

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.120.71

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Изучение функций фитирования для процесса
распада бозона Хиггса в Z бозона с
ассоциированным фотоном

Научный руководитель,
к.ф.-м.н., доцент

_____ Е. Ю. Солдатов

Научный руководитель

_____ Н. В. Проклова

Студент

_____ К. К. Казакова

Москва 2020

Содержание

Введение	3
Цель работы	3
1 Устройство детектора ATLAS	4
1.1 Эксперимент ATLAS	4
1.1.1 Система координат детектора ATLAS	4
1.1.2 Внутренний детектор	5
1.1.3 Система калориметров детектора ATLAS	5
1.1.4 Мюонный спектрометр	6
1.1.5 Триггерная система	6
2 Механизм Хиггса	7
2.1 Механизмы образования бозона Хиггса	7
2.2 Канал распада $H \rightarrow Z\gamma$	7
3 Критерии отбора Монте-Карло данных	9
4 Моделирование сигнала	11
4.1 Моделирование и математическое описание	11
4.2 Результаты для суммированного сигнала	13
4.3 Результаты для несуммированного сигнала	15
Заключение	18
Список используемых источников	19

Введение

Стандартная модель (СМ) - наиболее тщательно проработанная теория в физике элементарных частиц. То, почему частицы обладают массой, в СМ объясняется через механизм Хиггса[1]. Однако СМ не описывает гравитацию, Тёмную Энергию, Темную Материю и многие другие явления. Можно предположить, что СМ лишь часть более универсальной теории. Поэтому так важно наиболее обширно изучить все свойства бозона Хиггса, относительно недавно открытой частицы, и с максимальной точностью их описать для подтверждения СМ или же для открытия «новой физики». Любое отклонение от гипотезы приводит к теориям, выходящих за рамки СМ. Поэтому в данной работе исследуется редкий канал распада $H \rightarrow Z\gamma$, так как этот канал распада чувствителен к открытиям из-за особенностей процесса распада. Так как в последствии рассматривается распад Z бозона только в два лептона (в пару электронов либо мюонов), данный распад бозона Хиггса представляет особый интерес из-за чёткого сигнала и относительно небольшого фона от протон-протонных столкновений.

Цель работы

Целью данной работы является поиск функции, которая наиболее точно описывает смоделированный сигнал бозона Хиггса с распадом в Z бозон и фотон, а также целью является проверить, насколько хорошо данные согласуются с математическим описанием. Полученные в ходе работы результаты будут необходимы для уменьшения погрешности при переходе к описанию реальных данных с ускорителя на Большом Адронном Коллайдере (БАК), так как величина ошибки непосредственно влияет на вероятность открытия в данных. Также целью работы является проверка того, зависит ли математическое описание данных от способа образования бозона Хиггса из протон-протонных столкновений.

1 Устройство детектора ATLAS

1.1 Эксперимент ATLAS

Эксперимент ATLAS[2],[3] - это многоцелевой детектор (рис.1), предназначенный для исследования протон-протонных столкновений и столкновений тяжелых ионов, полученных с БАКа. Программа ATLAS предназначена для поиска бозона Хиггса и «новой физики», а так же для проверки КХД. Детектор радиально симметричен и состоит из разных подчастей, наложенных друг на друга концентрическими слоями. Детектор состоит из внутренней трековой системы, которая окружена сверхпроводящим соленоидом, адронного и электромагнитного калориметров, а также мюонного спектрометра.

1.1.1 Система координат детектора ATLAS

В детекторе используется несколько основных систем отчёты, одна из них - прямоугольная система координат. Начало отчёта выбирается в точке взаимодействия, оси расположены так, что ось x направлена к центру БАКа, ось z направлена вдоль движения пучка, а ось y направлена вверх. В цилиндрической системе координат вводятся полярный угол θ - отсчитывается от положительного направления оси z , и азимутальный угол ϕ - определяется в плоскости $0xy$ вокруг оси пучка. Псевдобыстрота задается формулой (1.1).

$$\eta = -\ln \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.1)$$

Угловое расстояние между частицами определяется формулой (1.2).

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2)} \quad (1.2)$$

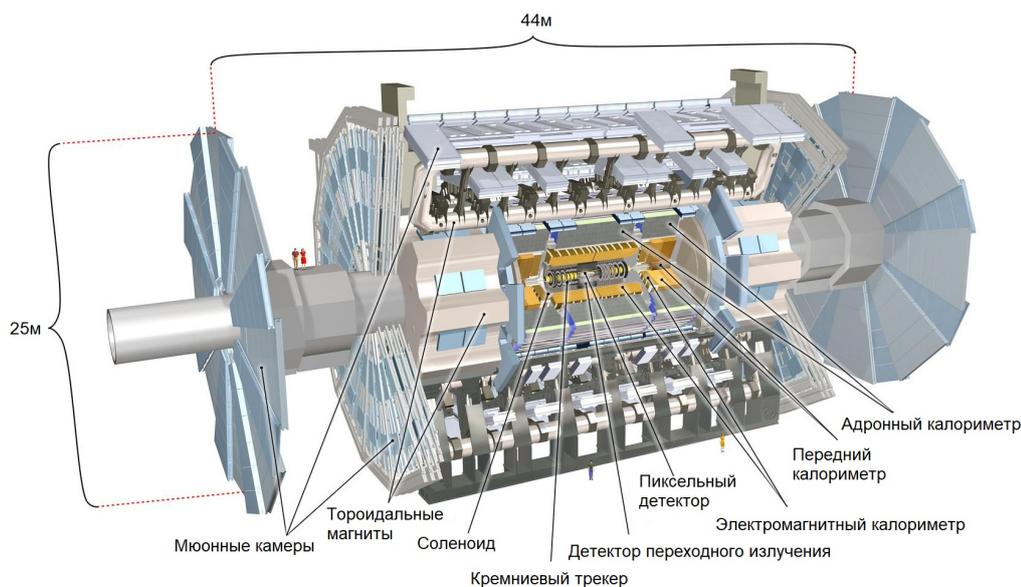


Рисунок 1 — Схема детектора ATLAS и его подсистем

1.1.2 Внутренний детектор

Внутренний детектор - это первая часть детектора ATLAS, регистрирующая продукты распада. Он относительно компактный и очень устойчив к радиационным воздействиям. Детектор состоит из трех частей: пиксельного детектора, детектора переходного излучения и кремниевого трекера, изображённые на рисунке (1), которые охватывают диапазон псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$. Внутренний детектор выполняет функции трекинга заряженных частиц. Благодаря магнитному полю от соленоида детектор фиксирует треки частиц, а также восстанавливает их импульсы.

1.1.3 Система калориметров детектора ATLAS

Система калориметров охватывает диапазон псевдобыстрот $|\eta| < 4.9$ и состоит из двух компонентов: электромагнитного и адронного калориметров. Основная задача калориметров - это измерение энергии и положения прошедших в него частиц. Также система калориметров позволяет вычислить потерянную энергию E_T^{miss} . Калориметры сконструированы так, чтобы обеспечивать надежную защиту мюонной системы от проникновения электромагнитных и адронных ливней. Электромагнитный калориметр, окружающий внутренний детектор, оптимизирован для измерения

энергии фотонов и электронов. Адронный калориметр окружает электромагнитный калориметр и позволяет измерить энергию адронов.

1.1.4 Мюонный спектрометр

Мюоны проходят через описанную в разделе 1.1.3 систему калориметров почти без потерь, поэтому главной задачей мюонного спектрометра является измерение импульсов и идентификация мюонов высоких энергий. Он разработан для обнаружения заряженных частиц и измерения их импульса в пределах значений псевдобыстрот $|\eta| < 2.7$. Мюонный спектрометр состоит из камеры прецессионного слежения и триггерных камер. Камеры слежения измеряют и восстанавливают импульс мюона по виду кривизны трека, изгибаемой магнитным полем тороидных магнитов.

1.1.5 Триггерная система

Триггерная система ATLAS имеет несколько различных подсистем: триггер первого уровня и триггер высокого уровня. Главная задача триггерной системы ATLAS заключается в фильтрации интересных событий от всех остальных фоновых событий. Также триггерная система должна уменьшать частоту событий, примерно 40 кГц, до частоты, которые могут использоваться для обработки данных и для хранения, которая примерно равна 200 Гц.

2 Механизм Хиггса

2.1 Механизмы образования бозона Хиггса

Существует несколько способов образования бозона Хиггса. Поскольку БАК является протон-протонным коллайдером, основной процесс, способствующий возникновению бозона Хиггса, должен содержать глюоны, происходящие от сталкивающихся протонов. Рисунок (2) демонстрирует диаграммы Фейнмана четырех основных процессов[4] образования бозона Хиггса из протон-протонных столкновений:

- Глюон-глюонное слияние (ggF) - наиболее распространенный процесс образования бозона Хиггса, требующий слияния двух глюонов, порождающих бозон Хиггса через петлю тяжелого кварка, обычно топ-кварка из-за его большой массы.
- Слияние векторных бозонов (VBF) - процесс образования бозона Хиггса в результате слияния двух слабых векторных бозонов (W^\pm или Z^0), испускаемых кварками.
- Ассоциированное рождение вместе с W^\pm или Z^0 бозонами (WH или ZH) - процесс, в котором бозон Хиггса образовывается совместно с векторным бозоном W^\pm или Z^0 , образованными из слияния двух кварков.
- Ассоциированное рождение вместе с топ-кварками (ttH) - процесс, в котором бозон Хиггса рождается вместе с парами топ-кварков из расщепления двух глюонов.

2.2 Канал распада $H \rightarrow Z\gamma$

Бозон Хиггса распадается на фермионы или бозоны, и только при измерении продуктов распада возможно реконструировать информацию о наличии бозона Хиггса в детекторе. Вероятность того, какой именно будет распад пропорционален массе продуктов распада. Это означает, что

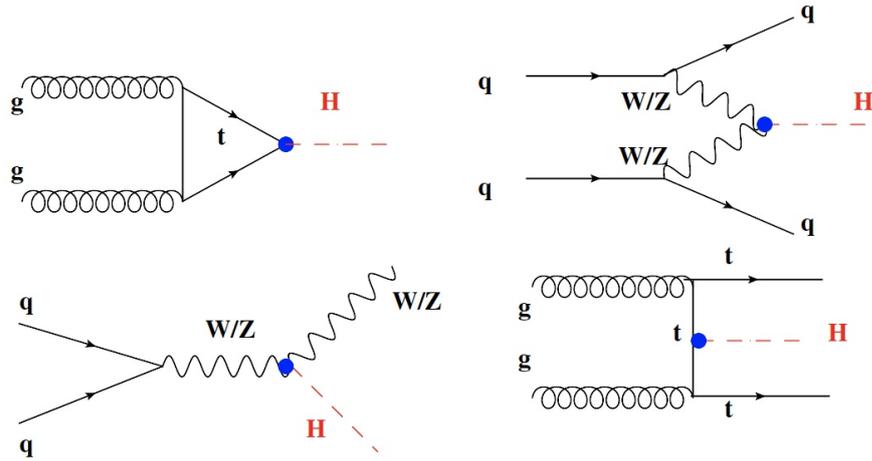


Рисунок 2 — Основные способы образования бозона Хиггса из столкновений адронов. Глюон-глюонное слияние(слева вверху), слияние векторных бозон(справа вверху), ассоциированное рождение вместе с W^\pm или Z^0 (слева внизу), ассоциированное рождение вместе с топ-кварками(справа внизу).

распады с тяжелыми частицами наблюдаются чаще. Из этого следует, что такие распады как распады в два фотона ($H \rightarrow \gamma\gamma$) или в Z бозон и фотон ($H \rightarrow Z\gamma$) наблюдаются крайне редко, вероятность распада составляет порядка $1.541 \cdot 10^{-3}$ [5]. Распад бозона Хиггса в Z бозон и фотон проходит через бозонные или фермионные петли, обычно W бозоны наиболее вовлечены в петлю, так как их связь с бозоном Хиггса наиболее сильная[6]. На рисунке (4) приведены диаграммы Фейнмана данных процессов.

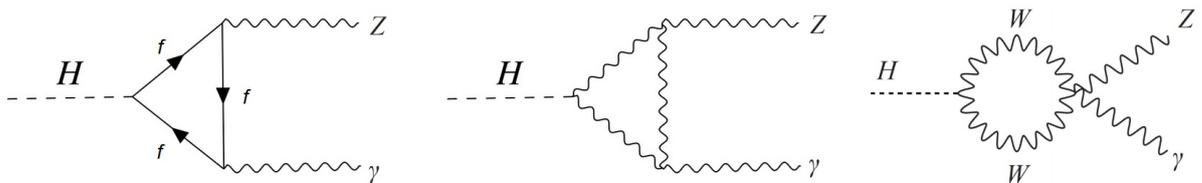


Рисунок 3 — Диаграммы Фейнмана для канала распада $H \rightarrow Z\gamma$

3 Критерии отбора Монте-Карло данных

В данной работе использовались официальные наборы Монте-Карло (МК) данных, прошедшие полное моделирование и реконструкцию для геометрии детектора ATLAS для четырёх основных каналов образования бозона Хиггса: ggH, VBF, WH или ZH и ttH. Значение массы бозона Хиггса для всех смоделированных образцов было выбрано равным $m_H = 125$ ГэВ. Монте-Карло данные приведены в таблице (1). Данные о предварительном отборе лептонов и фотонов приведены в таблице (2).

Таблица 1 — Данные МК сигнала для поиска бозона Хиггса

Канал образования	Значение массы, ГэВ	Количество событий
ggH, Z(ll)gam	125	1.436M
VBF, Z(ll)gam	125	1.155M
WmH, Z(ll)gam	125	60k
WpH, Z(ll)gam	125	60k
ttH, Z(ll)gam	125	5.398M

Таблица 2 — Информация о предварительном отборе лептонов и фотонов, используемых в качестве входных данных

Канал	Электроны	Мюоны	Фотоны
p_T	> 10 ГэВ	> 10 ГэВ	> 10 ГэВ
$ \eta $	$ \eta < 2.47$	$ \eta < 2.7$	$ \eta < 2.37$
	кроме $1.37 < \eta < 1.52$	-	кроме $1.37 < \eta < 1.52$
$ d_o /\sigma_{d_o}$	< 5	< 3	-
$z_0 \sin \theta$	< 0.5 mm	< 0.5 mm	-
Идентификация	Мягкая	Средняя	Жёсткая
Изоляция	Мягкий	Мягкая	Мягкая

Основными фоновыми событиями для процесса $H \rightarrow Z\gamma$ являются процессы распада Z бозона с ассоциированным фотоном и рождение Z бозона с адронными струями, где одна струя была неверно идентифицирована детектором как фотон. На рисунке (4) приведен один из доминирующих фонов, а именно распад Z бозона с ассоциированным фотоном. Также среди

смоделированных данных должен быть выбран нужный диапазон масс: $115 \text{ ГэВ} \leq m_{\mu\gamma} \leq 170 \text{ ГэВ}$ и $81,2 \text{ ГэВ} \leq m_{ll} \leq 101,2 \text{ ГэВ}$, а также накладывается ограничение на поперечный импульс фотона $p_T^\gamma/m_{ll\gamma} \leq 0.12$. Так как доминирующее фоновое событие имеет диапазон масс $81,2 \text{ ГэВ} \leq m_{ll} \leq 101,2 \text{ ГэВ}$, это позволяют эффективно использовать ограничения по инвариантной массе чтобы убрать события с данным распадом и отделить сигнал от фона.

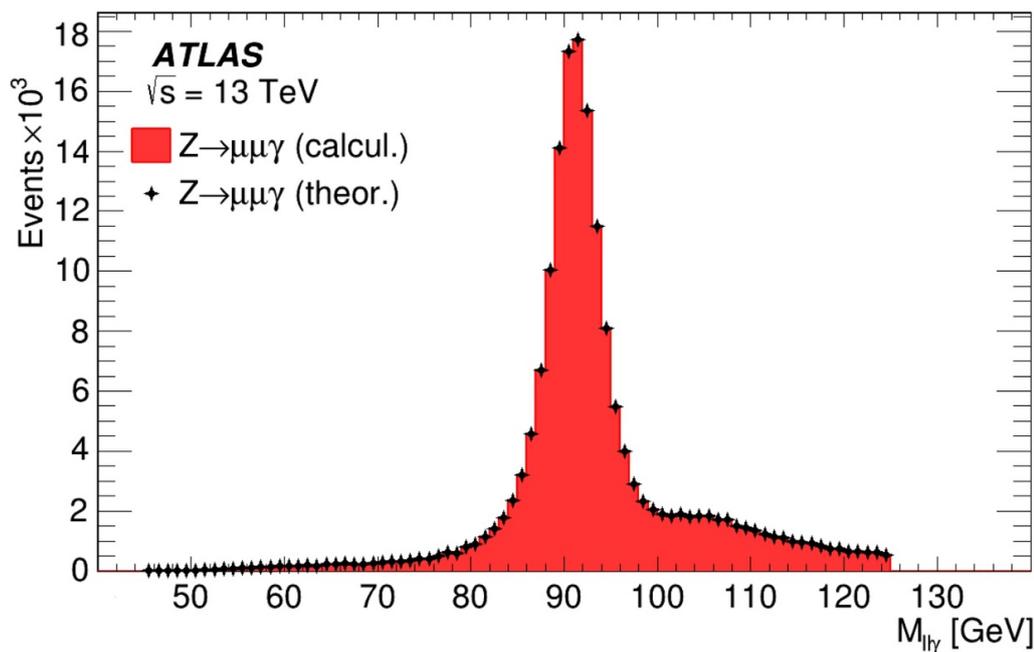


Рисунок 4 — Доминирующий фон процесса $H \rightarrow Z\gamma$

4 Моделирование сигнала

4.1 Моделирование и математическое описание

Выбор инвариантной массы $m_{ll\gamma}$ позволяет эффективно отделить форму сигнального распределения от фонового. Распределения сигнала и фона параметризуются аналитическими функциями. В данной работе была проведена параметризация только сигнального распределения. Основные параметры, которые входят в финальное фитирование процесса $H \rightarrow Z\gamma$:

- Пик распределения инвариантной массы бозона Хиггса
- Значение σ_{CB} для оценки справедливости полученных результатов
- Отношение фитирования к моделированию сигнала

Среди всех смоделированных данных для каждого способа образования бозона Хиггса (таких как ggH, VBF, ttH, WH или ZH) распределение по инвариантной массе трёх частиц для резонансной массы m_H хорошо описывается функцией Double-Sided Crystal Ball (DSCB). За распределение инвариантной массы была взята сумма всех способов образования бозона Хиггса с соответствующей нормировкой с учетом их поперечного сечения. Центральная часть функции DSCB описывается функцией Гаусса, а оба хвоста задаются степенным законом. Функция задается как (4.1):

$$N \cdot \begin{cases} e^{t^2/2}, & -\alpha_{Lo} \leq t \leq \alpha_{Lo} \\ \frac{e^{-0.5\alpha_{Lo}^2}}{\left[\frac{\alpha_{Lo}}{n_{Lo}} \left(\frac{n_{Lo}}{\alpha_{Lo}} - \alpha_{Lo} - t \right) \right]^{n_{Lo}}}, & t < -\alpha_{Lo} \\ \frac{e^{-0.5\alpha_{Hi}^2}}{\left[\frac{\alpha_{Hi}}{n_{Hi}} \left(\frac{n_{Hi}}{\alpha_{Hi}} - \alpha_{Hi} + t \right) \right]^{n_{Hi}}}, & t > \alpha_{Hi} \end{cases} \quad (4.1)$$

где $t = \Delta m_H / \sigma_{CB}$, $\Delta m_H = M_{Z\gamma} - \mu_{CB}$, N - нормировочный параметр, μ_{CB} - пик распределения Гаусса, σ_{CB} - ширина распределения Гаусса, α_{Lo} (α_{Hi}) - точки, где функция Гаусса переходит в степенную функцию на левом (правом) участке, n_{Lo} (n_{Hi}) - показатель степенной функции.

В данной работе также рассматривались такие функции, как Crystal Ball + Voigtan (CBPlusVoigt), Crystal Ball + Gaussian (CBGA), Crystal Ball (CB), Asymmetric Crystal Ball (ACB). Такие функции как Landau, Voigt и Gauss не приводятся в данной работе, так как эти функции имеют неподходящую форму распределения для описания сигнала бозона Хиггса из-за недостатка параметров. Приведем математическое описание рассматриваемых функций. Функция CBPlusVoigt задается как (4.2):

$$\begin{cases} \frac{a}{\pi a^2 + (u - t)^2} \cdot e^{-t^2}, & -\alpha \leq t \leq \alpha \\ \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{2}\right) \cdot \left(\frac{n}{|\alpha|} - |\alpha| - t\right)^{-n}, & \alpha < t < -\alpha \end{cases} \quad (4.2)$$

где a и u нормировочные коэффициенты функции Voigt. Функция CBGA задается как (4.3):

$$\begin{cases} \frac{1}{\sigma_{GA} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t - \mu_{GA})^2}{\sigma_{GA}}\right), & -\alpha \leq t \leq \alpha \\ \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{2}\right) \cdot \left(\frac{n}{|\alpha|} - |\alpha| - t\right)^{-n}, & \alpha < t < -\alpha \end{cases} \quad (4.3)$$

где коэффициенты σ_{CB} - ширина распределения Гаусса, μ_{GA} - пик распределения Гаусса. Функция Crystal Ball задается аналогично функции (4.1) с симметричными правым и левым хвостами. Функция ACB имеет схожий вид с функцией DSCB, поэтому в работе проверяется, является ли данная

функция более подходящей для описания сигнала и задаётся как (4.4):

$$N \cdot \begin{cases} e^{-0.5 \cdot t_L}, & t_L \leq -\alpha \\ \frac{e^{-0.5 \alpha^2}}{\left[\frac{\alpha}{n} \left(\frac{n}{\alpha} - \alpha - t_L \right) \right]^n}, & t_L > -\alpha \\ e^{-0.5 \cdot t_R}, & t_R \leq \alpha \\ \frac{e^{-0.5 \alpha^2}}{\left[\frac{\alpha}{n} \left(\frac{n}{\alpha} - \alpha + t_R \right) \right]^n}, & t_R > \alpha \end{cases} \quad (4.4)$$

где $t_L = \Delta m_H / \sigma_L$, $t_R = \Delta m_H / \sigma_R$ соответственно, σ_L (σ_R) - ширина распределения слева (справа) от пика распределения Гаусса.

4.2 Результаты для суммированного сигнала

В работе для каждой рассматриваемой функции были подобраны наиболее подходящие параметры распределения. В качестве иллюстрации на рисунке (5) приводятся распределения, фитированные функцией DSCB без параметров и после подбора подходящих параметров. На рисунке (6) приведен сигнал распада бозона Хиггса, фитированный четырьмя функциями: CBGA, CBPlusVoigt, CB и ACB. Основные параметры фитированных функций приведены в таблице (3).

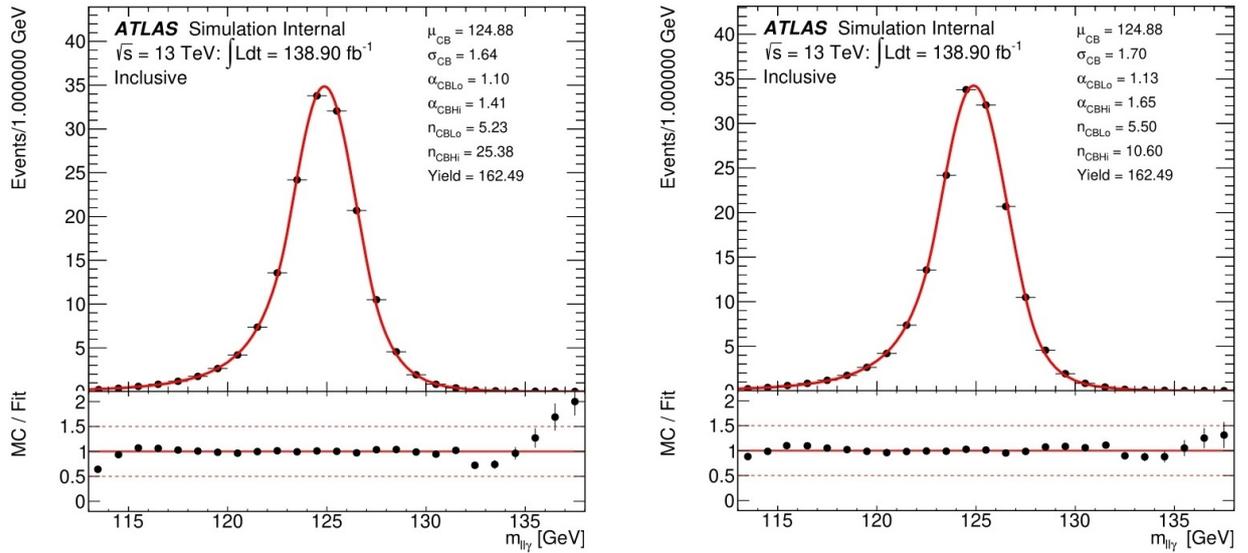


Рисунок 5 — Фитирование распределения с автоматическими параметрами (слева) и фитирование с наиболее подходящими параметрами (справа)

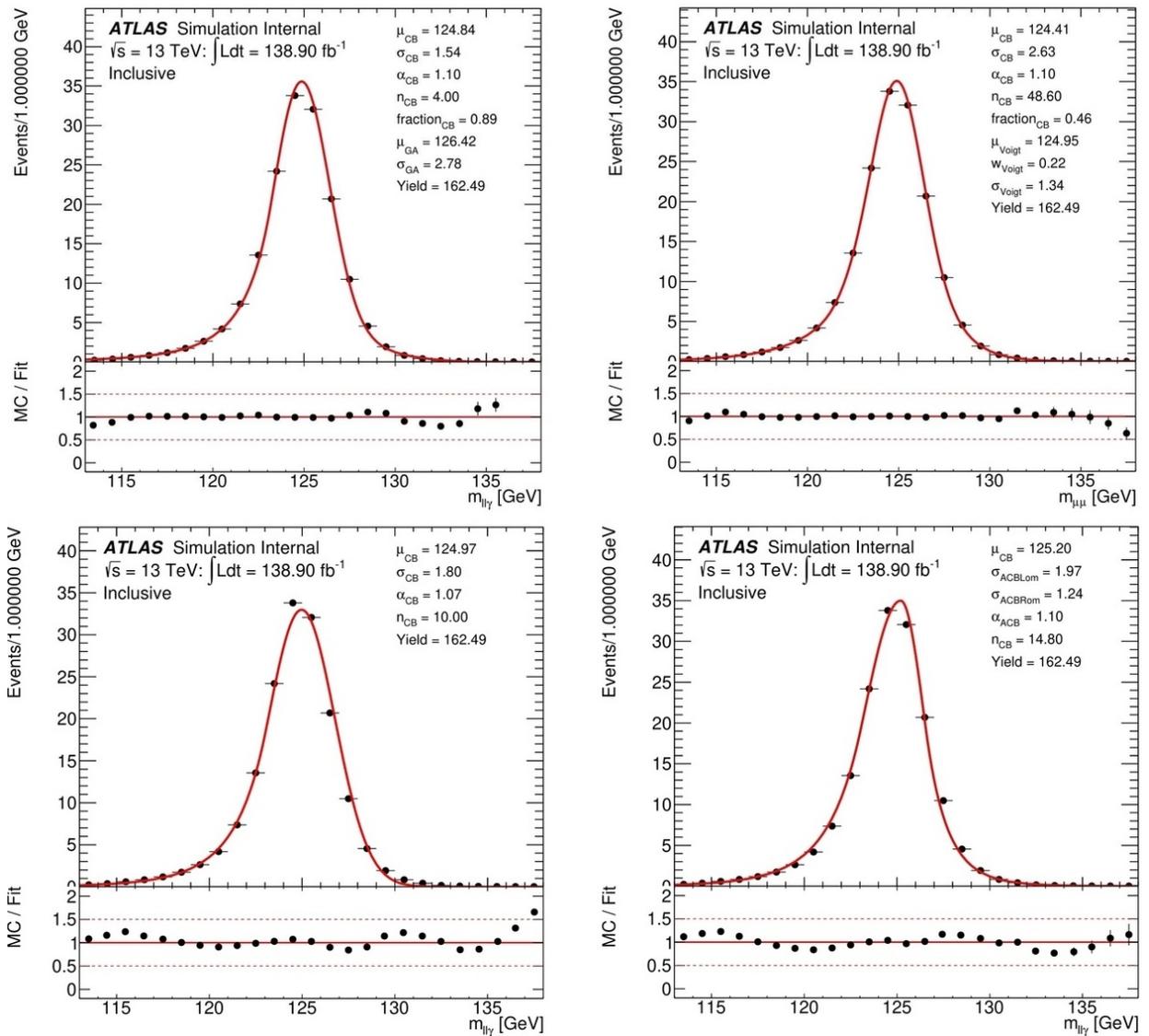


Рисунок 6 — Фитирование распределения функциями: CBGA (слева сверху), CBPlusVoigt (справа сверху), CB (слева снизу), ACB (справа снизу)

Таблица 3 — Значения инвариантной массы и ширины распределения для каждой функции фитирования

Функция фитирования	Значение массы, ГэВ	σ_{CB} , ГэВ
Inclusive, DSCB	124.88	1.70
Inclusive, CBPlusVoigt	124.41	2.63
Inclusive, CBGA	124.84	1.54
Inclusive, CB	124.97	1.80
Inclusive, ACB	125.20	1.97

Основываясь на рисунках (5) и (6), а также на данных, приведенных в таблице (3) видно, что наиболее близкое значение инвариантной массы бозона Хиггса к 125.00 ГэВ и наиболее лучшее отношение фитирования к моделированию имеет функции DSCB. Поэтому можно сделать вывод, что на данный момент функция Double-Sided Crystal Ball наиболее точно описывает форму распределения сигнала бозона Хиггса с распадом в Z бозон и фотон.

4.3 Результаты для несуммированного сигнала

Основываясь на полученных результатах в параграфе 4.2, для проверки зависимости сигнала от способа образования бозона Хиггса была выбрана функция DSCB. С целью получить оценку на зависимость, были зафиксированы параметры α_{Lo} , α_{Hi} , n_{Lo} , и n_{Hi} , а параметры σ_{CB} и μ_{CB} остались произвольными. Полученные результаты фитирования представлены на рисунке (7). Основные параметры приведены в таблице (4). На основе полученных данных можно сделать вывод, что значения инвариантной массы и σ_{CB} равны значениям, полученным в суммарной сигнале (Inclusive) в пределах погрешностей. Отклонения на графиках WH, ZH и ttH связаны с недостатком данных.

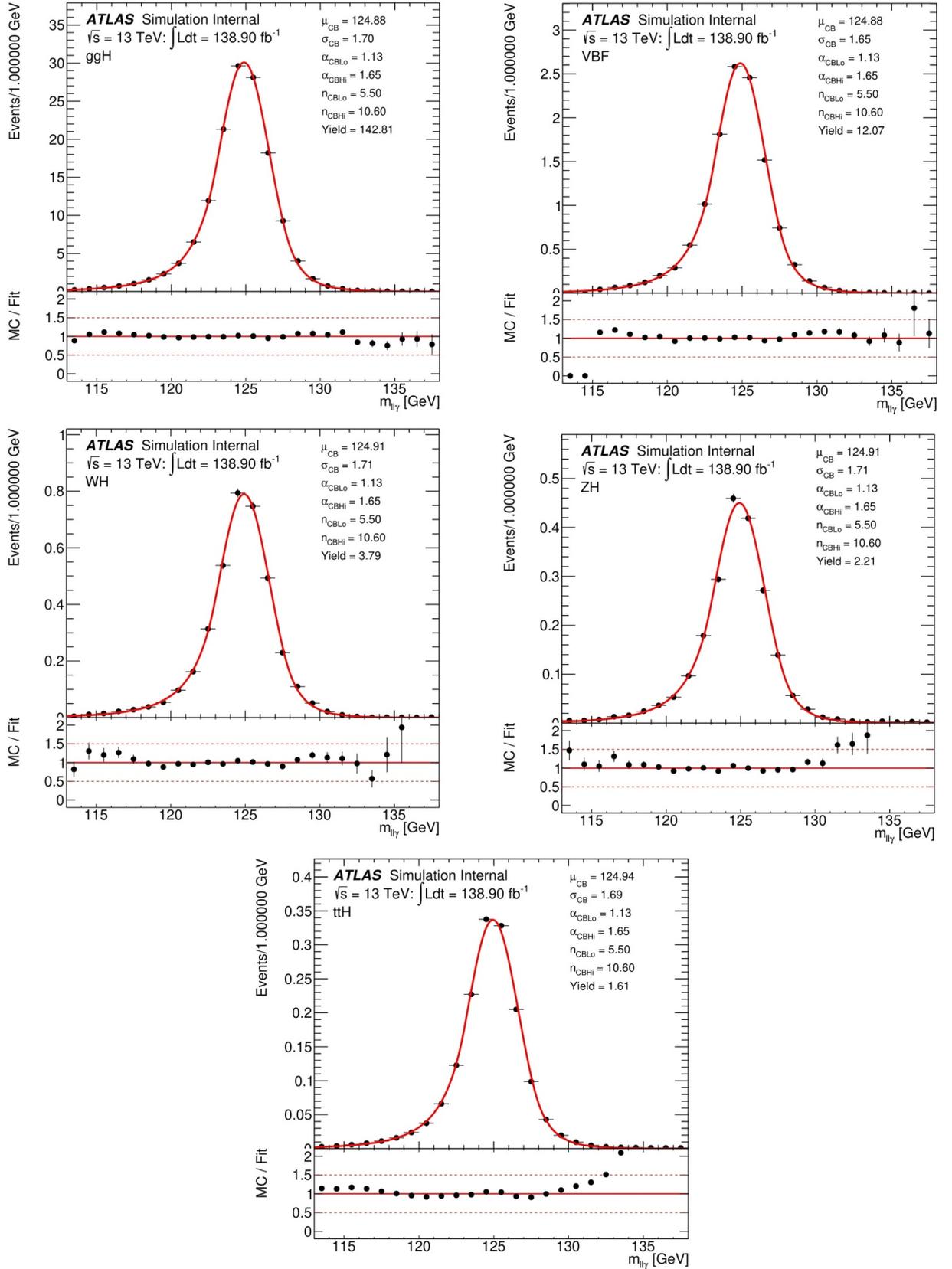


Рисунок 7 — Фитирование распределений функцией DSCB в зависимости от способа образования бозона Хиггса: ggH (слева сверху), VBF (справа сверху), WH (слева по-центру), ZH (справа по-центру), ttH (снизу)

Таблица 4 — Значения инвариантной массы и ширины распределения функции DSCB для каждого способа образования бозона Хиггса

Способ образования	Значение массы, ГэВ	σ_{CB} , ГэВ
ggH, DSCB	124.88	1.70 ± 0.14
VBF, DSCB	124.88	1.65 ± 0.47
WH, DSCB	124.91	1.71 ± 0.86
ZH, DSCB	124.91	1.71 ± 1.18
ttH, DSCB	124.94	1.69 ± 1.31

Заключение

Цель работы заключалась в поиске наиболее подходящей функции фитирования смоделированного сигнала бозона Хиггса в распаде в Z бозон и фотон, в поиске возможных математических функций, которые лучше всего описывают данный сигнал, а также целью было выяснить, зависит ли математическое описание данных от способа образования бозона Хиггса из протон-протонных столкновений.

Для достижения поставленных целей в результате проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Было проведено фитирование смоделированного сигнала и в ходе работы была найдена функция под названием Double-Sided Crystal Ball, которая лучше всего описывает распределение инвариантной массы бозона Хиггса в Z бозон и фотон.
2. Для каждого из четырёх основных механизмов образования бозона Хиггса было произведено фитирование сигнала и в ходе работы было получено, что сигнал не зависит от того, как был рожден бозон Хиггса, а зависит лишь от количества событий.

В будущем планируется сконструировать новую функцию под названием Doudle-Sided Asymmetric Crystal Ball (DSACB), так как эта функция есть совокупность двух наиболее подходящих функций для описания смоделированных данных распада бозона Хиггса, и ожидается, что данная функция будет наиболее хорошо описывать данные и будет использоваться и далее.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Smestad L.* Preparing for an Unbiased Study of the H Background with the ATLAS Experiment at LHC. — 2008. — URL: <https://cds.cern.ch/record/1402030> ; Presented 2008.
2. *Collaboration A.* The performance of ATLAS detector. — Heidelberg : Springer, 2011. — URL: <https://cds.cern.ch/record/1485681> ; Reprinted from The European Physical Journal C (articles published between summer 2010 and spring 2011).
3. *ATLAS Collaboration.* The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // JINST. — 2008. — Vol. 3. — S08003.
4. *Lamberti M.* Measurement of differential cross-sections for Higgs boson production in the $\gamma\gamma$ decay channel at $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ with the ATLAS experiment / Lamberti Mario. — 03/2020. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2746556> ; Presented 02 Apr 2020.
5. *Basalaev A.* Search for the Higgs boson in the final state with two leptons and a photon produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector. — 2020. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2744275>.
6. *ATLAS Collaboration.* Search for the decay of a Higgs boson in the $\ell\ell\gamma$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ // JHEP. — 2018. — June. — Vol. 11, arXiv:1806.05996. CMS-HIG-17-007–003. — 152. 40 p. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2624385> ; Submitted to JHEP.