

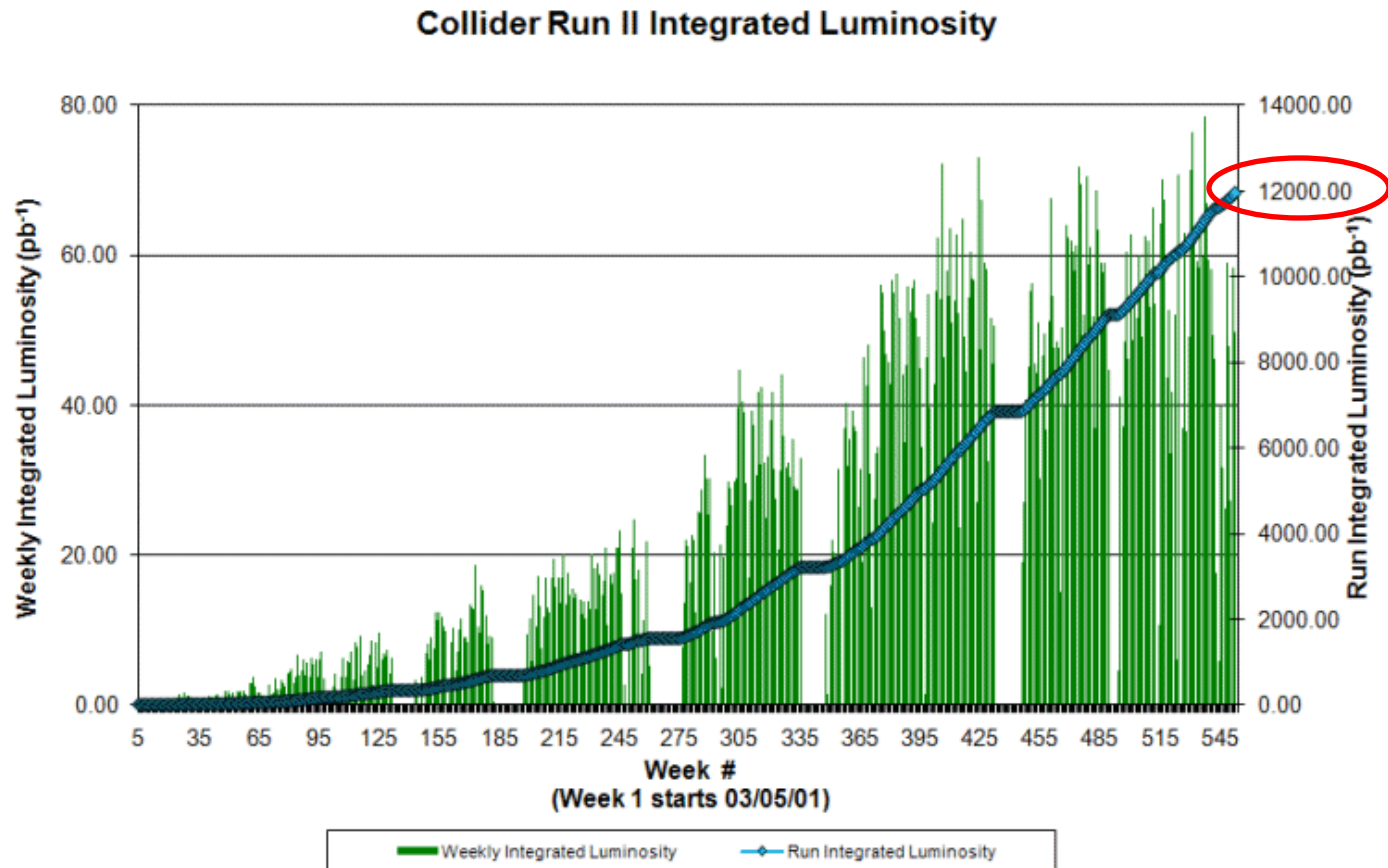


Новые результаты экспериментов на Тэватроне

С.П. Денисов, А.А. Щукин
(ИФВЭ, Протвино)

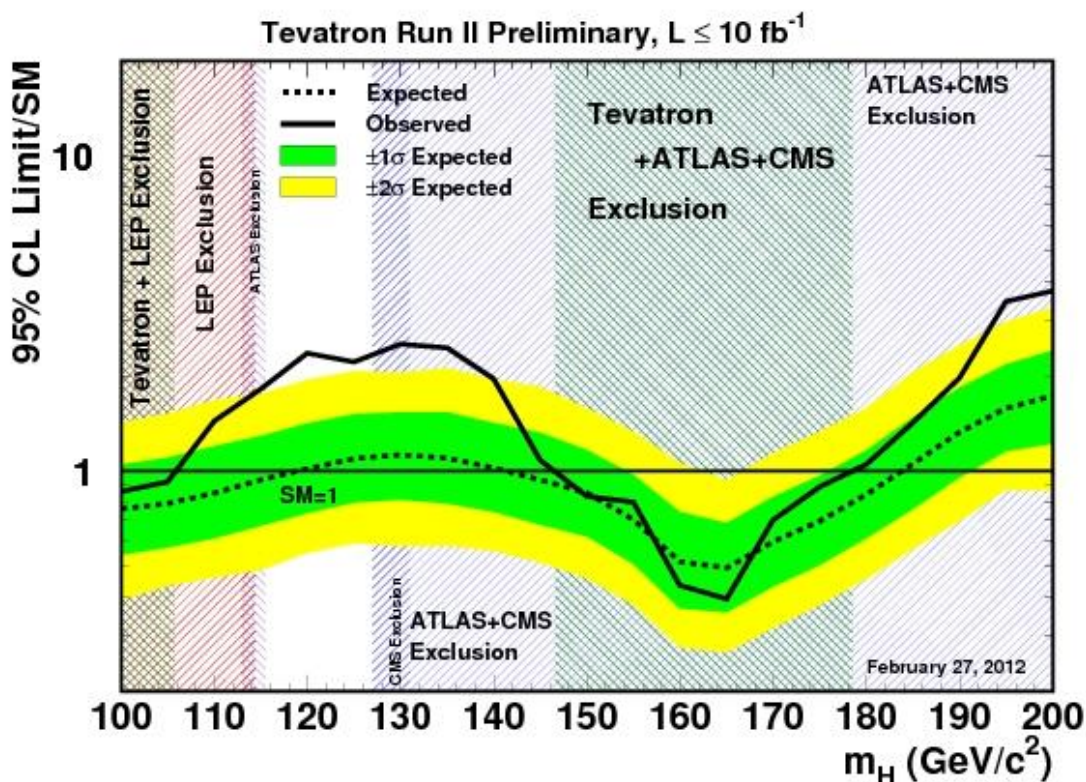
Коллайдер Тэватрон

- Энергия протон-антипротонных столкновений - 1.96 ТэВ
- Обслуживал два многоцелевых эксперимента – CDF и D0
- Завершил работу 30 сентября 2011 года



Поиск бозона Хиггса

- Одна из важнейших задач современной физики высоких энергий
- Большое количество исследуемых сигнатур
- Поиски как в Стандартной Модели, так и в Суперсимметрии
- Результаты LEP исключили $m_H < 114$ ГэВ
- Комбинированием результатов D0 и CDF с использованием данных до 10 fb^{-1} с уровнем достоверности 95% исключена область $147 < m_H < 179$ ГэВ



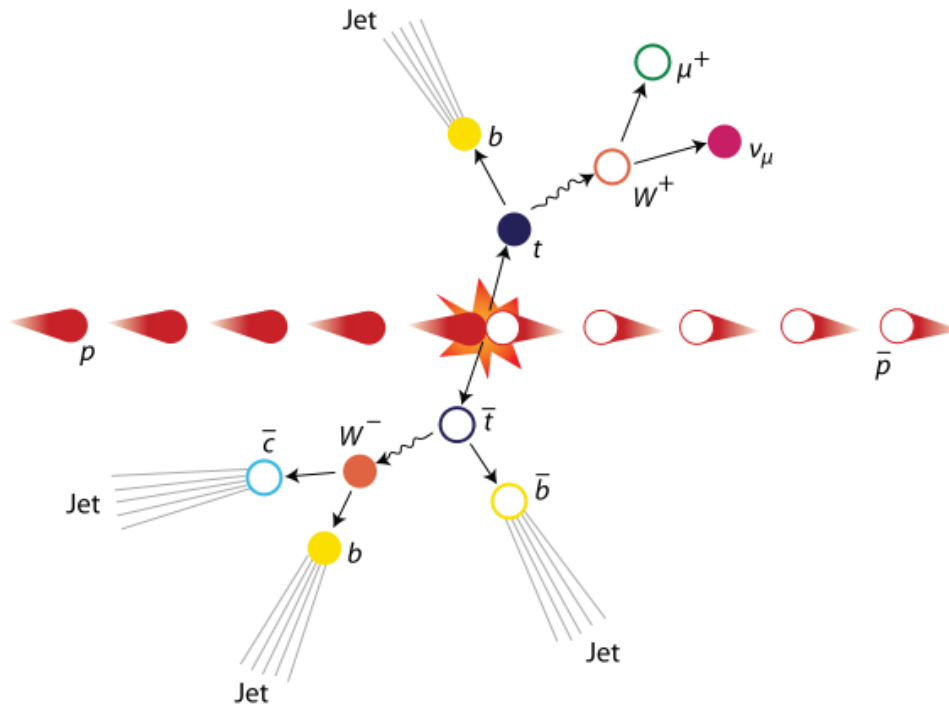
t-кварк

t-кварк был открыт в 1995 одновременно в экспериментах D0 и CDF:

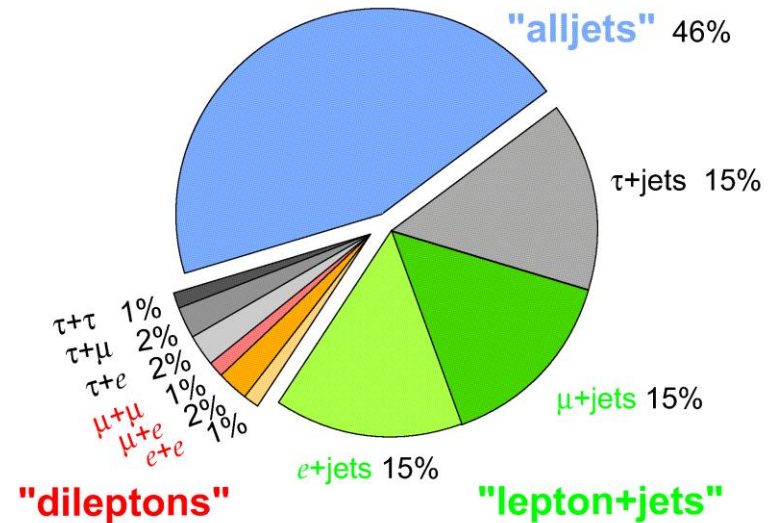
Phys. Rev. Lett. 74, 2422–2426 (1995)

Phys. Rev. Lett. 74, 2626–2631 (1995)

Поиск t-кварка и изучение его свойств – одна из основных задач экспериментов на коллайдере Tevatron



Top Pair Branching Fractions



t-кварк

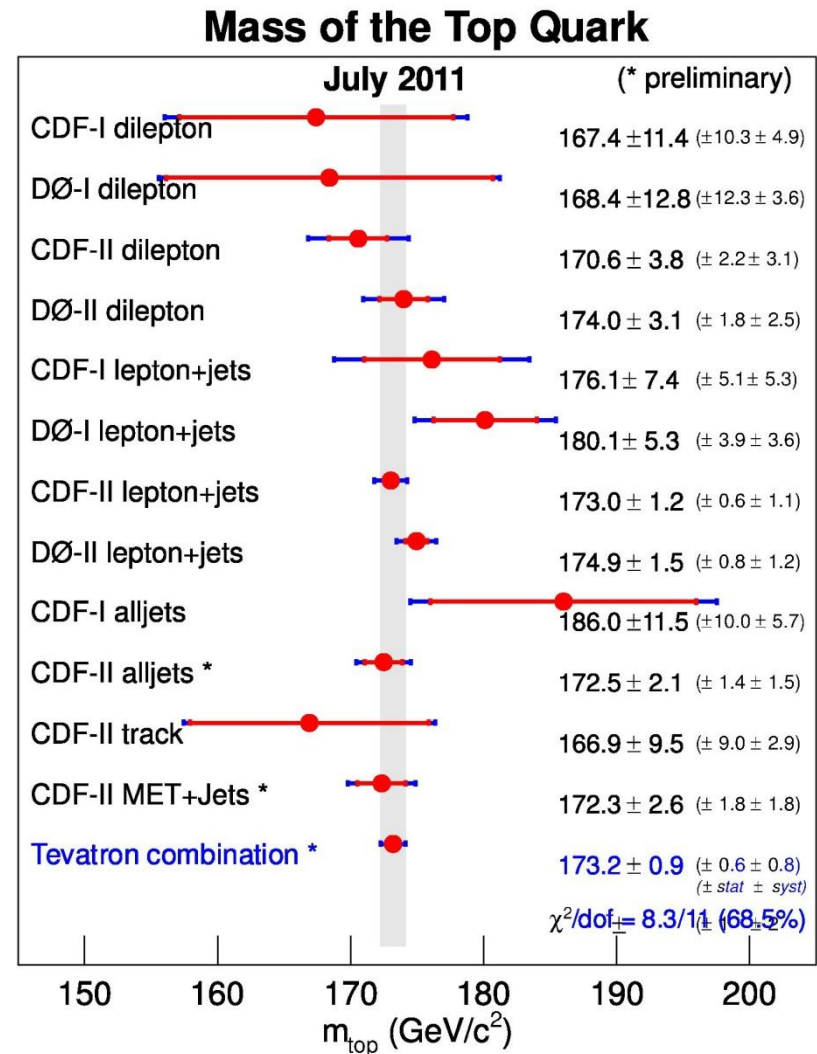
Измерение массы

- Масса t-кварка не предсказывается СМ
- Важный параметр для определения массы бозона Хиггса
- Последние данные комбинации результатов D0 и CDF (до 5.8 фб-1):

$$m_t = 173.2 \pm 0.9 \text{ ГэВ}$$

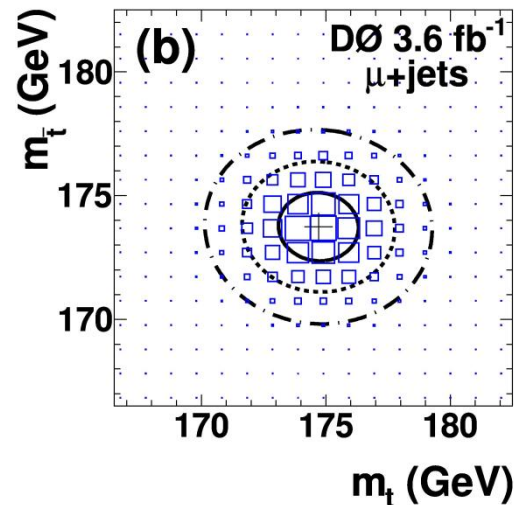
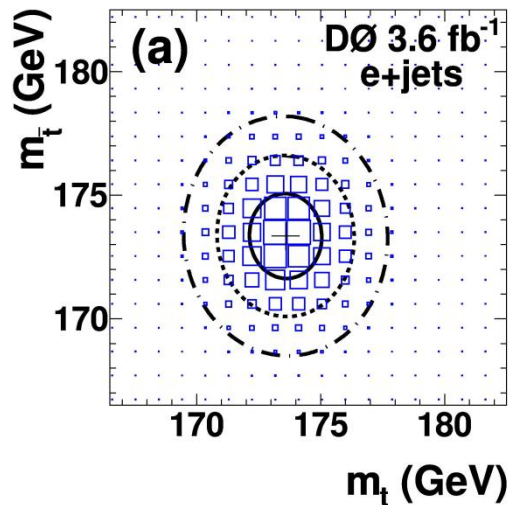
Точность измерения массы достигла 0.5% !

основной вклад в ошибку измерений вносит систематическая погрешность



t-кварк. Измерение разности масс $t\bar{t}$.

- Время жизни t-кварка настолько мало, что t и $\bar{t}$ не успевают создать связанные состояния и распадаются независимо
- Их массы определяются независимо, а заряд может быть определен по заряду лептона
- Согласно CPT $\Delta m_t = 0$



$$M_{\text{top}} - M_{\text{antitop}} = 0.8 \pm 1.8 \text{ (стат.)} \pm 0.5 \text{ (сист.) ГэВ}$$

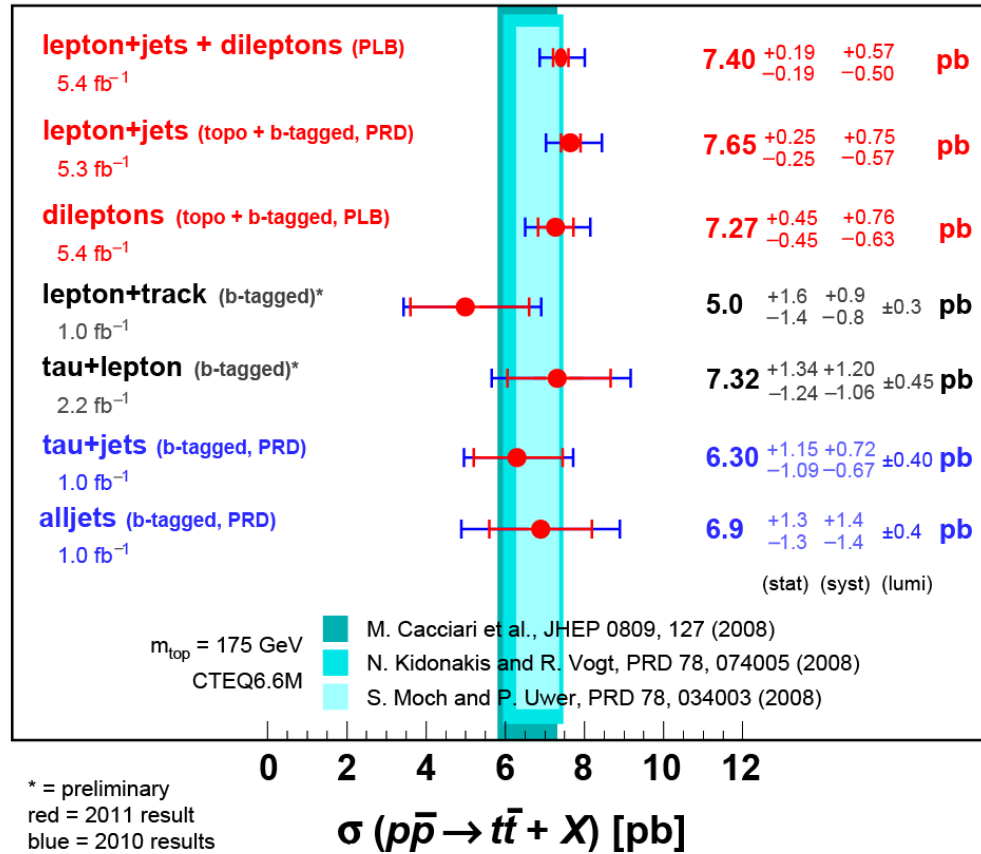
$$\Delta m_t / m_t = 0.4 \pm 1\%$$

t-кварк

Измерение сечений

DØ Run II

July 2011

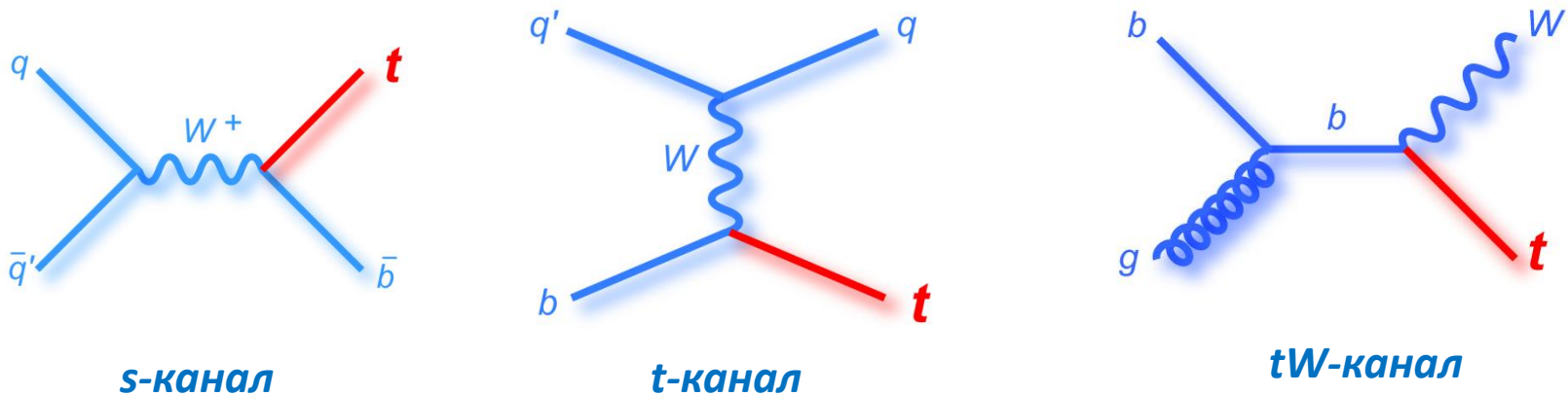


Последняя комбинация результатов DØ: $\sigma(p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} + X) = 7.56 (+0.63 -0.56) \text{ пб}$
 Результаты согласуются с CM (NLO)

t-кварк

Одиночное рождение

t-кварк может быть рожден за счет электрослабого взаимодействия:



Впервые в 2009 году в экспериментах на Тэватроне было надежно зарегистрировано одиночное рождение t-кварка

62 события

t-кварк

Одинокое рождение

D0 (5.4 фб-1): $\sigma_t = 2.86 (+0.69 -0.63)$ пб

$\sigma_s = 0.68 (+0.38 -0.35)$ пб

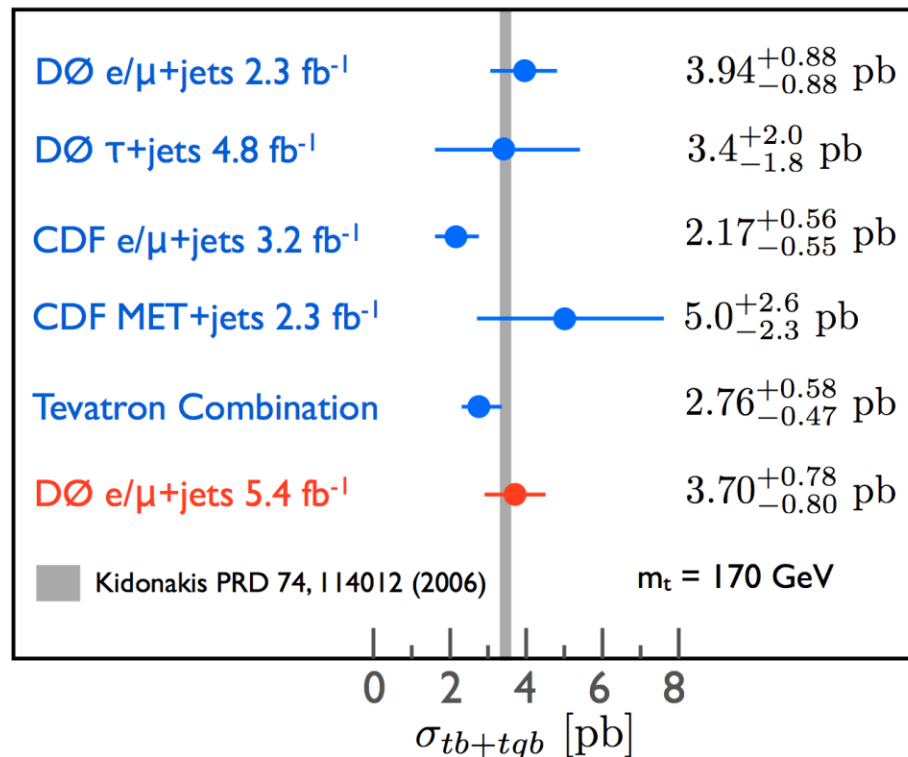
$\sigma_{s+t} = 3.43 (+0.73 -0.74)$ пб

CDF (7.5 фб-1): $\sigma_t = 2.90 \pm 0.59$ пб

$\sigma_s = 0.98 \pm 0.63$ пб

$\sigma_{s+t} = 3.04 (+0.57 -0.53)$ пб

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & \mathbf{V_{tb}} \end{pmatrix}$$



Измерение сечения позволило установить ограничение на величину $|V_{tb}|$
(ранее $|V_{tb}|$ вычислялся только косвенно, в предположении, что число поколений кварков равно трем)

D0: $|V_{tb}| > 0.79$ (CL=95%).

CDF: $|V_{tb}| = 0.92 \pm 0.11$ (стат.+сист.) ± 0.05 (теор.) или $|V_{tb}| > 0.78$ (CL=95%)

t-кварк

Измерение времени жизни t-кварка

- Прямое измерение времени жизни по наличию вершины распада не представляется возможным из-за его крайне малой величины.

Теоретические оценки: $\Gamma_t = 1.26 \text{ ГэВ}$, $\tau_t = 5 \cdot 10^{-25} \text{ с}$

- Определение времени жизни по ширине массового спектра частицы:

Разрешение установок D0 и CDF заметно превышает 1.3 ГэВ

Тем не менее, такое измерение было сделано в эксперименте CDF и получен результат

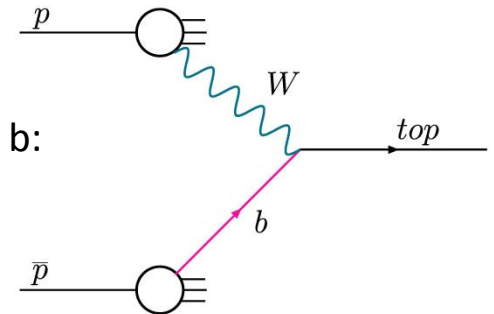
$$\Gamma_t < 7.6 \text{ ГэВ (95\% CL) или } 0.3 < \Gamma_t < 4.4 \text{ ГэВ (68\% CL)}$$

t-кварк

Измерение времени жизни t-кварка

Эксперимент D0, интегральная светимость 5.4 фб^{-1}

Рождение одиночного топ-кварка в t-канале идет через слияние W и b:



Таким образом:

$$\Gamma(t \rightarrow Wb) = \sigma(t\text{-channel}) \times \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)_{SM}}{\sigma(t\text{-channel})_{SM}}, \text{ где } \sigma(t\text{-channel})_{SM} = 2.15 \pm 0.24 \text{ пб}$$

$$\Gamma_t = \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)}{B(t \rightarrow Wb)}$$

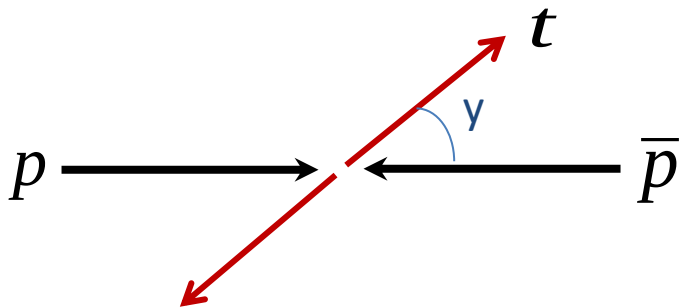
$$\Gamma_t = 2.00_{-0.43}^{+0.47} \text{ ГэВ}, \tau_t = \left(3.29_{-0.68}^{+0.90}\right) \times 10^{-25} \text{ с.}$$

Наиболее точное определение времени жизни частицы!

t-кварк

$$A_{FB}$$

СМ предсказывает пространственную асимметрию в парном образовании t - кварков:
 t -кварк вылетает преимущественно в направлении падающего кварка (протона), а анти- t -кварк – в обратном



$$A_{FB} = \frac{N(\Delta y > 0) - N(\Delta y < 0)}{N(\Delta y > 0) + N(\Delta y < 0)},$$

где Δy – разности быстрот t - и анти- t -кварков

Наблюдение отклонений от предсказанной величины A_{FB} может означать присутствие новых частиц: Z' , аксиглюоны и т.д..

t-кварк

A_{FB}

D0 (lepton+jets, 5.4 fb^{-1}):

$$A_{FB} = 0.196 \pm 0.065$$

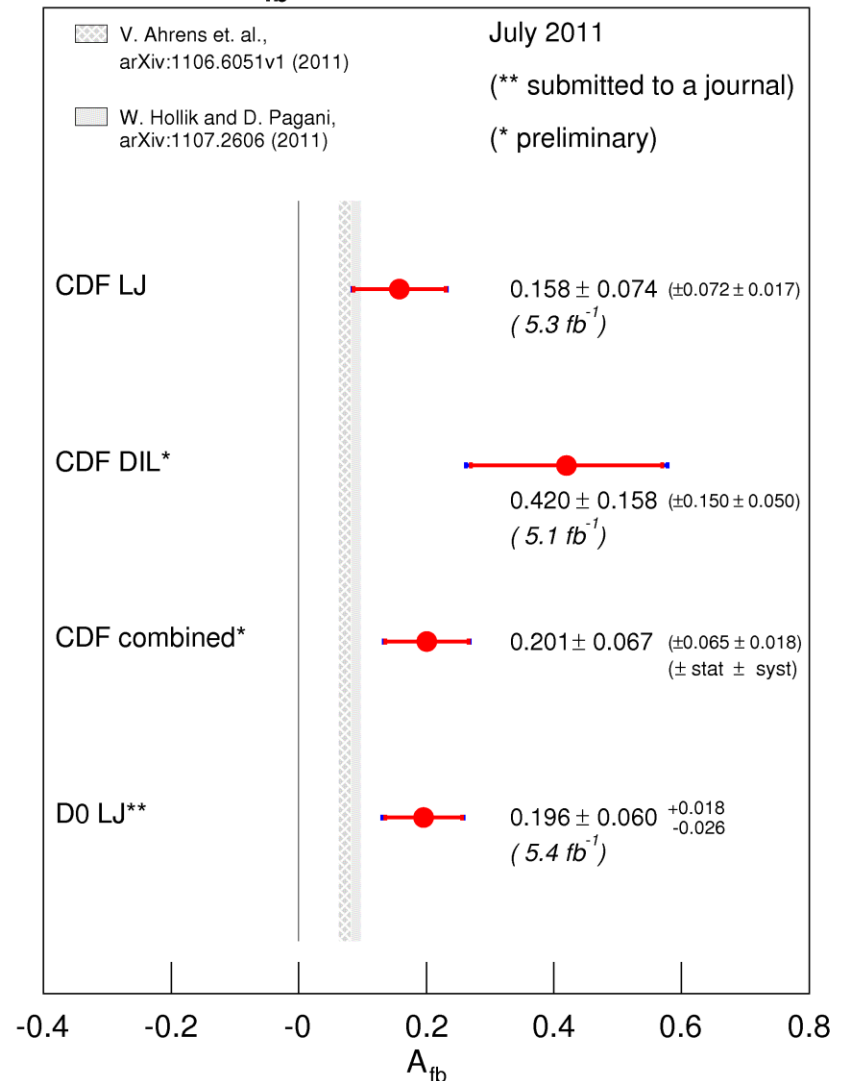
CDF (lepton+jets, 8.7 fb^{-1}):

$$A_{FB} = 0.162 \pm 0.047$$

Оба результата заметно ($>3\sigma$) отличаются от предсказаний СМ ($A_{FB} \approx 0.021$)

Кроме того, CDF наблюдает зависимость A_{FB} от m_{tt} и от $\Delta\eta$.

A_{fb} of the Top Quark



Измерение массы W бозона

- Масса W бозона – важнейший параметр СМ
- Не предсказывается теорией
- Через радиационные поправки Δr связан с массой бозона Хиггса и массой t-кварка:

$$m_W = \sqrt{\frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F}} \cdot \frac{1}{\sin\theta_W \sqrt{1-\Delta r}}$$

m_H примерно в 170 раз
чувствительнее к m_W , чем к m_t

$W \rightarrow \mu\nu$
 $W \rightarrow e\nu$

D0 (5.3 фб⁻¹)

$m_W = 80.375 \pm 0.023$ ГэВ



$m_H = 90 (+33 -26)$ ГэВ
 $m_H < 162$ ГэВ (95% CL)

Предыдущее значение
мирового среднего
 $m_W = 80.399 \pm 0.023$ ГэВ

Новое значение
мирового среднего
 $m_W = 80.385 \pm 0.015$ ГэВ

CDF (2.2 фб⁻¹)

$m_W = 80.387 \pm 0.019$ ГэВ

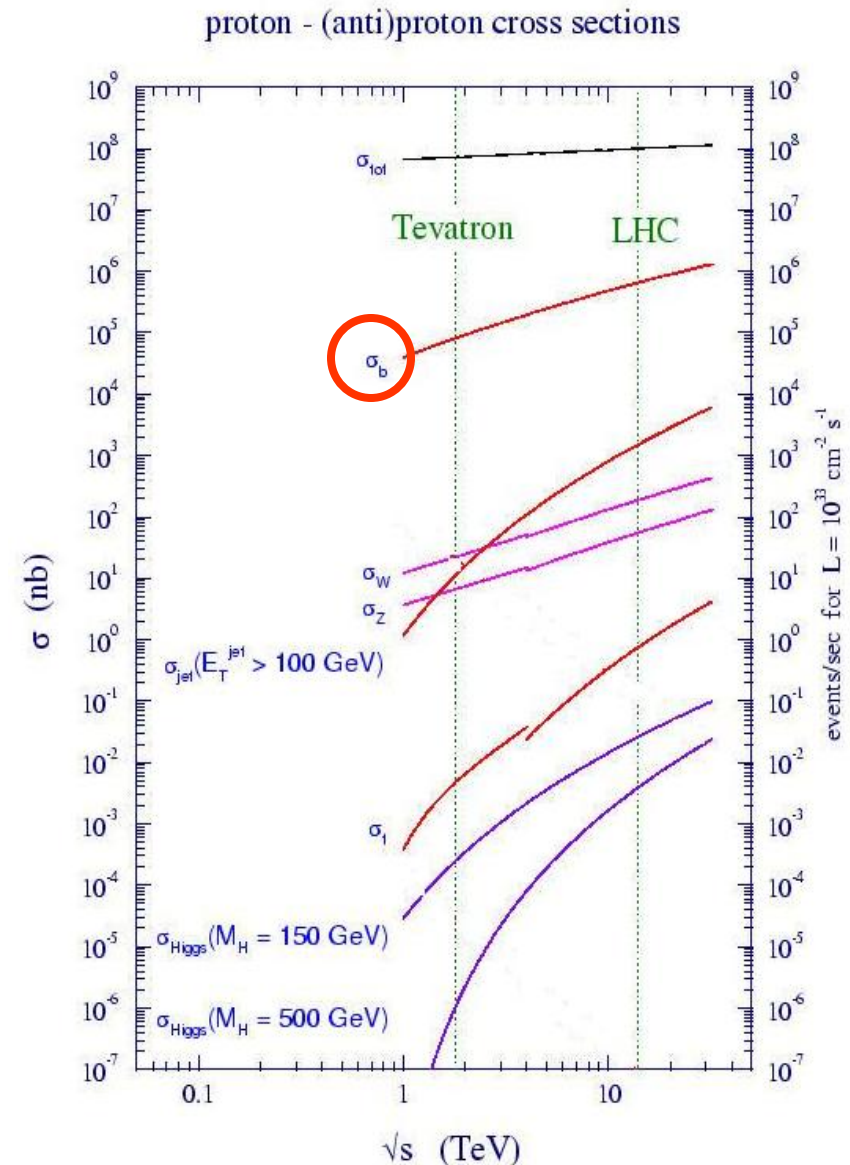


$m_H = 94 (+29 -24)$ ГэВ
 $m_H < 152$ ГэВ (95% CL)

В-физика

Большое сечение образования частиц с b -кварками (10^{-3} от полного сечения, $\sim 10^4$ б/с) обеспечивает широкую программу исследований по физике b -кварка:

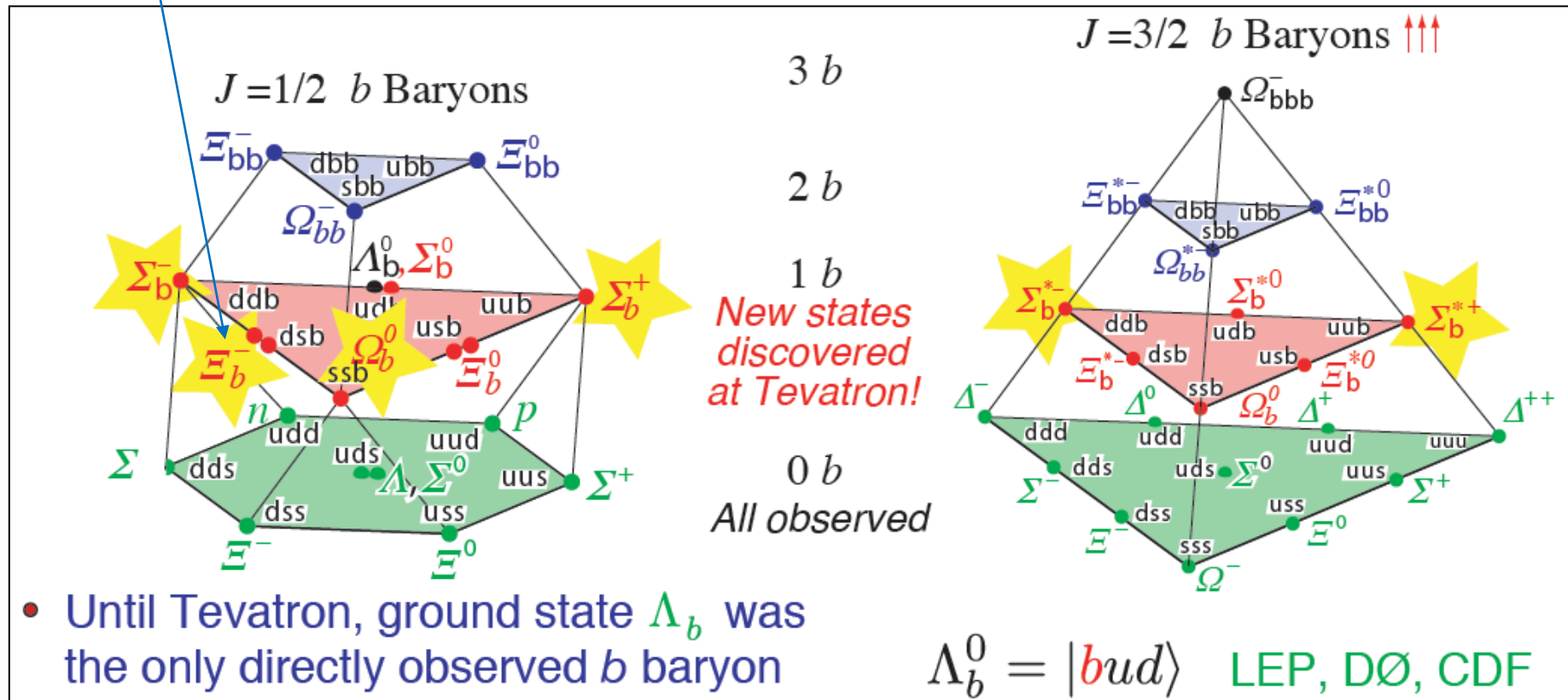
- измерение времени жизни B -мезонов;
- изучение редких распадов B -мезонов;
- Исследования в области спектроскопия адронов с b -кварками;
- изучение осцилляций B_s -мезонов;
- изучение нарушения СР-инвариантности.



В-физика

Целое семейство b -барионов открыто на Тэватроне

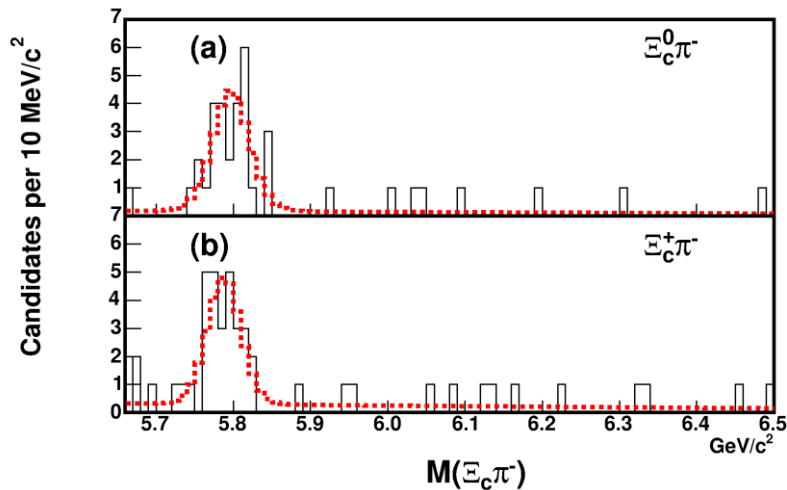
Первый барион с кварками
всех трех поколений



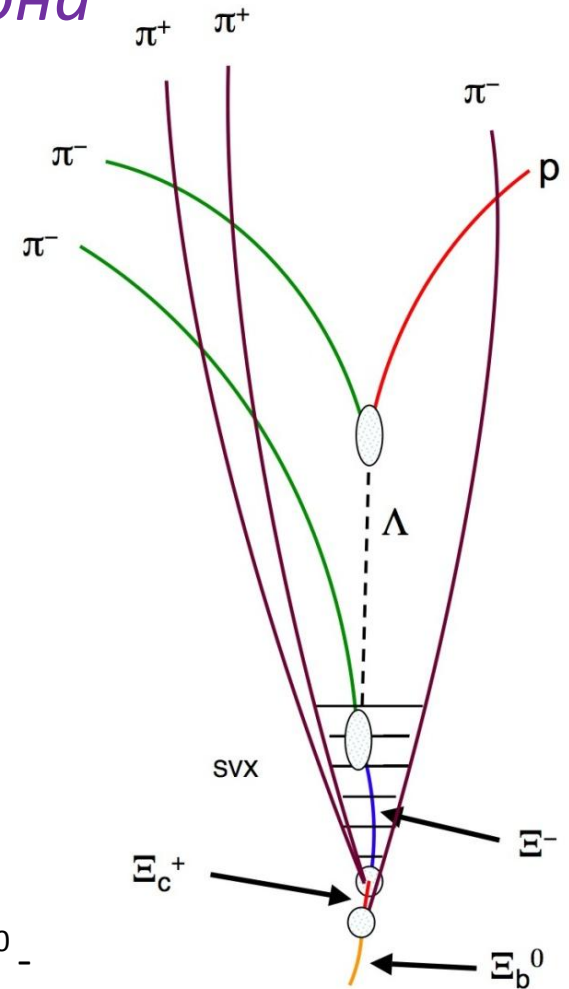
В-физика

Наблюдение Ξ_b^0 бариона

В июле 2011 года в эксперименте CDF (4.2 fb^{-1}) впервые был обнаружен Ξ_b^0 барион



В пике с массой 5787.8 $\text{МэВ}/c^2$, связанном с рождением Ξ_b^0 бариона, содержится 25.3 событий



В-физика

Поиск распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- Вероятность таких распадов очень мала (запрещены на LO): $BR=(3.2\pm 0.2)10^{-9}$
- Расширения СМ дают значительно большие значения BR

D0 (6.1 fb^{-1})

$BR < 5.1 \cdot 10^{-8}$ (95% CL)

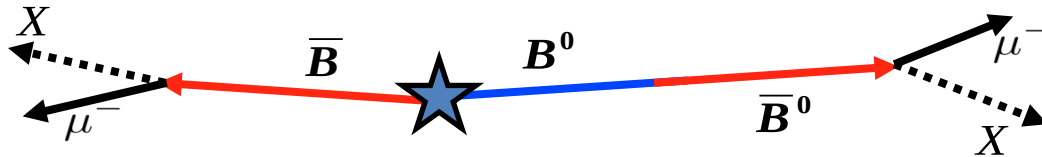
CDF (9.6 fb^{-1})

$BR = (1.3^{+0.9}_{-0.7}) \times 10^{-8}$ (95% CL)
 $0.8 \times 10^{-9} < BR < 3.4 \times 10^{-8}$

Т.к. обработаны уже значительные объемы имеющейся статистики, вряд ли удастся достичь до уровня теоретических предсказаний BR

В-физика

Зарядовая асимметрия димюонов одного знака



$$A_{sl}^b \equiv \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}}$$

Предсказание СМ: $A_{sl}^b = (-0.023_{-0.006}^{+0.005})\%$

В эксперименте D0 на статистике 9 fb^{-1} получено значение

$A_{sl}^b = (-0.787 \pm 0.172(\text{стат.}) \pm 0.093(\text{сист.}))\%$, что отличается от предсказываемого СМ значения на 3.9σ .

- Полулептонные распады B_q^0 и $\bar{B}_q^0$ различаются
- Нарушение CP-инвариантности при смешивании
- Результат может быть важен для проблемы антивещества во Вселенной

Новая физика

- Большое число поисковых направлений:

суперсимметрия

лептокварки

дополнительные измерения

новые тяжелые бозоны

новые тяжелые кварки

RS-гравитоны

возбужденные лептоны

долгоживущие частицы

> 110 публикаций

- Несмотря на то, что новых физических явлений не открыто, эти исследования крайне важны:

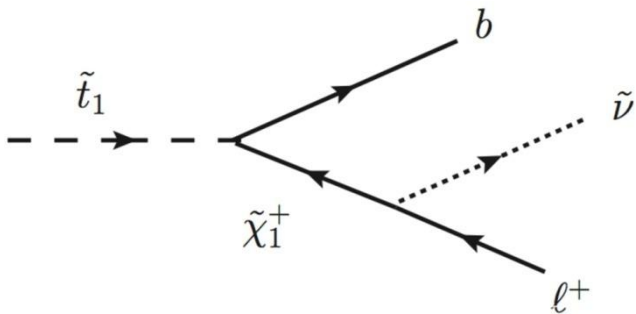
- всесторонне тестируется Стандартная Модель
- устанавливаются новые ограничения на процессы
- новые методологические разработки

Новая физика

Суперсимметрия. Поиск скалярного t -кварка. $D0(7.3 \text{ фб}^{-1})$

Минимальная суперсимметричная модель (MSSM)

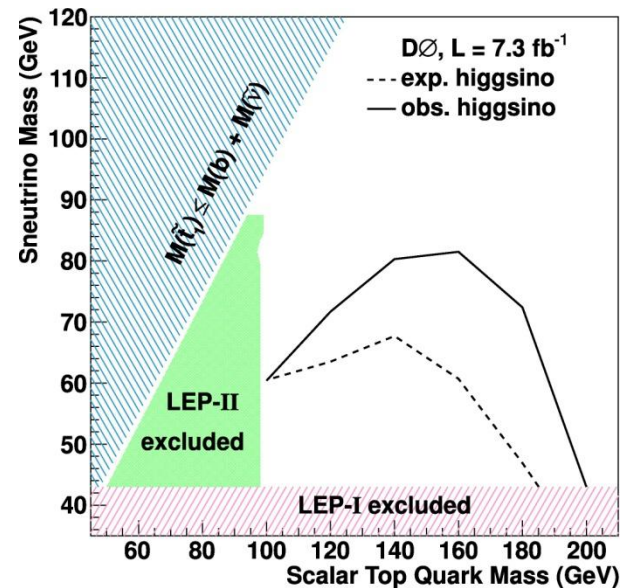
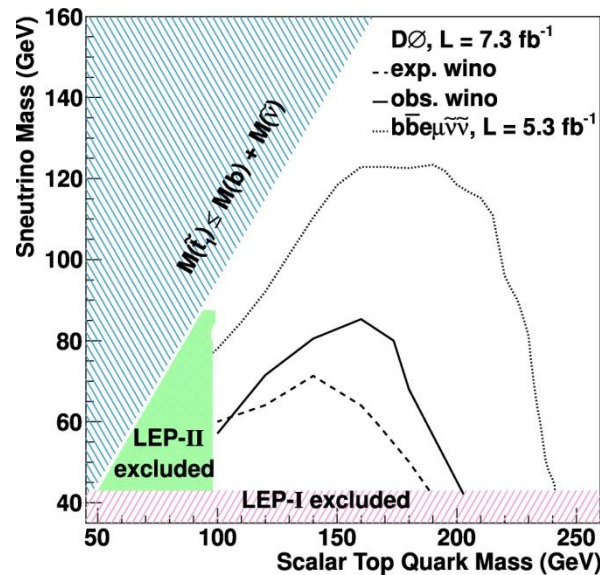
- каждой частице сопоставляется суперсимметричный партнер
- скалярный t -кварк может быть достаточно легким, чтобы образовываться на Тэватроне



Исследовались каналы:

$$\begin{aligned} \tilde{t} \tilde{t} &\rightarrow b \bar{b} \mu \tau \tilde{\nu} \tilde{\nu} \\ \tilde{t} \tilde{t} &\rightarrow b \bar{b} \tau \tau \tilde{\nu} \tilde{\nu} \end{aligned}$$

Исключены новые
области масс

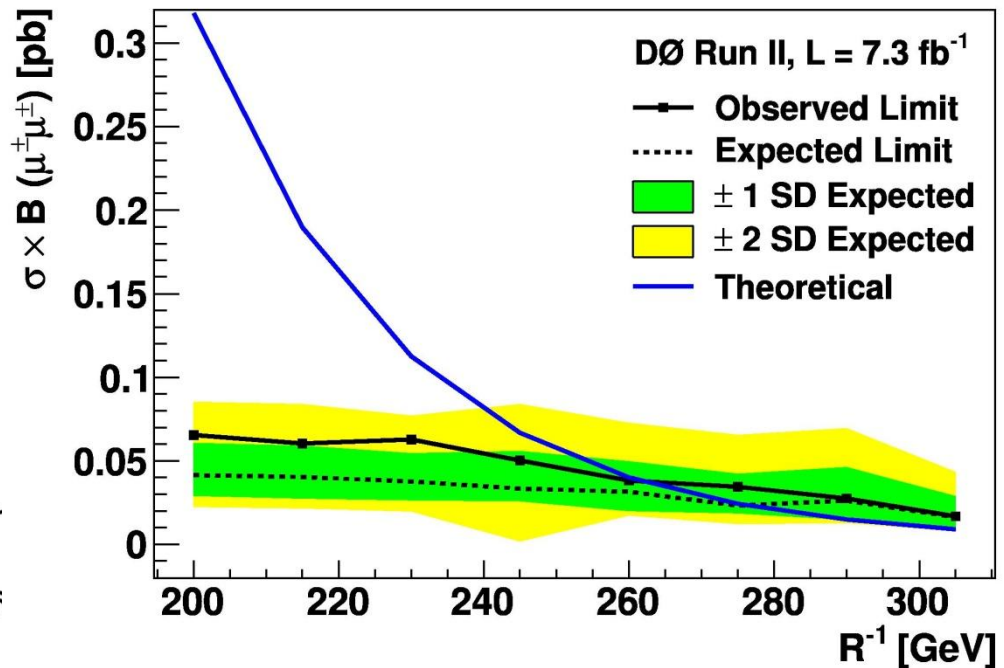
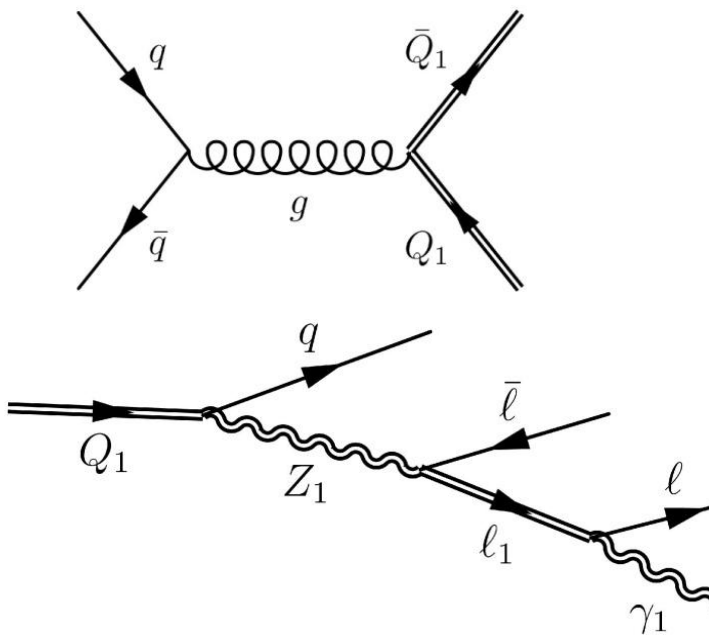


Новая физика

Поиск универсальных дополнительных измерений. $D0$ (7.3 fb^{-1})

UED:

- компактифицированные дополнительные измерения, доступные для всех полей СМ
- набор частиц Калуцы-Кляйна (КК)
- легчайшая КК-частица должна быть стабильна. Кандидат на роль «темной материи»



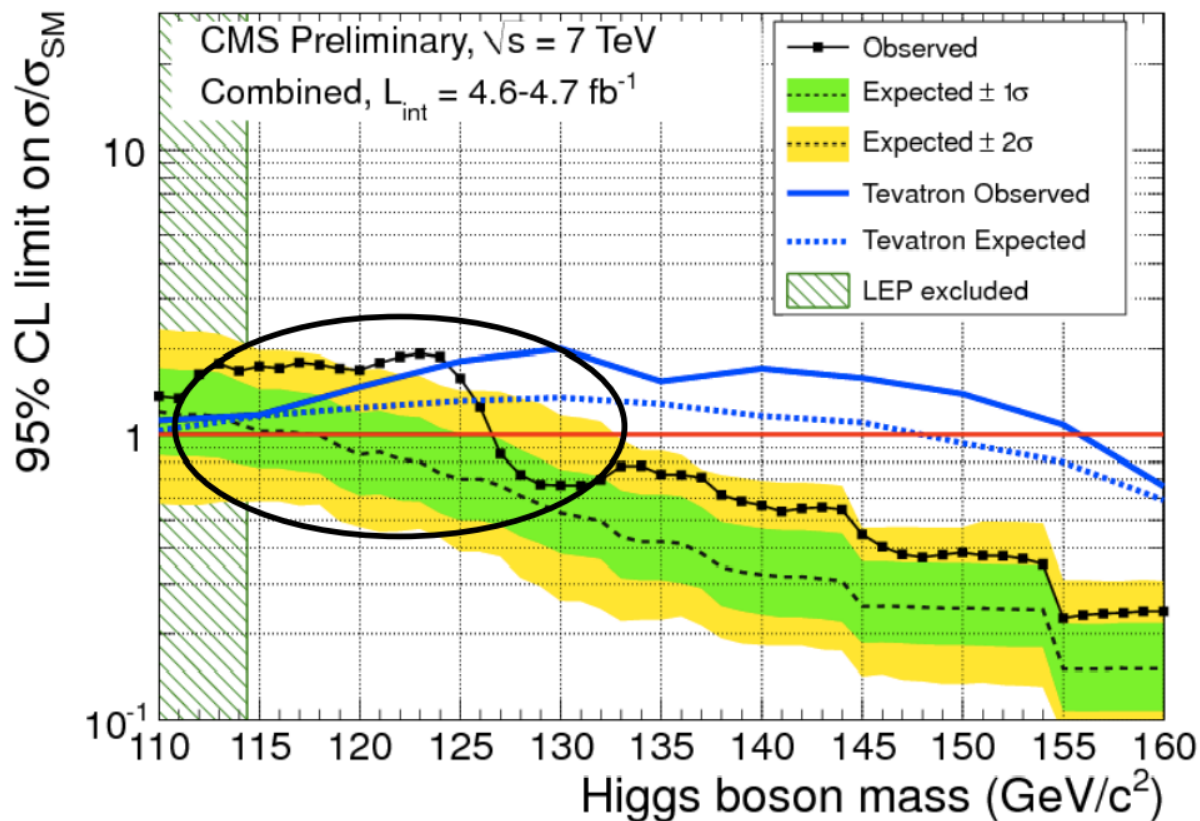
Заключение

- После остановки Тэватрона, сотрудничества D0 и CDF продолжают обработку и анализ данных
- Получены важнейшие физические результаты (прецизионные измерения свойств t -кварка, массы W -бозона, поиск бозона Хиггса и др.)
- По некоторым направлениям обработано лишь 10% статистики
- При общем согласии экспериментальных результатов с предсказаниями СМ остаются два открытых вопроса:
 - пространственная асимметрия образования пар $t\bar{t}$ (расхождение $\sim 3.3\sigma$)
 - зарядовая асимметрия димюонов одного знака (расхождение $\sim 3.9\sigma$)
- По многим направлениям от экспериментов D0 и CDF еще можно ожидать интересных результатов
- Список результатов и публикаций D0 и CDF:
<http://www-d0.fnal.gov/Run2Physics/WWW/results.htm>
<http://www-cdf.fnal.gov/physics/physics.html>

Backup

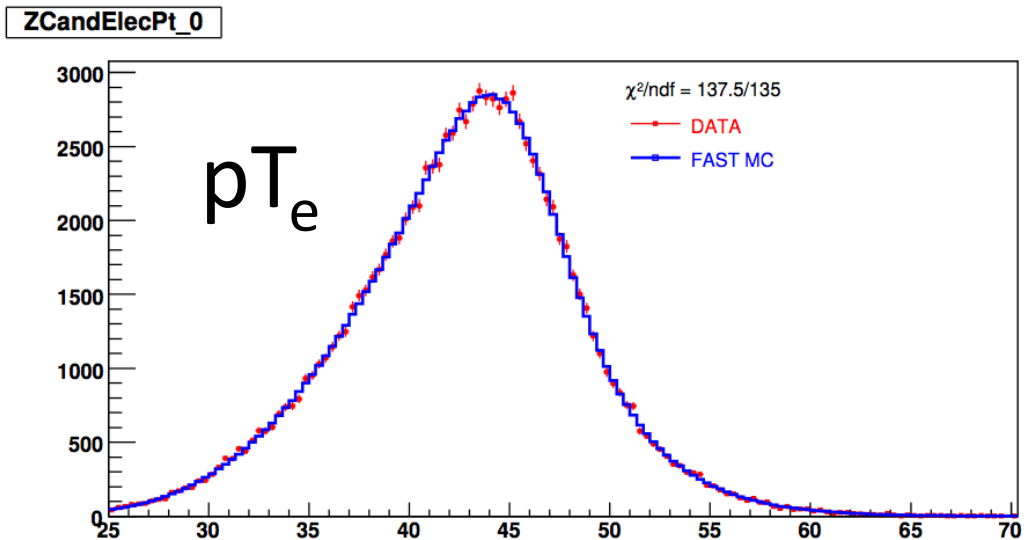
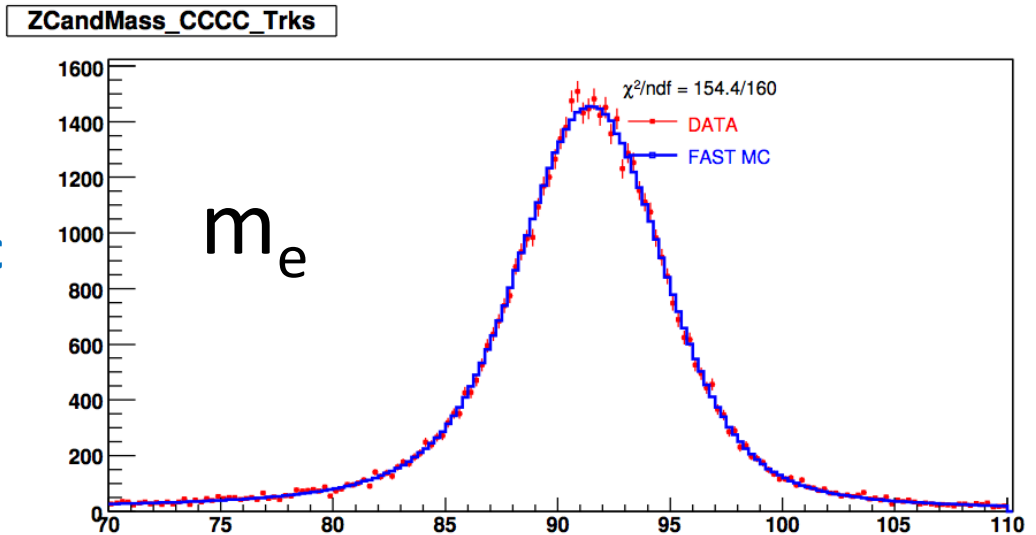
Поиск бозона Хиггса

- В экспериментах на БАК набрано и обработано около 5 fb^{-1} данных
- Тэватрон больше не является доминирующим игроком, но все равно обеспечивает сравнимую чувствительность в наиболее интересной области масс.



Измерение массы W бозона

Хорошее согласие данных и МС
на выборке $Z \rightarrow e\bar{e}$



Измерение массы W бозона

