

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

Андрей Поздняков

**Детектирование Хиггс бозона с большой массой  
( $m_H = 600 \text{ GeV}$ ) на ускорителе LHC.  
Исследование моделированных данных.**

квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель  
доктор ф.м.н. Гаврилов В. Б.

Москва 2006

## Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Поиск Хиггс бозона на LHC</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Моделирование эксперимента и обработка данных</b>	<b>5</b>
3.1	Моделирование . . . . .	5
3.2	Хиггс бозон с массой 600 Гэв . . . . .	5
3.2.1	Моды распада. Распад $H \rightarrow l\nu jj$ . . . . .	5
3.2.2	Исследование фона . . . . .	6
3.2.3	Реконструкция событий . . . . .	6
3.2.4	Наложение cut'ов . . . . .	7
3.3	Заключение . . . . .	10
3.3.1	Об этой работе . . . . .	10
3.3.2	Другие возможные варианты. Новая физика	10

# 1 Введение

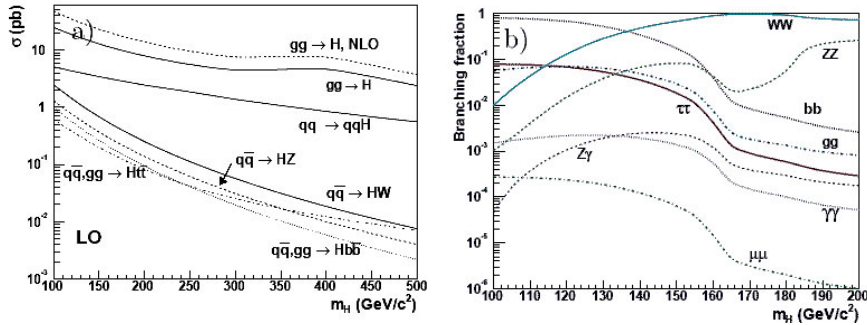
*Прошло совсем немного времени с открытия первых элементарных частиц. Однако современная наука продвинулась уже очень далеко в понимании фундаментальных законов природы. Люди способны не только объяснять происхождение и свойства всех известных на сегодня элементарных частиц, но и предсказывать существование новых частиц. Одной из таких частиц должен стать бозон Хиггса, существование которого необходимо для объяснения массы у  $W$  и  $Z$  бозонов. Обнаружение этого Хиггс бозона и есть основная цель эксперимента LHC.*

*Никто точно не знает какая именно Хиггсовская модель откроется, когда начнет свою работу Большой Адронный Коллайдер. Это может быть один Хиггс бозон в Стандартной Модели (SM) или пять бозонов в других теориях; возможны также и более экзотические и даже вовсе неожиданные сценарии. Чтобы быть готовым ко всему, необходимо полное понимание Хиггсовского механизма в Стандартной Модели и других похожих моделях. Основная задача эксперимента — обнаружить Хиггс бозон. Однако, после этого необходимо доказать, что обнаруженная частица и есть тот самый Хиггс бозон, который предсказывает нам теория (есть ограничения на его массу, спин его должен быть равен нулю и др.) Дополнительные сведения, такие как ширина распада или CP-четность, помогут понять, какая именно модель реализуется в природе. Из-за огромного количества таких моделей, еще одна важная задача — быть готовым ко всем возможным ситуациям. Например, Хиггс может рождаться путем распада более тяжелых частиц, а распадаться на невидимые частицы...*

## 2 Поиск Хиггс бозона на LHC

Со стартом работы LHC начнется новая эра поиска Хиггс бозона. На LHC будут сталкиваться протоны с протонами при энергии в системе центра масс 14 ТэВ и проектируемой светимостью  $L = 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Этот ускоритель будет способен родить множество Хиггсовских частиц SM с массой до 1 Tev в достаточном количестве, чтобы их увидеть.

Даже в Стандартной Модели с одним Хиггс бозоном, есть несколько возможностей рождения этой частицы на LHC. Наиболее важные из всех — это глюонный синтез, синтез векторных бозонов, рождение вместе с top кварками или векторными бозонами. В зависимости от массы Хиггс бозона, возможны различные моды его распада. При малых массах доминирует распад на  $b\bar{b}$  пары, однако, распад  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$  также ощутим. С увеличением массы, Хиггс бозон преимущественно распадается на более массивные частицы, в основном  $ZZ$  и  $W^+W^-$  пары. Сечение распада на два гамма-кванта  $H \rightarrow \gamma\gamma$  примерно в 1000 раз меньше, однако и этот канал может быть исследован, так как его можно легко выделить (очень чистый распад). Процессы рождения вместе со всеми возможными каналами распада приводят к огромному количеству различных конечных состояний. А значит, нужны детекторы, которые смогут зафиксировать все эти частицы при любых конечных состояниях.



ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) и CMS (Compact Muon Solenoid) — универсальные детекторы, которые удовлетворяют всем требованиям, чтобы найти Хиггс бозон при различных финальных состояниях. Помимо отличных детекторов, хорошая система триггеров понизит огромную частоту событий около 40 МГц (что соответствует примерно  $10^9$  взаимодействий в секунду) до приемлемых 100 Гц.

В течение последних лет был достигнут определенный прогресс в понимании процесса рождения Хиггс бозона с теоретической точки зрения. Например, с помощью теории возмущений было посчитано сечение рождения в глюонном синтезе. Вычисления в более и более высоких порядках дали очень точное предсказание для сечения. Кроме того, в настоящее время ограничение на массу Хиггс бозона известно из эксперимента LEP:  $M_H > 114 \text{ GeV}$

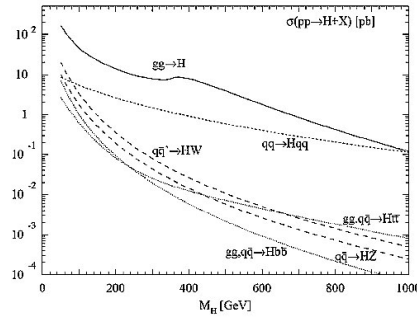
## 3 Моделирование эксперимента и обработка данных

### 3.1 Моделирование

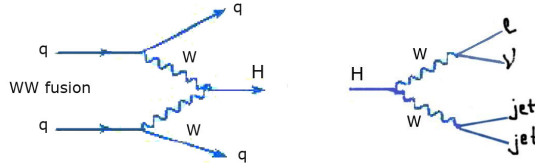
Ускоритель начнет свою работу в середине 2007 года и только через полгода или год наберется статистика, позволяющая сделать первые выводы. Однако чрезвычайно необходимо еще до начала эксперимента знать, что именно нужно от него ожидать. В том числе это важно и для проектирования самого эксперимента. Поэтому долгое время люди занимались моделированием эксперимента с помощью специальных компьютерных программ. После чего, данные, полученные из такого моделированного эксперимента анализируются, обрабатываются. В данной работе рассмотрен один из таких экспериментов.

### 3.2 Хиггс бозон с массой 600 Гэв

#### 3.2.1 Моды распада. Распад $H \rightarrow l\nu jj$



Как уже упоминалось выше, в случае если Хиггс бозон имеет большую массу, то основные моды его распада — это распады на  $ZZ$  и  $W^+W^-$  пары. В свою очередь,  $W$  бозон распадается на лептон и нейтрино или на две струи, а  $Z$  — на два лептона, поэтому в случае большой массы Хиггса, основными распадами будут такие:  $H \rightarrow ll\nu\nu$ ,  $H \rightarrow lljj$ ,  $H \rightarrow l\nu jj$ . В данной работе подробно рассмотрен последний случай.

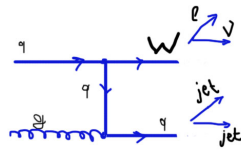


С помощью программы RUTHIA, сгенерированы данные, содержащие события  $q\bar{q} \rightarrow WW \rightarrow H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ , при массе Хиггс бозона  $m_H = 600 \text{ GeV}$ . Все данные записаны в один файл, в котором содержатся как величины, которые непосредственно могут быть измерены на реальном детекторе (ptl - поперечный импульс лептона, ptj - поперечный импульс струи, njet - количество струй в событии и др.), так и данные, которые не могут

быть измерены непосредственно (pt<sub>ν</sub> - импульс нейтрино, pt<sub>W</sub> - поперечный импульс W-бозона и пр.) При этом мы можем одновременно построить распределения для различных величин (pt<sub>Wl</sub>, pt<sub>Wj</sub>,  $m_W, m_H$ , и др.), реконструированных с помощью одних лишь измеряемых величин, и сравнить их с распределениями, заложенными в программе. Такое сравнение было успешно проделано.

### 3.2.2 Исследование фона

Одним из основных фонов для рассматриваемой моды распада будет фон  $q\bar{q} \rightarrow W, q \rightarrow l\nu, jj$  (рождение W-бозона и его распад на лептон и нейтрино плюс дополнительные струи образующиеся в событии).



Главная задача, которая будет стоять перед экспериментаторами — это суметь различить сигнальные события от фоновых.

Сечения процессов:

$$\sigma_s = 2.99 \cdot 10^{-11} mb \text{ для сигнала,}$$

$$\sigma_b = 5.422 \cdot 10^{-8} mb \text{ для фона.}$$

Это значит, что при светимости  $L_{int} = 100 fb^{-1}$ , которую планируется набрать за время работы эксперимента, количество сигнальных и фоновых событий будет таково:

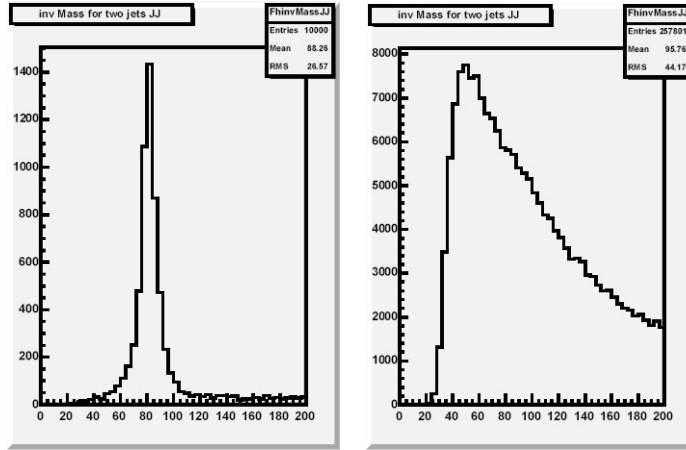
$$N_s = 2990 \text{ для сигнала,}$$

$$N_b = 5422000 \text{ для фона.}$$

### 3.2.3 Реконструкция событий

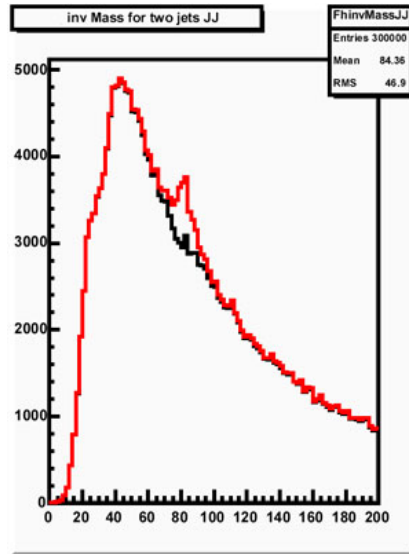
В реальном эксперименте мы можем измерить всего несколько величин: энергию и импульс конечных лептонов (в данном случае это мюоны), струй и их угловое распределение. Нейтрино засечь мы не можем, однако можно восстановить его поперечный импульс по недостающей энергии miss<sub>Et</sub>. Для этого измеряются поперечные импульсы всех остальных частиц, потом берется их векторная сумма. И недостающая часть импульса, такая чтобы в сумме был ноль, и считается поперечным импульсом нейтрино. По восстановленному поперечному импульсу нейтрино и импульсу лептона мы можем построить поперечный импульс W-бозона (W<sub>l</sub> бозон). Второй W-бозон нужно восстановить из двух струй, на которые он распадается (W<sub>j</sub> бозон). Всего в событии может насчитываться до 60 струй, поэтому непросто определить какие две струи образовались от распада W-бозона, а какие — от кварков протонов. Однако, это можно сделать. Так как те кварки, которые не участвовали в реакции с рождением бозонов, взаимодействовали слабо, то струи от них летят в основном вдоль траектории первоначального движения (тагирующие струи). Струи же от распада W-бозона, наоборот, сильно отклоняются, а потому имеют большой поперечный импульс. И действительно, если в каждом событии взять по две струи с максимальными поперечными

импульсами и построить их инвариантную массу, то такое распределение будет выглядеть примерно как на рисунке слева.



Пик приходится как раз на массу  $W = 80$  GeV. А для фоновых событий, в которых второй  $W$  бозон вообще не рождается, такого пика не будет. Как раз этот факт и позволяет нам выявить сигнал из большого количества фоновых событий. Для фона такое же распределение выглядит так, как показано на рисунке справа.

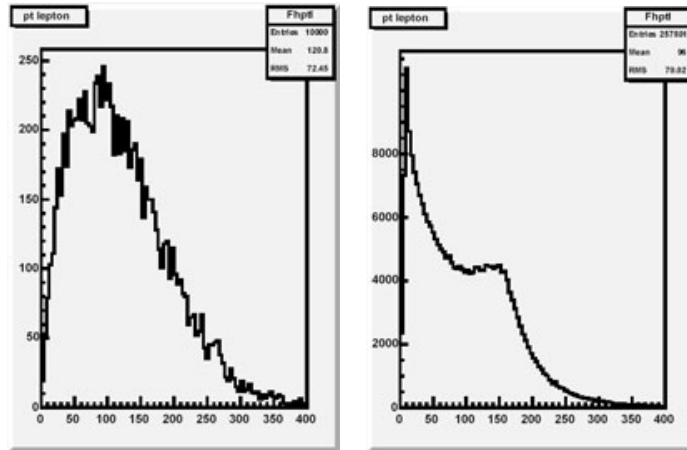
Однако, если построить эти распределения на одной картинке, то сигнальный пик совершенно не будет заметен. Сечение фона во много раз больше сечения сигнала. Тем не менее, если рассматривать не все события, а лишь те, которые удовлетворяют определенным кинематическим условиям, то этот пик уже можно заметить.



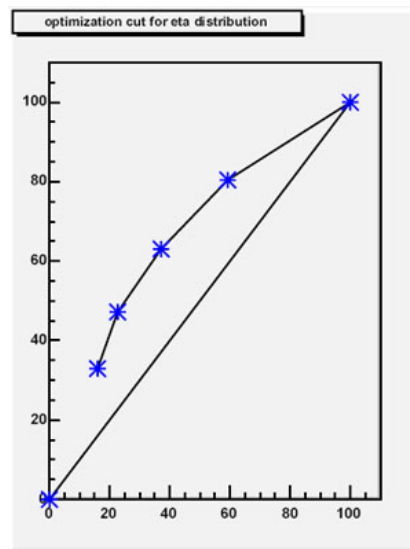
Главная задача как раз и состоит в том, чтобы найти такие кинематические условия (cut'ы), которые отсеют большую часть фона, но не затронут сигнал.

### 3.2.4 Наложение cut'ов

Один кат был наложен еще при генерации событий:  $pt_{Wl} > 200$  GeV. Теперь если посмотреть, к примеру, на распределение поперечного импульса лептона, то выглядеть оно будет примерно так (сигнал - слева, фон - справа; разный масштаб):



Из этих картинок видно, что если рассматривать только те события, в которых  $pt_l > 60$  GeV, то тем самым мы отсеем половину фона и всего около трети сигнала. Вопрос стоит лишь в выборе оптимального cut'а. Для того, чтобы выбрать наилучший cut, построим следующую картинку. Возьмем сначала cut " $pt_l > 10$  GeV" и посмотрим на его эффективность — сколько процентов фона после него останется и сколько процентов останется сигнала. По горизонтальной оси отложим процент оставшегося фона, по вертикальной — сигнала. Потом сделаем тоже самое для  $pt_l > 20$  GeV, и так далее. В итоге получатся, например, такие картинки для катов на  $pt_l$  (слева) и  $\eta_{tagjj}$  (справа):



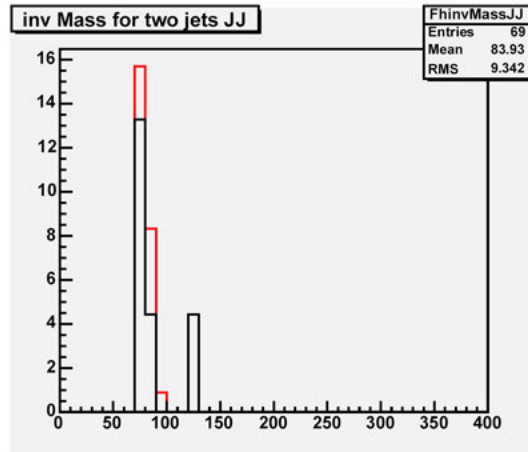
Точки означают наложенные каты. Оптимальна будет та, для которой прямая, проведенная из начала координат будет иметь наибольший угол. Для распределения поперечного импульса лептона таким катом будет  $pt_l > 60 \text{ GeV}$ , как это видно из рисунка. При этом после его наложения останется около 83% сигнала и 66% фона. Таким же образом можно поступить для совершенно разнообразных распределений и выбрать систему катов, которая отрежет весь фон и, желательно, не весь! сигнал...

Как раз в этом и состоит моя задача.

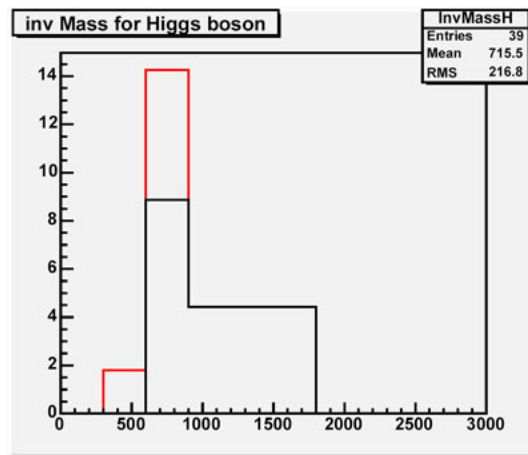
На данный момент получены такие результаты:

1.  $n_{jet} > 1$  — количество струй в событии больше одной.
2.  $pt_{Wl} > 200 \text{ GeV}$  — поперечный импульс  $Wl$ .
3.  $pt_l > 60 \text{ GeV}$  — поперечный импульс лептона.
4.  $|\eta_{lepton}| < 1.68$  — угловое распределение лептона.
5.  $mEt > 60 \text{ GeV}$  — поперечный импульс нейтрино.
6.  $pt_{Wj} > 270 \text{ GeV}$  — поперечный импульс  $Wj$  бозона.
7.  $pt_{j_1, j_2} > 70 \text{ GeV}$  — импульс двух струй от  $W$ .
8.  $|\eta_{j_3, j_4}| > 3.12$  — угловое распределение тагирующих струй.
9.  $50 < M_{jj} < 150$  — рассмотрим только интересный нам регион.

И в конечном итоге, после наложения всех этих ограничений, распределение для инвариантной массы двух струй будет выглядеть так:



Кроме того, интересно построить инвариантную массу для величин:  $l, mEt, j_1, j_2$ , которая по сути есть инвариантная масса  $lvjj$  или масса Хиггса:



Глядя на эти картинки можно сказать, что мы видим Хиггс бозон и его масса 600 Gev, однако, все-таки с уверенностью сказать этого нельзя, так как сигнал на верхней картинке настолько мал, что даже меньше статистической ошибки  $\sqrt{N}$  для фона. На нижней картинке ситуация по-лучше, однако, уверенности не прибавляет.

### 3.3 Заключение

#### 3.3.1 Об этой работе

В данной работе рассмотрен один из возможных случаев рождения Хиггс бозона на ЛНС. Прделана обработка данных смоделированного эксперимента. Выбраны оптимальные каты, чтобы отличить сигнал, когда рождается Хиггс бозон, от фоновых событий с теми же конечными состояниями. К сожалению, выбранная система катов не достаточно хороша, и дальнейшая цель — найти более оптимальные. Например, рассмотреть комбинацию импульса и углового распределения струй.

Кроме того, помимо рассмотренного здесь фона, есть еще и другие. Они менее значимы, однако их тоже надо учесть. Например, существует фон, когда в столкновении рождается пара  $t\bar{t}$ , и один топ-кварк распадается на  $l$  и  $\nu$ , а другой на две струи.

#### 3.3.2 Другие возможные варианты. Новая физика

Большинство физиков склоняются к тому, что если Хиггс бозон и будет найден, то он окажется легким, с массой 100-200 Gev. Тем не менее, рассмотренный в этой работе канал распада WW пары быдет актуален, так как он оказывается чувствительным к другим возможным теориям, таким как SUSY. Вместо Хиггс бозона на WW пару может распасться неизвестная частица, и это можно будет увидеть.

## Список литературы

- [1] Review of Higgs Physics at the LHC; V. Drollinger; CMS 2004
- [2] High transverse momentum physics at large hadron collider;  
The Atlas and CMS Collaborations; 2002
- [3] Vector Boson Fusion Higgs Production at the LHC – Mass Variables;  
Dan Green; Fermilab; January, 2005
- [4] IntroToCMS; <http://cmsinfo.cern.ch/>