

Изучение распадов бозона Хиггса на нерегистрируемые частицы в эксперименте СЕРС

Студент: Косицын А.М.
Научный руководитель: Чадеева М.В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт ядерной физики и технологий
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

26 января 2026 г.

CEPC: Круговой электрон-позитронный коллайдер

- Предложен в 2012 году китайским сообществом физиков
- Подземный туннель длиной ~ 100 км в Китае
- Двухкольцевой коллайдер: отдельные трубы для e^+ и e^-
- 2 точки взаимодействия (IPs)
- Стадия: инженерное проектирование (EDR)

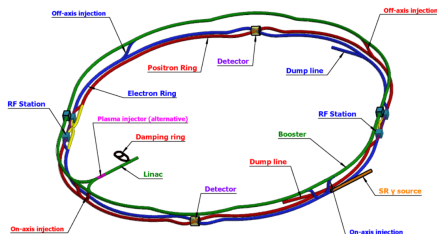


Рисунок 1 — Детектор CEPC

Основные режимы

1 Фабрика Хиггса ($\sqrt{s} = 240$ ГэВ)

- $e^+e^- \rightarrow ZH$
- Светимость: $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- 10 лет работы, ~ 2.6 млн бозонов Хиггса

2 Супер фабрика Z ($\sqrt{s} = 91$ ГэВ)

- $e^+e^- \rightarrow Z$
- Светимость: $116 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- 2 года работы, ~ 2.5 трлн Z-бозонов

3 Фабрика W ($\sqrt{s} = 160$ ГэВ)

- $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$
- Светимость: $16 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- 1 год работы, ~ 130 млн W-бозонов

Детектор СЕРС

Структура детектора (от центра к периферии)

- 1 **Вершинный детектор** – точки распада b/c -адронов
- 2 **Система трекинга** – траектории и импульсы заряженных частиц
- 3 **ECAL** – энергия e^- , γ ($H \rightarrow \gamma\gamma$)
- 4 **HCAL** – энергия адронных струй
- 5 **Магнит** – измерение импульсов
- 6 **Мюонный детектор** – идентификация мюонов
- 7 **Люминометр** – точное измерение светимости

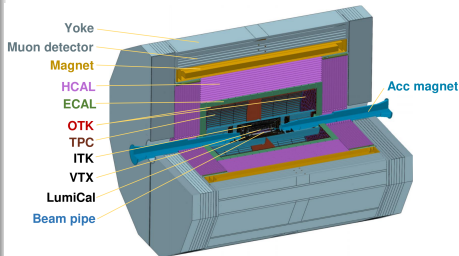


Рисунок 2 — Схема детектора СЕРС с основными подсистемами

- Система: Scientific Linux (SLC)
- Основные компоненты:
 - Генератор Whizard
 - Моделирование: Geant4, MokkaPlus
 - Реконструкция: CyberPFA
 - Анализ: ROOT
- Формат данных: LCIO/EDM4HEP
- Основа: DD4hep и Key4hep

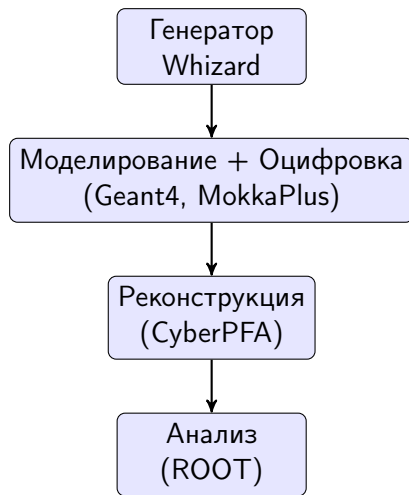


Рисунок 3 — Цепочка обработки данных

Основные принципы

- Particle Flow Algorithm (PFA)
- Объединение данных всех подсистем детектора
- Точное восстановление каждой частицы
- Разделение перекрывающихся ливней

Этапы работы

- 1 Отбор надёжных треков и группировка сигналов
- 2 Поиск центров ливней и построение кластеров
- 3 Связывание заряженных частиц с треками
- 4 Разделение перекрывающихся ливней
- 5 Формирование Particle Flow Objects (PFO)

Цель работы

Изучение канала: $e^+e^- \rightarrow ZH$ с $Z \rightarrow q\bar{q}$ и $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$

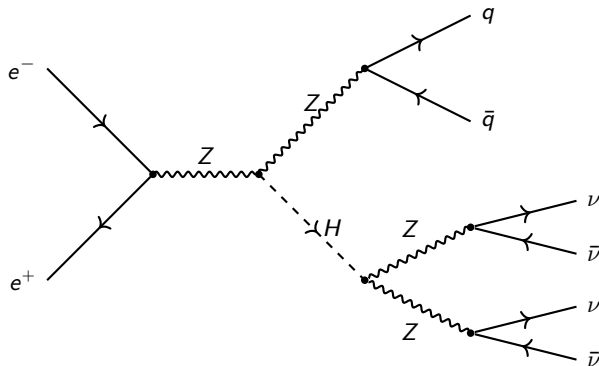


Рисунок 4 — Сигнальный процесс $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + 4\nu$

Сигнальные и фоновые семплы

Сигнальные и фоновые процессы смоделированы группой CEPС и доступны на их сервере в формате stdhep.

Таблица 1 — Информация о сигнальных семплах Хиггса

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

Важно отметить

В файле, содержащем сигнальный процесс, бозон Хиггса распадается инклюзивно, а Z-бозон – на два кварка.

Инклюзивный распад бозона Хиггса

Возможное число джетов и лептонов

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

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

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}	$\pm 1.7\%$

Обобщённый k_t -алгоритм для e^+e^-

Расстояния между частицами:

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

где:

- E_i — энергия частицы
- θ_{ij} — угол между частицами
- $R = 0.5$ — параметр радиуса джета
- $p = 1.0$ — воспроизводит классический k_t -алгоритм

Режим кластеризации

- Инклюзивный режим
- Все PFO подаются на вход кластеризатора
- Объединение пар с минимальным d_{ij}
- Остановка при $d_{iB} < d_{jk}$ для всех пар

Работа алгоритма поиска джетов

Сравнение параметров алгоритма k_t

- Исследованы три значения параметра p :
 - $p = -1$: обратный k_t -алгоритм (анти- k_t)
 - $p = 0$: алгоритм Cambridge/Aachen
 - $p = 1$: классический k_t -алгоритм
- Параметр $R = 0.5$ фиксирован
- Анализ на событиях $e^+e^- \rightarrow ZH$

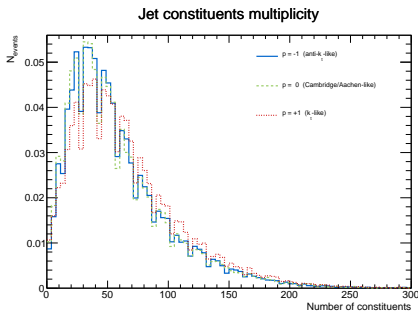


Рисунок 5 — Число частиц в джете для разных p

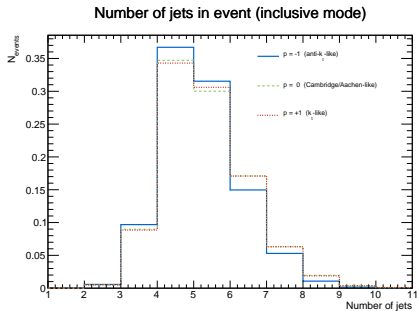


Рисунок 6 — Число джетов на событие для разных p

Критерий относительной изоляции

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

где $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ — угловое расстояние

Условия изоляции

- $I_{rel} < 0.1$
- Поперечный импульс $p_T > 2$ ГэВ
- Тип частицы: $|\text{type}| = 11$ (электроны) или 13 (мюоны)

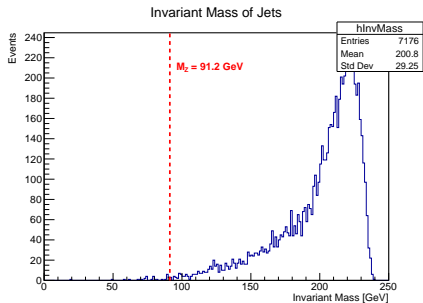
Основные отборы

- 1 **Изолированные частицы:** событие отбрасывается при наличии хотя бы одного изолированного лептона
- 2 **Размер джетов:** каждый джет должен содержать ≥ 6 составляющих частиц
- 3 **Количество джетов:** ровно 2 джета в событии

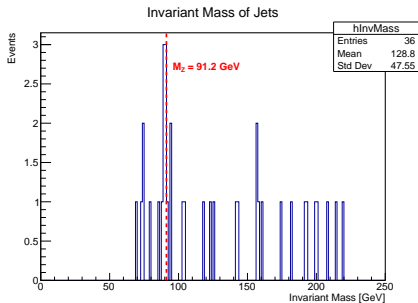
Статистика отбора

- Исходно: 7176 событий
- После отбора: 36 событий
- Сигнальные события: ~ 3 события в пике

Инвариантная масса двух джетов



(a) До отбора



(b) После отбора

Рисунок 7 — Инвариантная масса системы двух джетов

Наблюдения

- Слабый пик около 91 ГэВ
- Соответствует массе Z-бозона

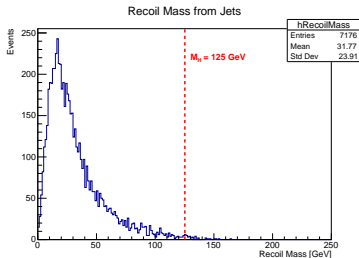
Масса отдачи

Формула массы отдачи

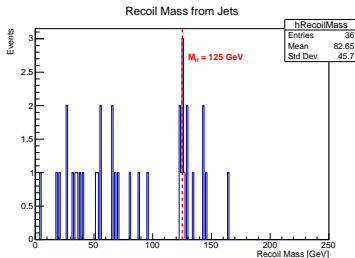
$$M_{\text{recoil}} = \sqrt{(\sqrt{s} - E_{qq})^2 - |\vec{p}_{qq}|^2}$$

где:

- $\sqrt{s} = 240$ ГэВ — энергия в СЦМ
- E_{qq} , \vec{p}_{qq} — энергия и импульс системы двух джетов



(а) До отбора



(b) После отбора

Рисунок 8 — Масса отдачи системы двух джетов

Наблюдения

- Слабый пик около 125 ГэВ после отбора
- Соответствует массе бозона Хиггса
- Всего в пике: ~ 3 события
- Необходимо увеличение статистики для надёжного вывода

Основные результаты

- 1 Проведена предварительная реконструкция событий $e^+e^- \rightarrow ZH$ с инклюзивным распадом Хиггса
- 2 Реализован и применён алгоритм поиска джетов на основе обобщённого k_t -алгоритма
- 3 Разработан критерий изоляции для подавления фоновых процессов
- 4 Наблюдается слабый пик инвариантной массы двух джетов при 91 ГэВ
- 5 Наблюдается слабый пик в массе отдачи при 125 ГэВ

Ограничения

- Малая статистика: 36 событий после отбора
- ~ 3 сигнальных события в пике
- Необходимо увеличение объёма данных

Необходимые улучшения

1 Увеличение статистики

- Реконструкция всех доступных событий
- Включение фоновых процессов

2 Усовершенствование алгоритмов

- Реализация идентификации τ -лептонов
- Оптимизация критериев изоляции
- Исследование других алгоритмов кластеризации джетов

Спасибо за внимание!