

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 2024

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. Рассмотрены фоновые процессы и 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. Background processes and possible problems of further research are considered, as well as methods for their solution.

СОДЕРЖАНИЕ

1	ВВЕДЕНИЕ	3
1.1	Обзор эксперимента СЕРС	3
1.2	Программное обеспечение	4
2	ХОД РАБОТЫ	7
2.1	Исследуемый распад	7
2.2	Вычисление массы отдачи	7
2.3	Тестирование программного обеспечения СЕРС	8
2.4	Фоновые процессы	11
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 [7]. 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 ($e^+e^- \rightarrow ZH$)
2. Z ($e^+e^- \rightarrow Z$)
3. W ($e^+e^- \rightarrow W^+W^-$)
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.

Строительство и прогресс (рисунок 1) эксперимента СЕРС подразумевают следующие этапы:

1. Подготовка предварительного отчёта о концептуальном проектировании (PreCDR) в 2015 году и отчёта о концептуальном проектировании (CDR) в 2018 году. Эти цели были достигнуты.

2. С 2018 по 2023 год — исследования и разработки, а также подготовка отчёта о техническом проектировании (TDR) [8]. Эти цели были достигнуты.
3. С 2024 по 2027 год — инженерное проектирование (EDR).
4. Строительство начнётся в 2027 году в рамках 15-го пятилетнего плана правительства и продолжится в рамках 16-го пятилетнего плана. Строительство будет завершено к 2035 году.
5. Ввод в эксплуатацию и эксперименты могут начаться уже в 2035 году, когда начнётся 17-й пятилетний план. Эксперименты будут продолжаться около 14 лет, до 2049 года, с 1 годом на ввод в эксплуатацию и 13 годами на сбор данных о Хиггсе, Z и W.
6. С 2049 по 2055 год — модернизация, с 1 годом на модернизацию и 5 годами на сбор данных.
7. После 2056 года ожидается, что сверхпроводящие магниты для проекта SPPC будут готовы к установке, и начнётся эра SPPC.



Рисунок 1 — Этапы развития эксперимента CEPC [7]

Место строительства все еще обсуждается (рисунок 2). Команда CEPC проводит изучение объектов по всей стране. Местные правительственные учреждения поддерживают CEPC. Исследование CDR основано на объекте номер 1 (Цин Хуан Дао), но команда CEPC все еще продолжает искать новых кандидатов в Китае.

1.2 Программное обеспечение

Программное обеспечение CEPC работает в системе Scientific Linux (SLC). Оно состоит из нескольких независимых частей: генератор, модели-

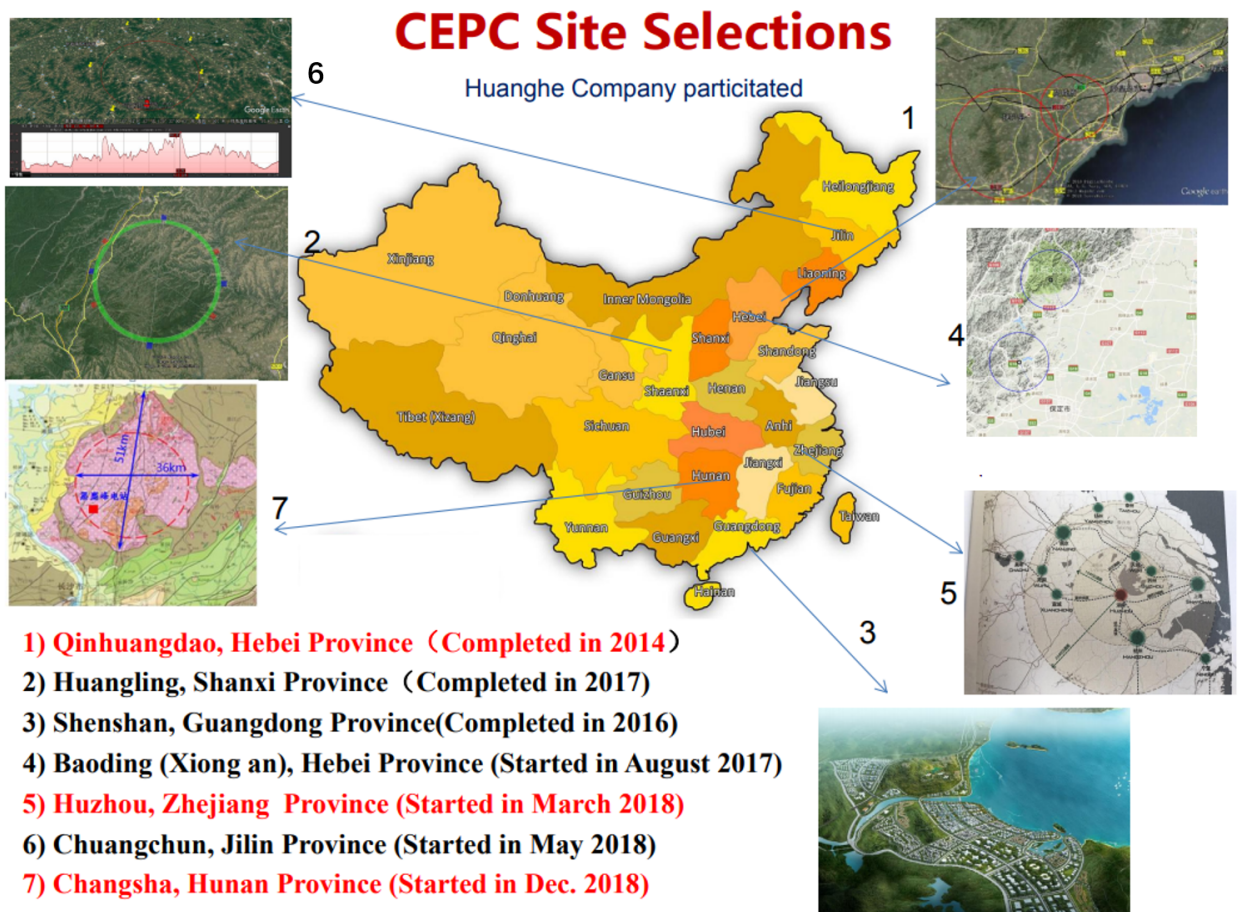


Рисунок 2 — Обсуждение места строительства эксперимента CEPC [7]

рование прохождения через вещество детектора, реконструкция и анализ, которые взаимодействуют друг с другом через файлы в формате LCIO (рисунок 3) [9]. 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 [6]. 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 рассматривается возможность перехода на пакеты DD4hep [4] или 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



Рисунок 3 — Цепочка программного обеспечения эксперимента SEPC

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 детектора, сопоставляют их с откликом (по времени и энергии) и генерируют оцифрованные срабатывания детектора, которые должны имитировать реальные экспериментальные события на удовлетворительном уровне. В принципе, для каждого отдельного субдетектора требуется одна система оцифровки, и её производительность 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.

2 ХОД РАБОТЫ

2.1 Исследуемый распад

Бозон Хиггса широко изучался с момента его открытия [1, 2] на ЛНС. 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 ЛНС.

По сравнению с адронным коллайдером, электрон-позитронный коллайдер обладает значительными преимуществами в исследовании механизмов образования бозона Хиггса (рисунок 4) 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 2.2) можно восстановить его инвариантную массу в этом процессе.

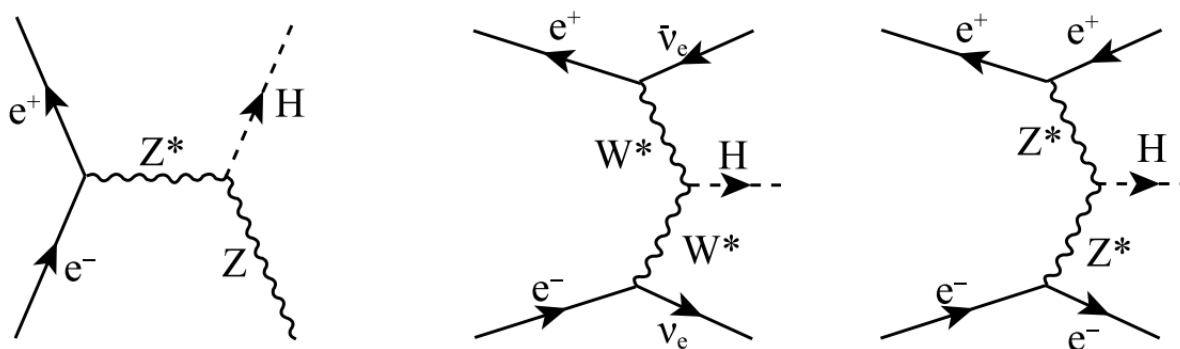


Рисунок 4 — Фейнмановские диаграммы механизмов (сигнальный и два фоновых) образования Хиггса в СЕРС [3]

2.2 Вычисление массы отдачи

Ранее были проведены предварительные исследования для эксперимента СЕРС по изучению сечения для процесса рождения бозона Хиггса в

ассоциации с Z -бозоном, когда Z -бозон распадается в два мюона [3]. Выделяя пары мюонов из распадов Z -бозона, можно наиболее точно реконструировать массу бозона Хиггса, с помощью метода массы отдачи:

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

где E_{μ^+} и E_{μ^-} — энергии двух мюонов, $M_{\mu^+\mu^-}$ — инвариантная масса двух мюонов, s — квадрат энергии в системе центра масс.

В работе, упомянутой выше [3], при энергии в системе центра масс 250 ГэВ и набранной интегральной светимости 5 аб^{-1} использование метода массы отдачи позволяет получить верхний предел на уровне $1.2 \cdot 10^{-2}$ с достоверностью 95%. Но нужно учитывать, что распад Z -бозона в два мюона составляет около 3%, а в два кварка около 70%. Поэтому важно получить оценки точности для второго процесса. Это позволит улучшить статистическую точность измерений.

Если же бозон Хиггса распадается на нерегистрируемые частицы (рисунок 5), то в детекторе будут зарегистрированы только струи от процесса $Z \rightarrow qq$ и распределение массы отдачи, построенное по формуле:

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

где E_{qq} и p_{qq} реконструированные импульс и энергия струй, s — энергия в системе центра масс, достигнет максимума в точке $M_{\text{recoil}} \approx M_h$, где M_h — масса бозона Хиггса.

2.3 Тестирование программного обеспечения СЕРС

Как упоминалось в пункте 1.2 для исследования определенного процесса генератор Whizard должен создать генераторный файл (семпл). После этого этот файл используется алгоритмом для реконструкции и оцифровки, а после полученные данные проходят анализ. В данный момент некоторые файлы генератора находятся в процессе генерации (например, нет сигнального распада, изображенного на рисунке 5) и еще не все механизмы образования Хиггса можно реконструировать.

Для того чтобы освоить использование программного обеспечения СЕРС была запущена полная реконструкция и анализ 200 событий процесса $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow qqX$ (X — инклюзивные распады бозона Хиггса в

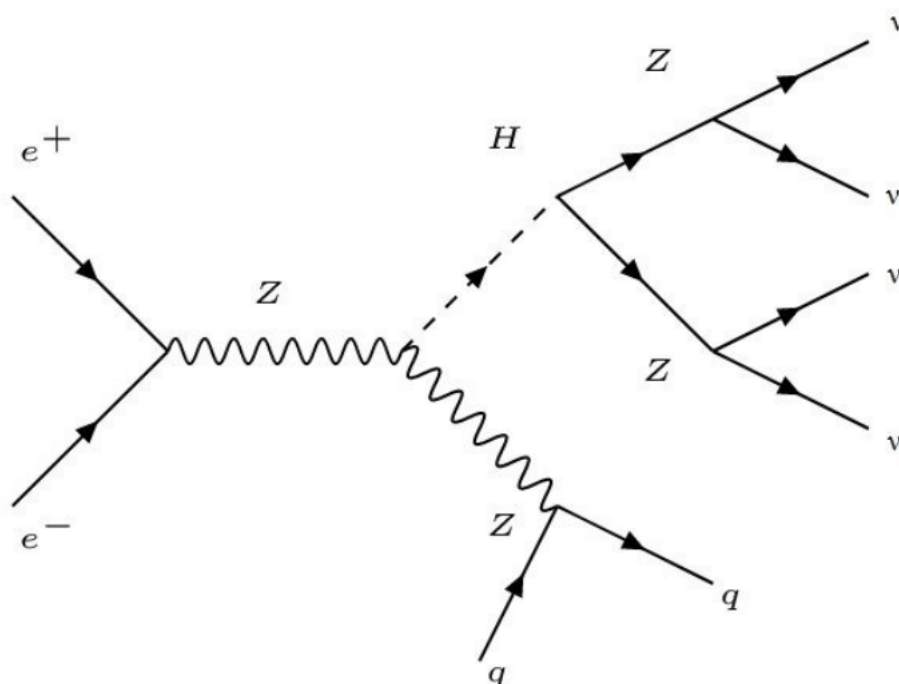


Рисунок 5 — Фейнмановская диаграмма рождения бозона Хиггса, в которой он распадается на нерегистрируемые частицы, а Z-бозон на два кварка

Стандартной Модели). Это связано с тем, что такой файл генератора уже сгенерирован. Для этого процесса была построена инвариантная масса и масса отдачи (рисунки 6 и 7).

В используемом генераторном файле сгенерированы все известные каналы распада Хиггса, поэтому чтобы получить сигнальные события нужно делать отбор по параметрам генерации. Более того, в СЕРС предполагается 700 тысяч событий, а интересный канал распада составляет примерно 0.1% от всех каналов. Это означает, что при реконструкции всех сгенерированных событий интересующего нас процесса на СЕРС будет получено около 700 сигнальных.

Для объемных задач в СЕРС используется вычислительный кластер HTCondor [10]. Нужно учитывать, что при средней загрузке кластера реконструкция одного генераторного файла (он содержит около 360 событий) занимает примерно 3-5 часов, поэтому реконструкция всех 700 тысяч событий займет большой промежуток времени.

Invariant mass for the process $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow qqX$

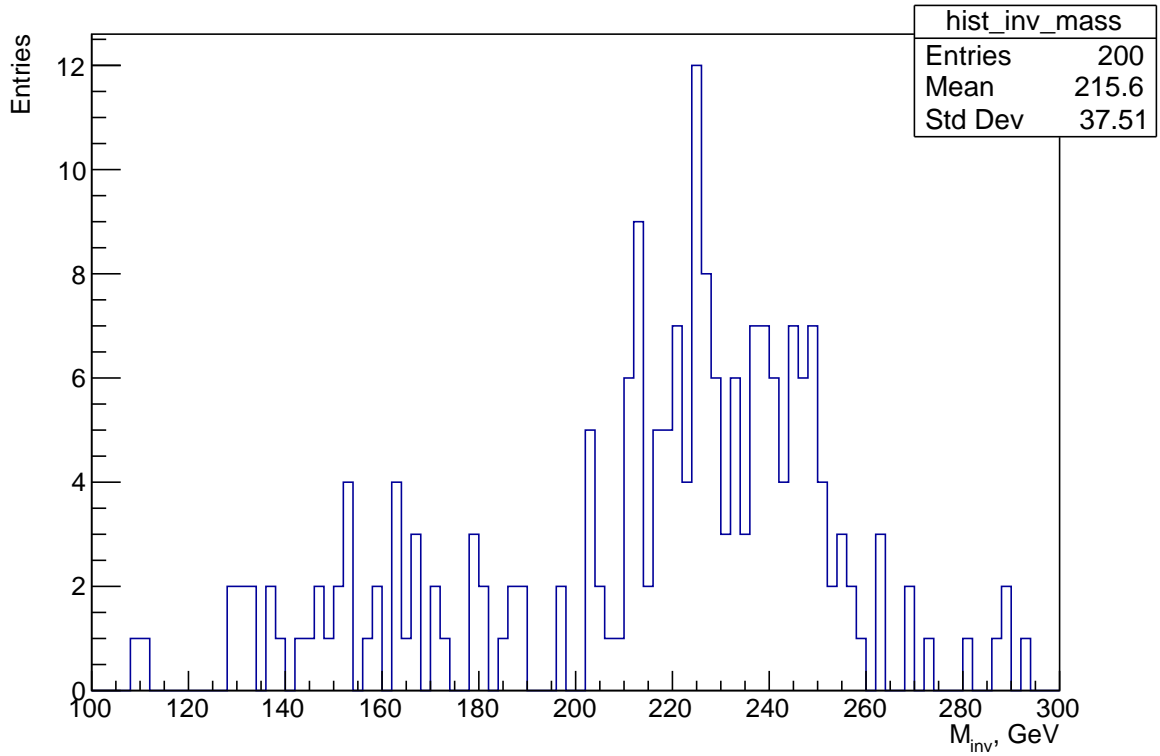


Рисунок 6 — Рассчитанная инвариантная масса для процесса $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow qqX$

Recoil mass for the process $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow qqX$

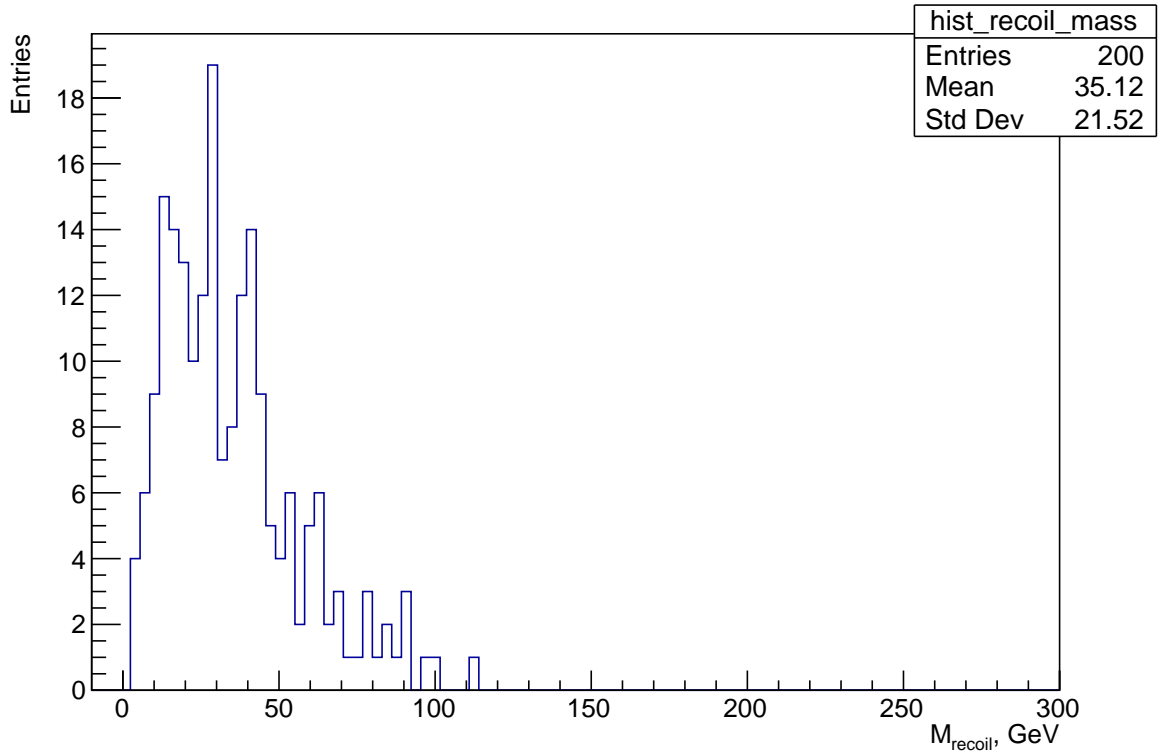


Рисунок 7 — Рассчитанная масса отдачи для процесса $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow qqX$

2.4 Фоновые процессы

При анализе сигнального процесса ($e^+e^- \rightarrow Zh, Z \rightarrow qq, h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$) необходимо будет учитывать существование следующих фоновых процессов на CEPС:

1. $e^+e^- \rightarrow WW$
2. $e^+e^- \rightarrow e^\pm\nu W^\pm$
3. $e^+e^- \rightarrow e^+e^-Z, (Z \rightarrow qq)$
4. $e^+e^- \rightarrow ZZ, (Z \rightarrow qq; Z \rightarrow \nu\nu)$
5. $e^+e^- \rightarrow \nu\nu Z, (Z \rightarrow qq)$
6. $e^+e^- \rightarrow \nu\nu h, (h \rightarrow qq, \tau\tau)$
7. $e^+e^- \rightarrow Zh, (h \rightarrow qq, \tau\tau; Z \rightarrow \nu\nu)$

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 на нерегистрируемые частицы. Рассмотрены фоновые процессы при анализе сигнального процесса. В дальнейшем планируется реконструировать все имеющиеся события как сигнального, так и фоновых каналов.

Список литературы

- [1] G. Aad et al (The ATLAS Collaboration), Phys. Lett. B, 716: 1 (2012)
- [2] S. Chatrchyan et al (The CMS Collaboration), Phys. Lett. B, 716: 30 (2012)
- [3] Cross section and Higgs mass measurement with Higgsstrahlung at the CEPC
- [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] S. Agostinelli et al. Geant4 – A Simulation Toolkit // Nucl.Instrum.Meth.A – 2003 – V. 506 – P. 250-303.
- [7] <http://cepc.ihep.ac.cn/index.html>
- [8] http://cepc.ihep.ac.cn/CEPC_tdr.pdf
- [9] <http://cepcsoft.ihep.ac.cn>
- [10] <https://htcondor.org>