Изучение распадов бозона Хиггса на нерегистрируемые частицы в эксперименте CEPC

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

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

27 июня 2025 г.

Обзор эксперимента CEPC

- Круговой e^+e^- коллайдер (CEPC – Circular Electron Positron Collider) — это крупный международный научный объект, предложенный китайским сообществом физиков в 2012 году
- Предполагается разместить его в туннеле длиной около 100 км, место на территории Китая еще не определено
- CEPC представляет собой двухкольцевой коллайдер, пучки e^+ и e^- циркулируют в противоположных трубах

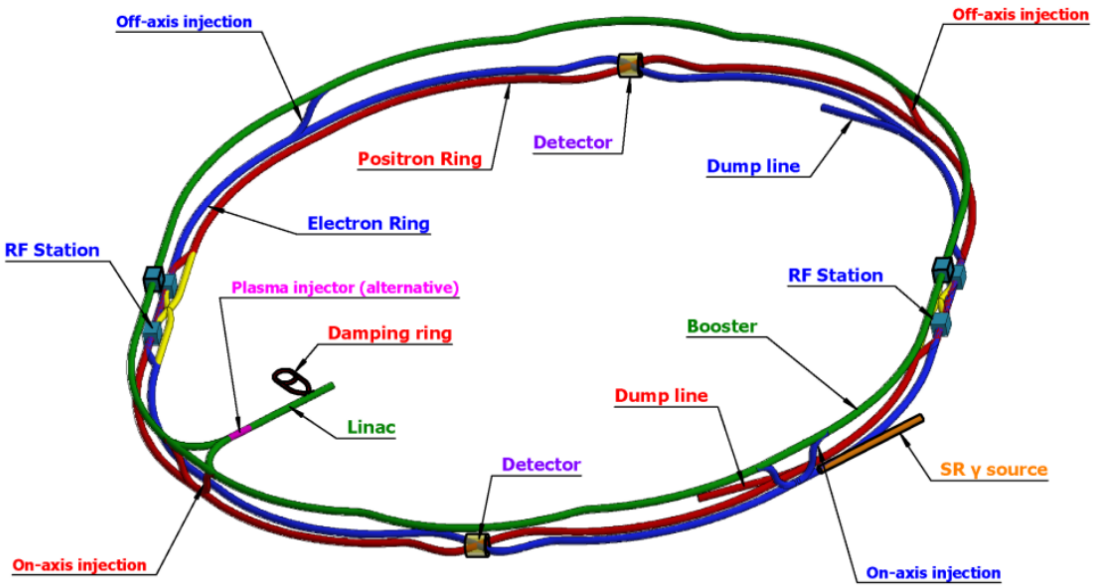


Рис. 1: Схематичное изображение CEPC

План и режимы работы CEPC

- Первые 10 лет CEPC будет работать как фабрика бозона Хиггса и создаст около 2,6 миллиона частиц Хиггса
- Затем, в течение 2 лет как суперфабрика Z-бозонов и создаст около 2,5 триллиона Z-бозонов
- Затем, в течение 1 года как фабрика W-бозонов и создаст около 130 миллионов W-бозонов

Предполагаемые режимы работы

- H ($e^+e^- \to ZH$, 240 ГэВ)
- Z ($e^+e^- \to Z$, 91 ГэВ)
- W ($e^+e^- \to W^+W^-$, 160 ГэВ)
- Рассматривается также возможность изучения процессов с рождением топ-кварка при энергии 360 ГэВ

Программное обеспечение CEPC

ПО CEPC состоит из нескольких независимых частей: генератор, моделирование прохождения через вещество детектора, реконструкция и анализ. В основном все написано на C++. Большая часть ПО была перенесена из пакета ILCSoft.

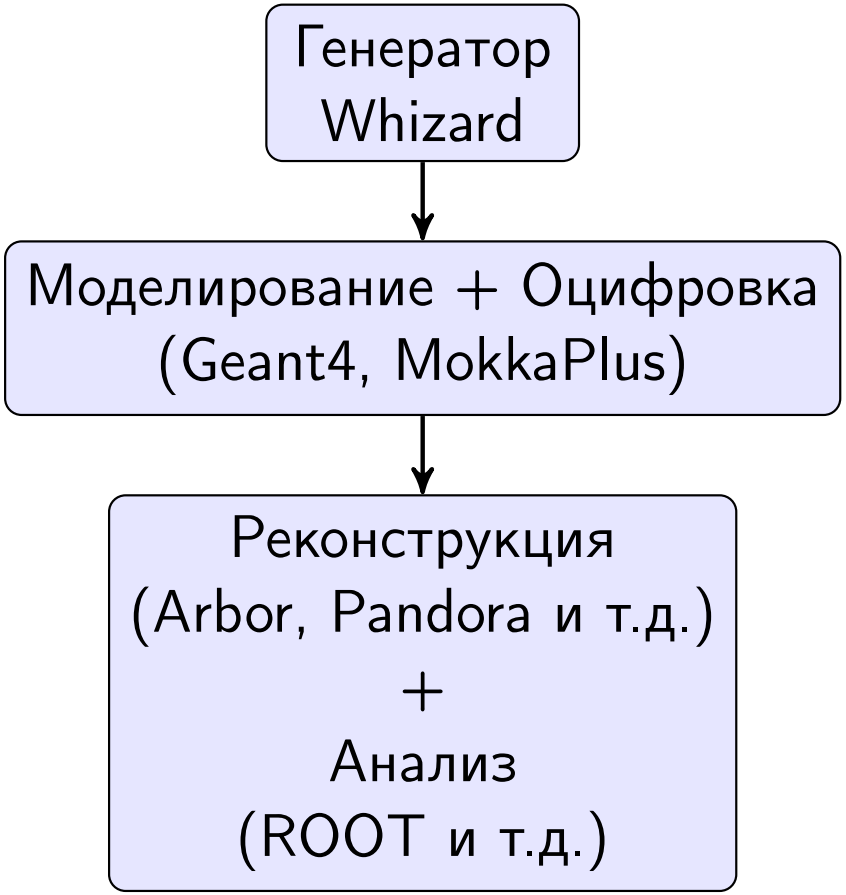
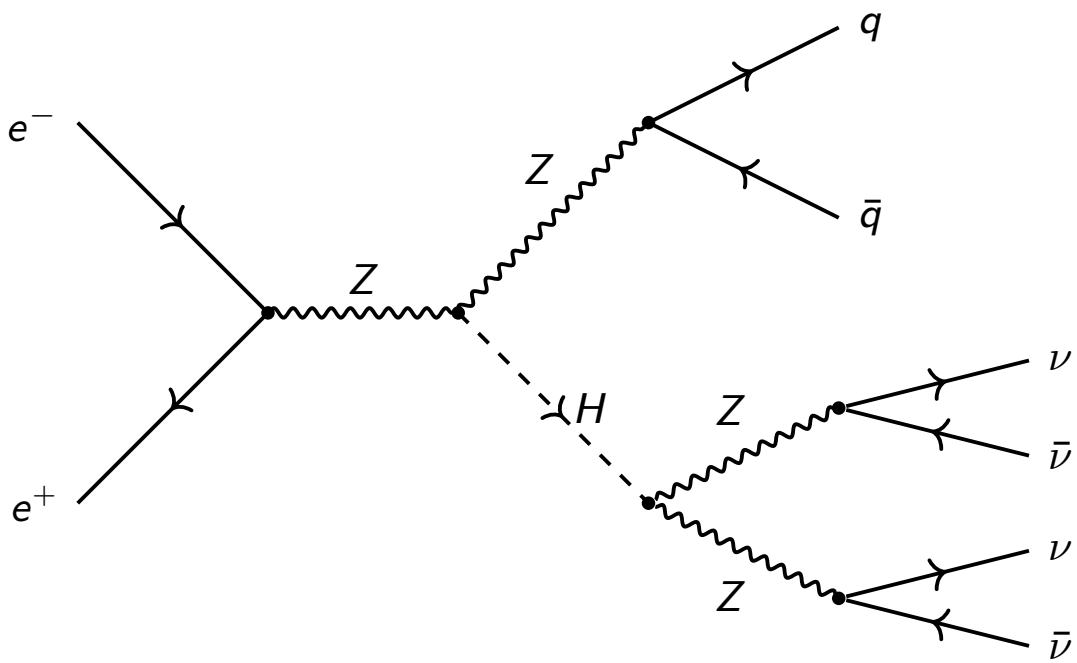


Рис. 2: Цепочка программного обеспечения эксперимента CEPC

Исследуемый распад

- Интересным каналом является $e^+e^- \to ZH$ ($Z \to q\bar{q}$, $H \to ZZ^* \to 4\nu$)
- По сравнению с адронным коллайдером, электрон-позитронный коллайдер обладает значительными преимуществами в исследовании механизмов образования бозона Хиггса, потому что энергия пучков лептонов и, соответственно, начальное состояние точно известны.
- Массу бозона Хиггса в таком распаде можно восстановить с помощью вычисления массы отдачи.



Сигнальные и фоновые семплы

Сигнальные и фоновые процессы смоделированы группой CEPC 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
  - $H \to ZZ^* \to 4\nu$ (сигнальный)
  - $H \to WW$ ($W \to l\nu_l$, $W \to l\nu_l$)
  - $H \to \tau\tau$ ($\tau \to l\nu_\tau\nu_l$, $\tau \to l\nu_\tau\nu_l$)
  - $H \to ZZ^*$ ($Z \to ll$, $Z^* \to ll$)
- 1 джет + 1 изолированный лептон + недостающая энергия
  - $H \to \tau\tau$ ($\tau \to hadr$, $\tau \to l\nu_\tau\nu_l$)
- 2 джета + 0, 1, 2 изолированных лептона + [недостающая энергия]
  - $H \to \tau\tau$ ($\tau \to hadr$, $\tau \to hadr$)
  - $H \to bb, cc, gg$
  - $H \to WW$ ($W \to qq$, $W \to l\nu_l$)
  - $H \to ZZ$ ($Z \to qq$, $Z \to ll$)
- 4 джета
  - $H \to WW$ ($W \to qq$, $W \to qq$)
  - $H \to ZZ$ ($Z \to qq$, $Z \to qq$)

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

Вычисление инвариантой массы и массы отдачи

Формулы

- Инвариантная масса: $M_{\text{inv}} = \sqrt{E_{qq}^2 - p_{qq}^2}$,
- Масса отдачи: $M_{\text{recoil}} = \sqrt{(\sqrt{s} - E_{qq})^2 - p_{qq}^2}$,

где E_{qq} и p_{qq} реконструированные импульс и энергия джетов, $\sqrt{s}$ — энергия в системе центра масс.

Алгоритмы реконструкции

- Алгоритм потока частиц PF для реконструкции отдельных частиц, в том числе в джетах (PFO-объекты)
- Алгоритм поиска джетов: 85% событий имеют 4 джета в конечном состоянии, поэтому использовался k_t jet-finder (число джетов зафиксировано и равно 4)

Отбор событий

Основные ограничения

- Для каждого события из шести пар джетов выбиралась та пара, масса которой ближе всего к массе Z-бозона (Z-кандидат) и для нее строилась инвариантная масса и масса отдачи
- Количество частиц в джетах, которые образуют Z-кандидат, должно быть больше 6 (исключение случайной комбинации, имитирующей распад $Z \to \tau\tau$, которого не было в анализируемом семпле)

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-кандидата, такое событие пропускалось

Распределение инвариантной массы Z-кандидата

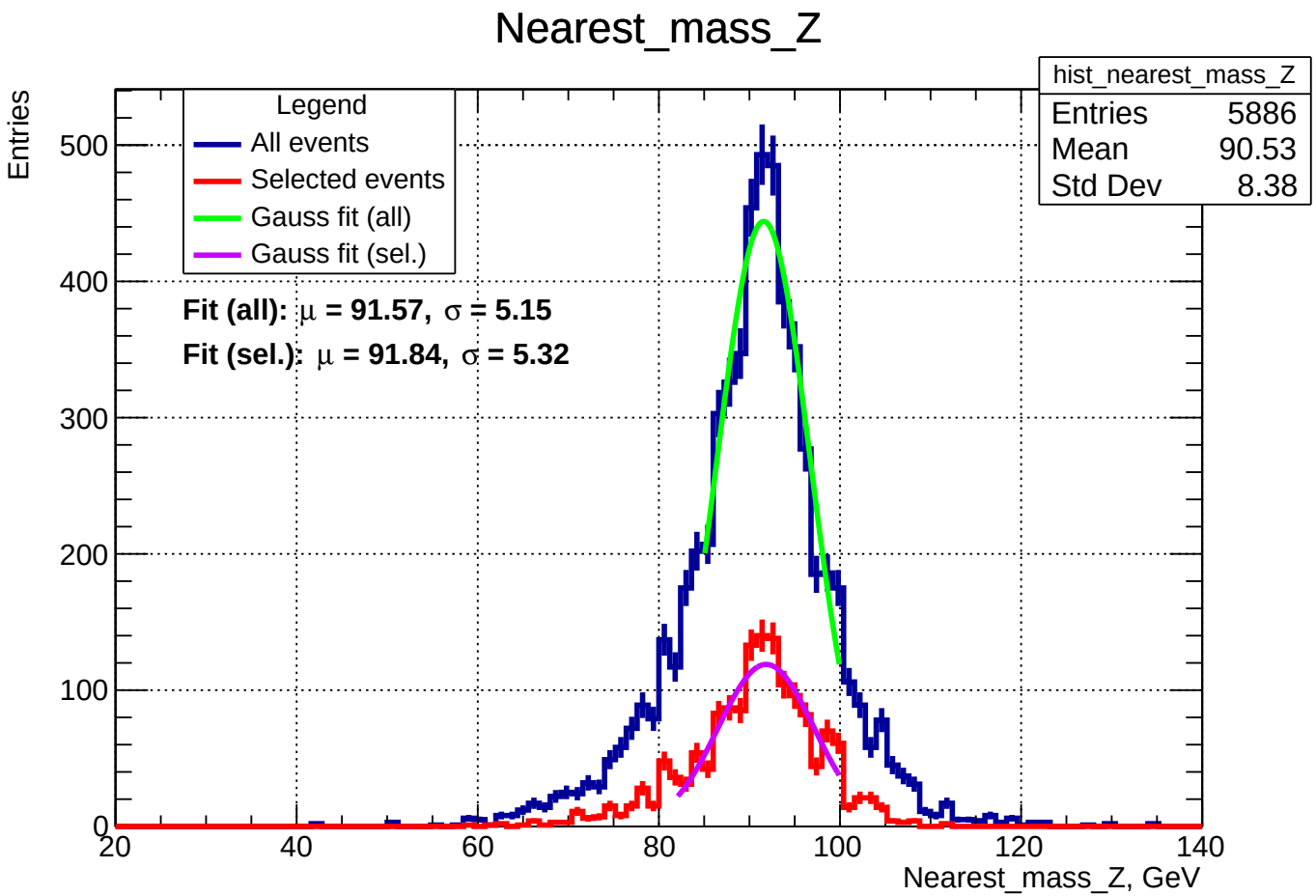


Рис. 3: Инвариантная масса двух джетов, образующих Z-кандидат. Первичные отборы (синяя гистограмма), дополнительный отбор (красная гистограмма). Кривые – фит функцией Гаусса

Распределение массы отдачи к Z-кандидату

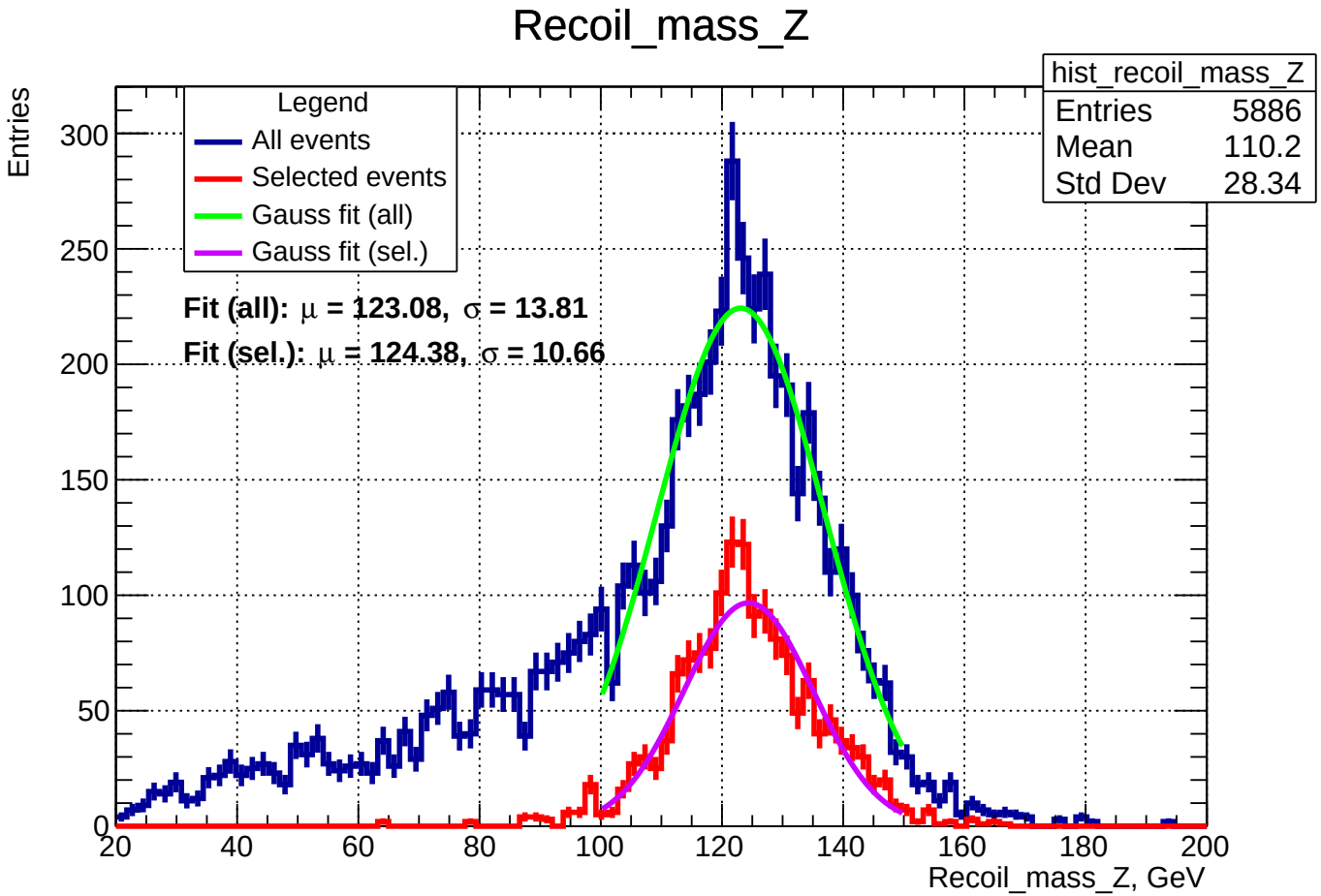


Рис. 4: Масса отдачи к инвариантной массе двух джетов, образующих Z-кандидат. Первичные отборы (синяя гистограмма), дополнительный отбор (красная гистограмма). Кривые – фит функцией Гаусса

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

Спасибо за внимание