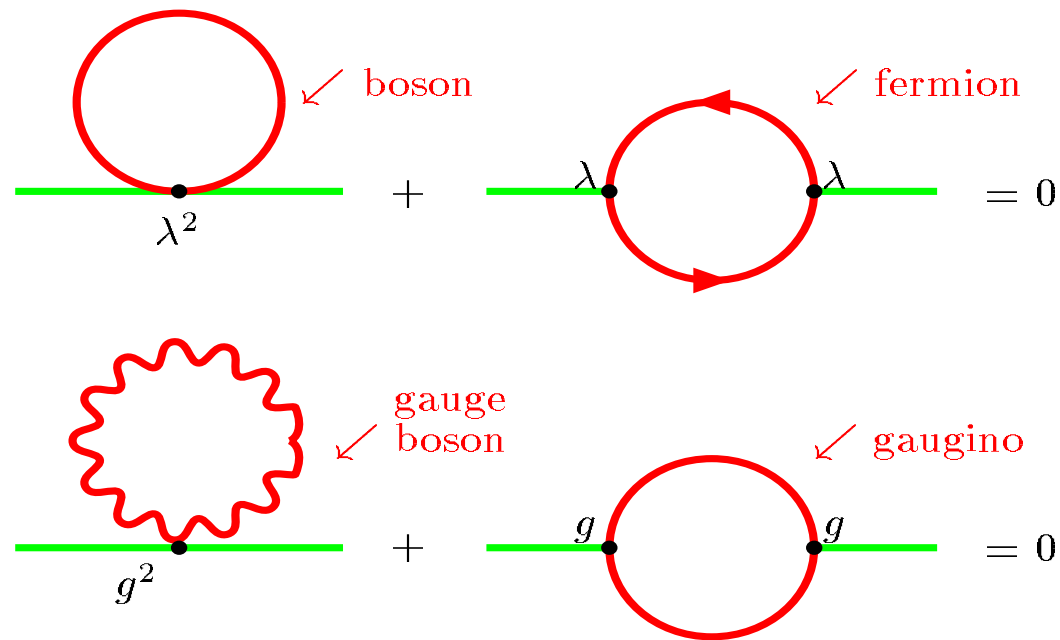
фотон ($s = 1$) $\iff$ фотино ($s = 1/2$)

глюон ($s = 1$) $\iff$ глюино ($s = 1/2$)

- Все эти новые частицы должны рождаться на ЛНС/БАК

Правда, пока не рождаются. Не хватает энергии?

Суперсимметрия приводит к сокращению больших радиационных вкладов в m_H :



Что и требуется

Дополнительный плюс суперсимметрии

Есть кандидат на роль частицы тёмной материи

- Суперпартнёры рождаются и исчезают парами
- Легчайший суперпартнёр стабилен
- Во многих моделях он электрически нейтрален (нейтралино, например, фотино)
- Именно это требуется от частицы тёмной материи.

Сценарий 2: составной бозон Хиггса

С теоретической точки зрения поле Энглера–Браута–Хиггса — не обязательно элементарное.

- 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) $\longleftrightarrow$ 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**

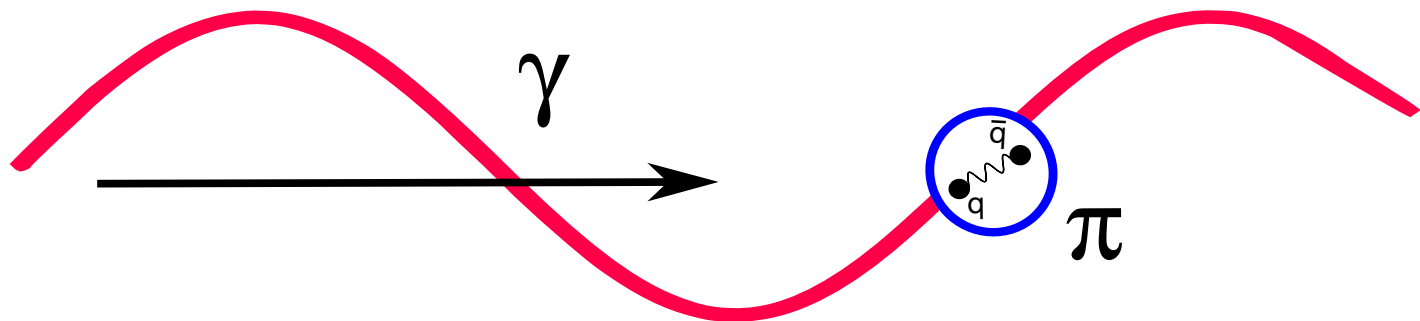
В физике частиц составные скалярные поля известны.

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

$\Delta p \Delta x \geq \hbar \implies$ Чтобы увидеть структуру на малом размере,
нужны большие импульсы и энергии.

[Структуру атома с помощью света (фотонов низких энергий) не разрешишь. Нужны электроны (или фотоны) высоких энергий $\implies$ опыт Резерфорда.]

π -мезон выглядит при низких энергиях как точечный.



Еще сценарии

- Расширенный хиггсовский сектор $\Rightarrow$ несколько бозонов Хиггса
- Дополнительные измерения пространства
- Новые свойства гравитационных взаимодействий

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

Во всех сценариях новой физики свойства открытого бозона Хиггса не совсем такие, как в Стандартной модели

“Будем искать!”

- Прямые поиски новой физики на LHC/БАК

2014 год – начало работы на полную энергию 13 – 14 ТэВ

- Изучение свойств бозона Хиггса

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

Программа исследований
свойств новой частицы
на LHC/БАК

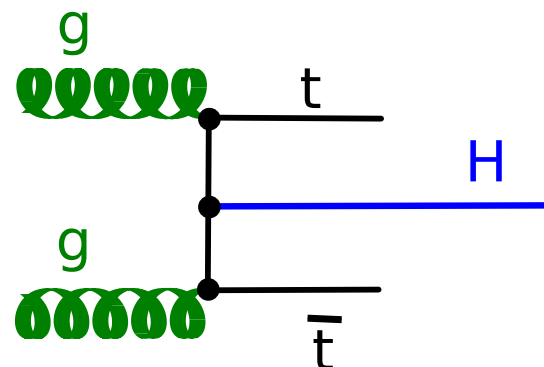
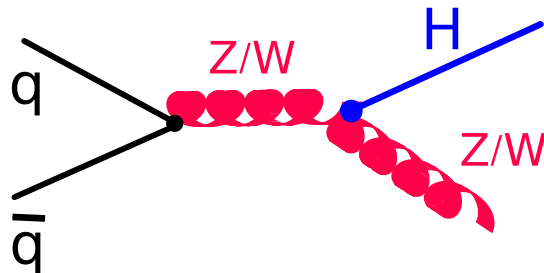
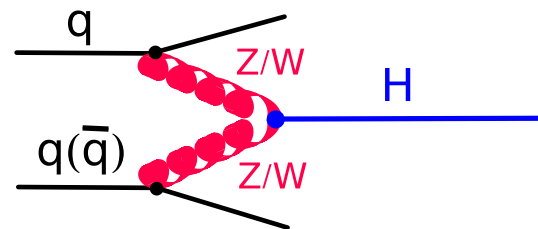
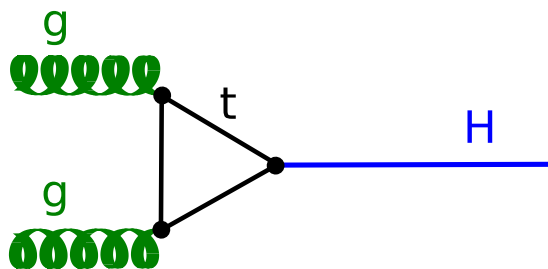
● Распады:

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

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

pp -коллайдеры — машины открытий.

e^+e^- -коллайдеры — машины для прецизионных исследований.

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