

Экспериментальное открытие t-кварка

Мучкинова Баина

12 ноября 2025 г.

- 1 Введение
- 2 Тэватрон
- 3 Детектор CDF
- 4 Детектор DØ
- 5 Каналы распада и стратегии отбора
- 6 Результаты CDF
- 7 Результаты DØ
- 8 Выводы

Стандартная Модель элементарных частиц (1994)

	I поколение	II поколение	III поколение
Кварки	u-кварк d-кварк	c-кварк s-кварк	b-кварк ?
Лептоны	электрон e^- ν_e	мюон μ^- ν_μ	тау-лептон τ^- ν_τ

Основная проблема

Масса t-кварка: $> 150 \text{ ГэВ}/c^2$

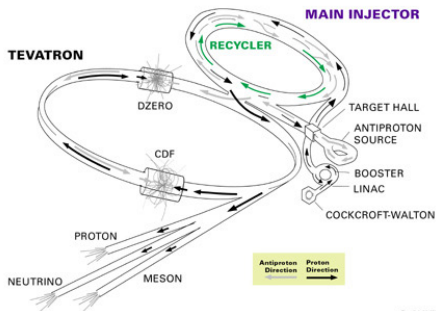
Требуется Тэватрон

Теоретическая необходимость

- Замыкание поколений
- Кварковая унитарность
- Распады b-кварка

Тэватрон — ускорительный комплекс

FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



Протон-антипротонный коллайдер Тэватрон

Характеристики

- Тип: $p\bar{p}$ -коллайдер
- Энергия: 1.8 ТэВ
- Длина: 6.3 км
- Место: Fermilab, США
- Запуск: 1985 год

Главная цель

Поиск и открытие t-кварка

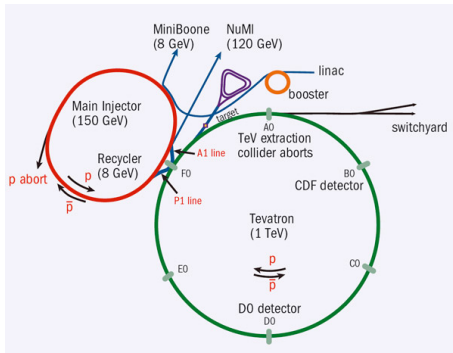
Технические характеристики Тэватрона

Параметр	Значение	Единица
Энергия протонов	980	ГэВ
Энергия антипротонов	980	ГэВ
Энергия в с.ц.м.	1.96	ТэВ
Длина окружности	6.3	км
Магнитное поле	4.2	Тл
Светимость (пиковая)	4.3×10^{32}	$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Светимость (интегральная)	10	fb^{-1}

Ускорительный комплекс

- Предварительные ускорители
- Главный инжектор
- Антипротонный источник
- Сверхпроводящие магниты

Схема ускорительного комплекса



Предварительные ускорители

- Кокротрон
- Линейный ускоритель
- Бустер

Основные кольца

- Главный инжектор
- Антипротонный источник
- Тэватрон

Детектор CDF (кратко)

Характеристики

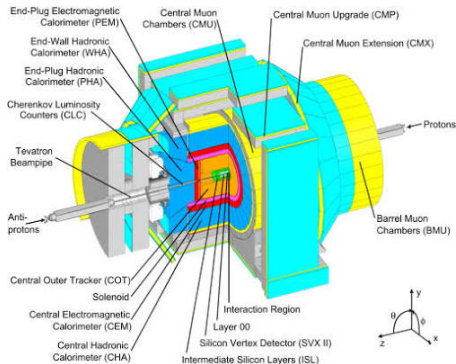
- Тип: многоцелевой детектор
- Магнитное поле: 1.4 Тл

Ключевые системы

- Кремниевый вершинный детектор
- Дрейфовые камеры
- Электромагнитный калориметр
- Адронный калориметр
- Мюонные спектрометры

Особенности

Высокая точность идентификации b -кварков



Детектор CDF

Система трекинга CDF

Кремниевый вершинный детектор (SVX II & ISL)

- Радиус: 1.5-28 см
- Слоев: 7 баррельных
- Разрешение: 10-15 мкм
- Задача: Идентификация b -кварков

Центральный трековый детектор (COT)

- Тип: Дрейфовая камера
- Радиус: 30-132 см
- Разрешение: 150 мкм
- Слоев: 12 суперслоев

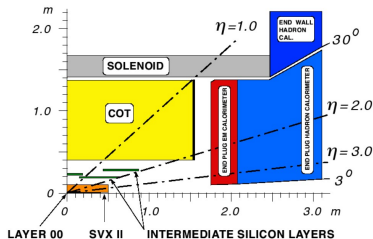


Схема системы трекинга

Ключевая особенность

Идентификация вторичных вершин для идентификации b -кварков

Детектор DØ (кратко)

Характеристики

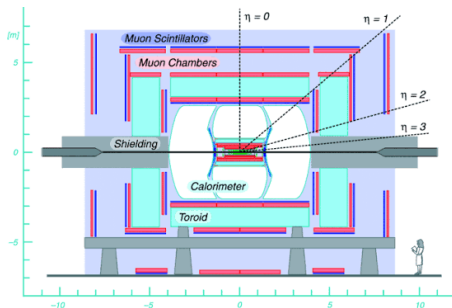
- Тип: многоцелевой детектор
- Магниты: тороидальные

Ключевые системы

- Вершинный детектор
- Ураново-жидкостные калориметры
- Трековые камеры
- Мюонные спектрометры

Особенности

Превосходное энергетическое разрешение калориметров



Детектор DØ

Сравнение DØ и CDF

Характеристика	DØ	CDF
Запуск	1992	1985
Трекер	Волоконный	Дрейфовые камеры
Калориметры	Ураново-жидкостные	Свинец/сцинтиллятор
Магниты	Тороидальные	Соленоид
Масса топ-кварка	199 ± 30 ГэВ	176 ± 13 ГэВ

Взаимодополняемость

- Разные подходы к детектированию
- Независимые методы анализа
- Перекрестная проверка результатов

Каналы распада t-кварка

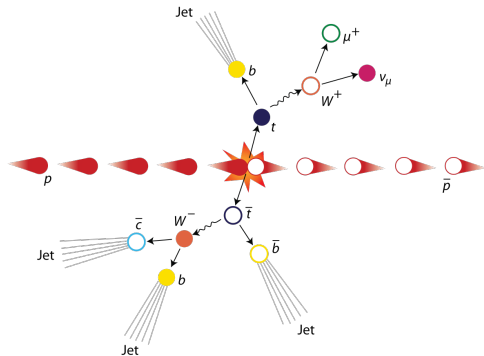


Диаграмма рождения $t\bar{t}$ пары с однолептонным распадом

Ключевые каналы

Двулептонный:

- 2 лептона + 2 b-струи + \cancel{E}_T
- Чистый сигнал

Однолептонный:

- 1 лептон + 4 струи + \cancel{E}_T
- Больше статистики

CDF: Стратегия отбора событий

Ключевой метод: идентификация b-кварка с помощью SVX

- Поиск вторичных вершин внутри струй
- Критерий: значимость смещения $L/\sigma(L) > 3.0$

Отбор в одолептонном канале

- Лептон (e или μ) с $E_T/P_T > 20$ ГэВ
- Missing* $E_T > 20$ ГэВ
- ≥ 3 струи с $E_T > 15$ ГэВ
- Обязательное наличие b-тега**

Отбор в двулептонном канале

- Два изолированных лептона
- Missing* $E_T > 20 - 25$ ГэВ
- ≥ 2 струи с $E_T > 10 - 15$ ГэВ
- Отсечка по инвариантной массе лептонов

CDF: Первые доказательства (1994 г.)

Экспериментальные условия

- Интегральная светимость: $\mathcal{L} = 19.3 \text{ пб}^{-1}$
- Энергия: $\sqrt{s} = 1.8 \text{ ТэВ}$
- Основной метод: b-тегирование с SVX

Результаты отбора

- **Однолептонный канал:**
 - Наблюдено: 6 событий
 - Фон: 2.3 ± 0.3
- **Двулептонный канал:**
 - Наблюдено: 2 события
 - Фон: 0.56 ± 0.13

Статистическая значимость

Вероятность флуктуации фона: **0.26%** $\Rightarrow \sim 3\sigma$

CDF: Открытие (1995 г.)

Улучшенные условия анализа

- Интегральная светимость: $\mathcal{L} = 67 \text{ пб}^{-1}$
- Улучшенные алгоритмы реконструкции
- Совместный анализ каналов

Результаты отбора

- **Однолептонный канал:**
 - Наблюдено: 27 событий
 - Фон: 6.7 ± 0.8
- **Двулептонный канал:**
 - Наблюдено: 5 событий
 - Фон: 1.3 ± 0.2

Статистическая значимость

Вероятность флуктуации фона: $4 \times 10^{-8} \Rightarrow 5.5\sigma$

Масса топ-кварка (1995)

$$176 \pm 8(\text{стат.}) \pm 10(\text{сист.}) \text{ ГэВ}/c^2$$

Сечение производства $t\bar{t}$

$$\sigma_{t\bar{t}} = 7.6^{+3.5}_{-2.0} \text{ пб}$$

Согласованность

Результаты согласуются с предсказаниями Стандартной модели

D0: Стратегия отбора событий (часть 1)

Три параллельных анализа

- 1 Однолептонный канал с b-тегированием
- 2 Однолептонный канал без b-тегирования
- 3 Двухлептонный канал

Отбор в однолептонном канале (с b-тегом)

- Лептон (e/μ) с $E_T/P_T > 20$ ГэВ
- *Missing* $E_T > 20$ ГэВ
- ≥ 4 струи с $E_T > 15$ ГэВ
- b-тегированная струя ($L/\sigma(L) > 7.0$)

Отбор в однолептонном канале (без b-тега)

- Те же кинематические требования
- **Отсутствие b-тегированных струй**
- Дополнительный кинематический анализ

D0: Стратегия отбора событий (часть 2)

Отбор в двулептонном канале

- Два изолированных лептона:
 - $e\mu$: $E_T(e) > 15 \text{ ГэВ}$, $P_T(\mu) > 15 \text{ ГэВ}/c$
 - $ee/\mu\mu$: $E_T/P_T > 20 - 25 \text{ ГэВ}$
- *Missing* E_T :
 - $e\mu$, ee : $> 15 \text{ ГэВ}$
 - $\mu\mu$: $> 25 \text{ ГэВ}$
- ≥ 2 струи с $E_T > 15 \text{ ГэВ}$
- Отсечка по инвариантной массе

Особенности подхода D0

- Более строгое требование к числу струй (4)
- Консервативный критерий b-тегирования
- Контрольный анализ без b-тега

D0: Результаты (1995 г.)

Результаты анализа ($\mathcal{L} \approx 50 \text{ пб}^{-1}$)

- Однолептонный канал (с b-тегом):
 - Наблюдено: 17 событий
 - Ожидаемый фон: 3.8 ± 0.6
- Двухлептонный канал:
 - Наблюдено: 6 событий
 - Ожидаемый фон: 1.1 ± 0.2

Статистическая значимость

Вероятность флуктуации фона: 2×10^{-6}

Измеренная масса топ-кварка

$$199_{-21}^{+19} \text{ (стат.) } \pm 22 \text{ (сист.) } \text{ ГэВ}/c^2$$

Выводы и историческое значение

Ключевые достижения

- CDF (1995): Статистическая значимость 5.5σ - открытие
- D0 (1995): Статистическая значимость 5.0σ - наблюдение
- Независимое подтверждение двумя экспериментами
- Массы согласуются в пределах погрешностей

Значение для физики

- Завершение поиска кварков Стандартной модели
- Подтверждение предсказаний через радиационные поправки
- Начало новой эры прецизионных измерений свойств t-кварка

Наследие

Методы, разработанные в этих работах, стали стандартом в современных экспериментах по физике частиц

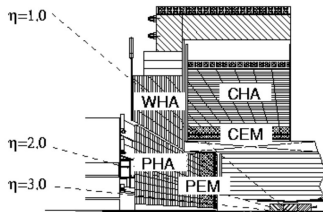
Back-Up

Электромагнитный калориметр

- Материал: Свинец/сцинтиллятор
- Разрешение: $\frac{14\%}{\sqrt{E}}$
- Задача: Фотоны, электроны
- Покрытие: $|\eta| < 3.6$

Адронный калориметр

- Материал: Сталь/сцинтиллятор
- Разрешение: $\frac{75\%}{\sqrt{E}}$
- Задача: Адроны, струи
- Покрытие: $|\eta| < 3.6$



Структура калориметров

Измерение энергии

Точное измерение энергий
частиц и струй

Мюонная и магнитная системы CDF

Мюонная система

Центральные детекторы:

- Тип: Дрейфовые камеры
- Покрытие: $|\eta| < 1.0$
- Слоев: 4-5 на сторону
- Разрешение: 1-2 мм

Тороидальные магниты:

- Поле: 1.4-1.9 Тл
- Задача: Импульс мюонов
- Покрытие: $|\eta| < 1.5$

Магнитная система

Центральный соленоид:

- Поле: 1.4 Тл
- Длина: 5 м
- Радиус: 1.5 м
- Тип: Сверхпроводящий

Параметры:

- Энергия: 25 МДж
- Ток: 4400 А
- Охлаждение: Жидкий гелий

Преимущества мюонной системы

- Высокая эффективность
- Хорошее разрешение
- Малый фон

Назначение магнитной системы

Измерение импульсов
заряженных частиц

Система триггера CDF

Уровни триггера

Level 1: Аппаратный

- Время: 5.5 мкс
- Сокращение: 50 кГц → 300 Гц

Level 2: Процессорный

- Время: 20 мкс
- Сокращение: 300 Гц → 100 Гц

Level 3: Программный

- Время: 1 сек
- Сокращение: 100 Гц → 5 Гц

Эффективность

Отбор интересных событий
из миллиардов столкновений

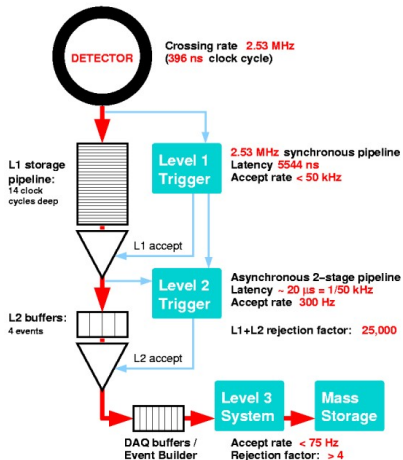


Схема системы триггера

Основные характеристики

- Тип: Протон-антипротонный коллайдер
- Место: Fermilab, США
- Энергия: 1.96 ТэВ (в с.ц.м.)
- Длина: 6.3 км
- Запуск: 1983 год
- Остановка: 2011 год

Историческое значение

- Самый мощный ускоритель 1983-2009 гг.
- Открытие топ-кварка (1995)
- Прецизионные измерения W- и Z-бозонов
- Исследования В-физики

Главные эксперименты

- CDF (Collider Detector at Fermilab)
- DØ (D-Zero)

Магнитная система и производство антипротонов

Сверхпроводящая магнитная система

- Тип: Двухполюсные диполи
- Материал: Ниобий-титан
- Количество: 774 диполя
- Поле: 4.2 Тл
- Температура: 4.2 К

Система охлаждения

- Жидкий гелий
- Распределительная система
- Криогенные станции

Производство антипротонов

- Мишень: Медная или никелевая
- Энергия протонов: 120 ГэВ
- Частота: 2.5 МГц
- Интенсивность: 3×10^{11} антипротонов/час

Накопление и охлаждение

- Accumulator ring
- Stochastic cooling
- Electron cooling
- Плотность: 3×10^{11} антипротонов

Основные компоненты

- Внутренние системы:
 - Вершинный детектор
 - Центральный трекер
 - Соленоид
- Калориметры:
 - Электромагнитный
 - Адронный
- Мюонные системы:
 - Центральные детекторы
 - Тороидальные магниты

Мюонная и магнитная системы CDF

Мюонная система

Центральные детекторы:

- Тип: Дрейфовые камеры
- Покрытие: $|\eta| < 1.0$
- Слоев: 4-5 на сторону
- Разрешение: 1-2 мм

Тороидальные магниты:

- Поле: 1.4-1.9 Тл
- Задача: Импульс мюонов
- Покрытие: $|\eta| < 1.5$

Магнитная система

Центральный соленоид:

- Поле: 1.4 Тл
- Длина: 5 м
- Радиус: 1.5 м
- Тип: Сверхпроводящий

Параметры:

- Энергия: 25 МДж
- Ток: 4400 А
- Охлаждение: Жидкий гелий

Преимущества мюонной системы

- Высокая эффективность
- Хорошее разрешение
- Малый фон

Назначение магнитной системы

Измерение импульсов
заряженных частиц

Обзор эксперимента DØ

Основная информация

- Место: Fermilab, США
- Ускоритель: Тэватрон
- Тип: Многоцелевой детектор
- Запуск: 1992 год
- Период работы: 1992-2011
- Светимость: $150 \text{ пб}^{-1} \rightarrow 10 \text{ фб}^{-1}$

Коллаборация

- Ученых: 500+
- Стран: 18
- Университетов: 90+

Структура детектора DØ

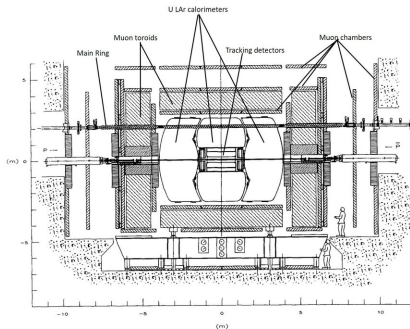


Схема детектора DØ

Основные компоненты детектора

Внутренние системы:

- Трековые детекторы
- Вершинный детектор
- Кремниевый микротрековый детектор
- Центральный волоконный трекер

Калориметрическая система:

- Электромагнитный калориметр
- Адронный калориметр
- Ураново-жидкостная технология

Мюонная система:

- Тороидальные магниты
- Мюонные детекторы
- Дрейфовые трубки
- Широкое угловое покрытие

Трековая и калориметрическая системы DØ

Трековая система

Кремниевый микротрековый детектор:

- Назначение: Точное трекинг
- Разрешение: 10 мкм
- Слоев: 6 баррельных
- Радиус: 2.5-10 см

Центральный волоконный трекер:

- Тип: Сцинтилляционные волокна
- Радиус: 20-52 см
- Разрешение: 50-100 мкм

Калориметрическая система

Электромагнитный калориметр:

- Тип: Ураново-жидкостный
- Материал: Уран/аргон
- Разрешение: $\frac{15\%}{\sqrt{E}}$
- Покрытие: $|\eta| < 4.2$

Адронный калориметр:

- Тип: Ураново-жидкостный
- Разрешение: $\frac{50\%}{\sqrt{E}}$
- Покрытие: $|\eta| < 4.2$

Тороидальные спектрометры

- Магниты: 3 тороидальных
- Поле: 1.8-2.0 Тл
- Покрытие: $|\eta| < 2.0$
- Детекторы: Дрейфовые трубки

Особенности конструкции

- Отсутствие железного ядра
- Минимальное рассеяние частиц
- Однородное магнитное поле
- Широкое угловое покрытие

Слои детектирования

- А-слой (внутренний)
- В-слой (средний)
- С-слой (внешний)

Система триггера DØ

Трехуровневая система

Уровень 1: Аппаратный

- Время: 4.2 мкс
- Сокращение: 50 кГц \rightarrow 1 кГц

Уровень 2: Процессорный

- Время: 100 мкс
- Сокращение: 1 кГц \rightarrow 1 кГц

Уровень 3: Программный

- Время: секунды
- Сокращение: 1 кГц \rightarrow 10 Гц

Типы триггеров

- Одиночные лептоны (e, μ)
- Множественные лептоны
- Фотоны и струи
- Специальные триггеры для В-физики