

# Изучение распадов бозона Хиггса на нерегистрируемые частицы в эксперименте CEPC

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)

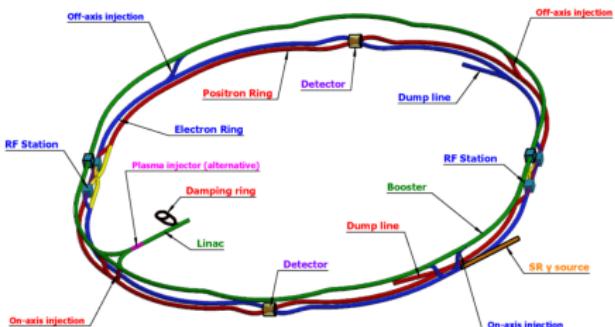


Рисунок 1 — Детектор CEPC

# Режимы работы СЕРС

## Основные режимы

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

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

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

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

### ③ Фабрика $W$ ( $\sqrt{s} = 160 \text{ ГэВ}$ )

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

# Детектор CEPC

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  $e^-$ ,  $\gamma$  ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )
- ④ **HCAL** – энергия адронных струй
- ⑤ **Магнит** – измерение импульсов
- ⑥ **Мюонный детектор** – идентификация мюонов
- ⑦ **Люминометр** – точное измерение свечимости

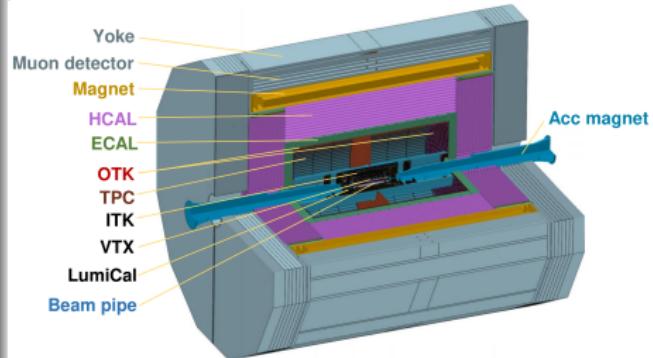


Рисунок 2 — Схема детектора CEPC с основными подсистемами

# Программное обеспечение CEPC

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

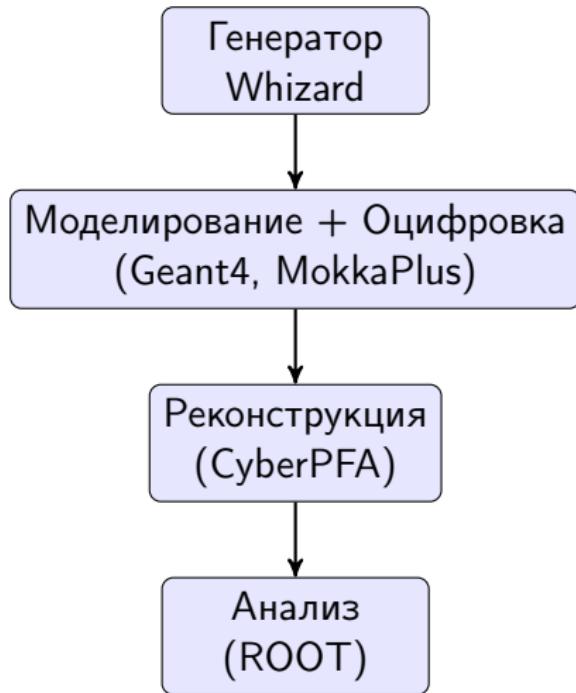


Рисунок 3 — Цепочка обработки данных

# Алгоритм реконструкции CyberPFA

## 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)

# Исследуемый процесс

## Цель работы

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

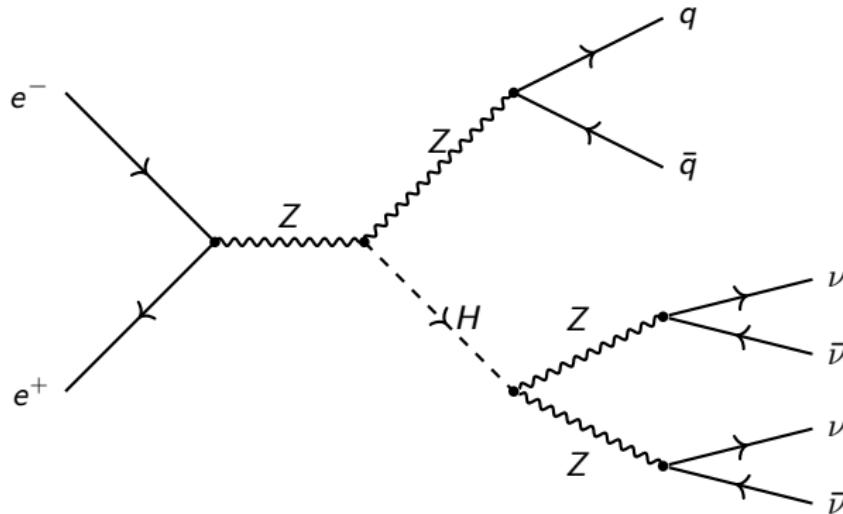


Рисунок 4 — Сигнальный процесс  $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + 4\nu$

# Сигнальные и фоновые семплы

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

Таблица 1 — Информация о сигнальных семплах Хиггса

Process	Final states	$\sigma$ [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.

# Инклузивный 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
  - $H \rightarrow \tau\tau$  ( $\tau \rightarrow hadr$ ,  $\tau \rightarrow l\nu_\tau\nu_l$ )
- 2 джета + 0, 1, 2 изолированных лептона + [недостающая энергия]
  - $H \rightarrow \tau\tau$  ( $\tau \rightarrow hadr$ ,  $\tau \rightarrow hadr$ )
  - $H \rightarrow bb, cc, gg$
  - $H \rightarrow WW$  ( $W \rightarrow qq$ ,  $W \rightarrow l\nu_l$ )
  - $H \rightarrow ZZ$  ( $Z \rightarrow qq$ ,  $Z \rightarrow ll$ )
- 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
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$2.27 \times 10^{-3}$	2.1%
$H \rightarrow ZZ$	$2.62 \times 10^{-2}$	$\pm 1.5\%$
$H \rightarrow W^+ W^-$	$2.14 \times 10^{-1}$	$\pm 1.5\%$
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$6.27 \times 10^{-2}$	$\pm 1.6\%$
$H \rightarrow b\bar{b}$	$5.82 \times 10^{-1}$	$+1.2\%$ $-1.3\%$
$H \rightarrow c\bar{c}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$\pm 5.8\%$
$H \rightarrow Z\gamma$	$1.53 \times 10^{-3}$	$\pm 5.5\%$
$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	$2.18 \times 10^{-4}$	$\pm 1.7\%$

# Поиск джетов

## 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
- $\theta_{ij}$  — 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  $e^+e^- \rightarrow ZH$

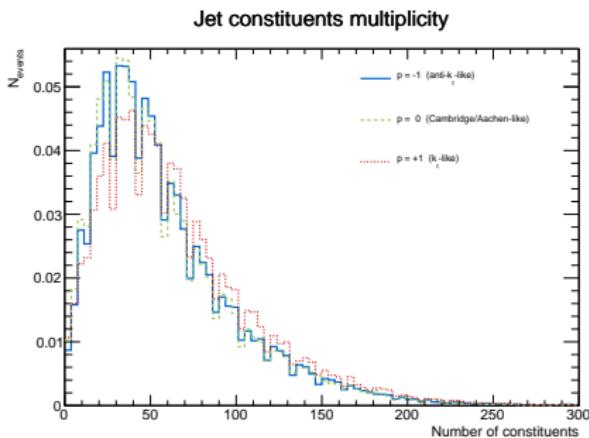


Рисунок 5 — Число частиц в джете для разных  $p$

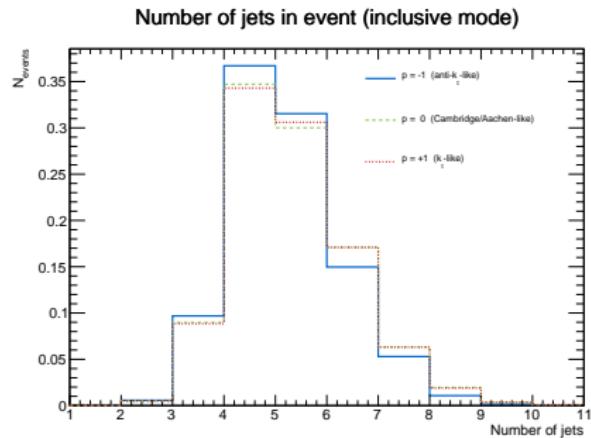


Рисунок 6 — Число джетов на событие для разных  $p$

# Поиск изолированных лептонов

## 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  $p_T > 2 \text{ ГэВ}$
- Тип частицы:  $|\text{type}| = 11$  (электроны) или 13 (мюоны)

# Критерии отбора

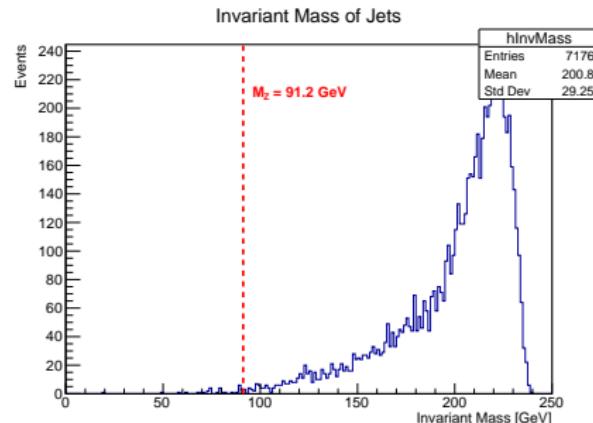
## Основные отборы

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

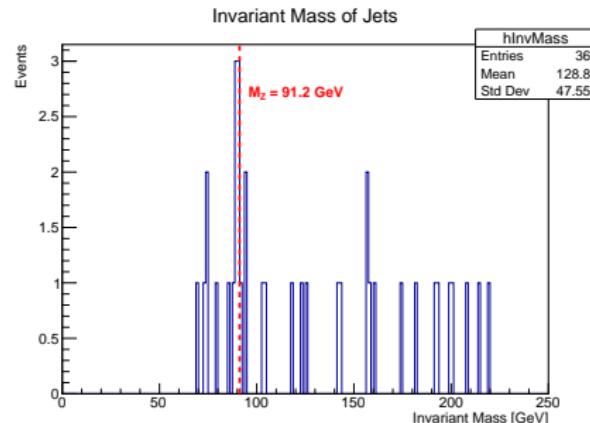
## Статистика отбора

- Исходно: 7176 событий
- После отбора: 36 событий
- Сигнальные события:  $\sim 3$  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

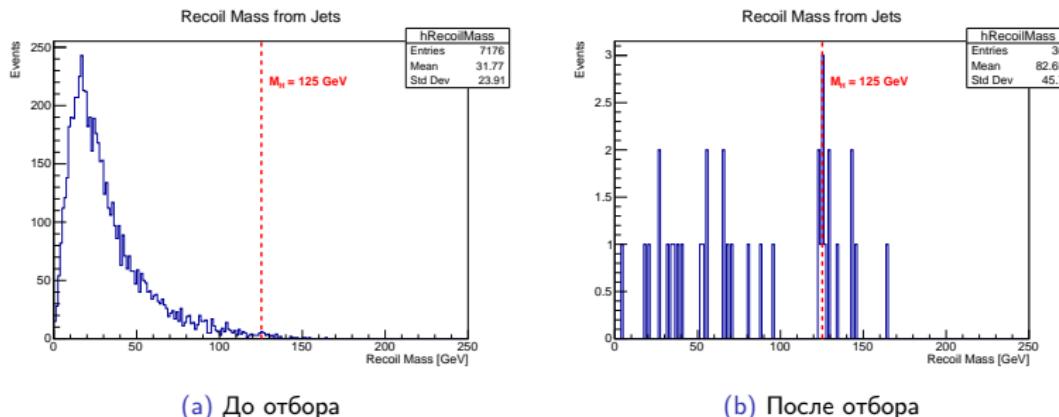


Рисунок 8 — Масса отдачи системы двух джетов

## Наблюдения

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

# Выводы

## 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
- $\sim 3$  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  $\tau$ -лептонов
- Оптимизация критериев изоляции
- Исследование других алгоритмов кластеризации джетов

Спасибо за внимание!