

Изучение распадов бозона Хиггса на нерегистрируемые частицы в эксперименте СЕРС

Студент: Косицын А.М.

Группа: M24-112

Научный руководитель: Солдатов Е.Ю.

Научный консультант: Чадеева М.В.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий

Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

26 июня 2026 г.

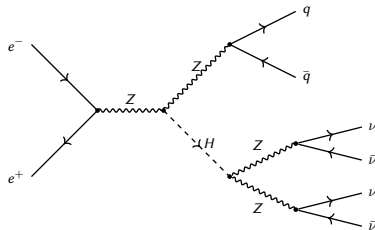
Мотивация и цель исследования

Актуальность

- Предсказанный СМ «невидимый» распад $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\nu$ не наблюдался
- $\text{BR}(H \rightarrow \text{invisible}) \approx 0.1\%$ из СМ
- Текущие ограничения:
 - ATLAS: $\text{BR} < 11\%$ (95% CL)
 - CMS: $\text{BR} < 15\%$ (95% CL)

Перспективы

- Проект e^+e^- коллайдера CEPC
- Прецизионные измерения в режиме фабрики Хиггса
- Превышение над предсказаниями СМ будет указывать на новую физику, например, распад бозона Хиггса на частицы темной материи
- Моделирование CEPC: верхний предел 0.26% (CPC, v44, 2020, 12)



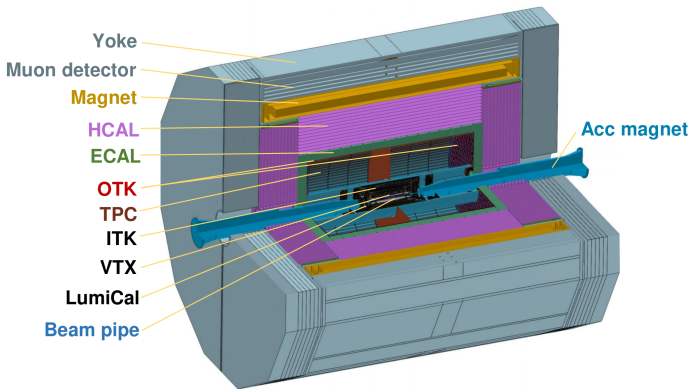
Сигнальный процесс $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + 4\nu$

Цель работы

- Исследование процесса $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + 4\nu$ в эксперименте CEPC при $\sqrt{s} = 240$ ГэВ
- Оценка верхнего предела на BR «невидимого» распада бозона Хиггса

Проект и базовый детектор СЕРС

Кольцевой e^+e^- коллайдер СЕРС. Режимы работы $\sqrt{s} = 240, 91, 160$ ГэВ.



Подсистемы детектора: Вершинный детектор (VTX), Внутренний трекер (ITX), Времяпроекционная камера (TPC), внешний трекер (OTK), Электромагнитный калориметр (ECAL), Адронный калориметр (HCAL), Соленоид (Magnet), Мюонный детектор (Muon detector), Калориметр для измерения светимости (LumiCal)

Программное обеспечение СЕРС

Архитектура СЕРСWS

Три уровня: внешние библиотеки (ROOT, Geant4, DD4hep), платформа Gaudi/Key4hep, прикладные алгоритмы и пакеты (CyberPFA, FastJet, RooFit).

Интерфейсы: DD4hep (геометрия детектора), EDM4hep (структура данных событий).

Идентификация частиц (PID)

Разделение $\pi^\pm$, $K^\pm$, $p^\pm$ по:

- ионизации в TPC (dN_p/dx , dE/dx)
- времени пролёта в ОТК: $t_{\text{ToF}} = \frac{s}{c} \sqrt{\frac{m^2}{p^2} - 1}$

Выбор гипотезы с **минимальным** χ^2 .

Алгоритм CyberPFA

Particle Flow Algorithm: объединение данных всех подсистем детектора.

Этапы: отбор треков $\rightarrow$ поиск ливней $\rightarrow$ связывание с треками $\rightarrow$ разделение ливней $\rightarrow$ PFO.

Поиск изолированных частиц

Выделение изолированных лептонов ($e^\pm$, $\mu^\pm$) и фотонов.

Конус изоляции: $\cos \theta_{ij} \geq \cos \theta_{\text{cone}}^{\text{cut}}$

Энергия в конусе: $E_{\text{cone}} = \sum_{j \neq i} E_j$

Выбранные параметры:

- энергия трека: $5.0 \text{ ГэВ} \leq E_\ell \leq 10^{20} \text{ ГэВ}$
- энергия в конусе: $0.0 \text{ ГэВ} \leq E_{\text{cone}} \leq 2.0 \text{ ГэВ}$
- угол конуса 9.9° ($\cos \theta_{\text{cone}}^{\text{cut}} = 0.985$)

Поиск струй: пакет FastJet

Обобщённый k_t -алгоритм для e^+e^- :

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

Выбранные параметры: $R = 0.5$, $p = 1.0$ (классический k_t)

Инклюзивный режим: последовательное объединение пар частиц с минимальным d_{ij} , число струй не фиксировано.

Сигнальные и фоновые процессы

Условия моделирования и нормировка МС-выборок

- **Режим «Фабрика Хиггса»:** $\sqrt{s} = 240$ ГэВ, интегральная светимость $\mathcal{L} = 5050 \text{ фб}^{-1}$ (эквивалент 10 лет работы).
- **Ожидаемая статистика:** $N_{\text{exp}} = \sigma \times \mathcal{L}$, где σ — теоретическое сечение процесса.
- **Весовой коэффициент:** $W = N_{\text{exp}}/N_{\text{ana}}$, где N_{ana} — число событий в сгенерированной выборке. Множитель W масштабирует МС-гистограммы к реальной ожидаемой статистике.

Выборка	Процесс	σ [фб]	N_{exp}	N_{ana}	W
qqHinv	$e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + 4\nu$	0.143	724	135 000	0.0054
qqHX	$e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + \text{incl.}$	143.39	724 120	892 750	0.8111
qq	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$	50 105.35	253 032 018	492 524	513.7456
4f_sw_sl0qq	$e^+e^- \rightarrow e\nu_e q\bar{q}$	2 579	13 023 950	396 400	32.8556
4f_ww_h0cuxx	$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	3 733	18 851 650	395 400	47.6774
4f_sze_sl0uu (qq)	$e^+e^- \rightarrow Ze^+e^- \rightarrow q\bar{q}e^+e^-$	325	1 641 250	398 800	4.1155
4f_zz_h0dtdt (qq)	$e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	501	2 530 050	394 200	6.4182
4f_sznu_sl0nu_up (q)	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}Z \rightarrow \nu\bar{\nu}q\bar{q}$	147	742 350	398 400	1.8633
nunuHX	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H \rightarrow \nu\bar{\nu} + \text{incl.}$	48.96	247 248	836 920	0.2954

Стратегия отбора событий

Предварительные отборы

Цель: исключение несовместимых топологий и сокращение объёма данных.

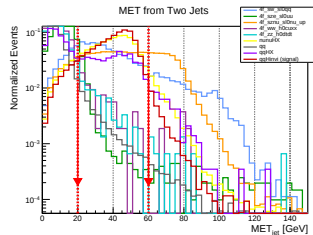
- Вето на изолированные лептоны
- Вето на высокоэнергетические фотоны
- Ровно две струи
- $N_{\text{const}} \geq 6$ для каждой струи

Основные кинематические отборы

Цель: выделение сигнала $Z \rightarrow q\bar{q}$, $H \rightarrow \text{invisible}$.
Применяются после предотборов.

- **Недостающая поперечная энергия (MET):**
 $20 < MET < 60$ ГэВ
- **Азимутальный угол между двумя струями:**
 $\Delta\phi_{jj} < 3.0$
- **Полярный угол Z-кандидата:** $|\cos\theta_Z| < 0.7$
 (центральная область детектора)
- **Инвариантная масса Z-кандидата:**
 $75 < M_{jj} < 105$ ГэВ
- **Недостающий импульс:**
 $20 < |\vec{p}_{\text{miss}}| < 80$ ГэВ

Процесс	Предотборы	Финал
qqHinvi	86 249 (63.9%)	46 336 (34.3%)
qqHX	2 873 (0.32%)	512 (0.06%)
qq	209 739 (42.6%)	6 (0.00%)
4f_sw_sl0qq	8 914 (2.25%)	249 (0.06%)
4f_ww_h0cuxx	534 (0.14%)	1 (0.00%)
4f_sze_sl0uu (qq)	20 508 (5.14%)	0 (0.00%)
4f_zz_h0dtdt (qq)	1 514 (0.38%)	1 (0.00%)
4f_sznu_sl0nu_up (q)	206 601 (51.9%)	30 043 (7.54%)
nunuHX	343 934 (41.1%)	47 925 (5.73%)



BDT-классификатор для подавления фоновых процессов

Мотивация

После основных отборов остаются два доминирующих фона с похожей на сигнал топологией:

- $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H \rightarrow \nu\bar{\nu} + \text{incl. (nunuHX)}$
- $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}Z \rightarrow \nu\bar{\nu}q\bar{q} \text{ (4f_sznu)}$

Метод и признаки

Алгоритм: градиентный бустинг (XGBoost)

11 кинематических признаков:

- $M_{jj}, \cos\theta_Z, \Delta R$
- $\cos\theta_1, \cos\theta_2$
- E_{j1}, E_{j2}, E_{jj}
- MET, $|\vec{p}_{\text{miss}}|$
- $\Delta\phi, \Delta\theta, \cos\theta_{\text{miss}}$

Обучение

- Обучение на данных после пред. отборов
- Разделение: аналитическая/обучающая (1:1)
- Тренировочная/тестовая (70%/30%)
- Глубина дерева: 5, темп обучения: 0.05
- До 1000 деревьев с ранней остановкой

Результаты обучения

Классификатор	Деревья	AUC (train)	AUC (test)
qqHinvi vs nunuHX	721	0.975	0.956
qqHinvi vs 4f_sznu	287	0.945	0.930

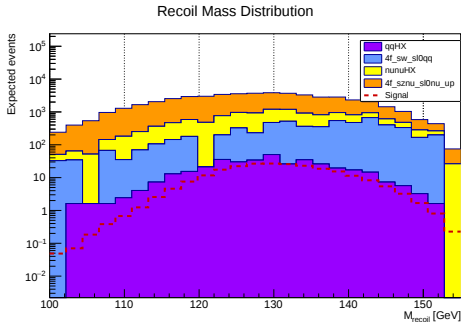
Пороги: 0.75 (vs nunuHX), 0.7 (vs 4f_sznu)

Сравнение с кинематическими отборами

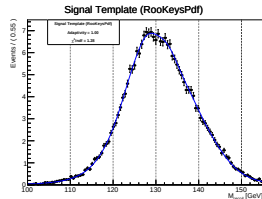
Процесс	Отборы	BDT
qqHinvi (сигнал)	53.7%	81.3%/82.8%
nunuHX (фон)	13.9%	7.0%
4f_sznu (фон)	14.5%	12.1%

BDT значительно лучше подавляет фоны nunuHX и 4f_sznu, при этом сохраняется больше сигнала. Следующий этап — разработка метода для применения классификаторов к смешанным данным.

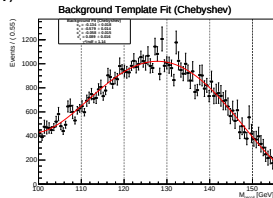
Метод массы отдачи $M_{\text{recoil}} = \sqrt{(\sqrt{s} - E_{jj})^2 - |\vec{p}_{jj}|^2}$



Суммарная гистограмма фоновых процессов (заливка) после применения всех отборов. Все процессы взяты с весами. Сигнал $qqH\nu\nu i$ — красная пунктирная кривая.



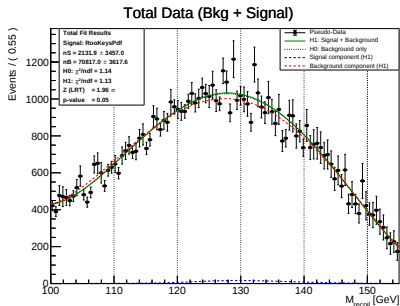
Шаблон сигнала f_S (ядерная оценка плотности)



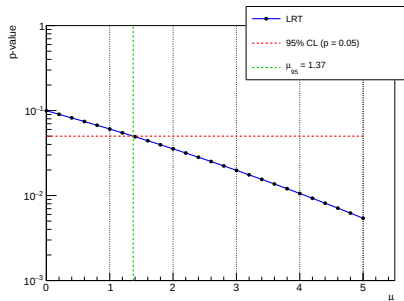
Шаблон фона f_B (полином Чебышёва 4-й степени)

Оценка верхнего предела по псевдоданным

Метод: подгонка к распределению массы отдачи, критерий отношения правдоподобий (LRT).
Статистика $q_0(\mu) = -2 \ln(L_\mu/L_0)$, L_μ — правдоподобие для гипотезы H_1 с усилением μ , L_0 — для гипотезы H_0 (теорема Вилкса, q_0 распределен по χ^2_1).



Аппроксимация M_{recoil} для $\mu = 1.37$. Зелёная: H_1 (сигнал+фон); красный пунктир: фон; синий пунктир: сигнал; чёрный пунктир: H_0 (только фон).



Зависимость p -value от коэффициента усиления сигнала μ . Порог 95% CL ($p = 0.05$) достигается при $\mu = 1.37$.

Результат: анализ чувствителен к сигналу, превышающему предсказание СМ в **1.37 раза**.

Заключение

Основные результаты

- Проведено моделирование сигнальных и фоновых процессов в CEP-CSW, где сигналом является $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q} + 4\nu$ при $\sqrt{s} = 240$ ГэВ
- Реализован алгоритм поиска изолированных частиц с эффективностью $\varepsilon > 99\%$ и применён k_t -алгоритм (из пакета FastJet) для поиска струй
- Разработана двухэтапная стратегия отбора событий
- С помощью метода массы отдачи и критерия отношения правдоподобий получена оценка верхнего предела $BR \approx 0.15\%$, что соответствует усилению сигнала относительно предсказания СМ в 1.37 раза
- Обучены и протестированы BDT-классификаторы для подавления двух доминирующих фоновых процессов

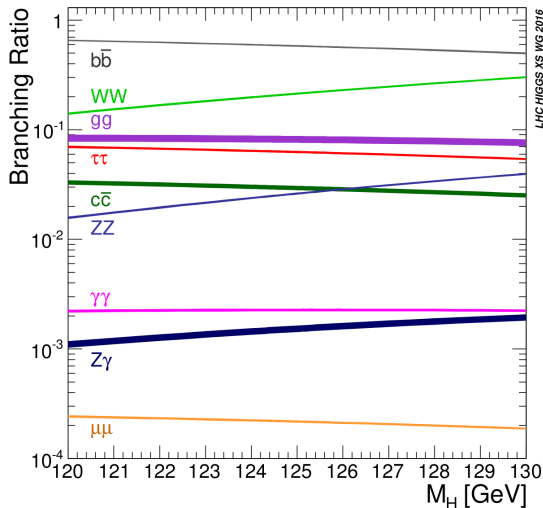
Ограничения

В текущем анализе учтены только статистические ошибки. В дальнейшем необходимо исследовать основные источники систематической погрешности.

Вывод: Исследование подтвердило хороший потенциал эксперимента CEP-CS для наблюдения «невидимых» распадов бозона Хиггса.

Спасибо за внимание!

Относительные вероятности распадов бозона Хиггса в СМ



СЕРС: Круговой электрон-позитронный коллайдер и режимы работы

Общая информация

- 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)

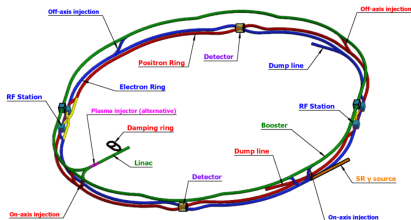


Схема коллайдера СЕРС

Основные режимы работы

- 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

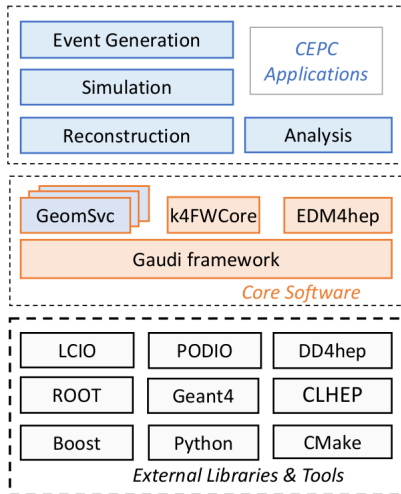
Архитектура программного обеспечения

Трёхуровневая архитектура CEPCSW

- **Нижний уровень:** внешние библиотеки
 - ROOT, Geant4, DD4hep
- **Средний уровень:** инфраструктура
 - Фреймворк Gaudi
 - Интеграция Key4hep
- **Верхний уровень:** прикладные алгоритмы
 - Генерация, реконструкция, анализ
 - CyberPFA, FastJet, RooFit

Ключевые интерфейсы

- **DD4hep:** единое описание геометрии детектора
- **EDM4hep:** структура данных событий (формат ROOT)



Структура программного обеспечения CEPCSW

Идентификация частиц (PID)

Задачи PID

- Разделение $\pi^\pm$, $K^\pm$, $p^\pm$
- Идентификация струй с b -, c - и лёгкими кварками
- Измерение заряда струи

Метод 1: Ионизация в ТРС

- Измерение плотности ионизации dN_p/dx и потерь энергии dE/dx

Метод 2: Время пролёта в ОТК

- Время пролёта t_{ToF} зависит от массы m и импульса p :

$$t_{\text{ToF}} = \frac{s}{c} \sqrt{\frac{m^2}{p^2} - 1}$$

Принцип идентификации

Для каждого трека вычисляется статистика χ^2 по всем гипотезам ($e^\pm$, $\mu^\pm$, $\pi^\pm$, $K^\pm$, $p^\pm$):

$$\chi_R^i = \frac{\langle R \rangle_{\text{meas}} - \langle R \rangle_{\text{exp}}^i}{\sigma_{\text{exp}}^i},$$

где:

- $\langle R \rangle_{\text{meas}}$ — измеренное значение (dN_p/dx , dE/dx или t_{ToF})
- $\langle R \rangle_{\text{exp}}^i$ — ожидаемое значение для гипотезы i
- σ_{exp}^i — разрешение для гипотезы i

Гипотеза с **минимальным** χ^2 выбирается как наиболее вероятный тип частицы.

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)

Идентификация изолированных частиц

Назначение алгоритма

Выделение изолированных лептонов ($e^\pm, \mu^\pm$) и фотонов

Конус изоляции

Косинус угла между импульсами:

$$\cos \theta_{ij} = \frac{\vec{p}_i \cdot \vec{p}_j}{|\vec{p}_i| \cdot |\vec{p}_j|}$$

Частица j внутри конуса, если:

$$\cos \theta_{ij} \geq \cos \theta_{\text{cone}}^{\text{cut}}$$

Энергия в конусе

$$E_{\text{cone}} = \sum_{j \neq i, \cos \theta_{ij} \geq \cos \theta_{\text{cone}}^{\text{cut}}} E_j$$

Для лептонов фотоны исключаются из суммы (подавление FSR)

Критерии изоляции

Две группы условий:

- 1 Диапазон энергии трека:

$$E_{\text{track}}^{\min} \leq E_\ell \leq E_{\text{track}}^{\max}$$

- 2 Энергия в конусе:

$$E_{\text{cone}}^{\min} \leq E_{\text{cone}} \leq E_{\text{cone}}^{\max}$$

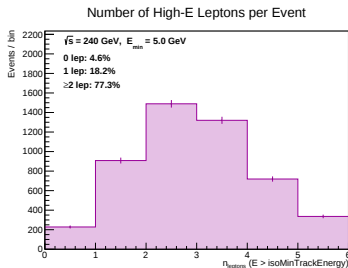
Режим работы

Используется **прямоугольный (пороговый)** критерий изоляции

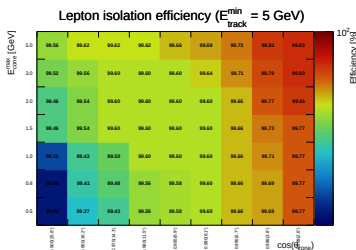
Валидация алгоритма изоляции

Методика валидации

- Контрольный процесс: $e^+e^- \rightarrow ZH$ ($Z \rightarrow \mu^+\mu^-$), гарантированно содержит 2 изолированных мюона
- Эффективность: $\varepsilon = \frac{N(n_{\text{isolated}} \geq 2)}{N(n_E > E_{\text{min}} > 0)} \times 100\%$
- Скан по 3 параметрам: $E_{\text{track}}^{\text{min}}$, $E_{\text{cone}}^{\text{max}}$, $\cos \theta_{\text{cone}}$



Число лептонов с $E > 5$ ГэВ на событие



2D карта эффективности для $E_{\text{track}}^{\text{min}} = 5.0 \text{ ГэВ}$

Выбранные параметры изоляции

$E_{\text{track}}^{\text{min}} = 5.0 \text{ ГэВ}$ | $E_{\text{track}}^{\text{max}} = 10^{20} \text{ ГэВ}$ | $E_{\text{cone}}^{\text{min}} = 0.0 \text{ ГэВ}$ | $E_{\text{cone}}^{\text{max}} = 2.0 \text{ ГэВ}$ | $\cos \theta_{\text{cone}}^{\text{cut}} = 0.985$ ($\theta \approx 9.9^\circ$)

Поиск джетов: пакет FastJet

Обобщённый k_t -алгоритм для e^+e^-

Расстояния между частицами:

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

$$d_{iB} = E_i^{2p}$$

где:

- E_i — энергия частицы
- θ_{ij} — угол между частицами
- R — параметр радиуса джета
- p — внутренний параметр

Параметры алгоритма

- $R = 0.5$ (параметр радиуса)
- $p = 1.0$ (классический k_t -алгоритм)

Режим кластеризации

Инклюзивный режим:

- Все PFO подаются на вход
- Последовательное объединение пар с минимальным d_{ij}
- Остановка при $d_{iB} < d_{jk}$ для всех пар

Примечание

При $p = 1$ алгоритм воспроизводит поведение классического k_t -алгоритма

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
 - $H \rightarrow \tau\tau$ ($\tau \rightarrow hadr$, $\tau \rightarrow l\nu_\tau\nu_l$)
- 2 джета + 0, 1, 2 изолированных лептона + [недостающая энергия]
 - $H \rightarrow \tau\tau$ ($\tau \rightarrow hadr$, $\tau \rightarrow hadr$)
 - $H \rightarrow b\bar{b}$, cc , gg
 - $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow qq$, $W \rightarrow l\nu_l$)
 - $H \rightarrow ZZ$ ($Z \rightarrow qq$, $Z \rightarrow ll$)
- 4 джета
 - $H \rightarrow WW$ ($W \rightarrow qq$, $W \rightarrow qq$)
 - $H \rightarrow ZZ$ ($Z \rightarrow qq$, $Z \rightarrow qq$)

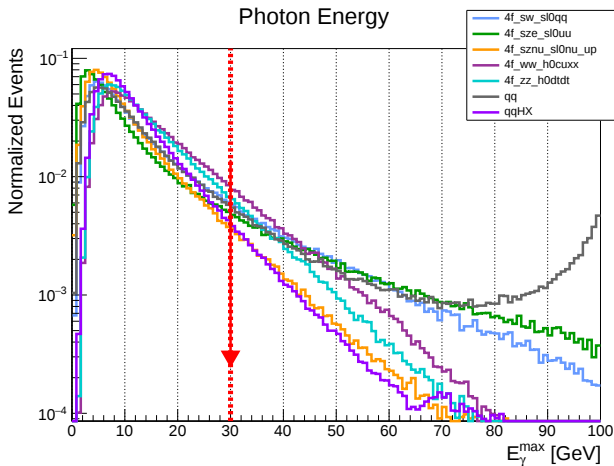
Таблица 1 — Относительные вероятности распадов и их относительные погрешности для бозона Хиггса с массой $m_H = 125$ ГэВ в Стандартной Модели

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}	$\pm 1.7\%$

Предварительные отборы: энергия фотонов

Критерий отбора

Событие отбрасывается при наличии фотона с энергией $E_\gamma > 30$ ГэВ

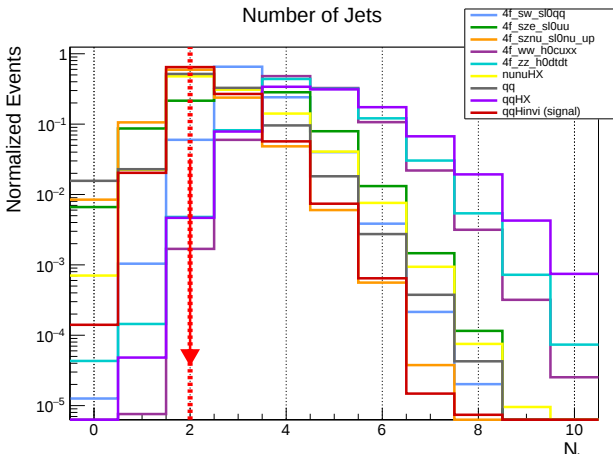


Предварительные отборы: число джетов

Критерий отбора

Событие сохраняется только если реконструировано ровно 2 джета:

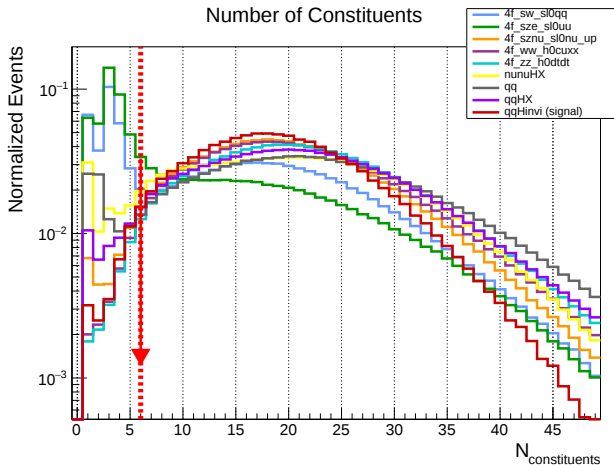
$$N_{\text{jets}} = 2$$



Предварительные отборы: число составляющих в джете

Критерий отбора

Каждый из двух джетов должен содержать не менее 6 частиц: $N_{\text{const}} \geq 6$



Полная статистика прохождения предварительных отборов

Пояснения

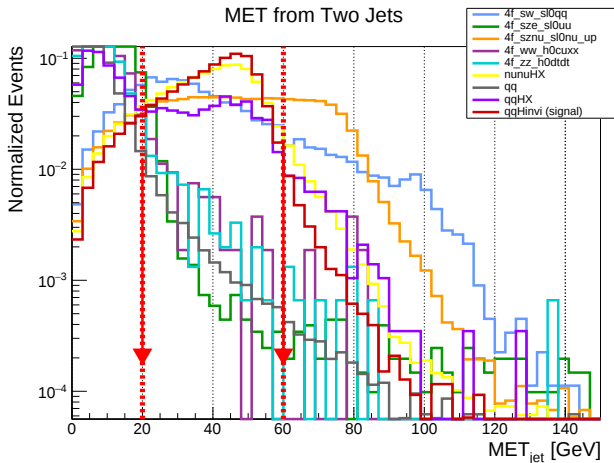
Столбцы: последовательные этапы предотборов

Ячейки: абсолютное число событий, прошедших данный этап (в скобках написана эффективность относительно предыдущего столбца)

Выделены: сигнальные выборки qqHinv и qqHX

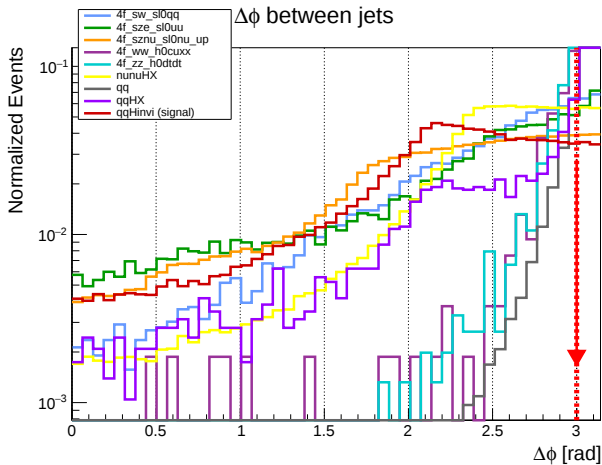
Процесс	Всего	Lep. veto	γ ($E > 30$)	Iso γ	2 джета	≥ 6 const.	После предотборов
qqHinv	135 000	135 000 (100.0%)	135 000 (100.0%)	135 000 (100.0%)	87 226 (64.6%)	86 249 (98.9%)	86 249 (63.9%)
qqHX	892 750	695 139 (77.9%)	663 821 (95.5%)	631 181 (95.1%)	2 940 (0.5%)	2 873 (97.7%)	2 873 (0.3%)
qq	492 524	466 139 (94.6%)	356 224 (76.4%)	343 662 (96.5%)	211 560 (61.6%)	209 739 (99.1%)	209 739 (42.6%)
4f_sw_sl0qq	396 400	188 656 (47.6%)	164 724 (87.3%)	156 695 (95.1%)	11 781 (7.5%)	8 914 (75.7%)	8 914 (2.3%)
4f_sze_sl0uu	398 800	172 810 (43.3%)	151 578 (87.7%)	141 144 (93.1%)	43 923 (31.1%)	20 508 (46.7%)	20 508 (5.1%)
4f_sznu_sl0nu_up	398 400	379 470 (95.3%)	360 827 (95.1%)	344 329 (95.4%)	209 670 (60.9%)	206 601 (98.5%)	206 601 (51.9%)
4f_ww_h0cuxx	395 400	358 974 (90.8%)	317 636 (88.5%)	300 176 (94.5%)	536 (0.2%)	534 (99.6%)	534 (0.1%)
4f_zz_h0ddt	394 200	345 571 (87.7%)	315 939 (91.4%)	299 134 (94.7%)	1 520 (0.5%)	1 514 (99.6%)	1 514 (0.4%)
nunuHX	836 920	836 920 (100.0%)	836 920 (100.0%)	836 920 (100.0%)	399 670 (47.8%)	343 934 (86.1%)	343 934 (41.1%)

Основные отборы: MET



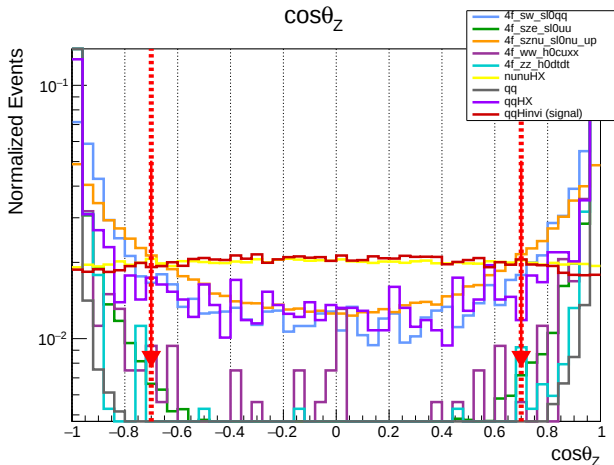
$$\text{MET} = \sqrt{(p_x^{j1} + p_x^{j2})^2 + (p_y^{j1} + p_y^{j2})^2}. \text{ Отбор: } 20 \text{ ГэВ} < \text{MET} < 60 \text{ ГэВ}$$

Основные отборы: $\Delta\phi$



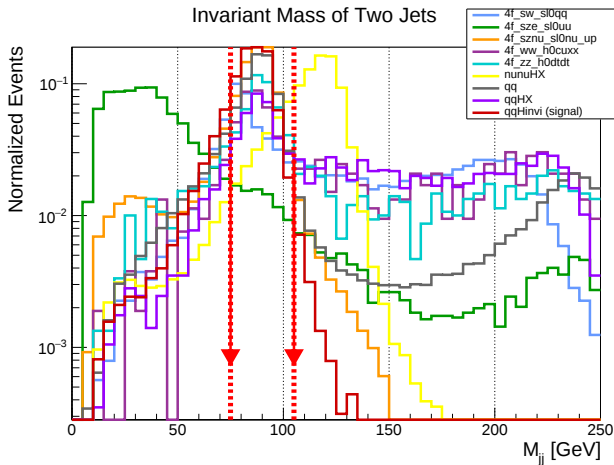
$\Delta\phi_{jj} = |\phi_1 - \phi_2|$. Отбор: $\Delta\phi_{jj} < 3.0$ радиан

Основные отборы: $\cos \theta_Z$



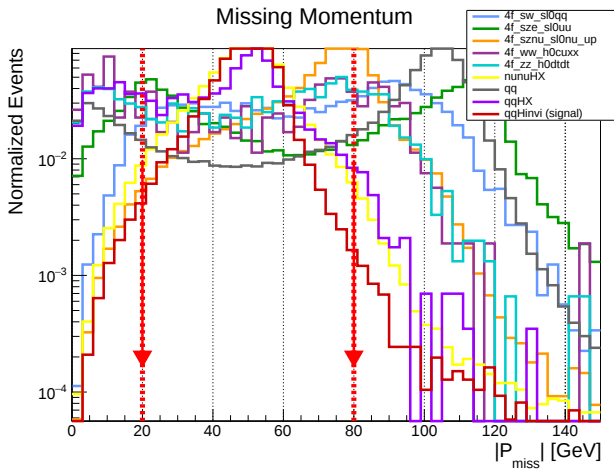
$$\cos \theta_Z = \frac{p_z^{jj}}{|\vec{p}_{jj}|}, \quad \vec{p}_{jj} = \vec{p}_{j1} + \vec{p}_{j2}. \text{ Отбор: } |\cos \theta_Z| < 0.7$$

Основные отборы: M_{jj}



$$M_{jj} = \sqrt{(E_{j1} + E_{j2})^2 - |\vec{p}_{j1} + \vec{p}_{j2}|^2}. \text{ Отбор: } 75 \text{ ГэВ} < M_{jj} < 105 \text{ ГэВ}$$

Основные отборы: $|\vec{P}_{\text{miss}}|$



$$|\vec{P}_{\text{miss}}| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad \vec{P}_{\text{miss}} = -\sum_k \vec{p}_k. \text{ Отбор: } 20 \text{ ГэВ} < |\vec{P}_{\text{miss}}| < 80 \text{ ГэВ}$$

Полная статистика прохождения основных отборов

Пояснения

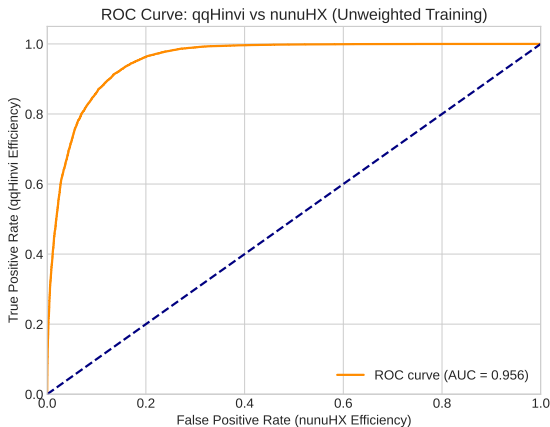
Столбцы: последовательные этапы основных отборов (применяются после предотборов)

Ячейки: абсолютное число событий, прошедших данный этап (в скобках написана эффективность относительно предыдущего столбца)

Выделены: сигнальные выборки qqH_{inv} и $qqHX$

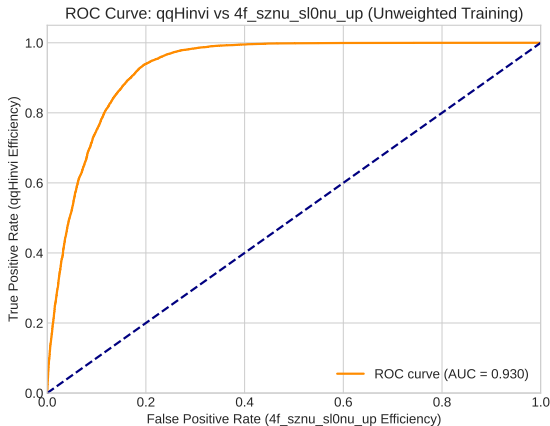
Процесс	После предотб.	MET	$\Delta\phi$	$ \cos\theta_Z $	M_{jj}	$ \vec{p}_{miss} $	Финал
qqH_{inv}	86 249	75 201 (87.2%)	70 899 (94.3%)	56 103 (79.1%)	46 344 (82.6%)	46 336 (100.0%)	46 336 (34.3%)
qqHX	2 873	1 267 (44.1%)	1 030 (81.3%)	751 (72.9%)	513 (68.3%)	512 (99.8%)	512 (0.1%)
qq	209 739	7 635 (3.6%)	685 (9.0%)	55 (8.0%)	6 (10.9%)	6 (100.0%)	6 (0.0%)
4f_sw_sl0qq	8 914	5 538 (62.1%)	4 968 (89.7%)	2 071 (41.7%)	255 (12.3%)	249 (97.7%)	249 (0.1%)
4f_sze_sl0uu	20 508	1 618 (7.9%)	1 524 (94.2%)	709 (46.5%)	1 (0.1%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
4f_sznu_sl0nu_up	206 601	117 915 (57.1%)	109 392 (92.8%)	42 814 (39.1%)	30 960 (72.3%)	30 043 (97.0%)	30 043 (7.5%)
4f_ww_h0cuxx	534	40 (7.5%)	21 (52.5%)	6 (28.6%)	1 (16.7%)	1 (100.0%)	1 (0.0%)
4f_zz_h0tdtd	1 514	102 (6.7%)	38 (37.3%)	15 (39.5%)	1 (6.7%)	1 (100.0%)	1 (0.0%)
nunuHX	343 934	281 352 (81.8%)	254 459 (90.4%)	197 593 (77.7%)	48 003 (24.3%)	47 925 (99.8%)	47 925 (5.7%)

BDT: ROC-кривая (qqHinvi vs nunuHX)



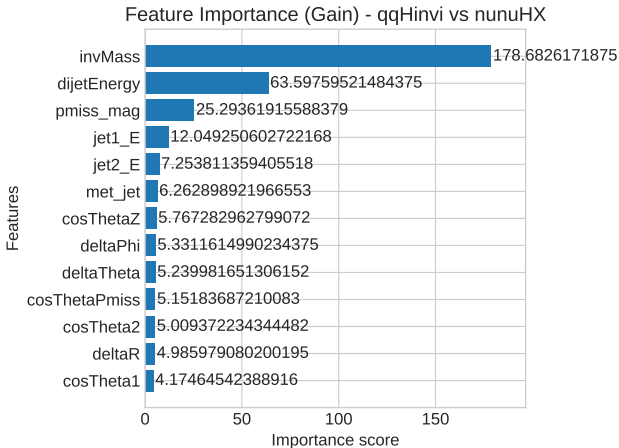
ROC-кривая классификатора qqHinvi vs nunuHX для тестовой выборки. AUC = 0.956.

BDT: ROC-кривая (qqHinvi vs 4f_sznu)



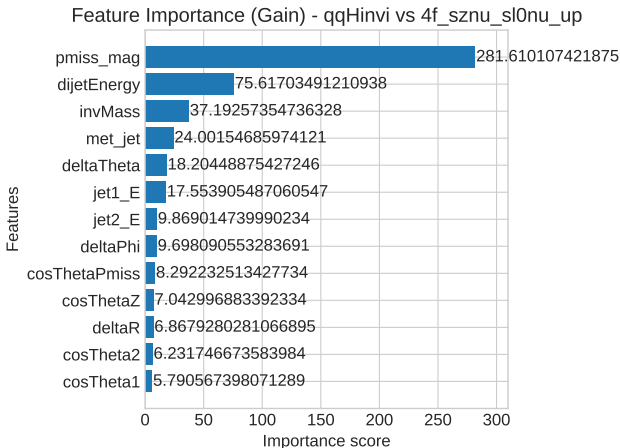
ROC-кривая классификатора qqHinvi vs 4f_sznu_sl0nu_up для тестовой выборки. AUC = 0.930.

BDT: Важность признаков (qqHinv_i vs nunuH_X)



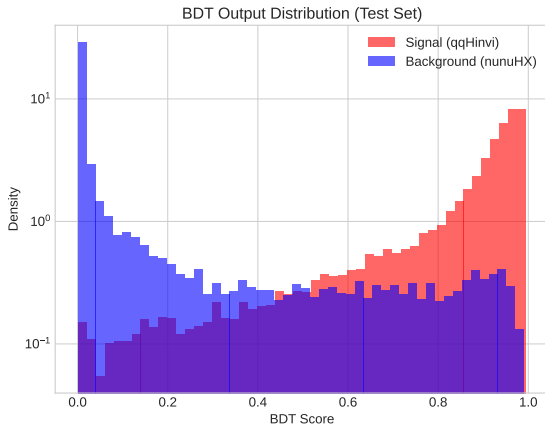
Важность признаков (по метрике gain) для классификатора qqHinv_i vs nunuH_X.

BDT: Важность признаков (qqHinvl vs 4f_sznu)



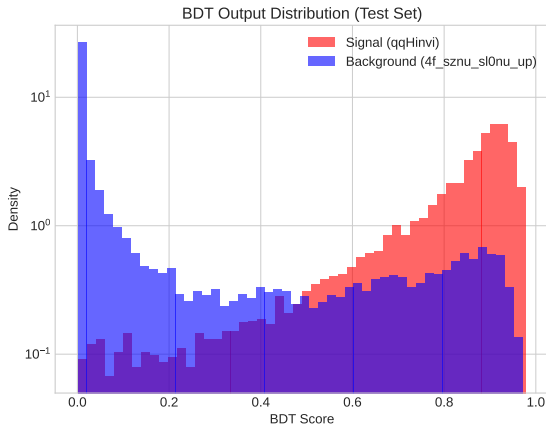
Важность признаков (по метрике gain) для классификатора qqHinvl vs 4f_sznu_sl0nu_up.

BDT: Распределение выхода (qqHinv vs nnuHX)



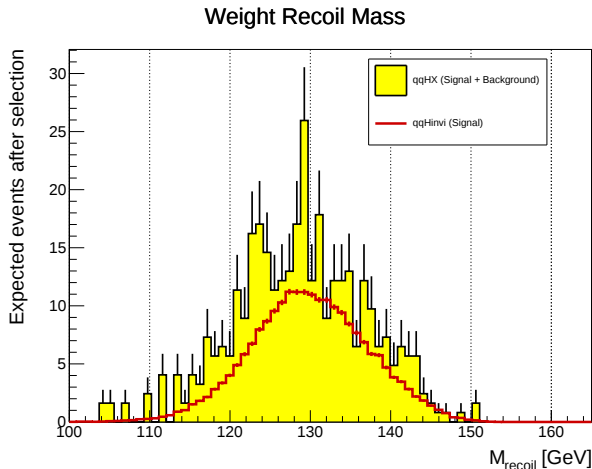
Распределение выхода BDT для сигнальных и фоновых событий на тестовой выборке. Выбранный порог: 0.75.

BDT: Распределение выхода (qqHinvl vs 4f_sznu)



Распределение выхода BDT для сигнальных и фоновых событий на тестовой выборке. Выбранный порог: 0.70.

Сравнение сигнальных выборок



Сравнение qqH_{inv} и $qqHX$ после всех отборов. Оба процесса взяты с весами. Более широкое распределение $qqHX$ обусловлено вкладом фоновых каналов распада Хиггса; эти процессы учтены при оценке верхнего предела.