

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

Пояснительная записка к работе на тему:

«Изучение распадов бозона Хиггса на нерегистрируемые частицы в
эксперименте СЕРС»

Место выполнения: Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
Лаборатория тяжелых кварков и лептонов

Студент, группа: Косицын Арсений Максимович, М24-112

Научный руководитель: Чадеева Марина Валентиновна

Москва 2025

Аннотация

В данной работе был проведен обзор коллайдера CEPC, на котором будут изучаться параметры бозона Хиггса. Изучено программное обеспечение эксперимента и проведена предварительная тестовая реконструкция сигнального канала, сделан первичный анализ полученных данных. Проведены тестовые запуски алгоритма для поиска джетов. Рассмотрены возможные проблемы дальнейшего исследования, а также методы их решения.

Abstract

In this paper, we conducted a review of the CEPC collider, which will study the parameters of the Higgs boson. The experimental software was studied and a preliminary test reconstruction of the signal channel was carried out, and a primary analysis of the data obtained was performed. Test runs of the jet search algorithm have been conducted. Possible problems of further research are considered, as well as methods of their solution.

СОДЕРЖАНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ	3
1.1	Обзор эксперимента СЕРС	3
1.2	Программное обеспечение	4
2	ХОД РАБОТЫ	5
2.1	Исследуемый распад	5
2.2	Реконструкция	6
2.3	Вычисление инвариантной массы и массы отдачи	8
3	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	12
	Список литературы	13

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Обзор эксперимента СЕРС

Круговой электрон-позитронный коллайдер (СЕРС – Circular Electron Positron Collider) — это крупный международный научный объект, предложенный китайским сообществом физиков в 2012 году [1]. Он будет размещён в Китае в подземном кольцевом туннеле длиной около 100 км. СЕРС представляет собой двухкольцевой коллайдер, в котором пучки электронов и позитронов циркулируют в противоположных направлениях в отдельных трубах, а детекторы установлены в двух точках взаимодействия (IPs). Он будет работать в четырех различных режимах:

1. H ($e^+e^- \rightarrow ZH$, 240 ГэВ в СЦМ)
2. Z ($e^+e^- \rightarrow Z$, 91 ГэВ в СЦМ)
3. W ($e^+e^- \rightarrow W^+W^-$, 160 ГэВ в СЦМ)
4. Рассматривается также возможность изучения процессов с рождением топ-кварка при энергии 360 ГэВ.

Энергии в системе центра масс составляют 240, 91 и 160 ГэВ, а светимости — $5 \cdot 10^{34}$, $116 \cdot 10^{34}$ и $16 \cdot 10^{34}$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ соответственно. Основная физическая цель состоит в том, чтобы использовать СЕРС в качестве фабрики Хиггса. Таким образом, предварительный план заключается в том, чтобы сначала в течение 10 лет работать как фабрика Хиггса и создать около 2,6 миллиона частиц Хиггса, затем в течение 2 лет работать как супер фабрика Z и создать около 2,5 триллиона Z -бозонов, а затем в течение 1 года работать как фабрика W и создать около 130 миллионов W -бозонов. Во взаимодействиях на коллайдере СЕРС будет рождаться огромное количество d -кварков, s -кварков и τ -лептонов.

Решение о строительстве все еще обсуждается. В данный момент проект находится на стадии инженерного проектирования (EDR) [1].

1.2 Программное обеспечение

Программное обеспечение CEPC работает в системе Scientific Linux (SLC). Оно состоит из нескольких независимых частей: генератор, моделирование прохождения через вещество детектора, реконструкция и анализ, которые взаимодействуют друг с другом через файлы в формате LCIO (рисунок 1) [2]. Большинство пакетов написаны на C++, и лишь немногие на языке Fortran.

Первоначальная версия программного обеспечения CEPC была перенесена из ILCSoft. Было адаптировано и модифицировано несколько пакетов (Druid, Arbor, ArborTracking, PFA и др.), в том числе пакеты являющиеся интерфейсом к Geant4 [3]. Кроме того, что составляет основу программного обеспечения CEPC, и других исходных пакетов ILCSoft, используются CLHEP, ROOT, Geant4, LCIO, MySQL, CERNLIB, XercesC, QT, CMake и т.д.

В настоящее время программное обеспечение реализовано на основе DD4hep [4] и Key4hep [5], которые постепенно становятся стандартом в программном обеспечении в физике высоких энергий. В них информация о структуре детектора представлена в виде XML кода и скриптов на языке Python.

Правильное описание отклика детектора имеет решающее значение для моделирования. Информация об отклике обобщается и интегрируется с помощью модулей оцифровки. Модули оцифровки считывают смоделированные срабатывания чувствительных элементов и сворачивают их с откликом детектора (по времени и энергии). Полученные сигналы имитируют реальные экспериментальные события на удовлетворительном уровне. В принципе, для каждого отдельного поддетектора требуется одна система оцифровки, и её корректность необходимо проверять на реальных экспериментальных данных.

Реконструкция — это всегда самая сложная, запутанная и интересная часть. Она принимает оцифрованные данные из моделирования или экспериментальные данные и интерпретирует их как физические объекты с измеренными величинами, такими как тип частицы, энергия, импульс и т. д.

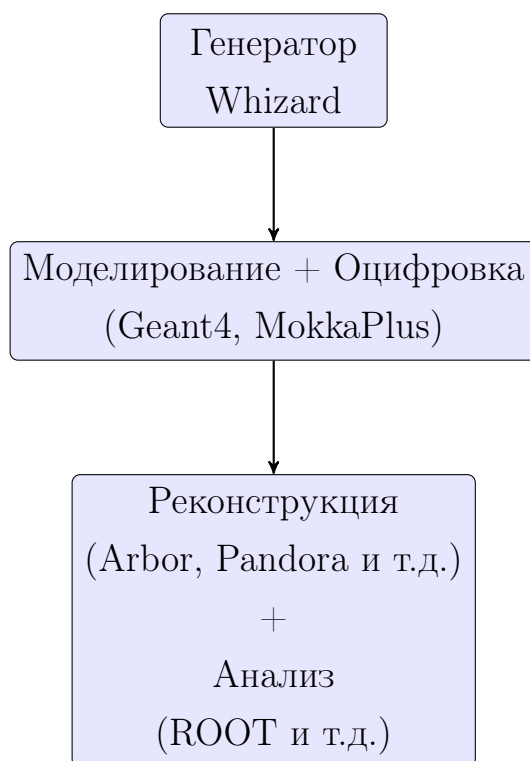


Рисунок 1 — Цепочка программного обеспечения эксперимента CEPC

2 ХОД РАБОТЫ

2.1 Исследуемый распад

Бозон Хиггса широко изучался с момента его открытия [6, 7] на LHC. Последние результаты показывают, что он в высшей степени соответствует Стандартной Модели (СМ). Однако многие новые физические модели предсказывают, что константы связи бозона Хиггса могут отклоняться от Стандартной модели на процентном уровне. Таким образом, для будущей программы измерений параметров бозона Хиггса становится необходимой процентная или даже субпроцентная точность. Однако такой точности трудно достичь на LHC.

Интересным каналом является $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$) (рисунок 2) и по сравнению с адронным коллайдером, электрон-позитронный коллайдер обладает значительными преимуществами в исследовании механизмов образования бозона Хиггса и измерении его параметров. Энергия пучков лептонов и соответственно начальное состояние точно известны. Таким образом даже при распаде бозона Хиггса на нерегистрируемые

частицы, с помощью вычисления массы отдачи (пункт 2.3) можно восстановить его инвариантную массу в этом процессе.

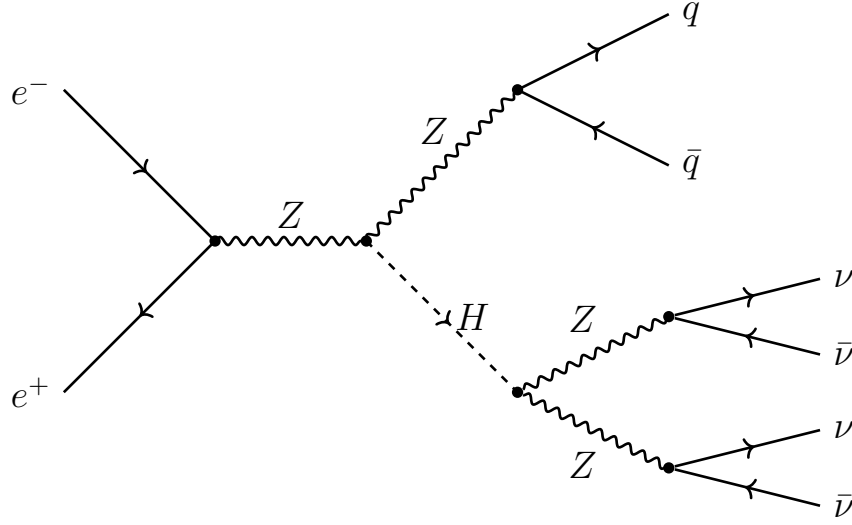


Рисунок 2 — Процесс рождения бозона Хиггса в ассоциации с Z-бозоном и последующим распадом H на нерегистрируемые частицы

2.2 Реконструкция

Сигнальные (таблица 1) и фоновые процессы смоделированы группой CEPС и доступны на их сервере в формате `stdhep`.

Таблица 1 — Информация о сигнальных семплах Хиггса [8]

Process	Final states	σ [fb]	ILC result [fb]	Events expected	Events generated
qqh_X	h, q, \bar{q}	143.39	141.99	724097	723755
uuh_X	h, u, \bar{u}	24.52	—	123802	123733
ddh_X	h, d, \bar{d}	31.45	—	158830	158742
cch_X	h, c, \bar{c}	24.51	—	123766	123711
ssh_X	h, s, \bar{s}	31.46	—	158891	158803
bbh_X	h, b, \bar{b}	31.18	—	157479	157412

В файле, содержащем сигнальный процесс, бозон Хиггса распадается инклюзивно (рисунок 3), а Z-бозон — на два кварка. Инклюзивные распа-

ды Хиггса (рисунок 4 и таблица 2) означают, что в конечном состоянии возможно разное количество джетов и изолированных лептонов:

- 2 джета + 0, 2, 4 изолированных лептонов + недостающая энергия
 - $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$ (сигнальный)
 - $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow l\nu_l$, $W \rightarrow l\nu_l$)
 - $H \rightarrow \tau\tau$ ($\tau \rightarrow l\nu_\tau\nu_l$, $\tau \rightarrow l\nu_\tau\nu_l$)
 - $H \rightarrow ZZ^*$ ($Z \rightarrow ll$, $Z^* \rightarrow ll$)
- 3 джета + 1 изолированный лептон + недостающая энергия
 - $H \rightarrow \tau\tau$ ($\tau \rightarrow hadr$, $\tau \rightarrow l\nu_\tau\nu_l$)
- 4 джета + 0, 1, 2 изолированных лептона + [недостающая энергия]
 - $H \rightarrow \tau\tau$ ($\tau \rightarrow hadr$, $\tau \rightarrow hadr$)
 - $H \rightarrow bb, cc, gg$
 - $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow qq$, $W \rightarrow l\nu_l$)
 - $H \rightarrow ZZ$ ($Z \rightarrow qq$, $Z \rightarrow ll$)
- 6 джетов
 - $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow qq$, $W \rightarrow qq$)
 - $H \rightarrow ZZ$ ($Z \rightarrow qq$, $Z \rightarrow qq$)

Анализ относительных вероятностей распадов показывает, что 85% событий содержат 4 джета, порядка 60% событий содержат 4 джета и ни одного изолированного лептона.

Было реконструировано примерно 6 тысяч событий канала $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow inclusive$) (рисунок 3). Реконструкция проводилась на вычислительном кластере HTCondor [9] и использовался алгоритм Arbor-PFO. Обработка одного stdhep файла (содержит около 2 тысяч событий) занимает продолжительное время.

Важно заметить, что СЕРС предполагает 700 тысяч событий, а интересный канал $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$) (рисунок 2)

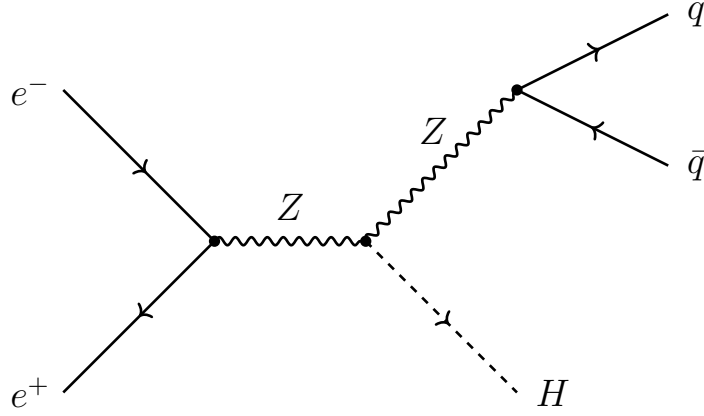


Рисунок 3 — Процесс с инклюзивным распадом Хиггса $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$)

Таблица 2 — Относительные вероятности и относительные погрешности для бозона Хиггса с массой $m_H = 125$ ГэВ в Стандартной Модели [10]

Decay channel	Branching ratio	Rel. uncertainty
$H \rightarrow \gamma\gamma$	2.27×10^{-3}	2.1%
$H \rightarrow ZZ$	2.62×10^{-2}	$\pm 1.5\%$
$H \rightarrow W^+W^-$	2.14×10^{-1}	$\pm 1.5\%$
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.27×10^{-2}	$\pm 1.6\%$
$H \rightarrow b\bar{b}$	5.82×10^{-1}	$+1.2\%$ -1.3%
$H \rightarrow c\bar{c}$	2.89×10^{-2}	$\pm 5.8\%$
$H \rightarrow Z\gamma$	1.53×10^{-3}	$\pm 5.5\%$
$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	2.18×10^{-4}	$\pm 1.7\%$

составляет примерно 0.1% от всех каналов. Это означает, что при реконструкции всех сгенерированных событий канала $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$) будет получено около 700 сигнальных.

2.3 Вычисление инвариантной массы и массы отдачи

Примерно 85% всех событий содержат 4 джета (см. таблицу 2). При этом два джета в моделировании гарантированно появляются из распада Z-бозона. Для поиска джетов использовался встроенный алгоритм (k_t jet-finder) [11]. В программном обеспечении СЕРС на данный момент нет

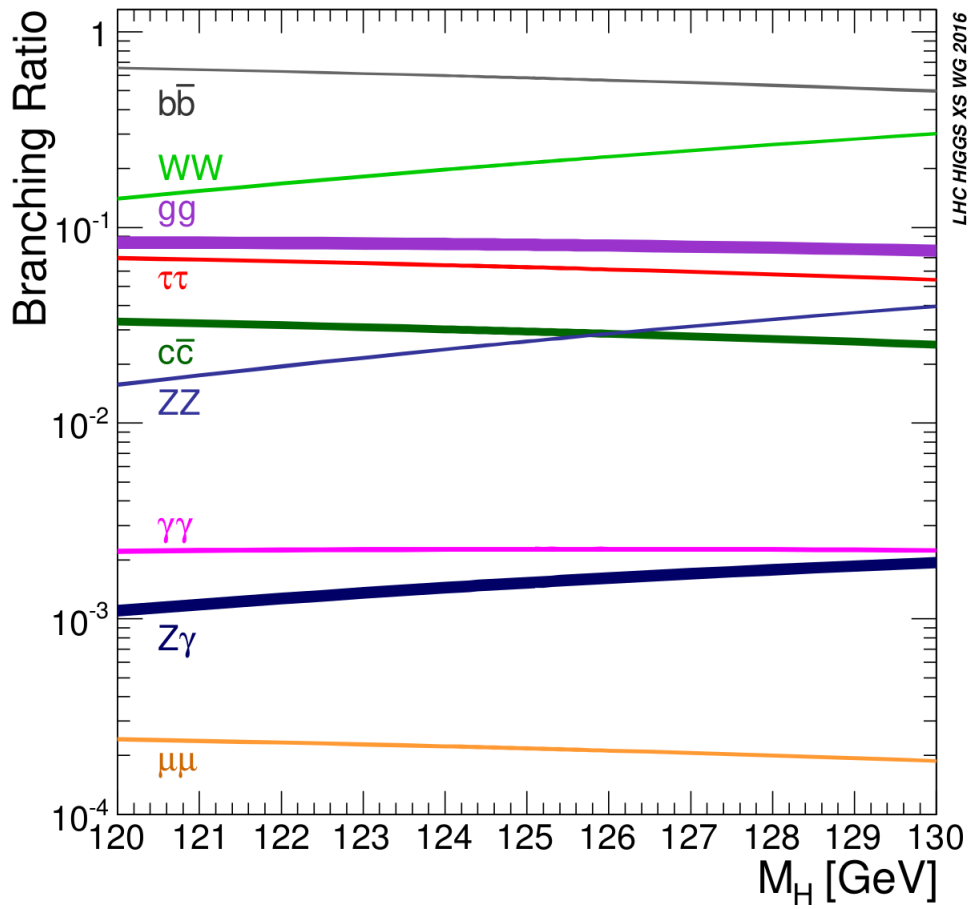


Рисунок 4 — Относительные вероятности основных распадов бозона Хиггса в Стандартной модели при массе близкой к 125 ГэВ [10]

реализации этого алгоритма для поиска произвольного числа джетов, поэтому это количество было задано равным 4.

В данной работе для выделения струй из распада Z -бозона были наложены следующие ограничения (рисунок 5 – синяя линия):

1. Для каждого события из четырех пар джетов выбиралась та пара, масса которой ближе всего к массе Z -бозона и для нее строилась инвариантная масса и масса отдачи.
2. Количество частиц в джетах, которые образованы распадом Z -бозона, должно быть больше 6 (исключение комбинаций, имитирующих $Z \rightarrow \tau\tau$, которых не было в этом семпле).

Поскольку на данный момент отсутствует идентификация изолированных лептонов, поиск фиксированного числа джетов не всегда приводит к правильной реконструкции события. Было наложено дополнительное ограничение: для каждого события из четырех пар джетов выбиралась та пара, масса которой ближе всего к массе бозона Хиггса, если один из джетов уже входил в пару для Z -бозона, такое событие пропускалось. Для прошедших отбор событий вычислялась инвариантная масса двух джетов (рисунок 5 – красная линия).

Выделяя пары джетов из распадов Z -бозона, можно реконструировать массу бозона Хиггса с помощью метода массы отдачи:

$$M_{\text{recoil}} = \sqrt{(\sqrt{s} - E_{qq})^2 - p_{qq}^2}, \quad (1)$$

где E_{qq} и p_{qq} реконструированные импульс и энергия джетов, \sqrt{s} — энергия в системе центра масс. Масса отдачи для двух вариантов отбора показана на рисунке 6.

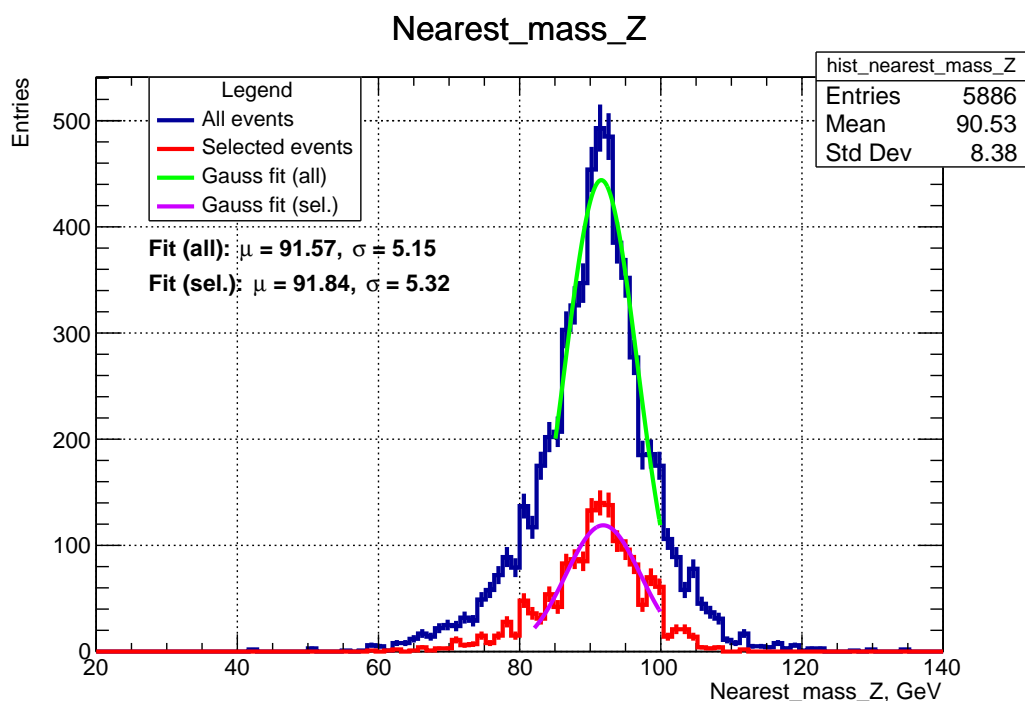


Рисунок 5 — Инвариантная масса двух джетов из распада Z -кандидата. Первичные отборы (синяя гистограмма), дополнительный отбор (красная гистограмма). Линии – фит функции Гаусса. Пояснения в тексте

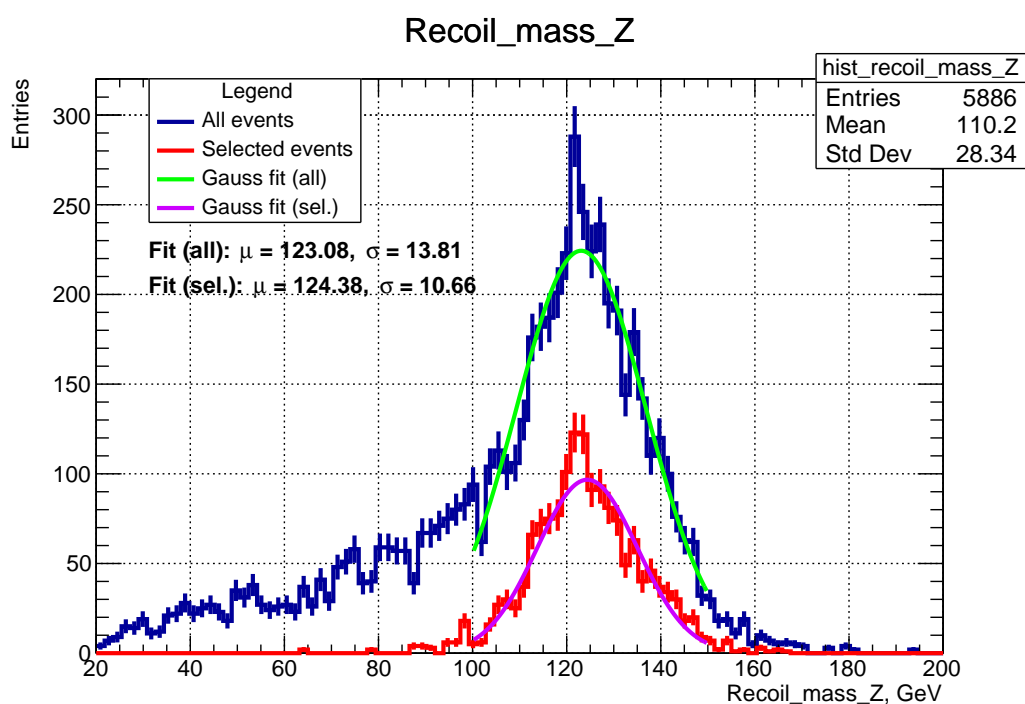


Рисунок 6 — Масса отдачи к инвариантной массе двух джетов из распада Z -кандидата. Первичные отборы (синяя гистограмма), дополнительный отбор (красная гистограмма). Линии – фит функции Гаусса. Пояснения в тексте

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен предварительный анализ сгенерированных событий с рождением бозона Хиггса в ассоциации с Z -бозоном и последующим распадом Z -бозона на кварк антикварковую пару, а бозона Хиггса – инклюзивно. Поиск фиксированного числа джетов не позволяет провести корректную реконструкцию значительного числа событий. В дальнейшем необходимо реконструировать все имеющиеся события как сигнального, так и фоновых каналов, а также добавить все необходимые алгоритмы для анализа:

- алгоритм поиска изолированных лептонов
- идентификация тау-лептонов
- поиск и выделение произвольного числа джетов

Список литературы

- [1] <http://cepc.ihep.ac.cn/index.html>
- [2] <http://cepcsoft.ihep.ac.cn>
- [3] S. Agostinelli et al. Geant4 – A Simulation Toolkit // Nucl.Instrum.Meth.A – 2003 – V. 506 – P. 250-303.
- [4] The DD4hep Project Repository. [Электронный ресурс] – 2016 – URL: <https://github.com/AIDAsoft/DD4hep>
- [5] The Key4hep Project Repository. [Электронный ресурс] – 2021 – URL: <https://key4hep.github.io/key4hep-doc/>
- [6] G. Aad et al (The ATLAS Collaboration), Phys. Lett. B, 716: 1 (2012)
- [7] S. Chatrchyan et al (The CMS Collaboration), Phys. Lett. B, 716: 30 (2012)
- [8] <http://cepcdoc.ihep.ac.cn/DocDB/0000/000034/003/CEPCNoteCover.pdf>
- [9] <https://htcondor.org>
- [10] <https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2023-rev-higgs-boson.pdf>
- [11] arXiv:1607.05039