

Рождение одиночного t -кварка в адронном канале распада на LHC

Олег Гребенюк

Семинар ОФВЭ

10 марта, 2009 г.

Оглавление

- 1 Мотивация
- 2 Струи
- 3 Фоновые процессы
- 4 Кинематические особенности партонов и струй
- 5 Выводы. Планы

D0

V.M. Abazov et al.. "Evidence for production of single top quarks and first direct measurement of $|V_{tb}|$ ", Phys.Rev.Lett.**98**,181802(2007), Phys.Rev.**D78**,012005(2008), hep-ex/0903.0850v1

Начало 2007: около **60 одиночных t -событий** были отобраны из 1460 событий, записанных за период набора данных с интегральной светимостью 1 fb^{-1} и удовлетворяющих всем критериям отбора. Получено сечение: $4.9 \pm 1.4 \text{ pb}$

Март 2009: интегральная светимость 2.3 fb^{-1} .

Сечение: $3.94 \pm 0.88 \text{ pb}$

Мотивация

CDF

T. Aaltonen et al.. "First Observation of Electroweak Single Top Quark Production", Phys.Rev.Lett.**101**,252001(2008), hep-ex/0903.0885v1

Март 2009: интегральная светимость 3.2 fb^{-1} .
Сечение: $2.3 \pm 0.6 \text{ pb}$
 $|V_{tb}| = 0.91 \pm 0.11 \pm 0.07$

ATLAS

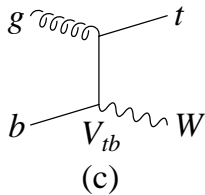
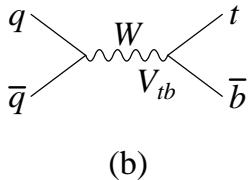
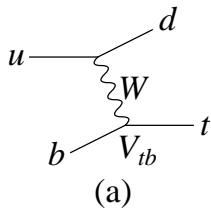
Предсказание СМ для сечения рождения одиночных t -кварков в протон-протонном взаимодействии на **LHC** составляет примерно **300 pb**. То есть, в первый год с планируемой интегральной светимостью 10 fb^{-1} можно ожидать около $4 \cdot 10^4$ одиночных t -кварков.

Однако, коэффициент распада W -бозона в **лептоны** равен **0.325**, а в **адроны** в два раза больше, **0.675**, и возможна полная реконструкция события (нет ненаблюдаемого нейтрино).

По этим причинам попытки использовать адронный канал распада W для регистрации рождения одиночного t -кварка не прекращаются до сих пор.

Механизмы рождения одиночного t -кварка

Z.Sullivan "Understanding single-top quark production and jets at hadron colliders", hep-ph/0408049



LO диаграммы (a) t -канального, (b) s -канального и (c) Wt -ассоциированного рождения одиночного t -кварка

В РУТНІА реализован только t -канальный механизм, но он имеет доминирующий вклад: 240 pb

Струи при рождении одиночного t -кварка в адронном канале

Струи из :

W -струны, натягиваемой между кварками от

$W \rightarrow q\bar{q}$ распада;

b -струны, натягиваемой между b -кварком от $t \rightarrow Wb$ распада и

каким-нибудь другим кварком;

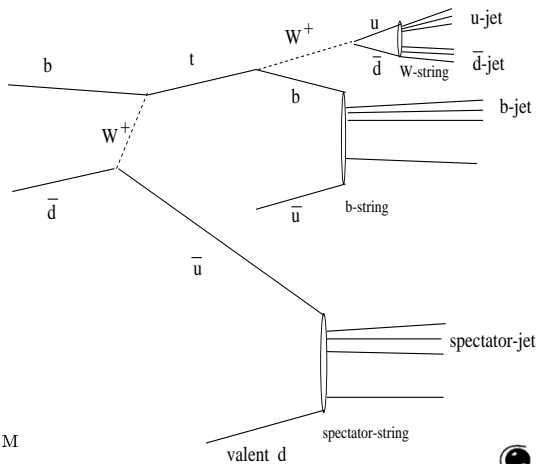
"спектаторной" струны,

натягиваемой между

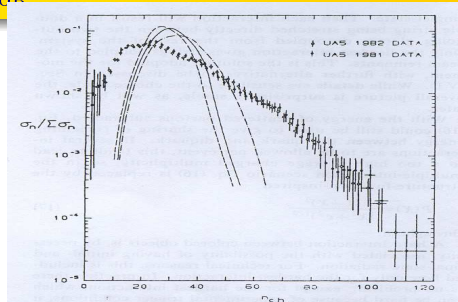
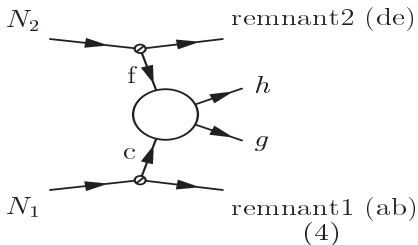
кварком q_f в $q_1 q_2 \rightarrow tq_f$

жестком процессе и другим

кварком.



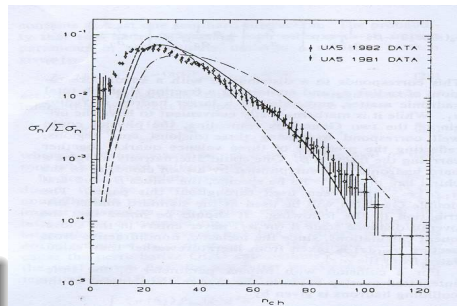
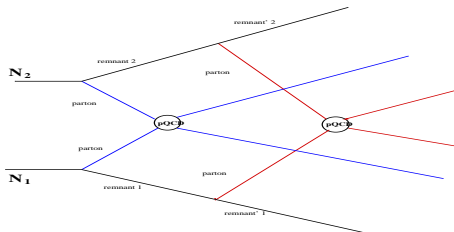
Однократное взаимодействие партонов



UA5

T.Sjostrand и M. van Zijl, Phys.Rev. D36(1987)2019
 Распределение множественности заряженных адронов, измеренное в эксперименте UA5 ($p\bar{p}$ коллайдер, 540 ГэВ, ЦЕРН), сравнивается с расчетами, учитывающими только однократные взаимодействия партон-партон с последующим возникновением и фрагментацией двух струй

Многokратные взаимодействия партонов



Underlying Events

Функция распределения безразмерного поперечного импульса $x_{\perp} \equiv 2p_{\perp}/E_{cm}$:

$$\rho(x_{\perp}) = \frac{1}{\sigma_{nd}(s)} \frac{d\sigma_{hard}}{dx_{\perp}},$$

$$dF(x_{\perp}) = \rho(x_{\perp}) dx_{\perp} \rightarrow F(x_{\perp}) = \int_{x_{\perp}}^1 \rho(x'_{\perp}) dx'_{\perp}.$$

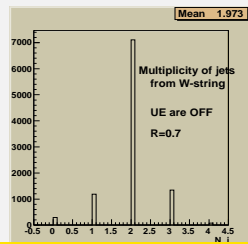
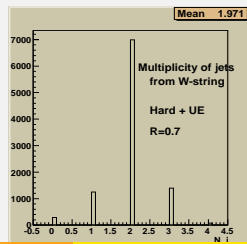
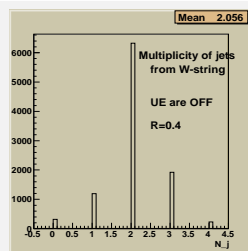
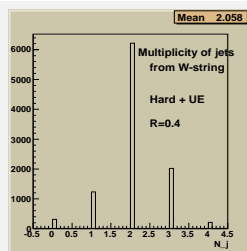
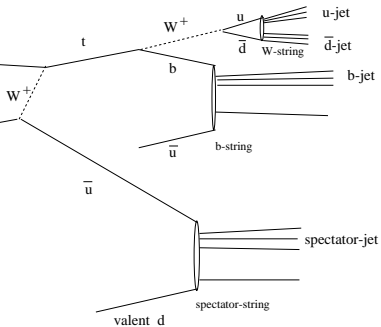
Данному рассеянию могут предшествовать k других партон-партонных взаимодействий с большими x_{\perp} с плотностью вероятности

$$\rho(k, x_{\perp}) = \rho(x_{\perp}) e^{-F(x_{\perp})} \frac{F(x_{\perp})^{k-1}}{(k-1)!}.$$

UAS

Тот же эксперимент сравнивается с расчетами, учитывающими многократные взаимодействия партонов с последующим возникновением и фрагментацией большого количества струн

Множественности струй из W -струны



Примеры струй из W -струны

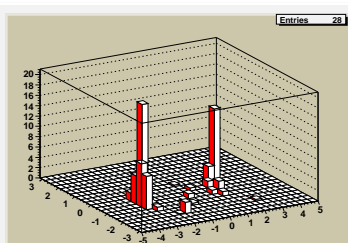
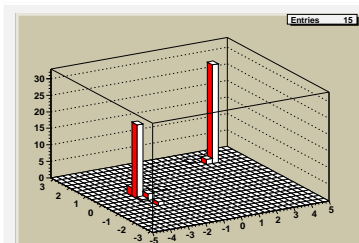
Массивные объекты

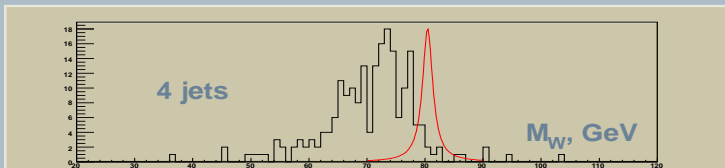
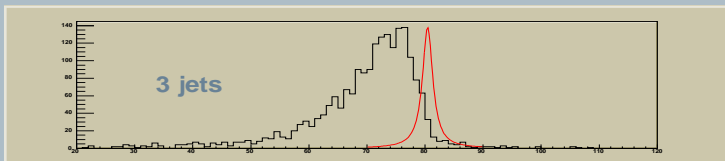
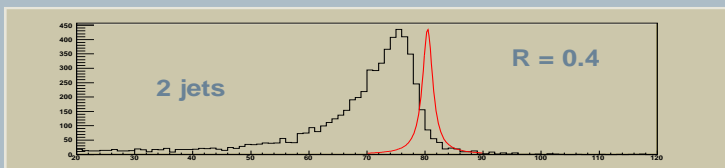
$$p_q = (\sqrt{p_{qT}^2 + m_q^2} \cosh \eta_q, p_{qT} \cos \varphi_q, p_{qT} \sin \varphi_q, \sqrt{p_{qT}^2 + m_q^2} \sinh \eta_q)$$

Если $p_{qT} \gg m_q$, то

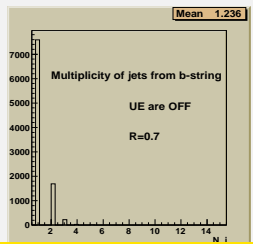
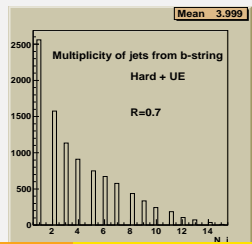
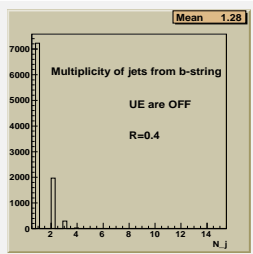
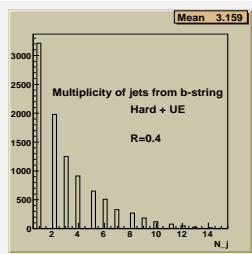
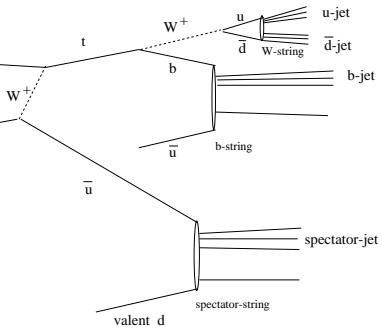
Безмассовые объекты

$$p_q = p_{qT} (\cosh \eta_q, \cos \varphi_q, \sin \varphi_q, \sinh \eta_q), \quad p_q^2 = 0$$

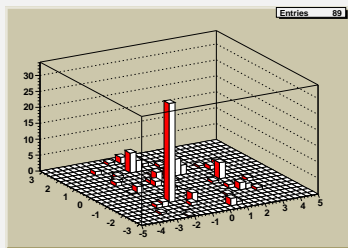
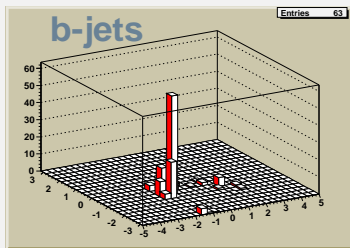
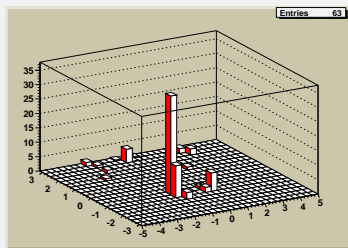
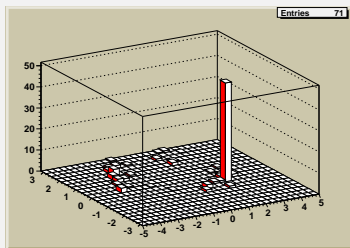


Массы W , реконструированные из струй

Множественности струй из b -струны



Примеры струй из b -струны. Многократные партонные взаимодействия



Фоновые процессы

Полное сечение для $pp \rightarrow \text{anything}$ на LHC равно 101.5 mb и оно распределено между следующими процессами:

| ISUB | Subprocess name | σ (mb) |
|-------|-----------------------------|---------------|
| 91 | Elastic scattering | 22.2 |
| 92+93 | Single diffractive (XB+AX) | 14.3 |
| 94 | Double diffractive | 10.3 |
| 95 | Low- p_{\perp} scattering | 54.7 |

low- p_{\perp} события - "то, что остается", когда удалены упругие и диффракционные события. Синонимы: **minimal bias** или **неупругие недиффракционные (nd) события**. low- p_{\perp} события генерируются с помощью базовых КХД subprocessов: $q_i q_j \rightarrow q_i q_j$, $q_i \bar{q}_i \rightarrow q_k \bar{q}_k$, $q_i \bar{q}_i \rightarrow gg$, $q_i g \rightarrow q_i g$, $gg \rightarrow q_k \bar{q}_k$ и $gg \rightarrow gg$ и упомянутого выше механизма многократных партон-партонных взаимодействий, с упорядоченной последовательностью поперечных импульсов $p_{\perp 1} > p_{\perp 2} > \dots > p_{\perp min}$

Фоновые процессы

КХД фон

Основными жесткими процессами, определяющими вклад в так называемый КХД фон на LHC, являются

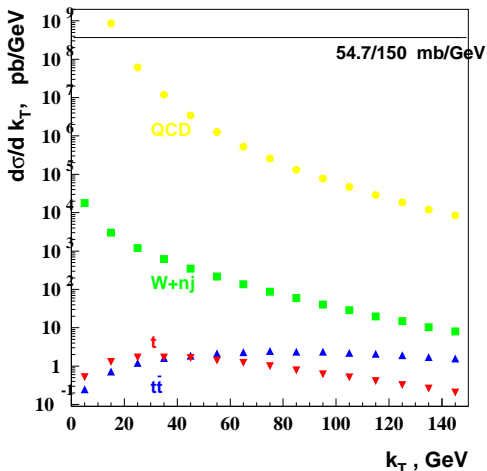
$$\begin{aligned} \text{ISUB} = & 11 & q_i q_j \rightarrow q_i q_j \\ & 28 & q_i g \rightarrow q_i g \\ & 68 & gg \rightarrow gg \end{aligned}$$

Рождение W -бозона без рождения t -кварков. $W + n_j$ фон

W -бозоны рождаются в PYTHIA в процессах ISUB=16,20, 23,25,26,31, 36,69,70, 72,73, 77 и 177, из которых только два процесса имеют сечения сравнимые с сечениями рождения t -кварков

| СКИН(3) | Жесткий процесс | ISUB | PARI(1) |
|-----------|-----------------------------------|------|-------------------------|
| 100 GeV/c | $q_i \bar{q}_j \rightarrow g W^+$ | 16 | $1.50 \cdot 10^{-7}$ mb |
| 100 GeV/c | $q_i q \rightarrow q_k W^+ h^0$ | 31 | $9.85 \cdot 10^{-7}$ mb |

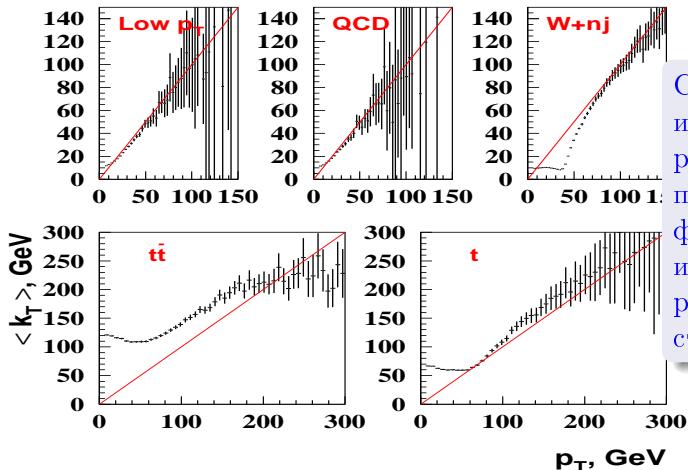
Сечения различных жестких процессов



Дифференциальные сечения различных жестких процессов как функции поперечного импульса k_{\perp} партонов в конечном состоянии. Только адронные каналы распадов W -бозонов в процессах $W + nj$ и рождения t -кварков. Сечения (PARI(1)) брались после генерирования 10^3 PYTHIA событий в 15-и бинах по k_{\perp} ([SKIN(3), SKIN(4)]).



$\langle k_{\perp} \rangle$ как функции p_{\perp}



Средние поперечные импульсы $\langle k_{\perp} \rangle$ различных жестких процессов как функции поперечных импульсов p_{\perp} реконструированных струй.

Инклюзивные сечения рождения струй

Инклюзивные дифференциальные сечения рождения одиночных струй как функции их поперечного импульса p_{\perp} :

$$\frac{d\sigma_{\text{jet}}}{dp_{\perp}} = \frac{\sigma_{\text{tot}}}{N_g} \cdot \frac{dn_{\text{jet}}}{dp_{\perp}},$$

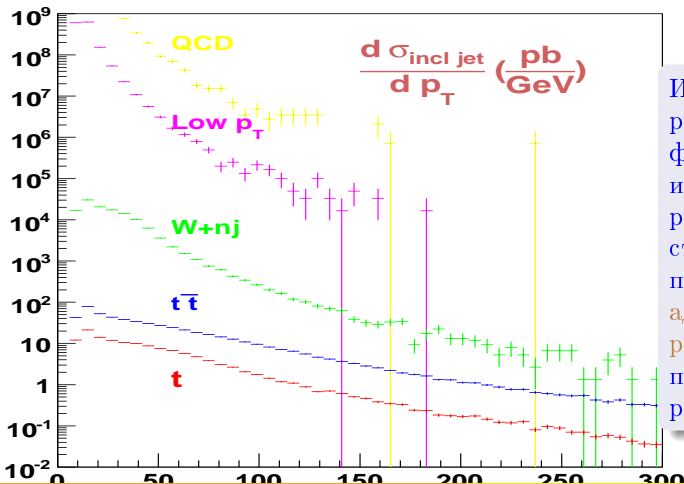
где σ_{tot} есть полное сечение процесса, $\frac{dn_{\text{jet}}}{dp_{\perp}}$ есть p_{\perp} -распределение струй, и N_g есть число <нагенерённых> событий. Интеграл по p_{\perp} даёт полное сечение рождения одиночных струй в данном процессе

$$\sigma_{\text{tot}}^{\text{jet}} = \frac{N_{\text{jet}}}{N_g} \sigma_{\text{tot}} = \langle n_{\text{jet}} \rangle \sigma_{\text{tot}},$$

где N_{jet} полное число реконструированных струй, $\langle n_{\text{jet}} \rangle$ есть средняя множественность струй в событиях.

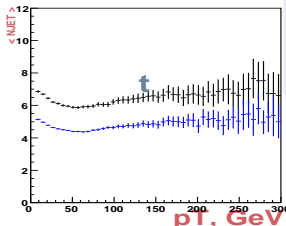
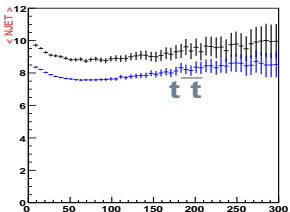
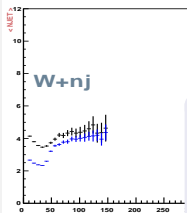
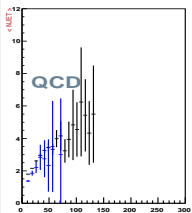
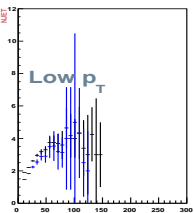
| Процесс | σ_t , pb |
|-----------------|------------------------|
| QCD | $4.7478 \cdot 10^{12}$ |
| low p_{\perp} | $5.47 \cdot 10^{10}$ |
| $W + nj$ | $2.3831 \cdot 10^5$ |
| $t\bar{t}$ | $2.2459 \cdot 10^2$ |

Инклюзивные сечения одиночных струй (ATLFAST)



Инклюзивные сечения рождения струй как функции поперечных импульсов p_{\perp} реконструированных струй для различных процессов. Только адронные каналы распадов W -бозонов в процессах $W + n_j$ и рождения t -кварков.

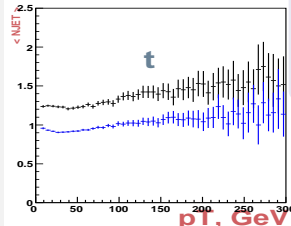
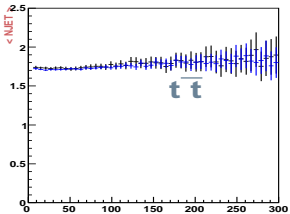
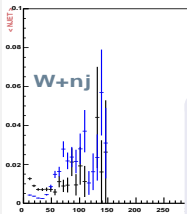
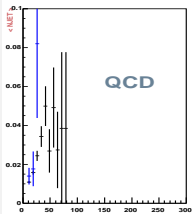
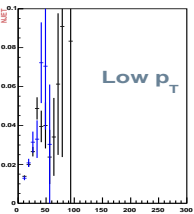
Средние множественности струй (ATLFAST)



Средние множественности струй как функции их поперечных импульсов для различных процессов с многократными партонными взаимодействиями (черные гистограммы) и без них (синие гистограммы).

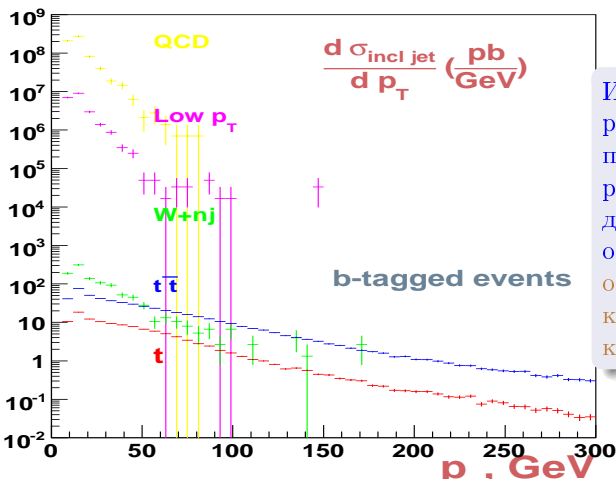


Средние множественности b -струй (ATLFAST)



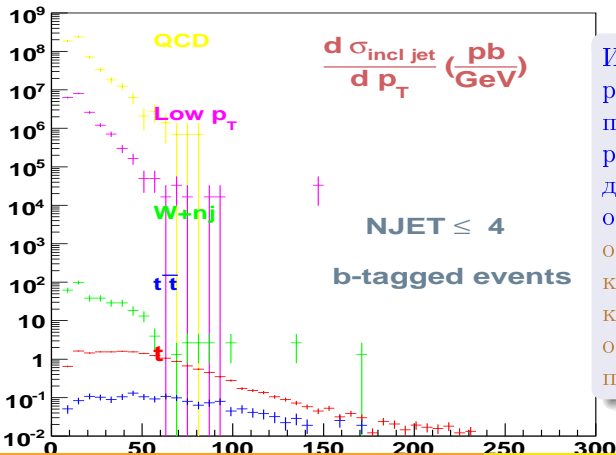
Средние множественности b -струй как функции их поперечных импульсов для различных процессов с многократными партонными взаимодействиями (черные гистограммы) и без них (синие гистограммы).

События с b -струями



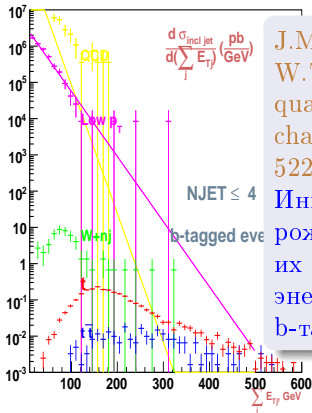
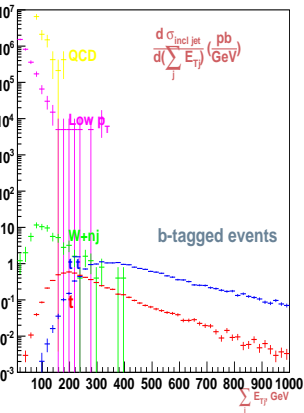
Инклюзивные сечения рождения струй как функции поперечных импульсов p_{\perp} реконструированных струй для различных процессов, но отличие от слайда 19 отобраны только события, в которых зарегистрирована по крайней мере одна b -струя.

События с b -струями и небольшими множественностями струй



Инклюзивные сечения рождения струй как функции поперечных импульсов p_{\perp} реконструированных струй для различных процессов, но отличие от слайда 19 отобраны только события, в которых зарегистрирована по крайней мере одна b -струя и общее количество струй не превышает 4.

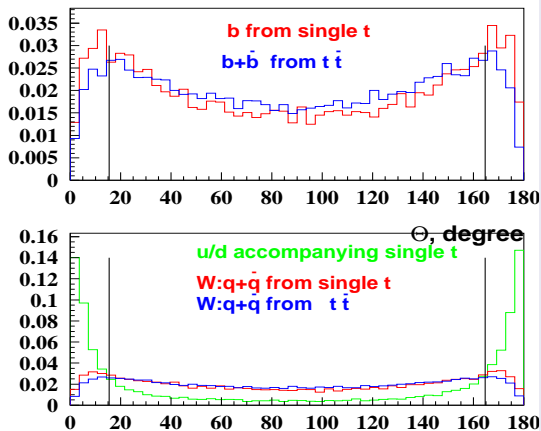
$\sum_j E_{Tj}$ (ATLFAST)



J.M.Benlloch, N.Wainer and W.T.Giele. "Search for the top quark in the hadronic decay channel", Phys. Rev. D**48**, 5226(1993)

Инклюзивные сечения рождения струй как функции их суммарной поперечной энергии $\sum_j E_{Tj}$ в b-таггированных событиях

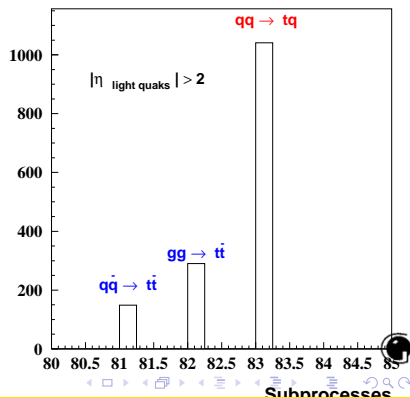
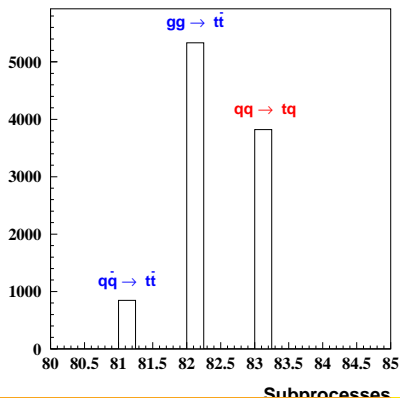
Кинематика партонов



Вверху: Θ -распределения b -кварков от распада одиночных t -кварков (красная гистограмма) и $b + \bar{b}$ -кварков от $t\bar{t}$ пар (синяя гистограмма).
 Внизу: Θ -распределения лёгких кварков - продуктов распадов W от одиночного t -кварка (красная гистограмма) и от $t\bar{t}$ пар (синяя гистограмма) сравниваются с Θ -распределениями лёгких кварков - партнёров одиночно рождённых t -кварков (зелёная гистограмма)

Кинематика партонов

Среди лёгких кварков с $|\eta| > 2$ доминирует вклад кварков - партнёров одиночно рождённых t -кварков



Возможная асимметрия струй вперед-назад

В **35 %** событий одиночный t -кварк и его партнёр - лёгкий кварк, рождаемые в жестком процессе, **имеют быстроты противоположного знака**

$$\eta = -\ln \tan \frac{\Theta}{2}, \quad \tan \Theta = \frac{q_{\perp}}{q_3},$$

т.е. **они летят в противоположные полусферы.**

Такие кинематические конфигурации приводят к **наблюдаемой асимметрии "вперёд-назад" множественности струй**, так как адронные распады одиночного t -кварка дают 3 струи, а его партнёр - одну.

Эта асимметрия тем больше, чем больше доля qt , летящих в противоположные полусферы. В частности, при условии

$$|\eta_t| < 1.5 \rightarrow 25^\circ < \Theta_t < 155^\circ$$

эта доля увеличивается до **45 %**.

Заключение

Наиболее эффективными требованиями для увеличения выхода одиночных t -кварков с адронным каналом распада являются

- наличие в событиях b -струй;
- отбор событий с небольшой множественностью струй (< 5)

Это почти решает проблему $t\bar{t}$ и $W + nj$ фонов. Уменьшают они и КХД фон, но остаются 2-3 порядка.

Учет кинематики:

- сферичность струй;
- Отбор по $\sum_j E_{Tj}$;
- Отбор по быстротам лёгких струй

может помочь, но, по-видимому, $S/B \approx 1/26$, полученное ранее для адронного варианта $t\bar{t}$ с (Lj. Simic, D.S. Popovic and G. Skoro. "Signal and background study for $t\bar{t}$ all hadronic decay at LHC". ATL-COM-PHYS-1999-057) не может быть улучшено, и t -кварк события с адронным каналом распада составляют небольшую часть событий даже после "оптимальных" обрезаний.

В этом случае есть смысл попробовать, как в экспериментах D0 и CDF, использовать технику мультивариативных дискриминантов: adaptive boosting algorithm and neural networks. В ближайших планах!