

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 2026

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	Детектор СЕРС	4
1.3	Программное обеспечение	5
1.3.1	Алгоритм реконструкции частиц CyberPFA	6
1.3.2	Идентификация частиц (PID)	8
2	ХОД РАБОТЫ	10
2.1	Сигнальный канал	10
2.2	Инклюзивный распад бозона Хиггса	11
2.3	Поиск джетов	14
2.4	Поиск изолированных лептонов	14
2.5	Вычисление инвариантной массы и массы отдачи	16
3	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
	Список литературы	19

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 Детектор СЕРС

Детектор СЕРС создан для изучения бозона Хиггса, электрослабых процессов и поиска новых явлений за пределами Стандартной модели. Он будет работать в трёх основных режимах: как «фабрика Хиггса» (при энергии 240 ГэВ), «фабрика Z-бозонов» (91 ГэВ) и «фабрика W-бозонов» (160 ГэВ) [2].

Детектор имеет цилиндрическую многослойную структуру (рисунок 1) и состоит из нескольких ключевых частей, расположенных от центра к внешней области:

- **Вершинный детектор** — позволяет точно находить точки распада короткоживущих частиц, таких как адроны с кварками b и c . Это необходимо для надёжного определения типа струи.
- **Система трекинга** — отслеживает траектории заряженных частиц и измеряет их импульсы с высокой точностью. Она также помогает различать пионы, каоны и протоны, что важно для анализа состава струй.
- **Электромагнитный калориметр** — измеряет энергию электронов и фотонов. Его высокая точность особенно важна для исследования редкого распада бозона Хиггса в два фотона ($H \rightarrow \gamma\gamma$).
- **Адронный калориметр** — измеряет энергию адронных струй. От его качества напрямую зависит способность детектора различать струи от разных бозонов (H, Z, W).
- **Магнит** — создаёт сильное магнитное поле, благодаря которому можно точно определить импульсы заряженных частиц по искривлению их траекторий.
- **Мюонный детектор** — расположен снаружи всех других слоёв и служит для надёжной идентификации мюонов, которые проходят через весь детектор почти без взаимодействия.
- **Люминометр** — специальный прибор, расположенный вблизи пучка, который измеряет общее число столкновений (светимость) с очень вы-

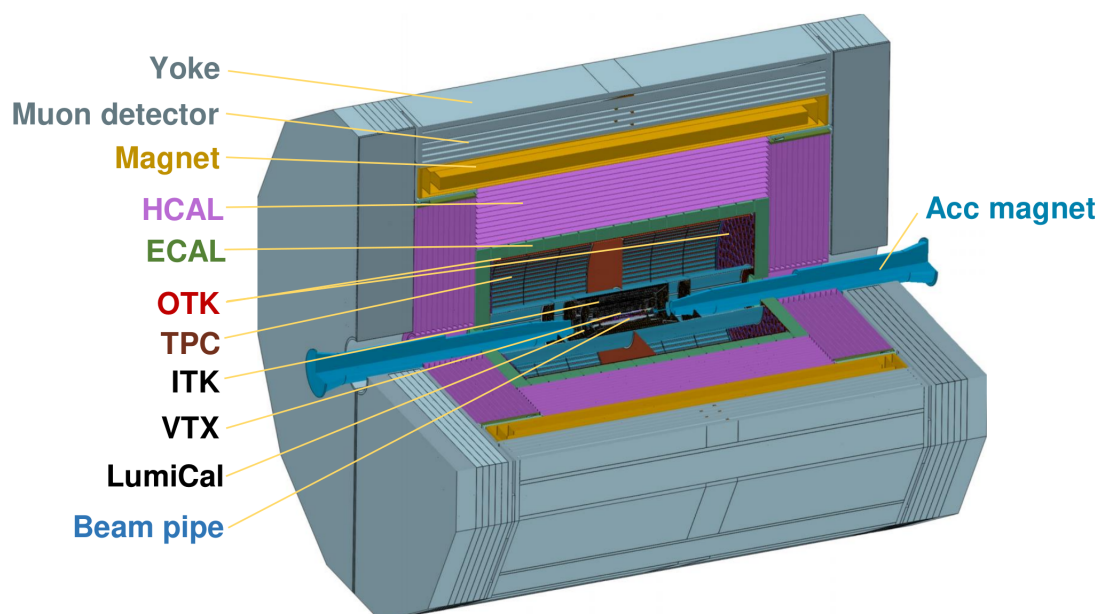


Рисунок 1 — Схематическое изображение детектора CEPC с указанием основных подсистем. От центра к периферии: вершинный детектор, внутренний кремниевый трекер, TPC-трекер, внешний кремниевый трекер, электромагнитный и адронный калориметры, сверхпроводящий соленоид, возвратное ярмо с мюонным детектором, а также люминометр, расположенный вблизи вакуумной трубки пучка [2]

сокой точностью. Это необходимо для точного определения вероятностей различных процессов.

Вся конструкция детектора оптимизирована под метод реконструкции событий, называемый Particle Flow Algorithm (PFA). Этот подход объединяет данные от всех подсистем, чтобы максимально точно восстановить каждый продукт столкновения — будь то заряженная частица, нейтральный адрон или фотон.

1.3 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 2) [3]. Большинство пакетов написаны на C++, и лишь немногие на

языке Fortran.

Первоначальная версия программного обеспечения CEPС была перенесена из ILCSoft. Было адаптировано и модифицировано несколько пакетов (Druid, Arbor, ArborTracking, PFA и др.), в том числе пакеты являющиеся интерфейсом к Geant4 [4]. Кроме того, что составляет основу программного обеспечения CEPС, 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 [5] и Key4hep [6], 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.

1.3.1 Алгоритм реконструкции частиц CyberPFA

Для детектора CEPС был разработан специальный алгоритм реконструкции событий CyberPFA [2]. Основная задача CyberPFA — точно определить, какие сигналы в детекторе принадлежат одной и той же частице, особенно когда ливни от разных частиц перекрываются. Алгоритм работа-

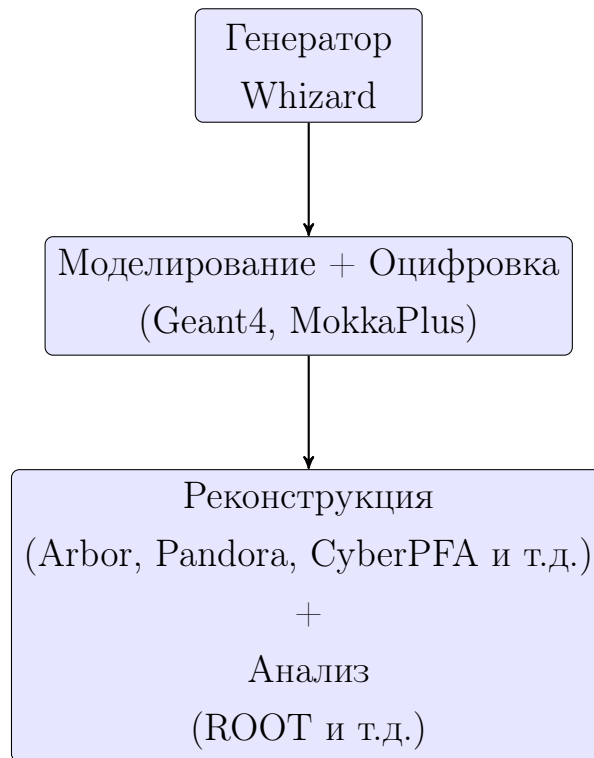


Рисунок 2 — Цепочка программного обеспечения эксперимента CEPES

ет по принципу Particle Flow: для каждой частицы он использует наилучшую доступную информацию — треки для заряженных частиц и данные калориметров для нейтральных.

Работа CyberPFA состоит из нескольких шагов:

- Сначала отбираются надёжные треки и группируются сигналы в калориметрах.
- Затем находятся «центры» ливней (локальные максимумы энергии) и строятся кластеры вокруг них.
- Для разных типов частиц применяются разные методы: заряженные частицы связываются с треками, нейтральные фотоны ищутся с помощью анализа формы ливней, а оставшиеся сигналы объединяются в конусы.
- Если ливни перекрываются, алгоритм разделяет их, используя известные профили развития электромагнитных и адронных ливней.
- Особое внимание уделяется удалению «ложных» сигналов, которые

возникают из-за пересечения стержней калориметра. Для этого используются данные о глубине развития ливня и геометрии модулей.

- На последнем этапе информация из трекеров, ECAL и HCAL объединяется, чтобы получить окончательные объекты — Particle Flow Objects (PFO).

CyberPFA реализован как независимый модуль в программном фреймворке CEPSCSW (на основе Gaudi) и не использует код Pandora или Arbor. Он выводит результаты в стандартном формате EDM4HEP/PODIO, совместимом с другими инструментами анализа. В данной работе для реконструкции событий использовался именно этот алгоритм.

1.3.2 Идентификация частиц (PID)

В эксперименте CEPSC каждая заряженная частица должна быть не только отслежена, но идентифицирована [2]. Для этого используется комбинация информации из нескольких подсистем детектора.

Для адронов (пионов, каонов, протонов) применяются два основных метода. Во-первых, в газовом трекере TPC измеряется удельная ионизация — сколько энергии частица теряет при прохождении через газ. Благодаря высокой гранулярности детектора это позволяет различать частицы с разной массой. Во-вторых, в области низких импульсов, где ионизация недостаточно информативна, используется система измерения времени пролёта (ToF). Детекторы во внешнем трекере фиксируют момент прихода частицы с точностью около 50 пс. Зная длину траектории и импульс, можно вычислить массу частицы и однозначно определить её тип. Вместе эти методы обеспечивают разделение пионов, каонов и протонов.

Мюоны идентифицируются по-другому. Они почти не взаимодействуют с веществом, поэтому проходят через весь детектор, оставляя сигнал только в трекерах и мюонной системе. Алгоритм считает частицу мюоном, если:

- есть качественный трек в кремниевых детекторах и TPC,
- энергия, которая выделилась в калориметрах (ECAL и HCAL), очень мала по сравнению с импульсом трека ($E/p \approx 0$),

- в мюонном детекторе, расположенном за всеми другими слоями, зарегистрировано не менее трёх совпадающих попаданий вдоль экстраполированной траектории.

2 ХОД РАБОТЫ

2.1 Сигнальный канал

Бозон Хиггса широко изучался с момента его открытия [7, 8] 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.

Интересным каналом является $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$) (рисунок 3) 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 2.5) можно восстановить его инвариантную массу в этом процессе.

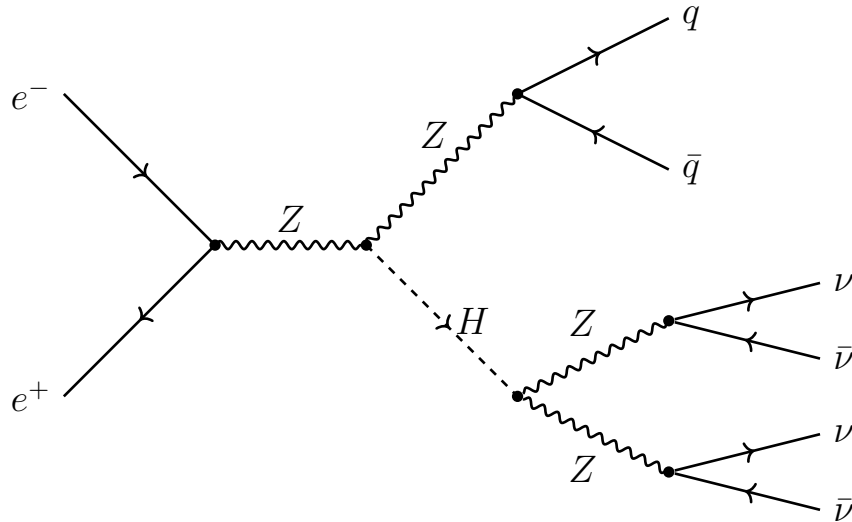


Рисунок 3 — Процесс рождения бозона Хиггса в ассоциации с Z -бозоном и последующим распадом H на нерегистрируемые частицы

2.2 Инклюзивный распад бозона Хиггса

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

Таблица 1 — Информация о сигнальных семплах Хиггса [9]

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 файлах, содержащих сигнальный процесс, бозон Хиггса распадается инклюзивно (рисунок 4), а Z-бозон — на два кварка. Инклюзивные распады Хиггса (рисунок 5 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]
 - $H \rightarrow \tau\tau$ ($\tau \rightarrow hadr, \tau \rightarrow hadr$)
 - $H \rightarrow bb, cc, gg$

Таблица 2 — Относительные вероятности и относительные погрешности для бозона Хиггса с массой $m_H = 125$ ГэВ в Стандартной Модели [11]

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}	$\pm 1.7\%$

- $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow qq$, $W \rightarrow l\nu_l$)
- $H \rightarrow ZZ$ ($Z \rightarrow qq$, $Z \rightarrow ll$)

• 6 джетов

- $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow qq$, $W \rightarrow qq$)
- $H \rightarrow ZZ$ ($Z \rightarrow qq$, $Z \rightarrow qq$)

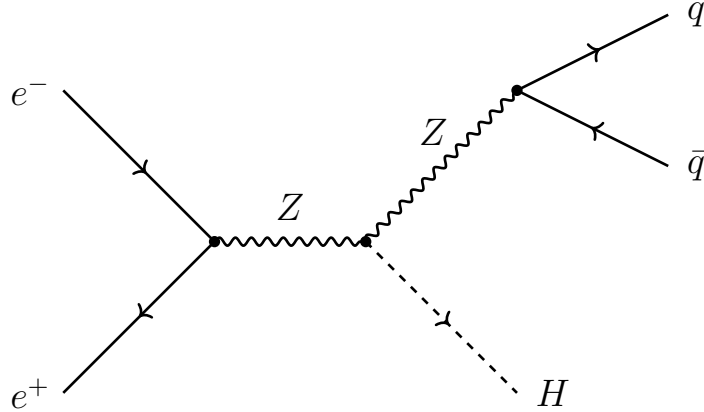


Рисунок 4 — Процесс с инклюзивным распадом Хиггса $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$)

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

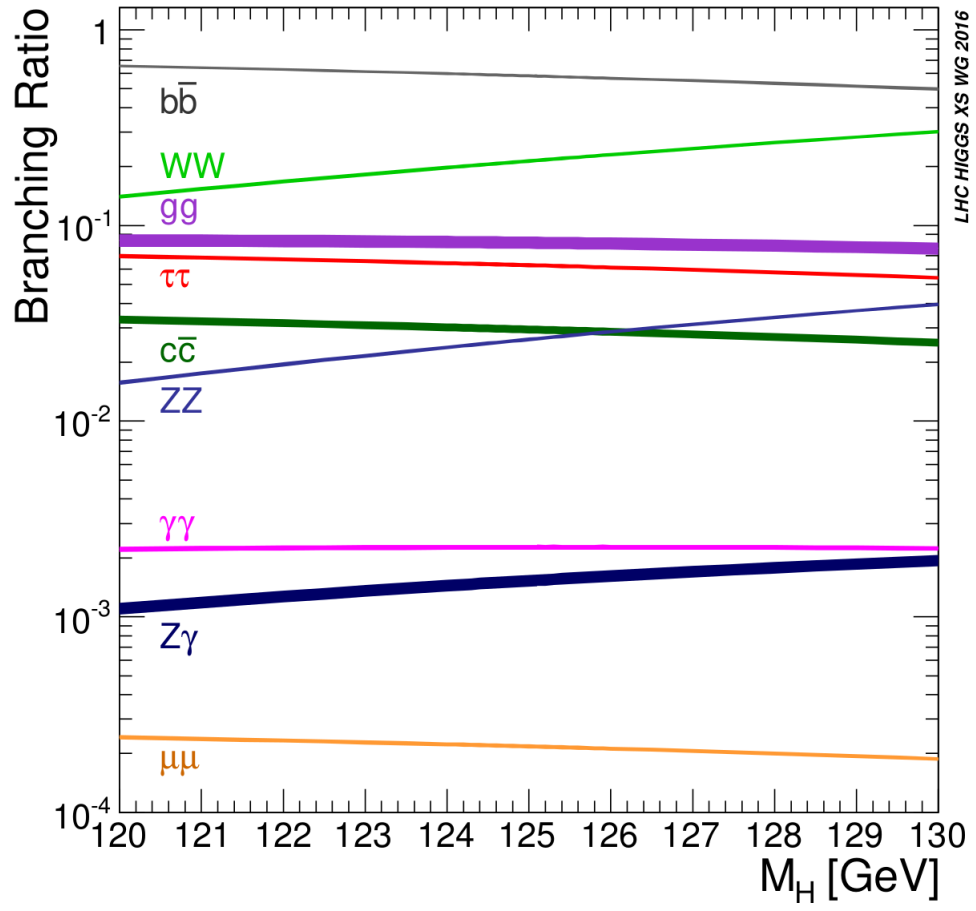


Рисунок 5 — Относительные вероятности основных распадов бозона Хиггса в Стандартной модели при массе близкой к 125 ГэВ [11]

С помощью алгоритма CyberPFA было реконструировано около 9200 событий канала $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$) (рисунок 4). Реконструкция проводилась на вычислительном кластере HTCondor [10].

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 3) составляет около 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 Поиск джетов

Для поиска адронных струй (джетов) в событиях $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$) (рисунок 4) был использован обобщённый алгоритм k_t для e^+e^- -столкновений (рисунок 6), реализованный в библиотеке FastJet [12]. Он работал в инклюзивном режиме кластеризации. Данный алгоритм поиска джетов определяет расстояния между частицами следующим образом:

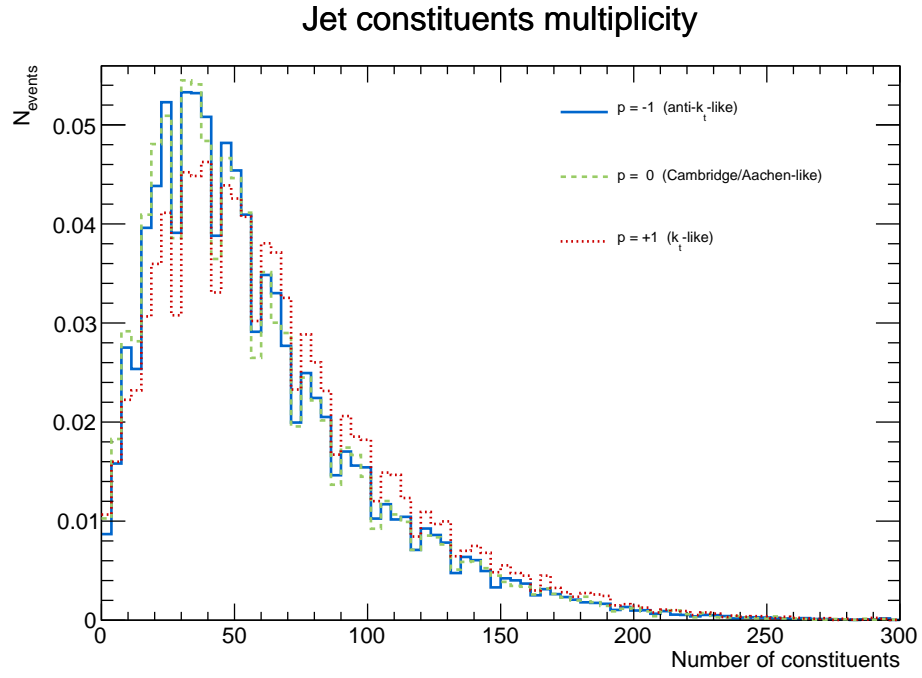
$$d_{ij} = \min(E_i^{2p}, E_j^{2p}) \frac{1 - \cos \theta_{ij}}{1 - \cos R}, \quad d_{iB} = E_i^{2p}, \quad (1)$$

где E_i — энергия i -й частицы, θ_{ij} — угол между частицами i и j , R — параметр радиуса джета, а p — внутренний параметр. При $p = 1$ алгоритм воспроизводит поведение классического k_t -алгоритма.

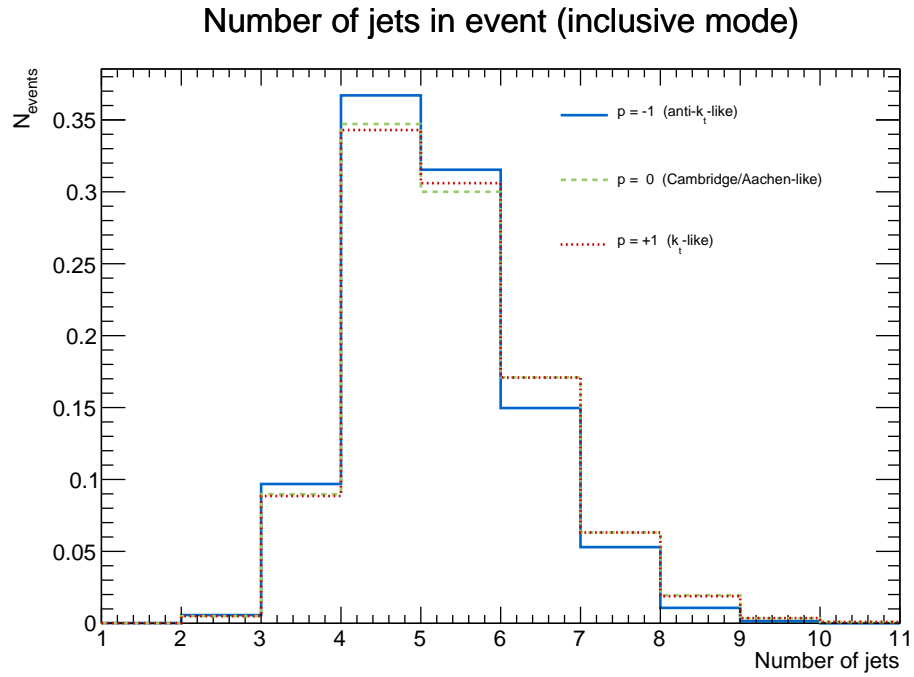
В инклюзивном режиме все реконструированные частицы (PFO), полученные после работы алгоритма CyberPFA, подаются на вход кластеризатора. Алгоритм последовательно объединяет пары частиц с минимальным расстоянием d_{ij} , пока не останется только набор «внутренних» джетов, для которых $d_{iB} < d_{jk}$ для всех оставшихся пар. В рамках анализа были установлены параметры: $R = 0.5$, $p = 1.0$.

2.4 Поиск изолированных лептонов

Для подавления фоновых процессов, содержащих изолированные лептоны, в анализе был реализован критерий на основе относительной изоляции. Для каждой реконструированной частицы (PFO) вычисляется сумма модулей импульсов всех остальных частиц, попадающих в конус с угловым радиусом $\Delta R = 0.4$ вокруг неё:



(a) Распределение числа составляющих джетов для разных значений параметра p алгоритма k_t



(b) Распределение числа реконструированных джетов на событие при различных p алгоритма k_t

Рисунок 6 — Сравнение характеристик реконструированных джетов при использовании обобщённого k_t -алгоритма с параметрами $p = -1$, $p = 0$ и $p = 1$.

$$I_{rel} = \frac{\sum_{j \neq i, \Delta R_{ij} < \Delta R} |\vec{p}_j|}{|\vec{p}_i|}, \quad (2)$$

где $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ — угловое расстояние между частицами в пространстве псевдобыстроты и азимутального угла. Частица считается изолированной, если $I_{rel} < 0.1$ и её поперечный импульс $p_T > 2 \text{ ГэВ}$.

В текущей реализации алгоритма тип частицы определяется по значению поля `type` объекта PFO, которое устанавливается алгоритмом реконструкции CyberPFA: $|\text{type}| = 11$ (электроны) или 13 (мюоны).

2.5 Вычисление инвариантной массы и массы отдачи

Для выделения сигнального канала из процесса $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$) (рисунок 4) были наложены следующие критерии отбора:

- событие отбрасывается, если в нём присутствует хотя бы один изолированный лептон;
- каждый реконструированный джет должен содержать не менее шести составляющих частиц;
- в событии должно быть ровно два джета.

На рисунке 7 показано распределение инвариантной массы системы двух джетов до и после применения указанных отборов. Чёткий пик около 91 ГэВ свидетельствует об успешной реконструкции Z -бозонов.

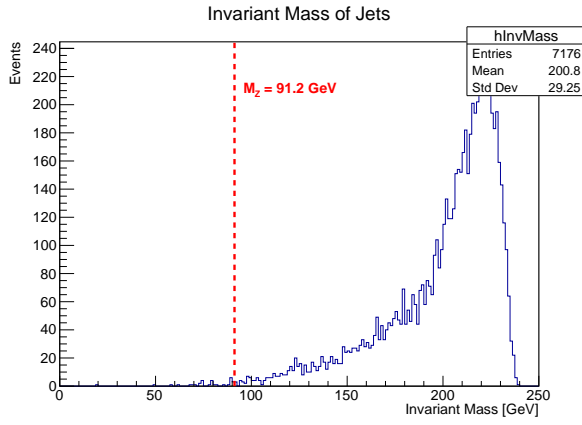
Используя реконструированные джеты от распада Z -бозона, можно восстановить массу бозона Хиггса методом массы отдачи:

$$M_{\text{recoil}} = \sqrt{(\sqrt{s} - E_{qq})^2 - |\vec{p}_{qq}|^2}, \quad (3)$$

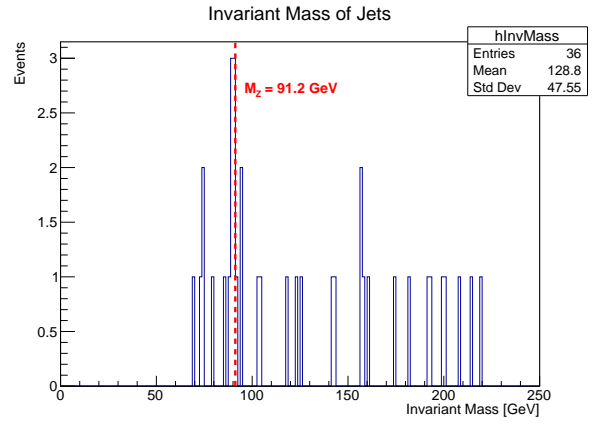
где E_{qq} и \vec{p}_{qq} — полная энергия и трёхмерный импульс системы двух джетов, а $\sqrt{s} = 240 \text{ ГэВ}$ — энергия в системе центра масс.

Распределение массы отдачи до и после отборов показано на рисунке 8. После отбора наблюдается выраженный пик около 125 ГэВ, соответствующий массе бозона Хиггса.

После применения полного набора отборов 7176 обработанных событий канала $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$) осталось 36 событий.

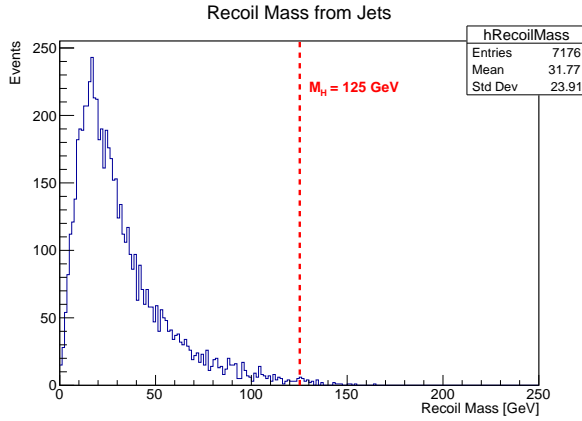


(a) До отбора

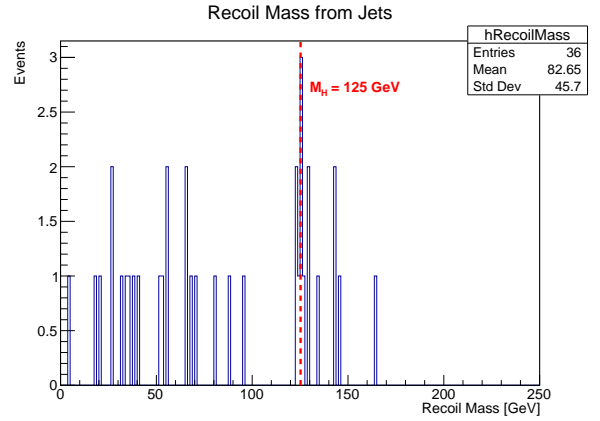


(b) После отбора

Рисунок 7 — Инвариантная масса системы двух джетов в событиях $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$)



(a) До отбора



(b) После отбора

Рисунок 8 — Масса отдачи по отношению к системе двух джетов в событиях $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{inclusive}$)

На распределении инвариантной массы двух джетов (рисунок 7, б) наблюдается слабый пик вблизи 91 ГэВ, что согласуется с массой Z -бозона. Соответствующее распределение массы отдачи (рисунок 8, б) демонстрирует слабый пик в области 125 ГэВ, что согласуется с массой бозона Хиггса.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведён предварительный анализ событий процесса $e^+e^- \rightarrow ZH$ с инклюзивным распадом бозона Хиггса, реконструированных с использованием алгоритма CyberPFA. Реализован инклюзивный поиск джетов на основе обобщённого k_t -алгоритма, а также критерий изоляции для подавления фоновых каналов с изолированными лептонами.

Из 7176 исходных событий после отбора осталось 36, из которых лишь три попадают в пик массы отдачи около 125 ГэВ. Несмотря на малую статистику, наличие пика в инвариантной массе двух джетов при 91 ГэВ и сигнала в массе отдачи подтверждает работоспособность предложенной цепочки анализа.

Однако текущий объём данных является недостаточным для надёжного извлечения сигнала. В дальнейшем необходимо:

- увеличить статистику;
- расширить анализ на все сигнальные и фоновые каналы;
- реализовать идентификацию тау-лептонов.

Список литературы

- [1] <http://cepc.ihep.ac.cn/index.html>
- [2] arXiv:2510.05260v1
- [3] <http://cepcsoft.ihep.ac.cn>
- [4] S. Agostinelli et al. Geant4 – A Simulation Toolkit // Nucl.Instrum.Meth.A – 2003 – V. 506 – P. 250-303.
- [5] The DD4hep Project Repository. [Электронный ресурс] – 2016 – URL: <https://github.com/AIDASoft/DD4hep>
- [6] The Key4hep Project Repository. [Электронный ресурс] – 2021 – URL: <https://key4hep.github.io/key4hep-doc/>
- [7] G. Aad et al (The ATLAS Collaboration), Phys. Lett. B, 716: 1 (2012)
- [8] S. Chatrchyan et al (The CMS Collaboration), Phys. Lett. B, 716: 30 (2012)
- [9] <http://cepcdoc.ihep.ac.cn/DocDB/0000/000034/003/CEPCNoteCover.pdf>
- [10] <https://htcondor.org>
- [11] <https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2023-rev-higgs-boson.pdf>
- [12] arXiv:1607.05039