
ОТКРЫТИЕ БОЗОНА ХИГГСА: ОТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ПРЕДПОСЫЛКИ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ПОДТВЕРЖДЕНИЮ

ПОДГОТОВИЛА: ИВАНОВА О.В., М24-114

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ 1960-Х ГОДОВ.

Развитие калибровочных теорий:

- К 1960-м годам сформировалась концепция, что фундаментальные взаимодействия описываются калибровочными теориями, построенными на локальных симметриях
- Квантовая электродинамика (КЭД) служила убедительным примером успешной перенормируемой абелевой калибровочной теории
- Естественным шагом стало стремление обобщить эти методы на слабое взаимодействие

Появление новых моделей:

- Это привело к созданию калибровочных моделей на основе групп $SU(2)$ или $SU(2) \times U(1)$
- Возникли попытки построения единой теории электрослабых взаимодействий
- Однако появилась фундаментальная теоретическая проблема, связанная с массами переносчиков взаимодействия

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА МАСС

Запрет массовых членов в калибровочных теориях:

- Член вида $m^2 A^\mu A_\mu$ явно нарушает калибровочную инвариантность, так как не инвариантен относительно калибровочных преобразований
- Такое нарушение делает теорию неперенормируемой, то есть не позволяет устранить расходимости в квантовых поправках
- Формально требует безмассовости калибровочных бозонов для сохранения симметрии

Экспериментальные противоречия:

- Слабые взаимодействия имеют конечный радиус действия, что указывает на массивность их переносчиков
- Требуют существования массивных векторных бозонов (W^\pm , Z^0) с массами порядка десятков ГэВ
- Это прямо противоречило формальному требованию безмассовости калибровочных бозонов

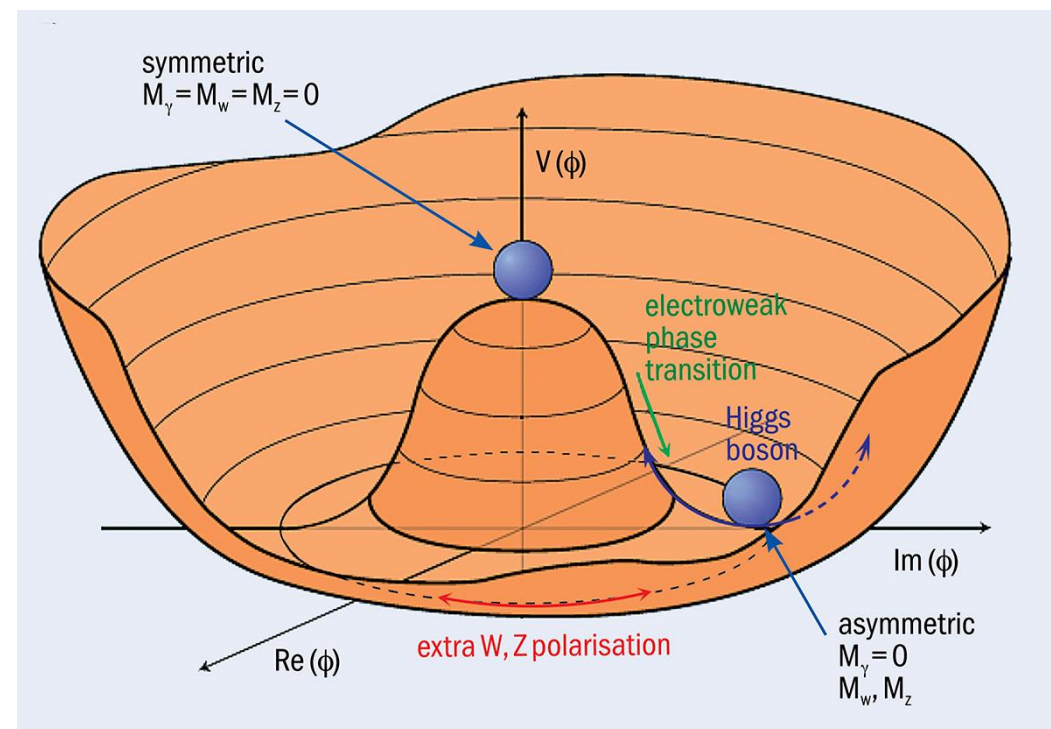
Вывод: Требовался нетривиальный механизм генерации масс, сохраняющий калибровочную симметрию на уровне лагранжиана

РЕШЕНИЕ: МЕХАНИЗМ ХИГГСА (1964)

Исторический контекст и предпосылки:

- Явление спонтанного нарушения симметрии (СНС) было хорошо известно из физики конденсированного состояния, особенно из теории сверхпроводимости
- Н. Намбу и Дж. Голдстоун перенесли эту концепцию в квантовую теорию поля
- Теорема Голдстоуна утверждала, что СНС в релятивистской теории обязательно приводит к появлению безмассовых скалярных частиц (голдстоунов)

Возникшая проблема: Голдстоуновские бозоны не наблюдались в экспериментах по слабым взаимодействиям, что создавало новое теоретическое противоречие



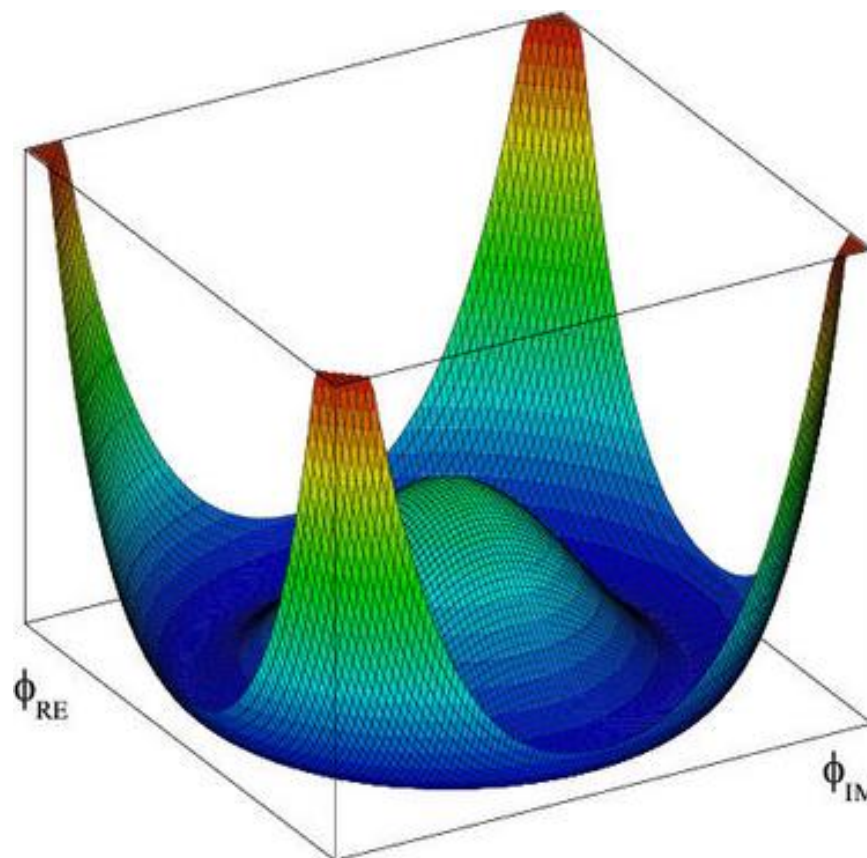
МЕХАНИЗМ ЭНГЛЕРА-БРАУТА-ХИГГСА

Прорыв 1964 года: Независимо друг от друга три группы исследователей предложили решение:

- Питер Хиггс
- Франсуа Энглерт и Роберт Браут
- Джеральд Гуральник, Карл Хаген и Том Киббл

Предложенный механизм позднее получил название **механизма Энглера-Браута-Хиггса** (ЕВН-механизм)

Суть механизма: Динамическая генерация масс через спонтанное нарушение симметрии, при котором массы возникают как следствие взаимодействия полей с хиггсовским конденсатом



РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЗМА ХИГГСА

Основные следствия механизма:

- Калибровочные бозоны приобретают массу без явного нарушения калибровочной симметрии на уровне лагранжиана
- Теория остается перенормируемой, что позволяет проводить последовательные квантовые вычисления
- Голдстоуновские моды превращаются в продольные компоненты массивных векторных бозонов, обеспечивая им необходимые три степени свободы
- В физическом спектре частиц появляется одна новая скалярная частица - бозон Хиггса

ПОТЕНЦИАЛ "МЕКСИКАНСКАЯ ШЛЯПА"

Математическая формулировка модели:

- Рассматривается комплексное скалярное поле ϕ , обладающее глобальной или локальной симметрией $U(1)$
- Лагранжиан системы: $\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - V(\phi)$
где $D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu$ - калибровочно-ковариантная производная
- Потенциал скалярного поля имеет вид: $V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$.

Анализ двух принципиально различных режимов:

- При $\mu^2 > 0$: симметрия теории сохраняется, единственный минимум потенциала находится при $\phi = 0$
- При $\mu^2 < 0$: симметрия спонтанно нарушается, минимум потенциала достигается при ненулевом значении поля

$$|\phi_0| = \sqrt{-\frac{\mu^2}{2\lambda}}.$$

НАРУШЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИММЕТРИИ

Детальный процесс нарушения симметрии:

- В теории с локальной $U(1)$ калибровочной симметрией при $\mu^2 < 0$
- Одна из степеней свободы скалярного поля (соответствующая фазе) поглощается калибровочным полем
- Голдстоуновский бозон, который должен был бы появиться по теореме Голдстоуна, исчезает из физического спектра

Конкретные физические следствия:

- Калибровочное поле A_μ приобретает массу $m_A = g|\phi_0|$; где g - константа связи
- Появляется продольная компонента у векторного бозона
- В спектре физических частиц остается одна скалярная степень свободы - хиггсовский бозон

Принципиальная новизна: Впервые предложен механизм генерации масс, который не нарушает калибровочную симметрию

ВКЛАД ТРЕХ ГРУПП (1964)

Детальный анализ работы Хиггса:

- Впервые явно продемонстрировала существование новой физической скалярной частицы, возникающей как квант возбуждения относительно вакуумного ожидания
- Четко указала, что механизм спонтанного нарушения симметрии в калибровочных теориях не приводит к появлению безмассовых мод Голдстоуна
- Тем самым решила ключевую проблему перенормируемости калибровочных теорий с массами

Анализ работы Энглера и Браута:

- Основное внимание уделено собственно механизму генерации масс калибровочных полей
- Показала, что калибровочные поля естественным образом приобретают массу в фазе с нарушенной симметрией
- Дала полное описание процесса "поглощения" голдстоуновских мод

ВКЛАД ТРЕХ ГРУПП (1964)

Исследование Гуральника-Хагена-Киббла:

- Развила наиболее общую теорию спонтанного нарушения калибровочных симметрий
- Подтвердила универсальность, общность и неизбежность предложенного механизма
- Предоставила наиболее строгое математическое описание

Совместный вклад: Создана полная теоретическая основа, без которой современная Стандартная модель не могла бы быть построена

РОЖДЕНИЕ БОЗОНА ХИГГСА

Процедура калибровочного фиксирования:

- После выбора конкретной калибровки (например, унитарной калибровки) скалярное поле можно записать в виде

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} (v + h(x)) ,$$

- Здесь $v = |\phi_0|$ - величина вакуумного среднего значения, определяемая параметрами потенциала
- $h(x)$ - физическое скалярное возбуждение относительно вакуума
- Масса скалярной частицы: $m_H = \sqrt{2\lambda} v$.

Таким образом, теория предсказывает существование новой фундаментальной частицы — **бозона Хиггса**, который может взаимодействовать с другими частицами пропорционально их массам

ЭЛЕКТРОСЛАБАЯ ТЕОРИЯ ГЛЭШОУ-ВАЙНБЕРГА-САЛАМА

Теоретическая основа и исторический контекст:

- Модель Глэшоу-Вайнберга-Салама (GWS) основана на локальной калибровочной симметрии $SU(2)_I \times U(1)_Y$
- Кварки и лептоны организованы в левые дублеты и правые синглеты
- Теория была предложена в период 1961-1967 годов как попытка объединения электромагнитного и слабого взаимодействий

Фундаментальная проблема первоначальной формулировки:

- Калибровочные бозоны слабого взаимодействия W^\pm и Z^0 должны обладать большими массами для объяснения короткодействующего характера слабых сил
- Фотон как переносчик электромагнитного взаимодействия должен оставаться строго безмассовым
- Явное введение массовых членов нарушало бы локальную калибровочную симметрию и делало теорию неперенормируемой

ХИГГСОВСКИЙ ДУБЛЕТ В СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Структура и свойства поля Хиггса:

- Для реализации ЕВН-механизма вводится комплексное скалярное поле, преобразующееся как дублет относительно $SU(2)_1$
- Поле имеет слабый гиперзаряд $Y = 1$ и записывается в виде: $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$.
- Состоит из двух комплексных скаляров, что дает четыре вещественные степени свободы

Потенциал Хиггса и его минимизация: $V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$.

- Потенциал имеет стандартную форму перевернутой "мексиканской шляпы":
- При $\mu^2 < 0$ минимум потенциала достигается при ненулевом вакуумном среднем значении

ХИГГСОВСКИЙ ДУБЛЕТ В СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Вакуумное среднее и нарушение симметрии:

- $\langle \Phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \quad v = \sqrt{-\frac{\mu^2}{\lambda}}.$ - фундаментальный масштаб электрослабого нарушения
- Происходит нарушение симметрии: $SU(2)_I \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$
- Это точно соответствует наблюдаемой структуре взаимодействий: три массивных бозона (W^+, W^-, Z^0) и один безмассовый (фотон)

МАССЫ КАЛИБРОВОЧНЫХ БОЗОНОВ

Процесс смешивания калибровочных полей:

- После подстановки вакуумного среднего в кинетический член лагранжиана $(D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi)$,
- Происходит нетривиальное смешивание калибровочных полей
- В результате диагонализации массовой матрицы появляются физические состояния

Физические калибровочные бозоны:

Вычисление масс бозонов:

$$m_W = \frac{1}{2}gv, \quad m_Z = \frac{1}{2}\sqrt{g^2 + g'^2}v, \quad m_A = 0.$$

$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(W_\mu^1 \mp iW_\mu^2), \quad (1)$$

$$Z_\mu = \cos \theta_W W_\mu^3 - \sin \theta_W B_\mu, \quad (2)$$

$$A_\mu = \sin \theta_W W_\mu^3 + \cos \theta_W B_\mu, \quad (3)$$

- Соотношение: $\frac{m_W}{m_Z} = \cos \theta_W$.

где θ_W — угол Вайнберга.

ФИЗИЧЕСКИЙ БОЗОН ХИГГСА В СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Представление хиггсовского поля после нарушения симметрии:

- После выбора калибровки единичного заряда хиггсовский дублет принимает вид:
$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix},$$
- $h(x)$ представляет скалярное поле, соответствующее физическому бозону Хиггса
- Масса бозона Хиггса: $m_H = \sqrt{2\lambda} v.$
- При известном значении $v \approx 246$ ГэВ масса Хиггса определяется исключительно параметром самодействия λ

Экспериментальная сложность:

- Параметр λ не фиксируется теорией, делая массу Хиггса свободным параметром
- Это существенно осложняло экспериментальные поиски, так как не было априорного предсказания массы
- Требовался поиск в широком диапазоне возможных масс

ЗНАЧЕНИЕ РАБОТ ХОФТА И ВЕЛЬТМАНА (1971-1972)

Ключевой теоретический вопрос, остававшийся открытым:

- Является ли теория с массами, возникающими через спонтанное нарушение симметрии, математически самосогласованной на квантовом уровне?

Фундаментальный вклад Хофта и Вельтмана:

- В работах 1971-1972 годов Герард Хофт и Мартинус Вельтман доказали ренормализуемость неабелевых калибровочных теорий с спонтанным нарушением симметрии
- Доказательство охватывало электрослабую теорию с механизмом Хиггса
- Это устранило последнее серьезное теоретическое возражение против модели

Историческое значение доказательства:

- Доказательство ренормализуемости сделало модель Глэшоу–Вайнберга-Салама полноценной физической теорией, предсказывавшей не только структуру взаимодействий, но и точные значения масс и сечений.

ЗАВЕРШЕННАЯ СТРУКТУРА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Ключевые особенности электрослабой теории после включения ЕВН-механизма:

- Единая калибровочная симметрия $SU(2)_I \times U(1)_Y$, объединяющая слабые и электромагнитные взаимодействия
- Полное и корректное описание всех известных слабых и электромагнитных процессов
- Массы W и Z бозонов возникают динамически без явного нарушения калибровочной симметрии
- Строго безмассовый фотон и правильно определенная $U(1)_{em}$ калибровочная симметрия
- Предсказание существования новой фундаментальной скалярной частицы - бозона Хиггса

Этапы экспериментального подтверждения:

- Первые косвенные подтверждения на ускорителях SLAC и CERN в 1970-80-х годах
- Прямое открытие W и Z бозонов на CERN в 1983 году
- Окончательное подтверждение - **открытие бозона Хиггса на LHC в 2012 году**

РОЛЬ БОЗОНА ХИГГСА В СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Фундаментальная роль хиггсовского поля:

- Бозон Хиггса является квантовым возбуждением хиггсовского поля, которое приобретает ненулевое вакуумное среднее $v \approx 246$ ГэВ
- Через механизм спонтанного нарушения электрослабой симметрии это поле обеспечивает несколько ключевых функций

Конкретные функции хиггсовского механизма:

- Генерация масс W - и Z -бозонов через взаимодействие с калибровочными полями
- Объяснение масс лептонов и кварков через юкавские члены Лагранжиана
- Сохранение перенормируемости и внутренней самосогласованности теории
- Обеспечение правильного предела при высоких энергиях (унитарность)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАССУ ХИГГСА

Система теоретических ограничений, сложившаяся к 1980-м годам:

Нижний предел из требования стабильности вакуума:

- Требование стабильности или хотя бы метастабильности вакуума Вселенной накладывает серьезные ограничения $m_H \gtrsim 130$ ГэВ при учете вклада топ-кварка
- До точного измерения массы топ-кварка пределы были значительно более широкими

Верхний предел из требования унитарности:

- Для сохранения унитарности в процессах рассеяния слабых бозонов при высоких энергиях следовало жесткое ограничение: $m_H \lesssim 1$ ТэВ

Предсказания из ренормгрупповой эволюции (RGE):

- Приблизительные оценки указывали на область 100–300 ГэВ как наиболее естественную в СМ. Эта область соответствовала переходу между различными режимами поведения теории

Общий вывод: Диапазон возможных масс был очень широк: от $\mathcal{O}(10^2)$ до $\mathcal{O}(10^3)$ ГэВ, что требовало поиска в широкой области

ПЕРВЫЕ ПОИСКИ НА LEP (1989-2000)

Экспериментальная установка и методология:

- LEP (Large Electron-Positron Collider) - электрон-позитронный коллайдер в CERN с энергией центра масс ~ 200 ГэВ
- Основной канал рождения Хиггса: $e^+e^- \rightarrow Z^* \rightarrow ZH$

Стратегия поиска по финальным состояниям:

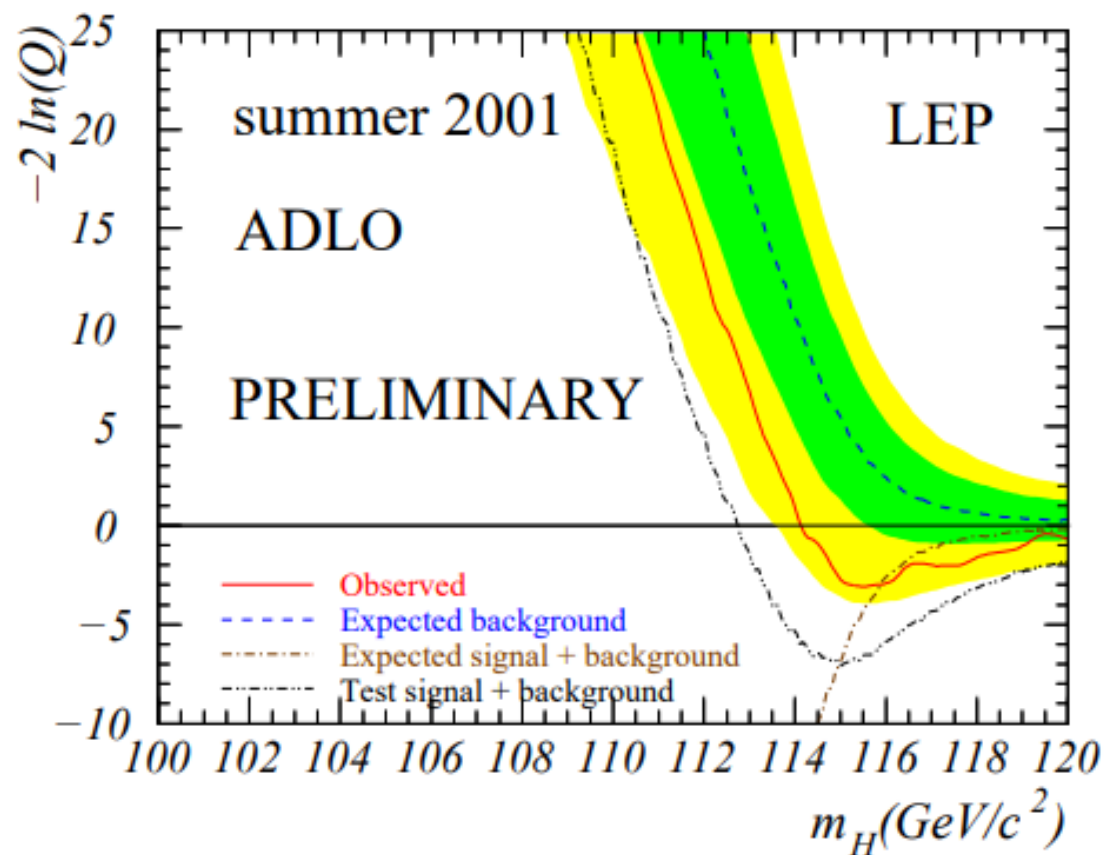
- $H \rightarrow b\bar{b}$ - доминирующий канал распада при низких массах Хиггса ($\sim 60\%$)
- $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ - лептонный канал с хорошим угловым разрешением
- Каналы с "пропавшей энергией" при распадах Z бозона
- Комбинированный анализ нескольких каналов для увеличения чувствительности



РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА НА LEP

Ключевые результаты к концу программы LEP:

- Установлен нижний предел: $m_H > 114.4$ ГэВ (95% CL)
- Интересно, что данные LEP показали небольшое ($\sim 2\sigma$) избыток событий вблизи 115 ГэВ, но статистика была недостаточной для открытия.



ПОИСКИ НА ТЕВАТРОНЕ (2001-2011)

Экспериментальная установка и особенности:

- Теватрон - протон-антипротонный коллайдер с энергией центра масс $\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ
- Два детектора: CDF (Collider Detector at Fermilab) и Do
- Значительно более высокая светимость по сравнению с LEP, но более сложные фоновые условия

Основной канал рождения Хиггса:

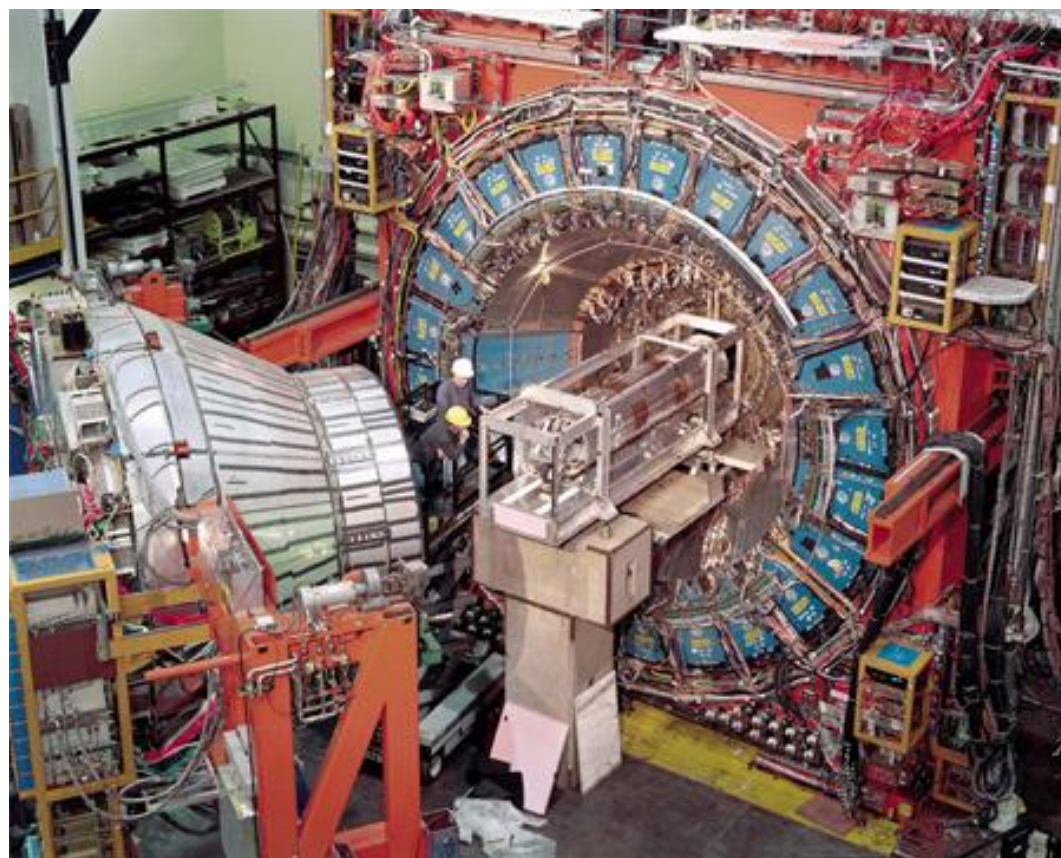
- Глюон-глюонное слияние ($gg \rightarrow H$) - доминирующий механизм рождения в протонных столкновениях

Стратегия поиска и ключевые сигнатуры:

- $H \rightarrow b\bar{b}$ в ассоциированном рождении с W/Z - основной канал при низких массах
- $H \rightarrow WW^*$ - канал с высокой статистикой, но сложной кинематикой
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ - редкий, но исключительно чистый канал с высоким разрешением по массе
- Комбинированный анализ данных двух детекторов для увеличения статистики

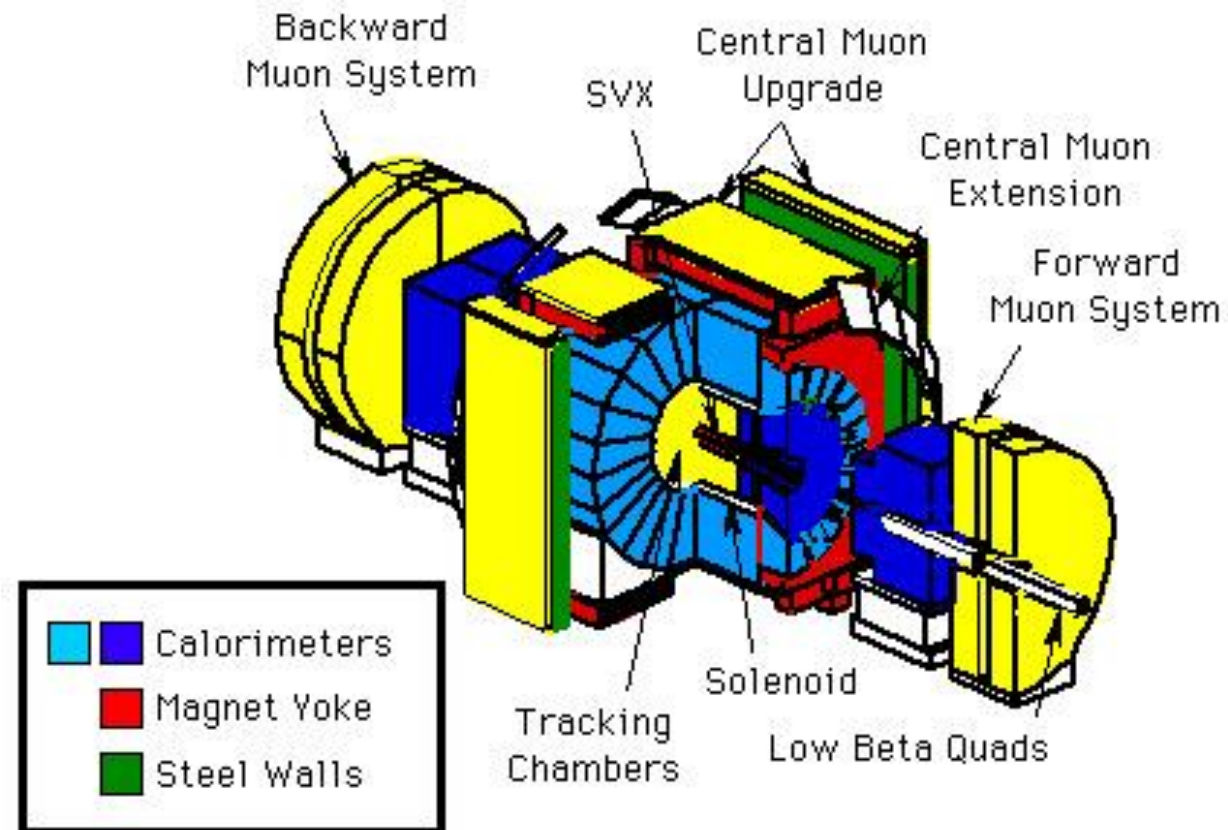
ЭКСПЕРИМЕНТ CDF

- Большая центральная камера трекинга
- Качественная b-теггинг система
- Высокое разрешение по энергии джетов
- Главный канал: $WH \rightarrow \ell \nu b \bar{b}$

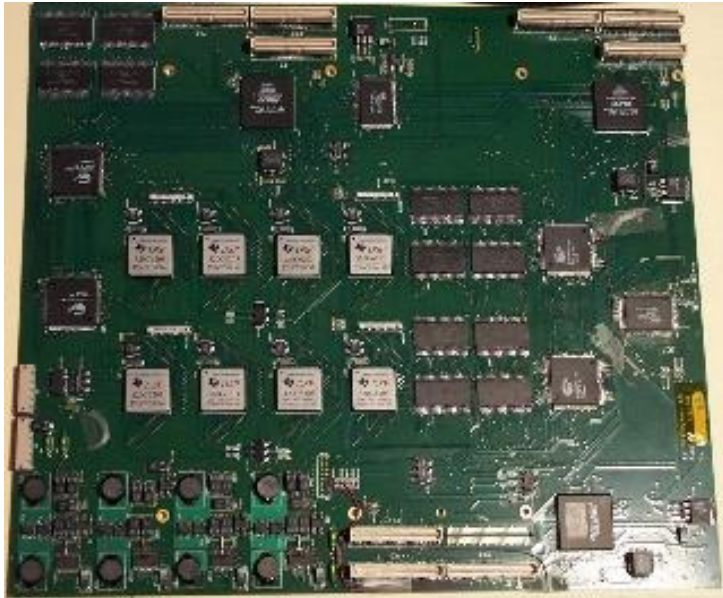


ЭКСПЕРИМЕНТ CDF

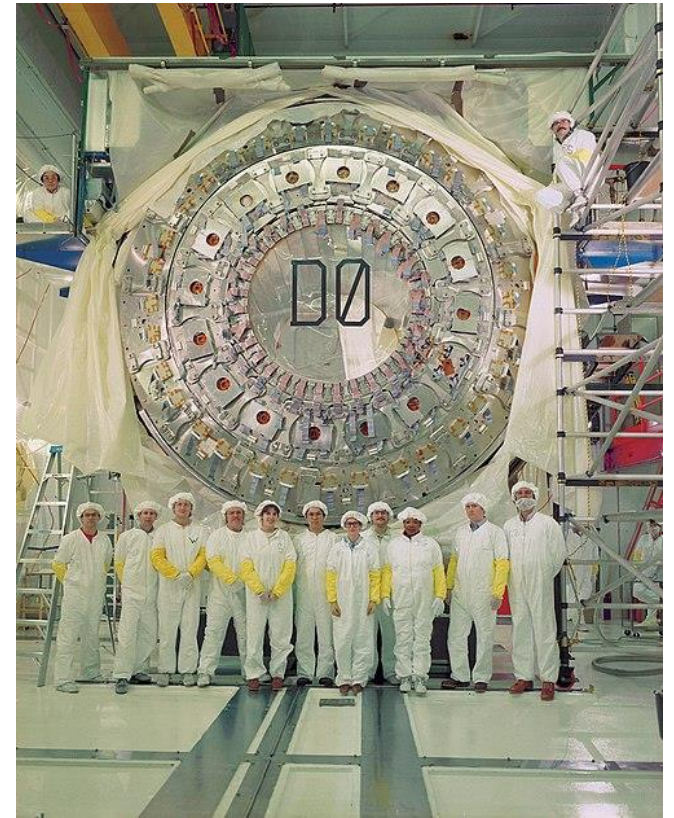
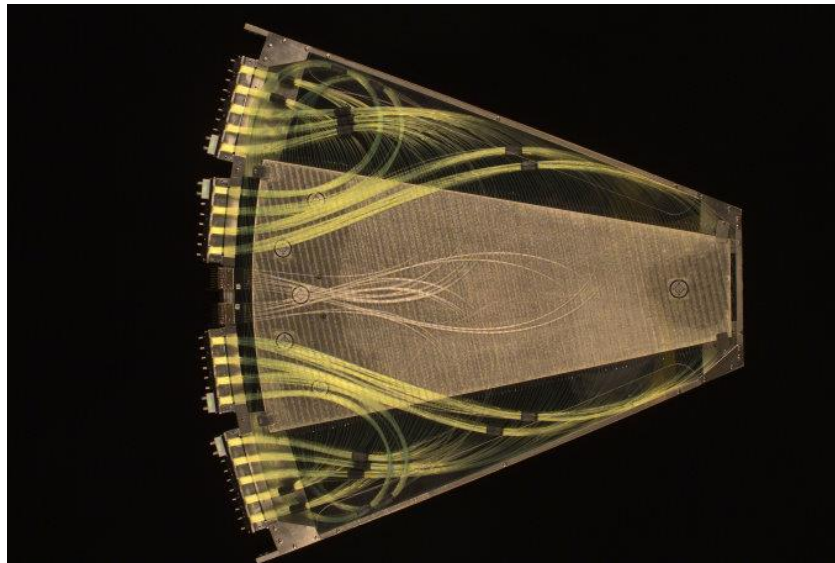
CDF Detector



ЭКСПЕРИМЕНТ DØ

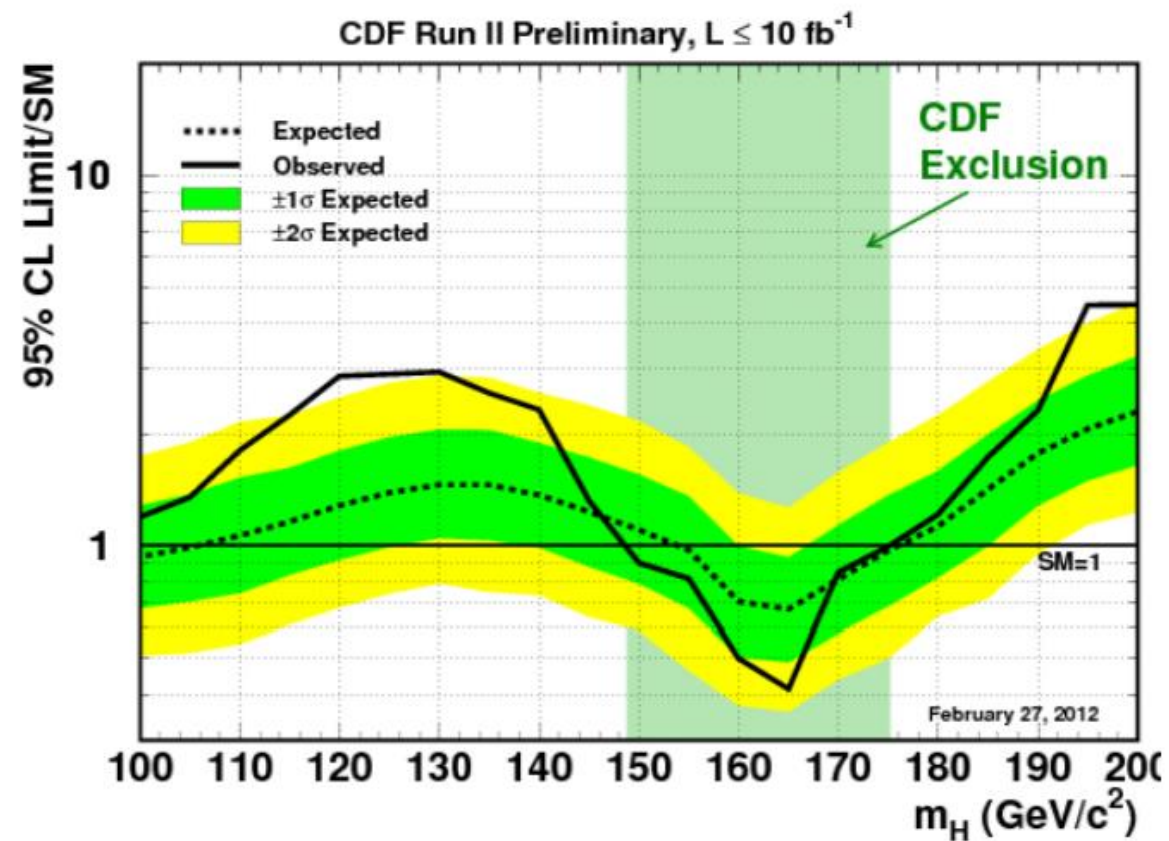


- Сильный тороидальный магнит
- Отличная мюонная система
- Главный канал: $ZH \rightarrow \nu\bar{\nu} b\bar{b}$



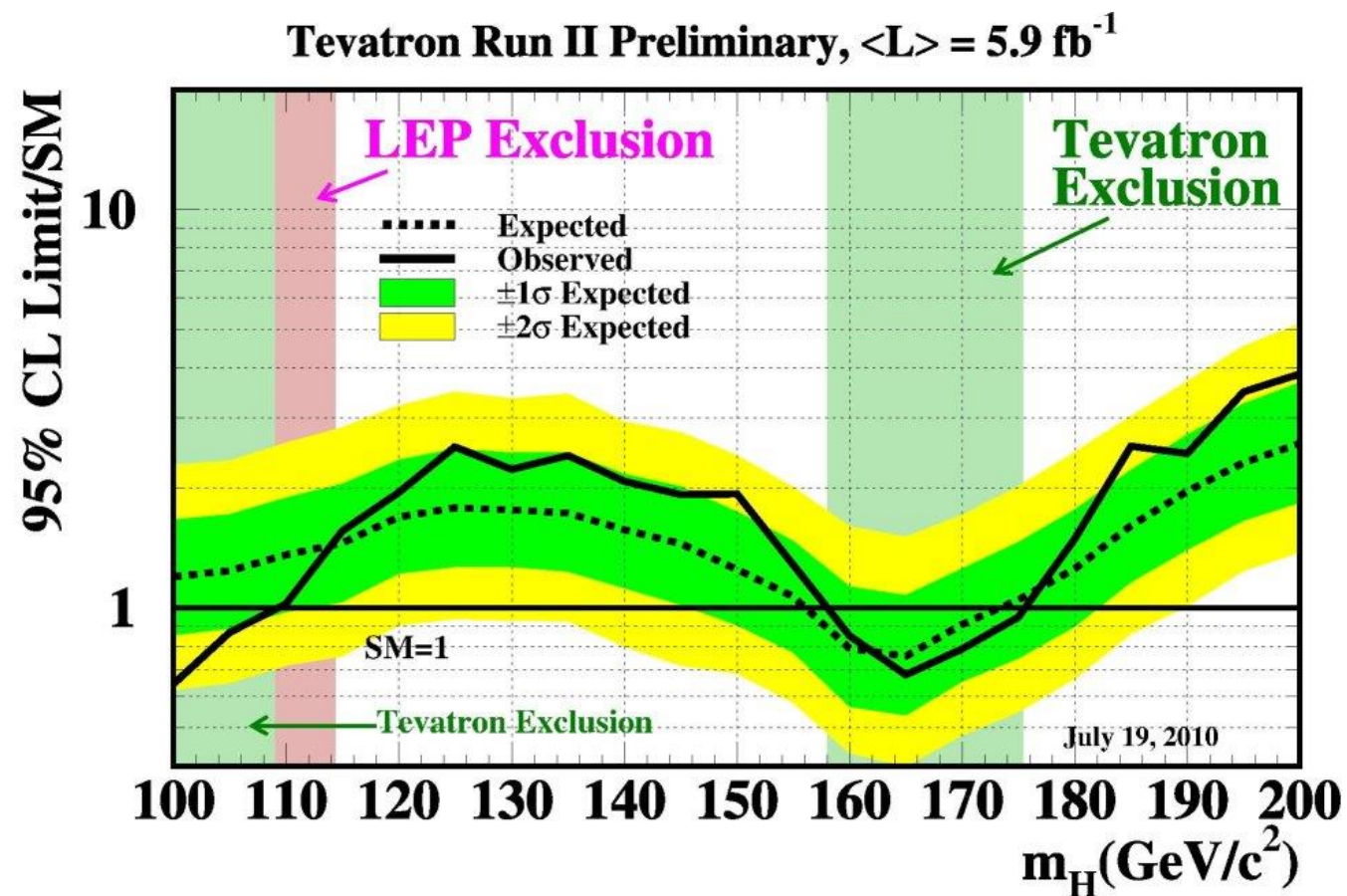
РЕЗУЛЬТАТЫ CDF (2011)

- Небольшой избыток событий в области 115–135 ГэВ
- Максимум локальной значимости: $\approx 2.5\sigma$



РЕЗУЛЬТАТЫ DØ

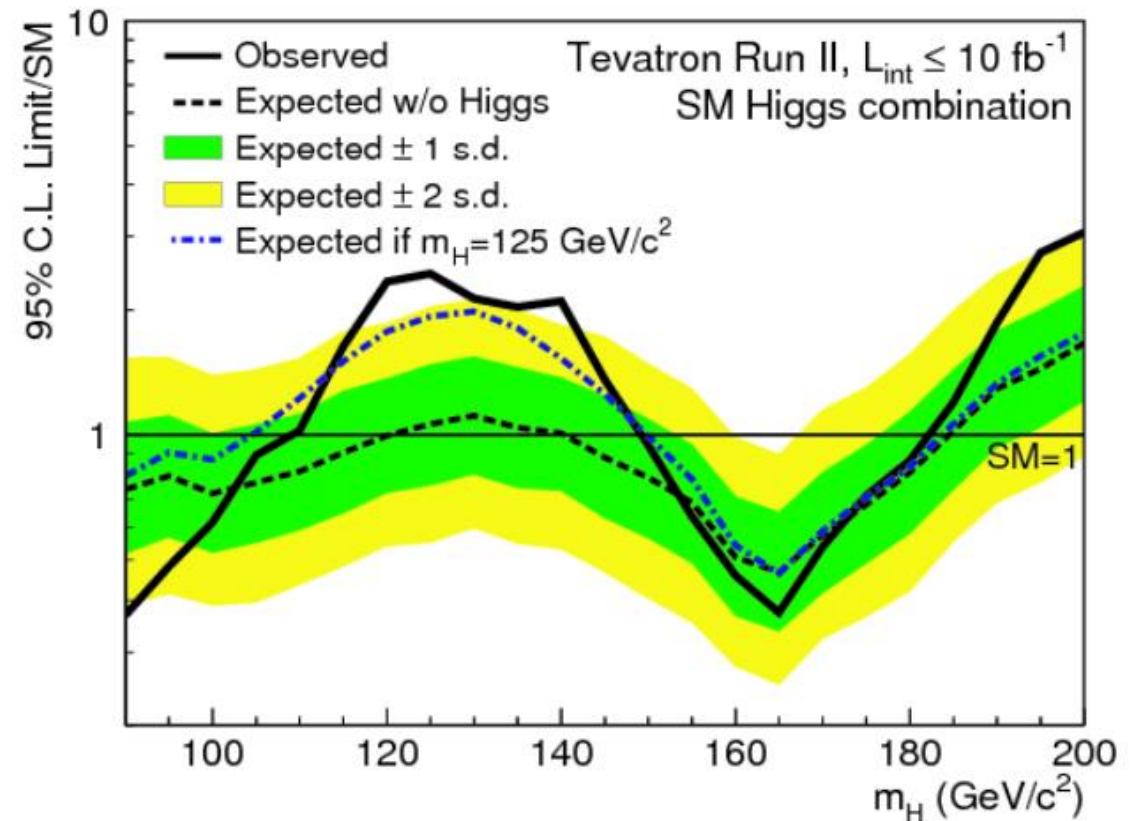
- Независимый избыток в $b\bar{b}$ канале
- Тоже около 2σ в области 125 GeV



РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА НА ТЕВАТРОНЕ. КОМБИНАЦИЯ CDF + DØ (ИЮЛЬ 2012)

Достижения к 2011 году:

- Достигнута чувствительность, близкая к уровню исключения широких областей масс
- Область масс бозона Хиггса вероятно $115 < m_H < 140$ ГэВ (95% CL)
- Обнаружен избыток, совместимый с $m_H \approx 125$ ГэВ ($\sim 3.1\sigma$)
- Важный вклад в изучение канала $H \rightarrow b\bar{b}$, который позже стал ключевым для LHC



РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА НА ТЕВАТРОНЕ. КОМБИНАЦИЯ CDF + DØ (ИЮЛЬ 2012)

Systematic Uncertainty	Signal	Background
pre-tag		
Jet EC – Jet ER	2.7	7.7
Jet R&T	3.0	3.7
Trigger	2.9	3.1
Lepton identification	1.0	1.1
Heavy-flavor fractions	–	2.6
Cross sections	6.0	6.3
Luminosity	6.1	5.9
Multijet normalization	–	0.9
Total	10.0	12.9
single tag		
Jet EC – Jet ER	2.6	4.7
Jet R&T	3.0	2.5
<i>b</i> tagging	1.9	5.2
Trigger	2.9	3.0
Lepton identification	1.0	1.2
Heavy-flavor fractions	–	8.1
Cross sections	6.0	7.1
Luminosity	6.1	5.7
Multijet normalization	–	1.8
Total	10.1	14.8
double tag		
Jet EC – Jet ER	2.8	3.6
Jet R&T	3.2	2.2
<i>b</i> tagging	7.3	8.0
Trigger	3.0	3.3
Lepton identification	1.1	1.6
Heavy-flavor fractions	–	9.8
Cross sections	6.0	8.0
Luminosity	6.1	6.1
Multijet normalization	–	0.4
Total	12.4	17.1

ПОИСК НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

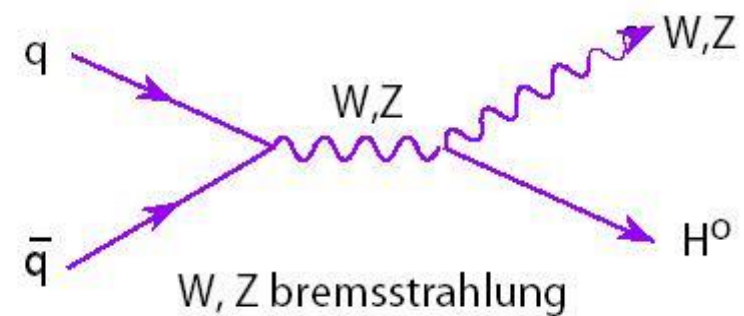
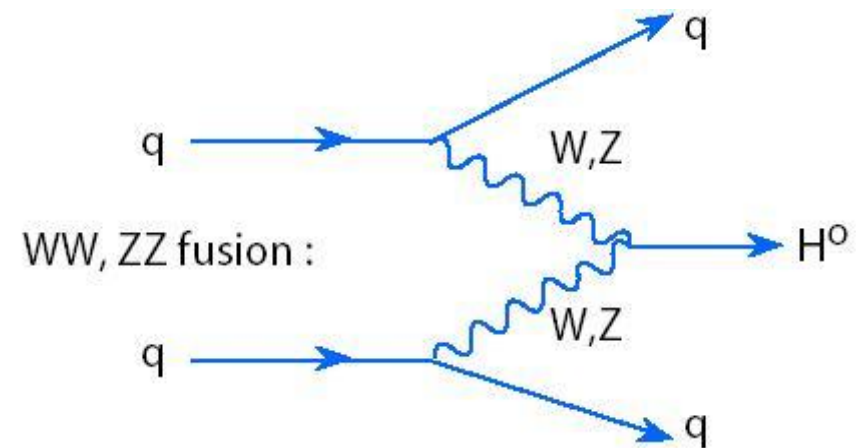
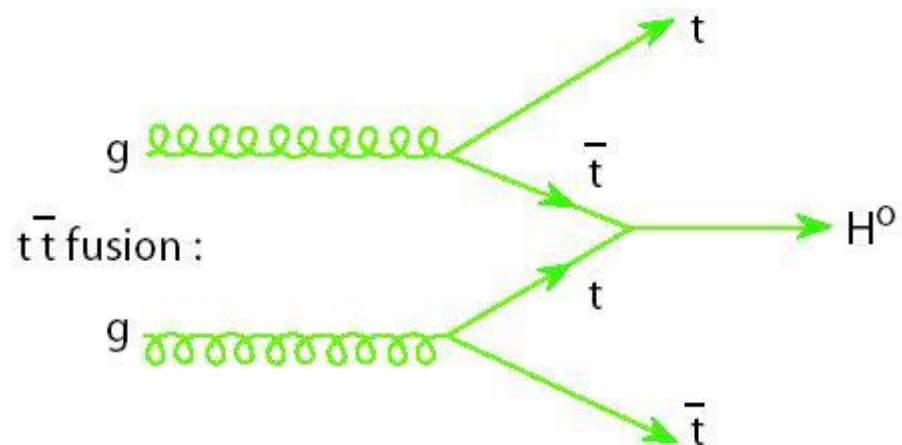
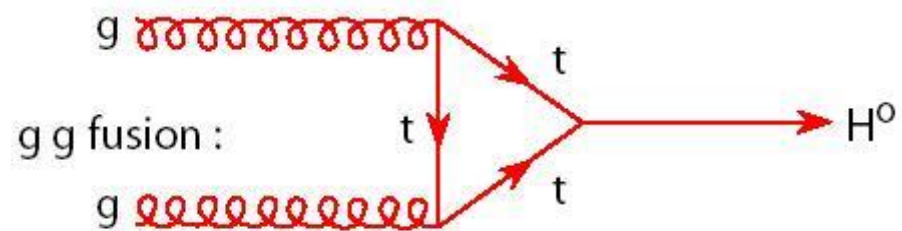
Технические характеристики ускорителя:

- Энергия столкновения протон-протонных пучков: $\sqrt{s} = 7\text{-}8$ ТэВ в Run 1 (2010-2012)
- Максимальная проектная энергия для Run 2: $\sqrt{s} = 13\text{-}14$ ТэВ
- Светимость: до 10^{34} см⁻²с⁻¹, что позволяет регистрировать редкие процессы
- Длина окружности: 27 км, самый большой ускоритель в мире

Экспериментальные установки:

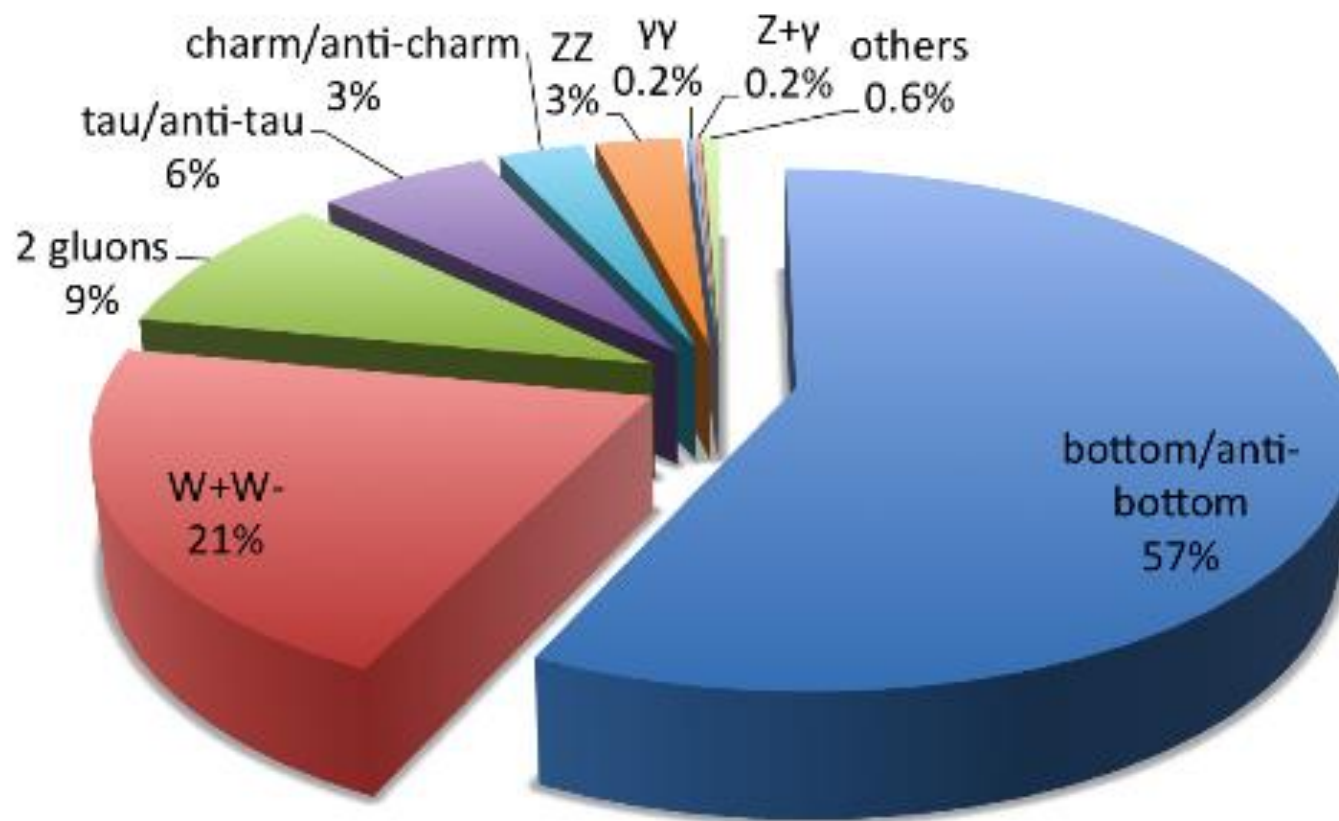
- Два основных универсальных детектора: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) и CMS (Compact Muon Solenoid)
- Специализированные детекторы: LHCb, ALICE
- Сложнейшие системы триггеров и сбора данных для обработки миллиардов столкновений в секунду

ОСНОВНЫЕ КАНАЛЫ РОЖДЕНИЯ ХИГГСА НА LHC



ОСНОВНЫЕ КАНАЛЫ РАСПАДА БОЗОНА ХИГГСА

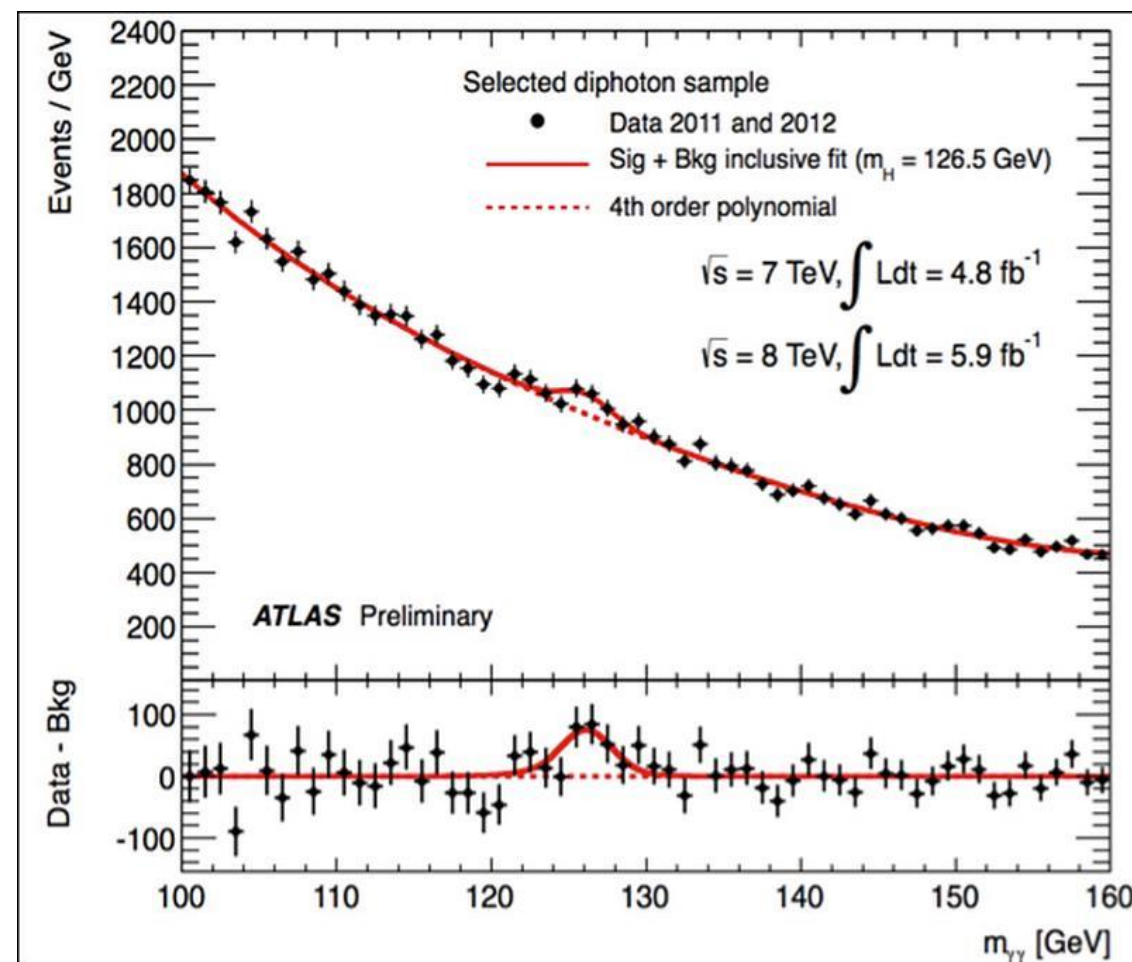
Decays of a 125 GeV Standard-Model Higgs boson



РЕЗУЛЬТАТЫ НА МОМЕНТ ИЮЛЯ 2012 ГОДА:

Коллаборация ATLAS:

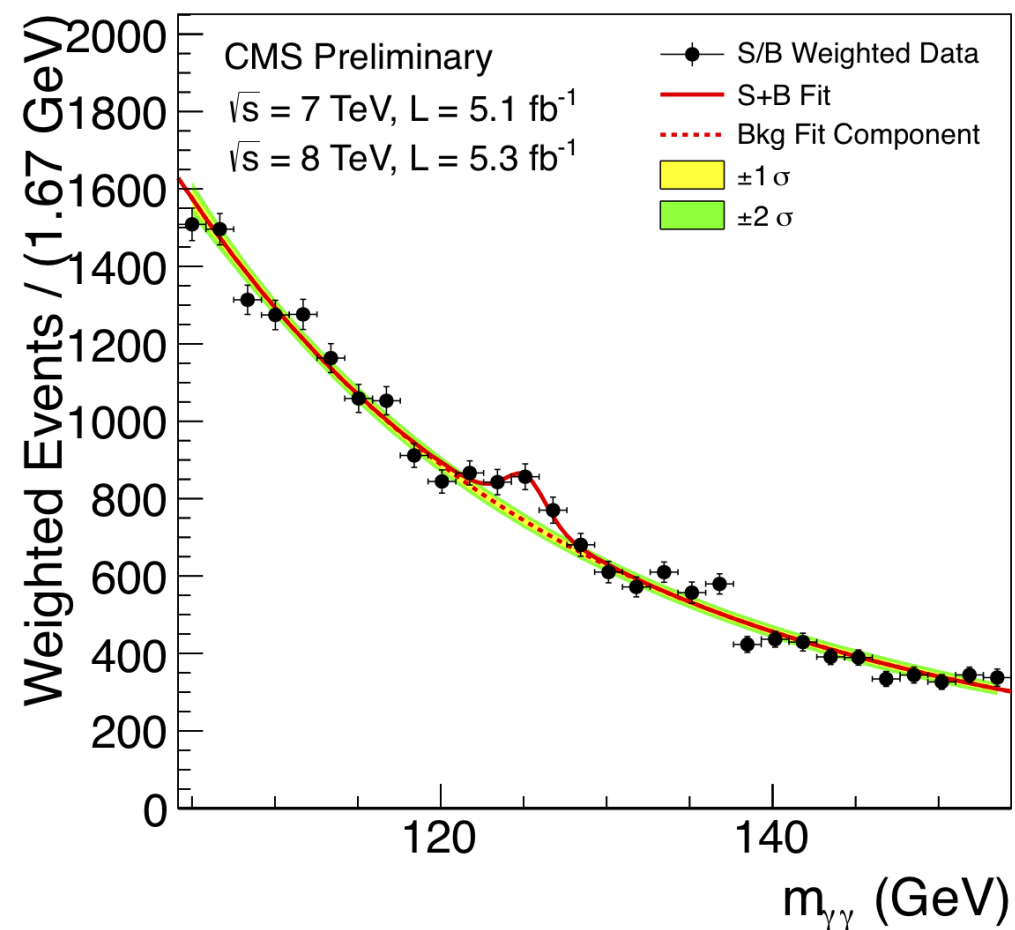
- Масса: $m_H = 125.3 \pm 0.6$ ГэВ
- Значимость: 5.9σ (комбинация каналов $\gamma\gamma$ и $4l$)
- Наблюдаемый избыток событий в ключевых каналах распада



РЕЗУЛЬТАТЫ НА МОМЕНТ ИЮЛЯ 2012 ГОДА:

Коллаборация CMS:

- Масса: $m_H = 125.8 \pm 0.6$ ГэВ
- Значимость: 5.0σ (комбинация каналов $\gamma\gamma$ и $4l$)
- Независимое подтверждение сигнала при той же массе



ИСТОРИЧЕСКОЕ ОТКРЫТИЕ

Совместные характеристики открытия:

- Согласующиеся измерения массы в двух независимых экспериментах
- Сигнал наблюдается в нескольких каналах распада ($\gamma\gamma$, $ZZ \rightarrow 4l$, $WW \rightarrow l\nu l\nu$)
- Предварительные данные по спину и четности согласуются с предсказаниями СМ

Историческое значение:

- 4 июля 2012 года - официальное объявление об открытии новой бозонной частицы
- Завершение почти 50-летнего поиска, начатого теоретическими работами 1964 года
- Нобелевская премия по физике 2013 года: Ф. Энглер и П. Хиггс



СВОЙСТВА БОЗОНА ХИГГСА

Свойство	Значение
Масса	125.09 ± 0.14 ГэВ
Спин	0
Чётность	+ (0^+)
Электрический заряд	0
Ширина распада	≈ 4.1 МэВ

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С LHC RUN 2 И RUN 3

Достижения Run 2 (2015-2018):

- Увеличение энергии до $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и светимости
- Накопление интегральной светимости $\sim 140 \text{ fb}^{-1}$ на эксперимент
- Значительное улучшение точности измерений

Ключевые результаты:

Комбинация каналов распада позволила измерить массовые и кросс-секционные параметры:

- Значимость наблюдения отдельных распадов ($b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, ZZ^* , $\gamma\gamma$) превышает 5σ
- Измерены коэффициенты взаимодействия с точностью 10–15%
- Результаты согласуются со Стандартной моделью, но оставляют пространство для проверки новых физических эффектов (BSM)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ: ИТОГИ 60-ЛЕТНЕГО ПУТИ

Теоретическая база и историческое развитие:

- Механизм Браута-Энглера-Хиггса (1964) решил фундаментальную проблему генерации масс в калибровочных теориях
- Сохранение ренормируемости обеспечило математическую самосогласованность
- Доказательство Хофта-Вельтмана (1971-72) легитимизировало теорию

Включение в Стандартную Модель:

- Электрослабая теория Глэшоу-Вайнберга-Салама с ЕВН-механизмом обеспечила полное описание слабых и электромагнитных взаимодействий
- Корректное предсказание масс W и Z бозонов, а также безмассовости фотона
- Предсказание существования новой фундаментальной скалярной частицы

Экспериментальные поиски и методология:

- LEP и Теватрон создали методологическую базу и установили важные ограничения
- Разработаны современные статистические методы анализа данных
- Подготовлена экспериментальная инфраструктура для открытия на LHC

Историческое открытие на LHC:

- ATLAS и CMS объявили об открытии 4 июля 2012 года
- Масса $m_H \approx 125$ ГэВ, значимость $>5\sigma$ в каждом эксперименте
- Наблюдение в нескольких каналах распада ($\gamma\gamma$, $ZZ \rightarrow 4l$, $WW \rightarrow l\nu l\nu$)
- Нобелевская премия 2013 года: Ф. Энглер и П. Хиггс

ПЕРСПЕКТИВЫ: ХИГГС КАК ОКНО В НОВУЮ ФИЗИКУ

Ключевые направления будущих исследований:

Точные измерения самовзаимодействий Хиггса:

- Треххиггсовская и четыреххиггсовская вершины
- Реконструкция формы хиггсовского потенциала
- Проверка механизма спонтанного нарушения симметрии

Поиск редких и запрещенных распадов:

- $H \rightarrow \mu^+\mu^-$, $H \rightarrow Z\gamma$, $H \rightarrow J/\psi \gamma$
- Распады с нарушением лептонного числа
- Поиск нестандартных каналов распада

Тестирование возможных расширений СМ:

- Суперсимметрия (SUSY) - дополнительные хиггсовские бозоны
- Техницвет - композитная природа Хиггса
- Расширенные хиггсовские сектора с дополнительными дублетами
- Модели со скрытыми секторами и темной материей



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

