

ТОП КВАРК: СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

Э.Э. Боос

НИИЯФ, МГУ

С.Р. Слабоспицкий

ГНЦ ИФВЭ, Протвино

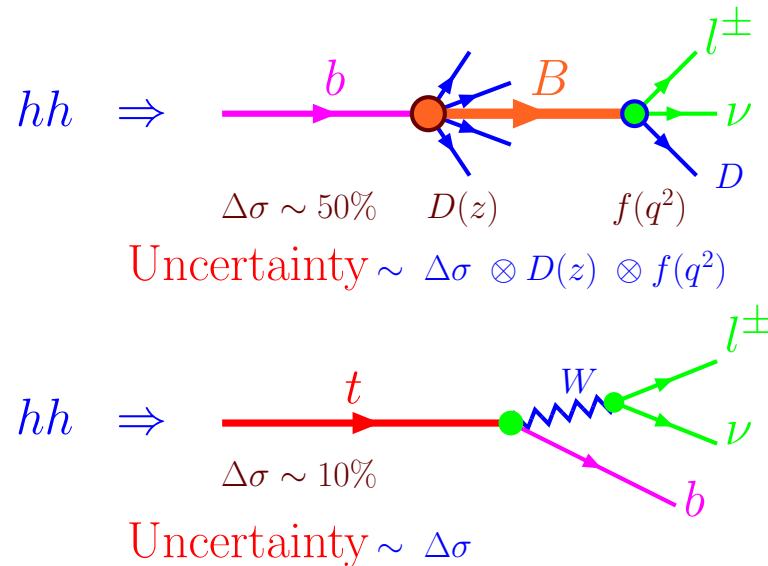
ПОЧЕМУ МЫ ЛЮБИМ ТОП КВАРК ?

- топ кварк принадлежит к 3-му поколению кварков и лептонов и описывается Стандартной Моделью (СМ) $U(1) \otimes SU(2)_L \otimes U(3)_c$
 $m_t = 172.4 \pm 1.2$ ГэВ свойства и механизмы рождения отличаются от (u, d, s, c, b)
- полные и дифференциальные сечения рождения вычисляются с точностью $\mathcal{O}(10\%)$
- в СМ t -кварк распадается по “одному” каналу, $B(t \rightarrow bW^+) = 1 - \mathcal{O}(10^{-3})$
- не следует ожидать существования “топ”-адронов (адронов с топ кварками), $T(t\bar{t}), M(t\bar{q}), \Lambda(tqq)$

$$\Gamma_{tot}(t) \approx 1.5 \text{ ГэВ} \Rightarrow \tau_{life}(t) \approx 0.6 \text{ ГэВ}^{-1} \ll \tau_h \sim \frac{1}{\Lambda_{\text{КХД}}} \approx 5 \text{ ГэВ}$$

t -кварк будет распадаться до стадии “адронизации”

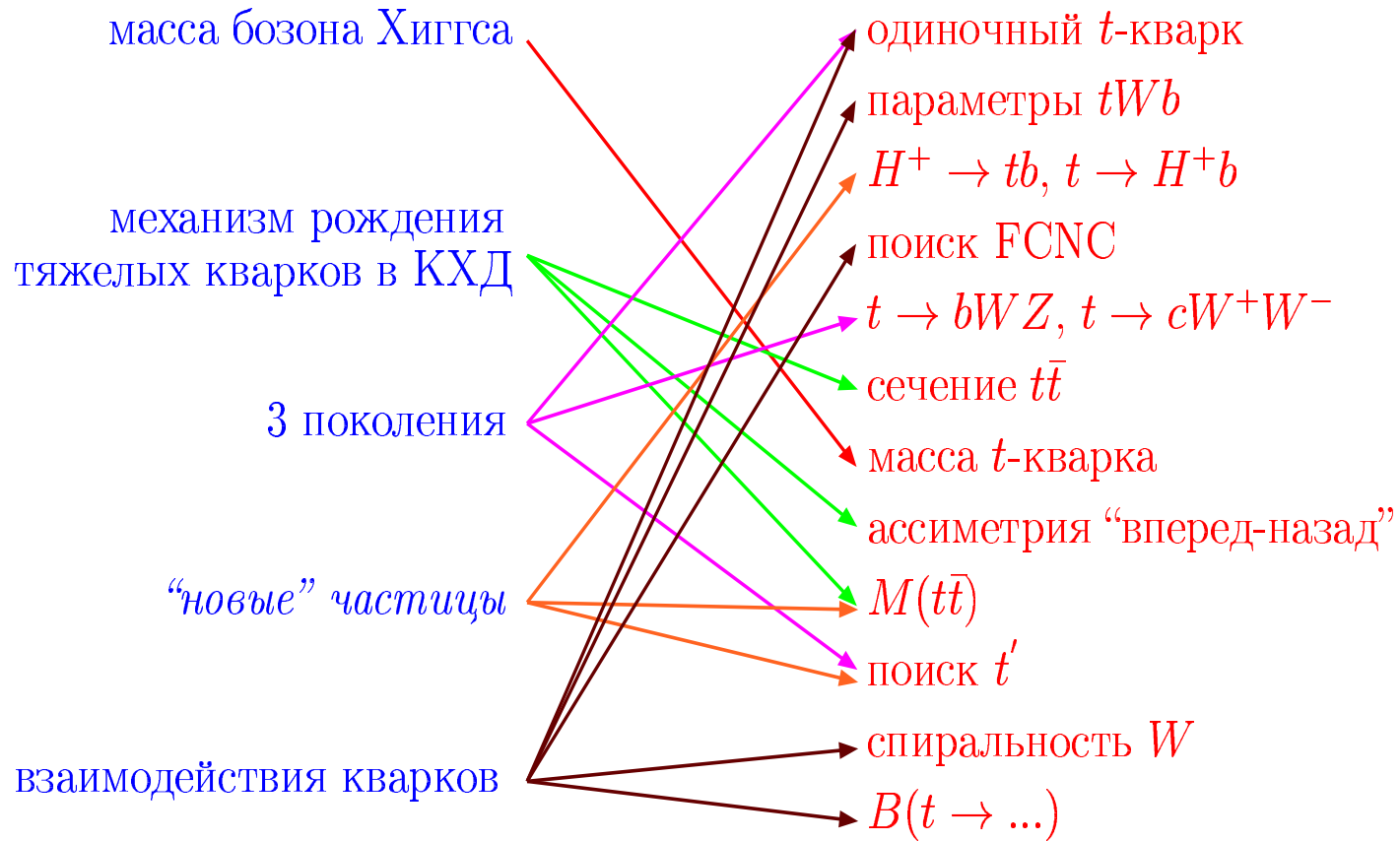
- процессы образования и распады t -кварков вычисляются в рамках СМ с высокой точностью без привлечения дополнительных феноменологических параметров



топ кварк является уникальным и мощным “инструментом” для исследования физики СМ и поиска проявлений новой физики вне рамок Стандартной Модели

ФИЗИКА ТОП КВАРКОВ НА КОЛЛАЙДЕРАХ

- полные сечения ($t\bar{t}$ пар и одиночное рождение)
 - дифференциальные распределения, $M(t\bar{t})$, p_T , ..., спиновые корреляции, спиральность W
 - m_t , $\Gamma_{tot}(t \rightarrow X)$, $|V_{tb}|$, e_t
 - образование и распады топ кварков за счет “новой” физики
 - вершины $gt\bar{t}$, $Wt\bar{b}$; редкие распады
- ◇ Новая Физика (вне рамок СМ) может проявить себя различными способами
- аномальное $gt\bar{t}$ взаимодействие
 - аномальное $Wt\bar{b}$ взаимодействие
 - нейтральные токи с нарушением аромата (FCNC)
 - новые бозоны (H^\pm , W' , W_R , Z' , η_T , ρ_T , ...)
 - дополнительные размерности, ...
- различные взаимодействия могут приводить к похожим наблюдаемым эффектам



Топ кварк в СМ

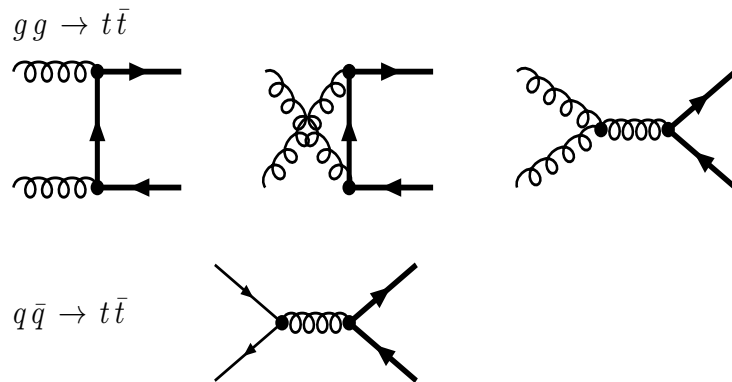
- топ кварк принадлежит к 3-му поколению кварков и лептонов и описывается Стандартной Моделью (СМ) $U(1) \otimes SU(2)_L \otimes U(3)_c$

фермион	Q_f	поколение		
		1.	2.	3.
кварки	$+\frac{2}{3}$	up (u) 1.5 - 3.3 МэВ	charm (c) $1.27^{+0.07}_{-0.11}$ ГэВ	top (t) 172.4 ± 1.2 ГэВ
	$-\frac{1}{3}$	down (d) 3.5 - 6.0 МэВ	strange (s) 104^{+26}_{-34} МэВ	bottom (b) $4.20^{+0.17}_{-0.07}$ ГэВ
лептоны	0	ν_e < 2 эВ (95% C.L.)	ν_μ < 0.19 МэВ (90% C.L.)	ν_τ < 18.2 МэВ (95% C.L.)
	-1	e 0.511 МэВ	μ 105.658 МэВ	τ 1777 МэВ

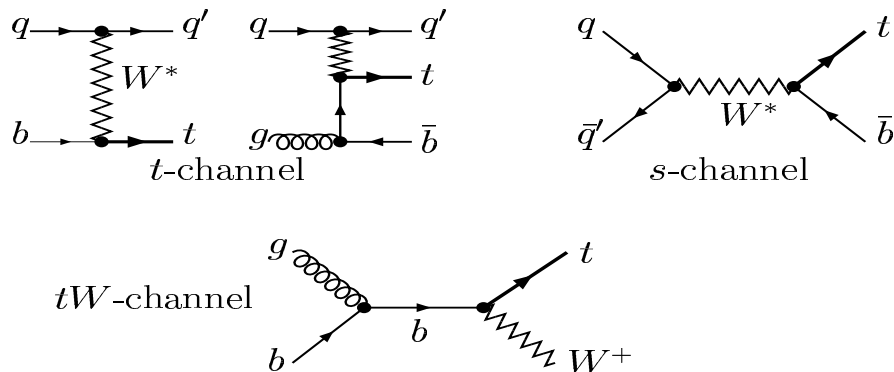
- существование топ-кварка обусловлено:
 - ◇ самосогласованностью (перенормированностью) СМ
 - ◇ отсутствие нейтральных токов с нарушением аромата
 - ◇ b -кварк имеет изоспин $T_3 = -\frac{1}{2}$ и $Q_f = -\frac{1}{3}$, изодублет

МЕХАНИЗМЫ РОЖДЕНИЯ

- $t\bar{t}$ рождение (КХД)

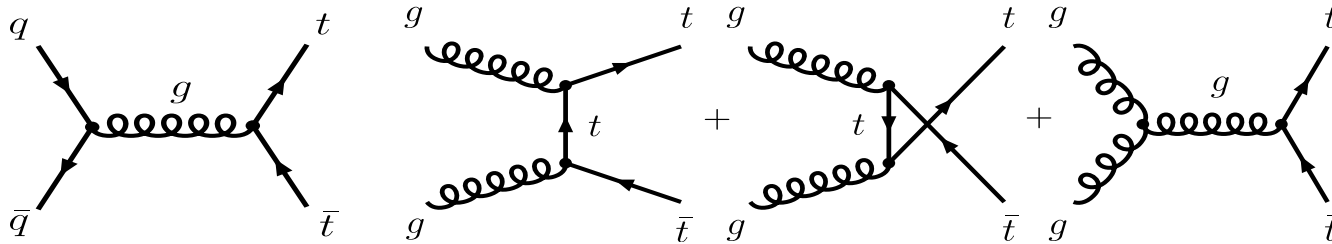


- электрослабое (одиночное) рождение топ кварка

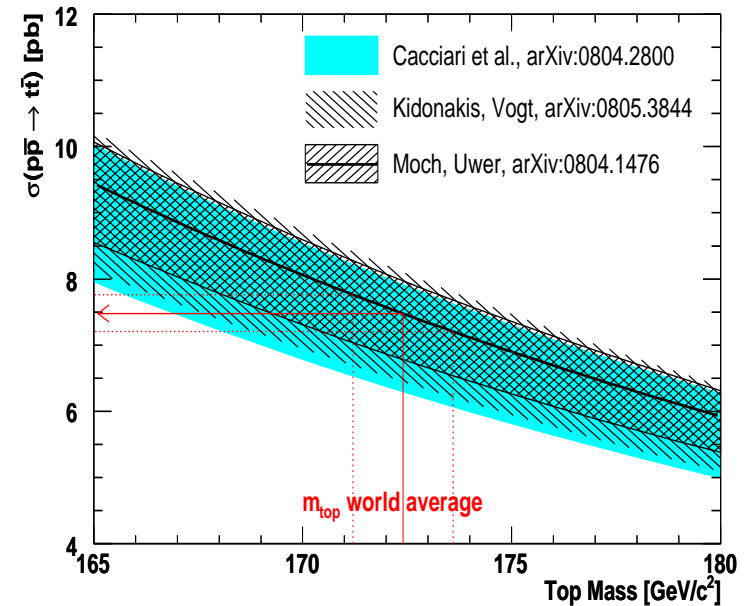


- $t\bar{t}b\bar{b}$
- $t\bar{t}H, t\bar{t}W^\pm, t\bar{t}Z$

Механизмы рождения: $t\bar{t}$ пара кварков



	процесс	$\sigma_{t\bar{t}}$ [пб]	
Run I	90% $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$	$5.19^{+0.52}_{-0.68}$	Cacciari
$p\bar{p}$, 1.8	10% $gg \rightarrow t\bar{t}$	5.24 ± 0.31	Kidonakis
Run II	85% $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$	$6.70^{+0.71}_{-0.88}$	Cacciari
$p\bar{p}$, 1.96	15% $gg \rightarrow t\bar{t}$	6.77 ± 0.42	Kidonakis
LHC	10% $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$	833^{+52}_{-39}	Bonciani
pp , 14	90% $gg \rightarrow t\bar{t}$	873^{+2}_{-28}	Kidonakis

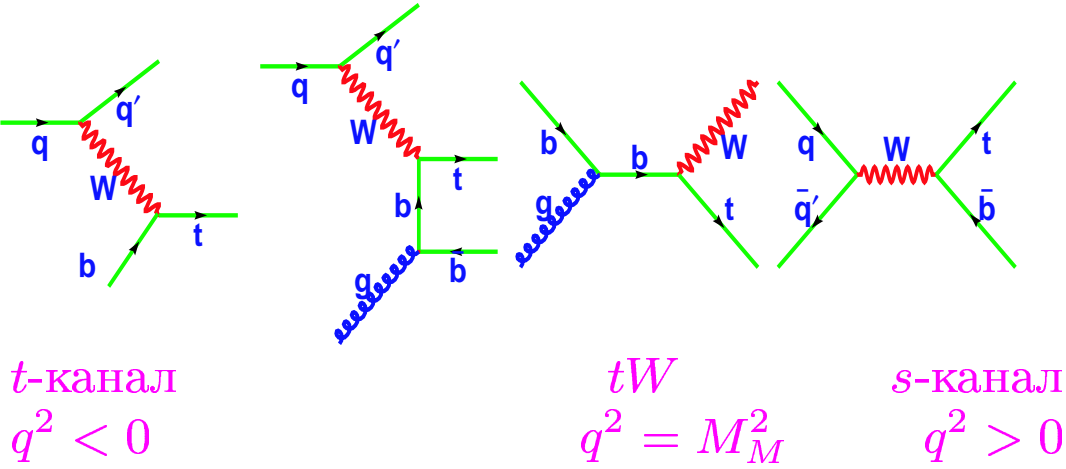


- LHC - фабрика топ кварков, при $\mathcal{L} = 100 \text{ пб}^{-1}$ следует ожидать 8×10^7 $t\bar{t}$ -пар и 2.5×10^7 одиночных топ кварков

Электрослабое рождение топ кварков

- Электрослабое (одиночное) рождение топ кварков позволяет:
 - ◇ прямое измерение элемента ККМ V_{tb} (проверка унитарности ККМ матрицы)
 - ◇ исследовать структуру $Wt\bar{b}$ вершины
 - ◇ спин топ -кварка
 - ◇ эффекты от “новой” физики (FCNC, H^\pm , W' , ...)

- три процесса одиночного рождения топа



t -канал
 $q^2 < 0$

tW
 $q^2 = M_M^2$

s -канал
 $q^2 > 0$

	t/\bar{t}	σ_S [пб]	σ_T [пб]	σ_{tW} [пб]	
Run I	t, \bar{t}	$0.75^{+0.10}_{-0.09}$	$1.46^{+0.20}_{-0.16}$	—	Sullivan
Run II	t, \bar{t}	$0.88^{+0.12}_{-0.11}$	$1.98^{+0.28}_{-0.22}$	—	Sullivan
1.96 ТэВ		0.98 ± 0.04	2.16 ± 0.12	0.26 ± 0.06	Kidonakis
	t	$6.56^{+0.69}_{-0.63}$	$155.9^{+7.5}_{-7.7}$	—	Sullivan
LHC	\bar{t}	$4.09^{+0.43}_{-0.39}$	$90.7^{+4.3}_{-4.5}$	—	
14 ТэВ	t	$7.2^{+0.6}_{-0.5}$	146 ± 5	41 ± 4	Kidonakis
	\bar{t}	4.0 ± 0.2	89 ± 4	41 ± 4	

- аномальное взаимодействие топ-кварков. Наиболее общий, низшей размерности, CP сохраняющий Лагранжиан:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \frac{g}{\sqrt{2}} W_{\mu}^{-} \bar{b} \gamma^{\mu} \left(f_1^L P_L + f_1^R P_R \right) t \\ &- \frac{g}{\sqrt{2} M_W} \partial_{\nu} W_{\mu}^{-} \bar{b} \sigma^{\mu\nu} \left(f_2^L P_L + f_2^R P_R \right) t + h.c., \end{aligned}$$

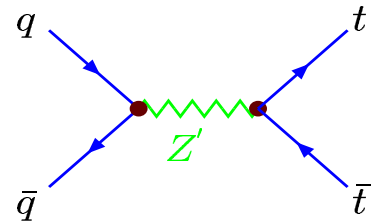
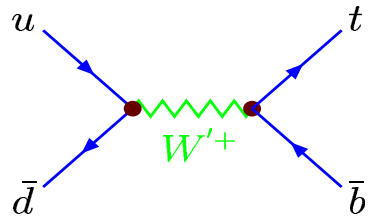
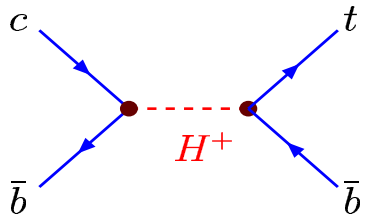
в СМ $f_1^L \approx 1$, $f_2^L = f_1^R = f_2^R = 0$

сечения рождения одиночного топ кварка при различных значениях формфакторов:

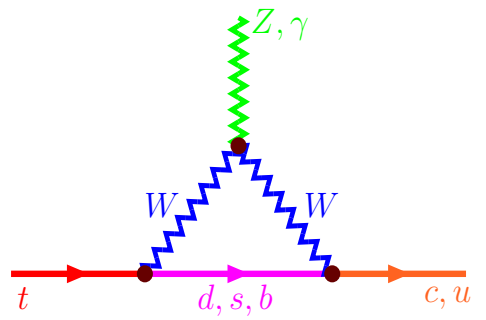
$$f_1^L = 1 : 2.9 \pm 0.3 \text{ пб}, \quad f_1^R = 1 : 2.7 \pm 0.3 \text{ пб}, \quad f_2^{L,R} = 1 : 10.4 \pm 1.4 \text{ пб}$$

Новая физика в рождении топ кварков

- **НОВЫЕ БОЗОНЫ:**

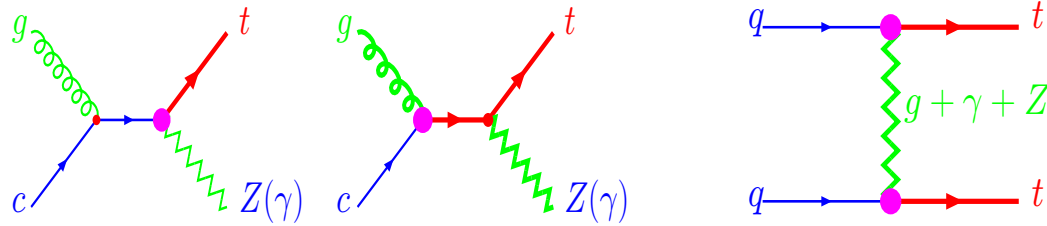
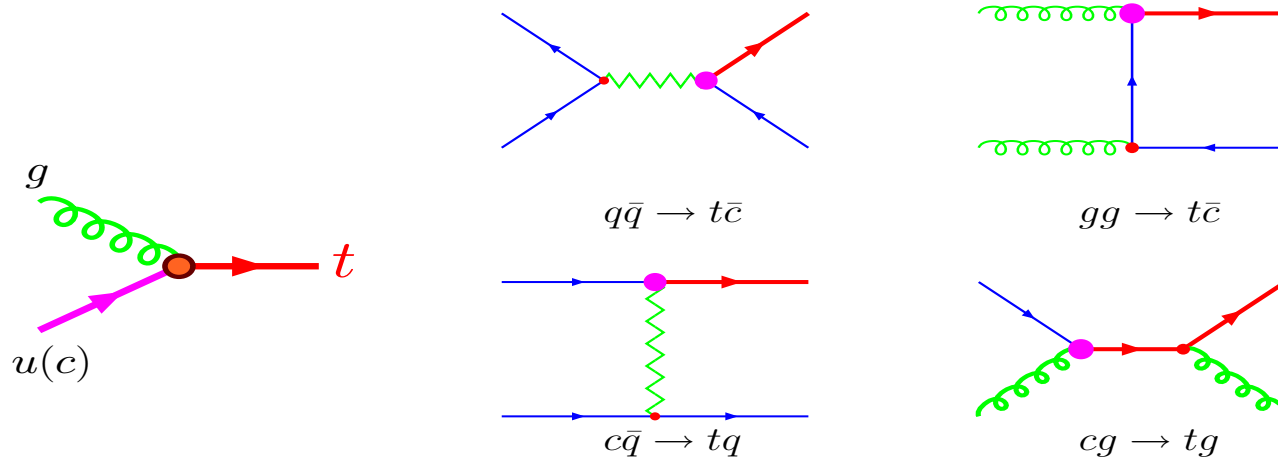
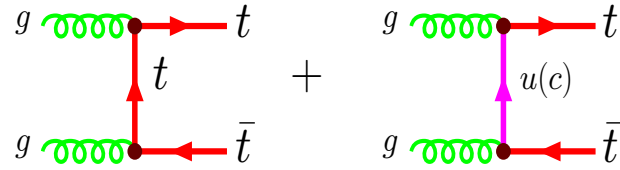


- **нейтральные токи с нарушением аромата (FCNC) $t \rightarrow qg, t \rightarrow q\gamma, t \rightarrow qZ$**



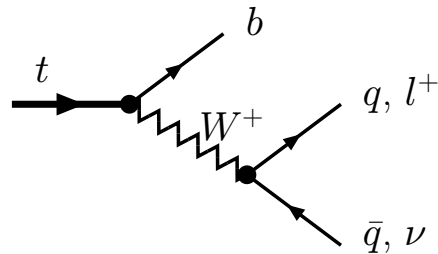
	SM	two-Higgs	SUSY
$B(t \rightarrow cg)$	$5 \cdot 10^{-11}$	10^{-6}	10^{-3}
$B(t \rightarrow c\gamma)$	$5 \cdot 10^{-13}$	10^{-6}	10^{-5}
$B(t \rightarrow cZ)$	$\sim 10^{-13}$	10^{-9}	10^{-4}

- FCNC процессы приводят к весьма экзотическим конечным состояниям:



РАСПАДЫ ТОП КВАРКА

в рамках СМ доминирующая мода распада: $t \rightarrow bW$



3 поколения $\Rightarrow |V_{tb}| = 0.99990 - 0.99992$, $|V_{ts}| = 0.037 - 0.043$, $|V_{td}| = 0.0048 - 0.014$

$$\Gamma_t = |V_{tb}|^2 \frac{G_F m_t^3}{8\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{m_W^2}{m_t^2}\right)^2 \left(1 + 2\frac{m_W^2}{m_t^2}\right) \left[1 - \frac{2\alpha_s}{3\pi} \left(\frac{2\pi^2}{3} - \frac{5}{2}\right)\right].$$

при $m_b^2/m_t^2 \rightarrow 0$, $m_t^2 \gg m_W^2$ и не учитывая поправки $\mathcal{O}\left(\frac{\alpha_s m_W^2}{\pi m_t^2}\right)$ и $\mathcal{O}(\alpha_s^2)$

$\Gamma_t = 1.02/1.26/1.54$ ГэВ при массе t -кварка 160/170/180 ГэВ

- в рамках СМ распад поляризованного топ кварка приводит к трем поляризациям W -бозона:

$$f_0 = \frac{\Gamma_t}{\Gamma_t} \approx \frac{1}{1 + 2x^2}, \quad f_- = \frac{\Gamma_-}{\Gamma_t} \approx \frac{2x^2}{1 + 2x^2}, \quad f_+ = \frac{\Gamma_+}{\Gamma_t} \approx y^2 \frac{2x^2}{(1 - x^2)(1 + 2x^2)},$$

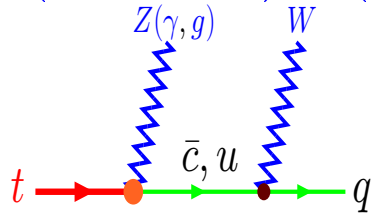
$$x = \frac{m_W}{m_t}, \quad y = \frac{m_b}{m_t}; \quad \text{при } m_t = 175 \text{ ГэВ}, \quad m_W = 80.419 \text{ ГэВ}, \quad m_b = 4.8 \text{ ГэВ}$$

$$f_0 = 0.703, \quad f_- = 0.297, \quad f_+ = 0.00036$$

- измерение вероятности распада

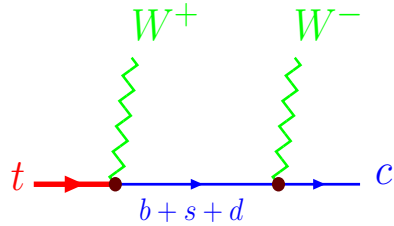
$$R = \frac{\mathcal{B}(t \rightarrow Wb)}{\mathcal{B}(t \rightarrow Wq)} = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{tb}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2}$$

- $t \rightarrow b W Z$, очень чувствителен к массе топ кварка, $m_t \approx m_b + m_W + m_Z$
 $B(t \rightarrow b W Z) = (3.4 - 10.) \times 10^{-7}$ for $m_t = (169 - 180)$ GeV



вклад от FCNC может значительно усилить
 $B(t \rightarrow q W Z) \sim 10^{-6} \approx B_{SM}$

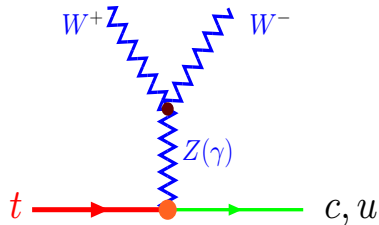
- $t \rightarrow c W^+ W^-$ подавлен ГИМ механизмом



$$\sum_{j=d,s,b} V_{tj} V_{cj}^* = 0 \text{ for } m_j = 0$$

$$B(t \rightarrow c W^+ W^-) \approx 10^{-13}$$

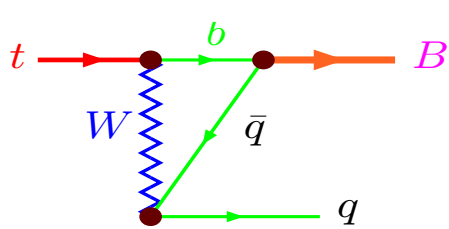
новый b' -кварк (4-е поколение) может значительно усилить этот канал, $m_{b'} = 100 - 300$ GeV, $B(t \rightarrow W^+ b') \sim 10^{-3} - 10^{-7}$



$$FCNC \Rightarrow B(t \rightarrow q W^+ W^-)_{FCNC} \sim 10^{-7} \gg B_{SM}$$

- $t \rightarrow c Z Z$ $B(t \rightarrow c Z Z)_{SM} \sim 10^{-13}$, $B(t \rightarrow q Z Z)_{FCNC} \sim 10^{-8} \gg B_{SM}$

- $t \rightarrow Bq$ “ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ” распад (реальный W -бозон), $B = B_d, B_s, \Upsilon, \chi_b$

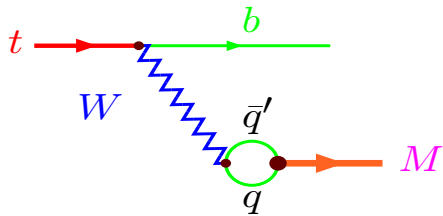


$$B(t \rightarrow \Upsilon q, \chi_b q) \sim 10^{-9}$$

$$B(t \rightarrow B^0 q) \sim 10^{-6}$$

$$B(t \rightarrow B_s q) \sim 10^{-6}$$

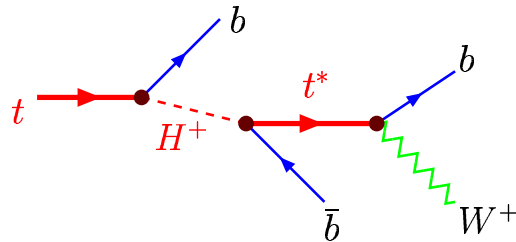
- $t \rightarrow bM$ “ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ” распад (виртуальный W -бозон), $M = \pi^+, K^+, D^+, \dots$



$$\Gamma(t \rightarrow bM) \approx \frac{G_F^2 m_t^3}{144\pi} f_M^2 |V_{qq'}|^2$$

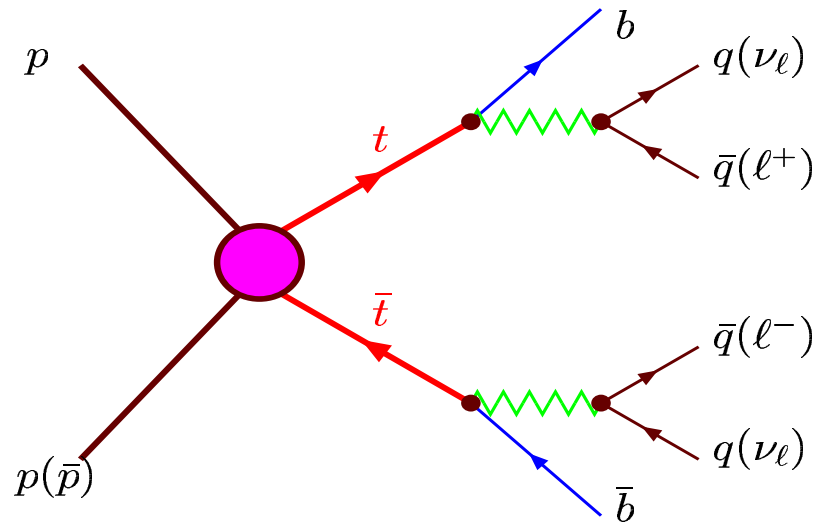
$$B(t \rightarrow b\pi) \sim 10^{-8}, B(t \rightarrow bD_s) \sim 10^{-7}$$

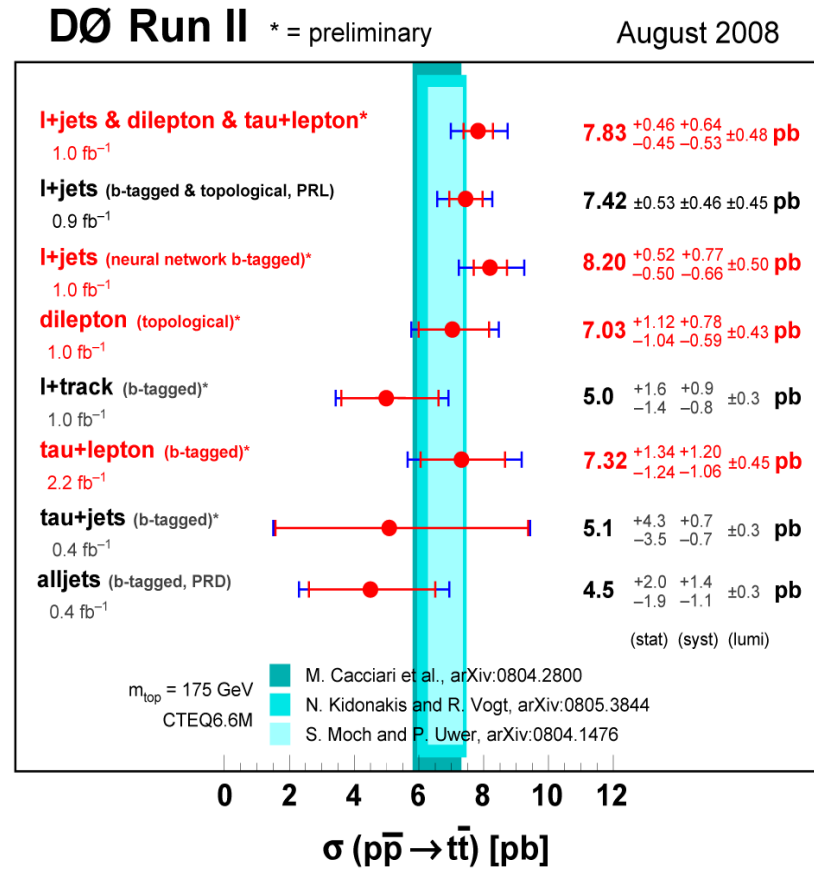
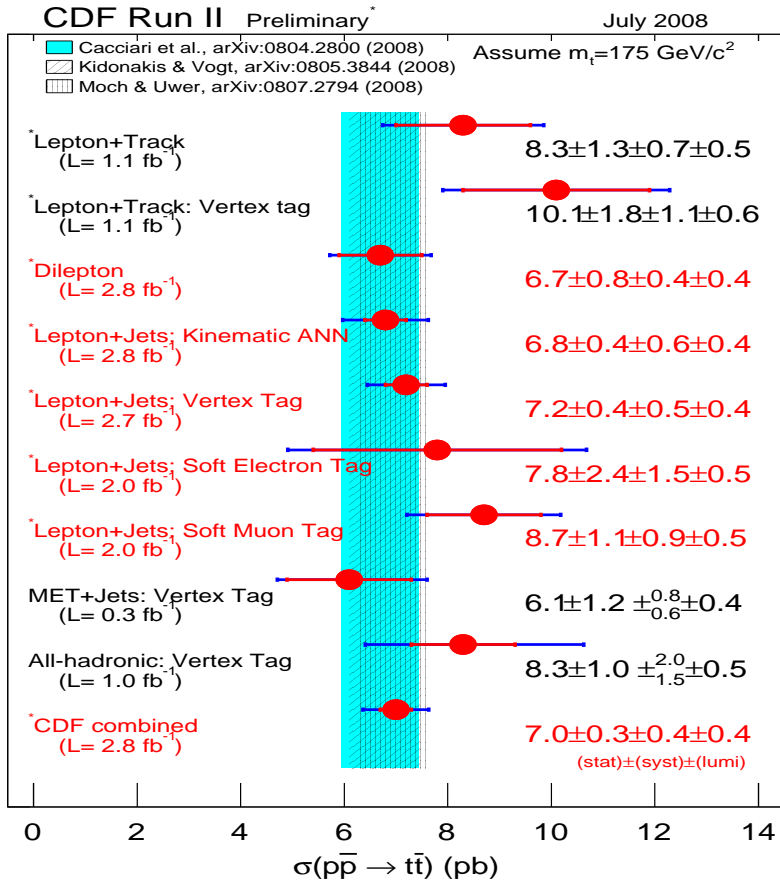
- $t \rightarrow bH^+$, при $m_H \approx m_t$ появляется интересная мода распада:
 $H^\pm \rightarrow \bar{b}t^*(\rightarrow Wb) \rightarrow Wb\bar{b}$, $\Rightarrow t \rightarrow Wb\bar{b}$



СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС: Тэватрон

- сечение рождения $t\bar{t}$ пары кварков Run-II, $\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ,
- процессы с рождением топ кварков ($t\bar{t}$ и одиночного) приводят к конечным состояниям:
 - ◇ две или более адронных струи
 - ◇ по крайней мере одна b -струя (b -мечение)
 - ◇ один или два изолированных заряженных лептона (электрон, мюон, τ)
 - ◇ “потерянная” поперечная энергия (нейтрино)





$$\sigma(\text{CDF}) = 7.0 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 0.4(\text{syst}) \pm 0.4(\text{lumi}) \text{ pb}$$

$$\sigma(\text{DØ}) = 7.8 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst}) \pm 0.5(\text{lumi}) \text{ pb}$$

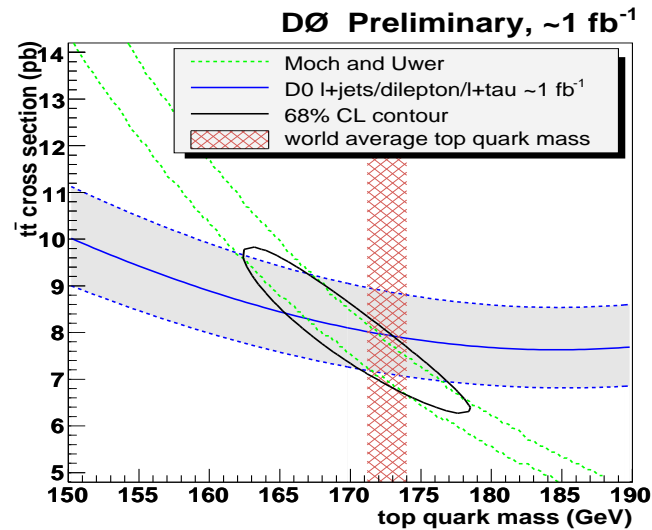
- измерение вклада глюон-глюонной аннигиляции:

$$F_{gg} = \frac{\sigma(gg \rightarrow t\bar{t})}{(\sigma(q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}) + \sigma(gg \rightarrow t\bar{t}))} = 15\%$$

CDF: NN(кинематика); $\Delta\varphi_{\ell\ell}$ в дилептонных событиях

$$F_{gg}^{NN} = 0.07_{-0.07}^{+0.15}, \quad F_{gg}^{\Delta\varphi} = 0.53_{-0.37-0.08}^{+0.35+0.07}$$

- величина $\sigma(t\bar{t})$ как функция m_t ($\sigma(t\bar{t}) \propto 1/m_t^2$)



- Прямое измерение массы топ кварка

- ◇ наиболее точное измерение в конечном состоянии: $\ell^\pm + \text{jets}$ ($M(\ell^\pm, E_T, \text{jets})$)

$$m_t(CDF) = 172.2 \pm 1.0 \pm 1.3 \text{ ГэВ}$$

$$m_t(D\emptyset) = 172.2 \pm 1.0 \pm 1.4 \text{ ГэВ}$$

- ◇ не использую информацию об энергии струй (ограничено статистикой): $p_T(\ell^\pm)$, вершина распада b в xy плоскости

$$m_t = 175.3 \pm 6.2 \pm 3.0 \text{ ГэВ}$$

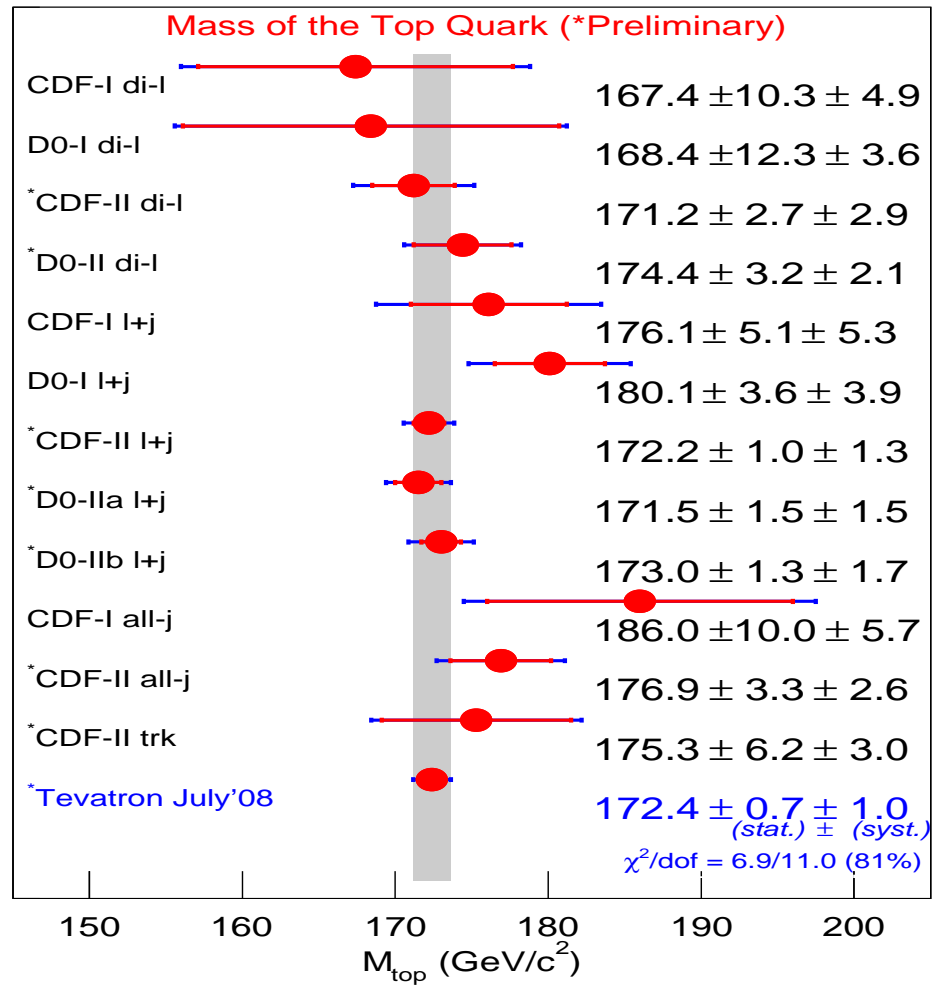
- ◇ дилептонные события $e^\pm \mu^\mp$ (требует хорошего описания матричных элементов):

$$m_t(CDF) = 171.2 \pm 2.7 \pm 2.9 \text{ ГэВ}$$

$$m_t(D\emptyset) = 174.4 \pm 3.2 \pm 2.1 \text{ ГэВ}$$

- ◇ 6 струйные события: наибольшая статистика, полностью реконструируемое конечное состояние. Но очень большой фон от многоструйных КХД событий

$$m_t(CDF) = 175.3 \pm 6.2 \pm 3.0 \text{ ГэВ}$$

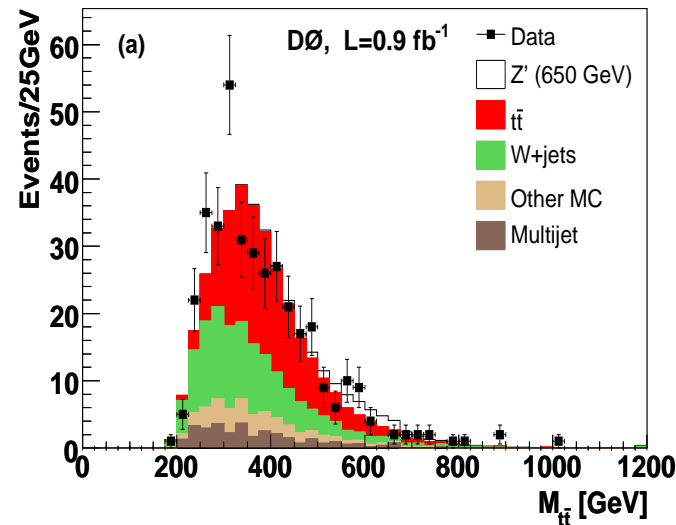
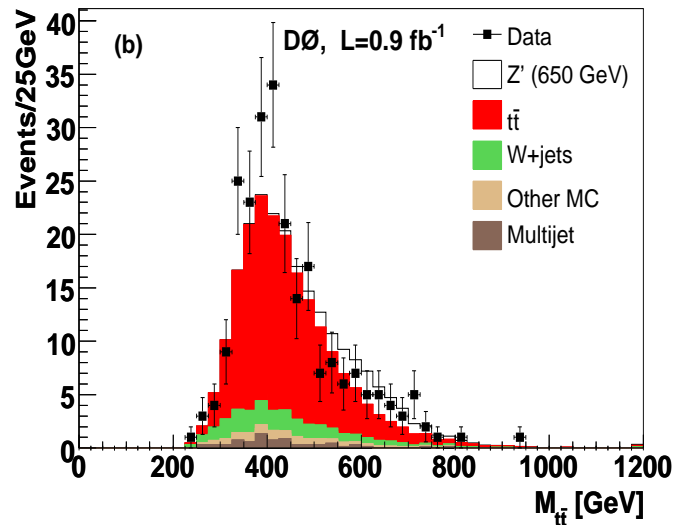


- зарядовая “вперед-назад” асимметрия в рождении t и \bar{t} кварков возникает за счет NLO поправок ($\sim 5 - 10\%$)

$$CDF \quad A_{FB} = 17 \pm 7 \pm 4 \%$$

$$D\emptyset \quad A_{FB} = 12 \pm 8 \pm 1 \%$$

- распределение по инвариантной массе $t\bar{t}$ пары ($M(t\bar{t})$) чувствительно к :
 - ◇ резонансам $X \rightarrow t\bar{t}$, например Z'
 - ◇ интерференция от физики вне рамок СМ

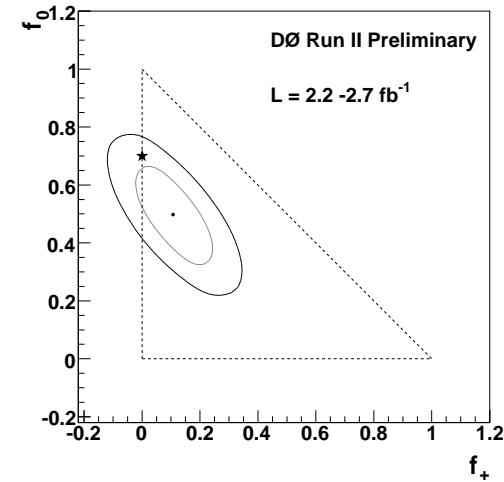
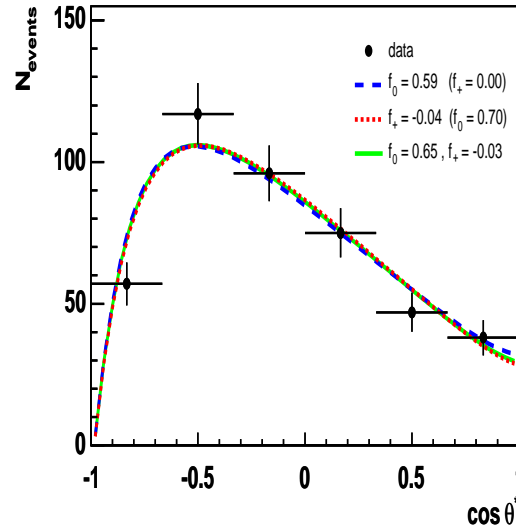
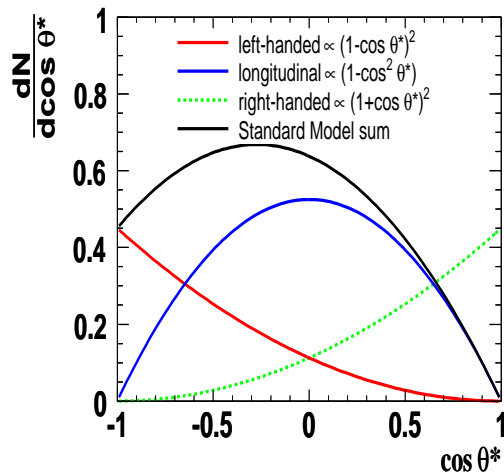


$$M(Z') > 760 \text{ ГэВ } 95\%C.L.$$

- поиск t' из четвертого поколения в моде $t' \rightarrow Wq$: $m(t') > 311$ ГэВ 95% C.L.
- измерение спиральности W в распаде топ кварка

$$\frac{dN}{d\cos\theta^*} = f_- \cdot \frac{3}{8}(1 - \cos\theta^*)^2 + f_0 \cdot \frac{3}{4}(1 - \cos^2\theta^*) + f_+ \cdot \frac{3}{8}(1 + \cos\theta^*)^2,$$

где $\cos\theta^*$ - угол вылета ℓ^\pm в системе покоя W бозона по отношению к направлению импульса топ кварка:



CDF $f_0 = 0.66 \pm 0.16, \quad f_+ = -0.03 \pm 0.07$
 DØ $f_0 = 0.49 \pm 0.10 \pm 0.08, \quad f_+ = 0.11 \pm 0.05 \pm 0.05$

- распады топ кварка

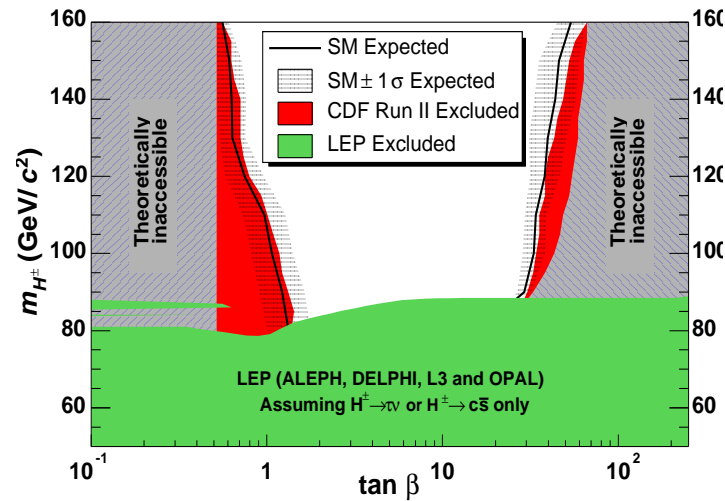
- ◇ отношение парциальных ширин распада

$$R_b = \frac{\Gamma(t \rightarrow Wb)}{\Gamma(t \rightarrow Wq)} = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2} \quad R_b = 0.97^{+0.07}_{-0.08}$$

- ◇ “невидимый” распад t -кварка, $B(t \rightarrow X)$

$CDF : B(t \rightarrow X) < 9\%$, $B(t \rightarrow Zc) < 13\%$, $B(t \rightarrow Zq) < 3.7\%$ (FCNC)

- поиск заряженного бозона Хиггса при $M_{H^+} < m_t$



- прямое измерение полной ширины топ кварка: $\Gamma_t < 13.1$ ГэВ при $m_t = 175$ ГэВ

Электрослабое рождение топ кварков

- сечение рождения одиночного топ кварка

$$CDF \quad \sigma(tX) = (2.0 - 2.7)_{-0.7}^{+0.9} \text{ пб}$$

$$\sigma(tb + tqb) = 4.8 \pm 1.3 \text{ пб}$$

$$D\emptyset \quad \sigma(tb) + 0.9 \text{ пб}$$

$$\sigma(tqb) = 3.8 \text{ пб}$$

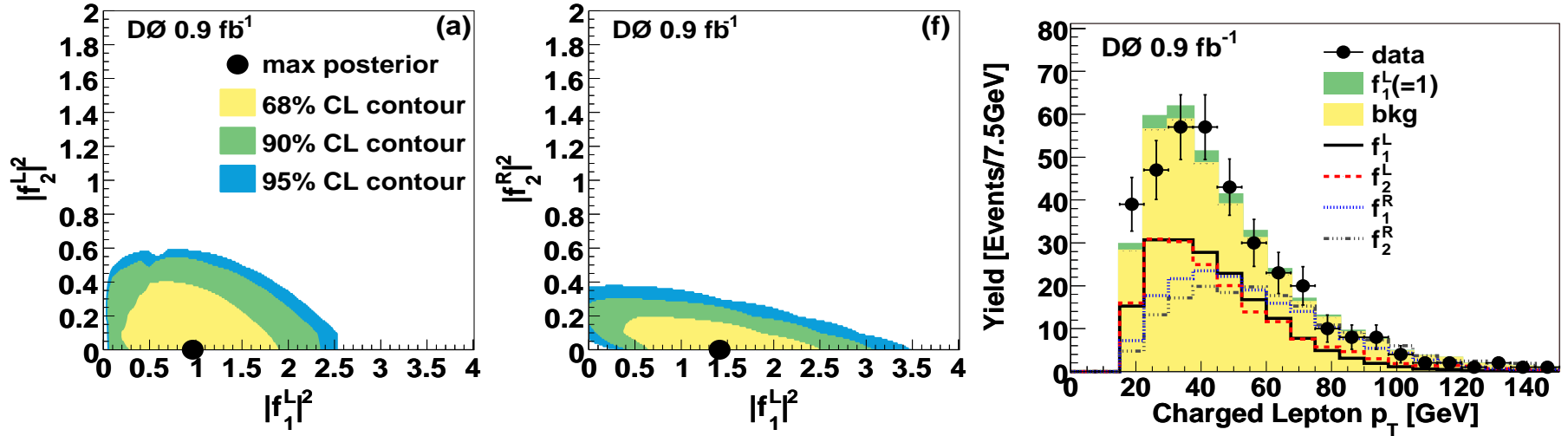
- прямое измерение $|V_{tb}|$ (без дополнительных предположений о 4-м поколении и унитарности ККМ). Чувствительно к m_t и структурным функциям кварков и глюонов

$$CDF \quad |V_{tb}| = 1.00_{-0.12}^{+0.00} \text{ (exp + theory)}$$

$$D\emptyset \quad |V_{tb}| = 0.88 \pm 0.14(\text{exp}) \pm 0.07(\text{theory})$$

- структура tWb -вершины (анализ основан на пакете **CompHEP**):

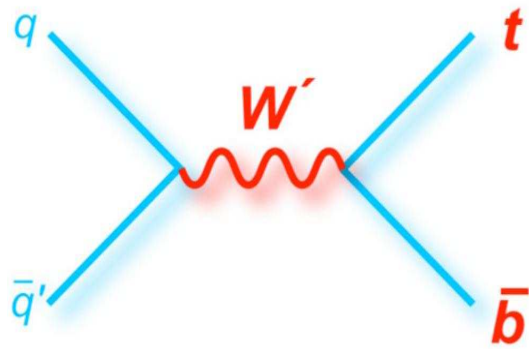
$$\mathcal{L} = \frac{g}{\sqrt{2}} \left[W_{\mu}^{-} \bar{b} \gamma^{\mu} \left(f_1^L P_L + f_1^R P_R \right) t - \frac{1}{m_W} \partial_{\nu} W_{\mu}^{-} \bar{b} \sigma^{\mu\nu} \left(f_2^L P_L + f_2^R P_R \right) t \right] + h.c.$$



сценарий	$\sigma(tb + tqb)$	константы
(L_1, R_1)	$5.2_{-3.5}^{+2.6}$ пб	$ f_1^L ^2 = 1.8_{-1.3}^{+1.0}$ $ f_1^R ^2 < 2.5$ (95% C.L.)
(L_1, R_2)	$4.5_{-2.2}^{+2.2}$ пб	$ f_1^L ^2 = 1.4_{-0.8}^{+0.9}$ $ f_2^R ^2 < 0.3$ (95% C.L.)
(L_1, L_2)	$4.4_{-2.5}^{+2.3}$ пб	$ f_1^L ^2 = 1.4_{-0.5}^{+0.6}$ $ f_2^L ^2 < 0.5$ (95% C.L.)

● **новый тяжелый W' бозон**

- ◇ распад W' приводит к такому же состоянию как и s -канал
- ◇ W'_L , $(V - A)$, необходимо учитывать $W - W'$ интерференцию
- ◇ при W'_R , $M(W'_R) > M(\nu_R)$ распады на $\ell\nu$ и $q\bar{q}$
- ◇ при W'_R , $M(W'_R) < M(\nu_R)$ распады только на $q\bar{q}$



$$M(W'_L) > 731 \text{ ГэВ (D}\emptyset\text{)}$$

$$> 800 \text{ ГэВ (CDF)}$$

$$M(W'_R) > M(\nu_R)$$

$$M(W'_R) > 739 \text{ ГэВ (D}\emptyset\text{)}$$

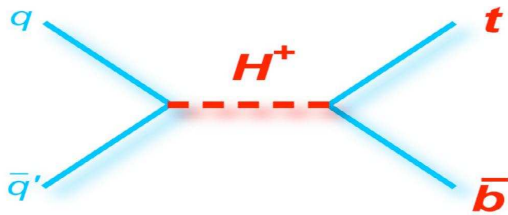
$$> 800 \text{ ГэВ (CDF)}$$

$$M(W'_R) < M(\nu_R)$$

$$M(W'_R) > 768 \text{ ГэВ (D}\emptyset\text{)}$$

$$> 825 \text{ ГэВ (CDF)}$$

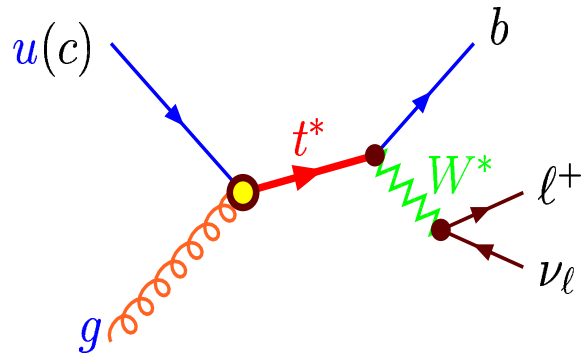
● **поиск заряженного бозона Хиггса при $M_{H^+} > m_t$**



- ◇ распределение по $M(t, \bar{b})$, исключена область параметров для 2HDM-I модели:
 $180 < M_{H^+} < 184 \text{ ГэВ}$ при $23 < \text{tg } \beta < 70$

- поиск FCNC в одиночном рождении топ кварков

$$u(c) + g \rightarrow t, \quad t \rightarrow bW$$



$$B(t \rightarrow u g) < 3.9 \times 10^{-4}$$

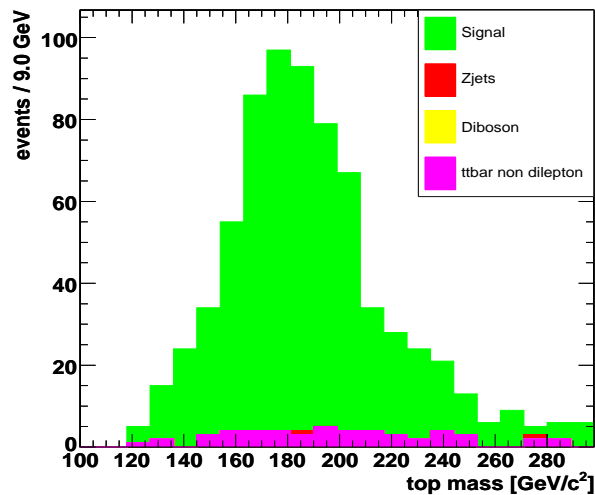
$$B(t \rightarrow c g) < 5.7 \times 10^{-3}$$

ПЕРСПЕКТИВЫ LHC

- при оценке возможностей LHC (детекторы ATLAS и CMS) проводится моделирование сигнальных и фоновых событий
- базовые Монте-Карло генераторы “жестких” событий: Alpgen, AcerMC, CompHep, Madgraph, Madevent, MC@NLO, MCFFM, SingleTop, TopReX
- основные МК генераторы : PYTHIA и HERWIG (ISAJET, Sherpa) - адронизация и распады короткоживущих частиц
- моделирование отклика детектора (“полное” моделирование) - GEANT 4 (“быстрые” МК генераторы - ATLFAST, FAMOS)
- типичные кинематические обрезания на реконструированные объекты:
 - ◇ $p_T(\ell) > 20(30)$ ГэВ и $|\eta(\ell)| < 2.0$
 - ◇ $E_T > 20$ ГэВ
 - ◇ $E_T(j) > 20$ ГэВ
 - ◇ b -струи, с эффективностью: $\varepsilon(b) \sim 50 - 60\%$, $\varepsilon(c) \sim 10\%$, $\varepsilon(q, g) \sim 1 - 2\%$,

Измерение массы топ кварка

- $t\bar{t}$: ди-лептонный канал: $t\bar{t} \rightarrow bW^+\bar{b}W^- \Rightarrow \ell^+ \ell^- B B \cancel{E}_T$
основной фон: $Z, W^+W^-, W^\pm Z, ZZ + \text{jets}$
 - ◇ обрезания: $P_T(\ell, B) > 20$ ГэВ, $\cancel{E}_T > 40$ ГэВ $\Rightarrow S/B \approx 12 : 1$

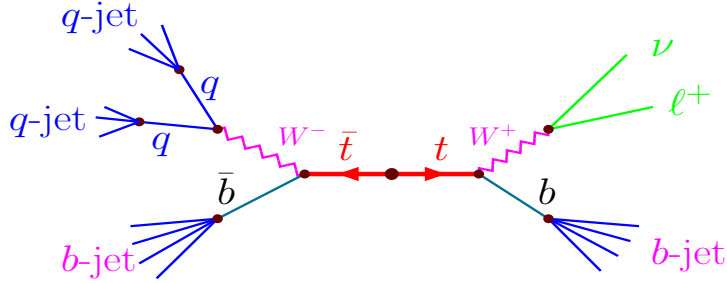


ожидаемая точность измерения при 1 пб^{-1} : $\Delta M_t = 1.5(stat) \pm 4.2(syst)$ ГэВ

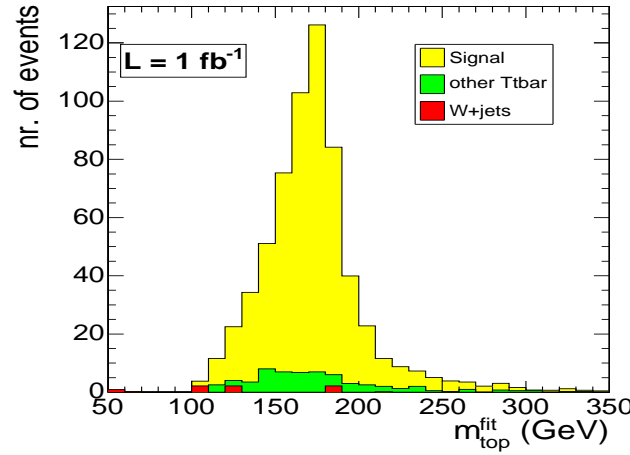
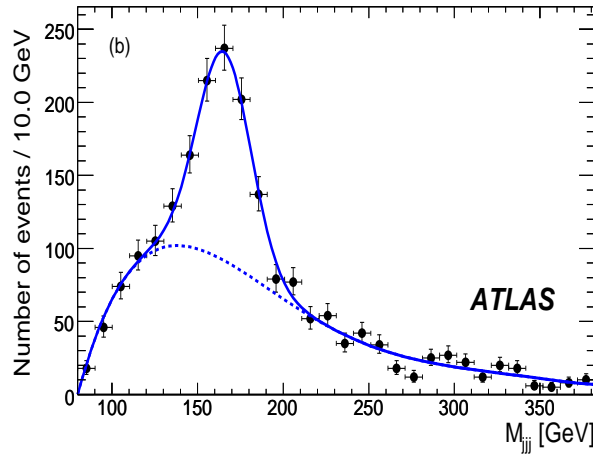
ожидаемая точность измерения при 10 пб^{-1} : $\Delta M_t = 0.5(stat) \pm 1.1(syst)$ ГэВ

при 10 пб^{-1} : $\Delta\sigma(t\bar{t})/\sigma(t\bar{t}) = 11\%(stat) \pm 0.9\%(syst) \pm 3\%(lumi)$

- полу-лептонный канал (the “золотой” канал !)



$t\bar{t} \rightarrow bW^+\bar{b}W^- \rightarrow \ell^\pm \nu b\bar{b}q\bar{q}' \Rightarrow \ell^\pm \cancel{E}_T BBjj$
 основной фон: W +jets



$$\epsilon(t\bar{t}) = 6.3\%$$

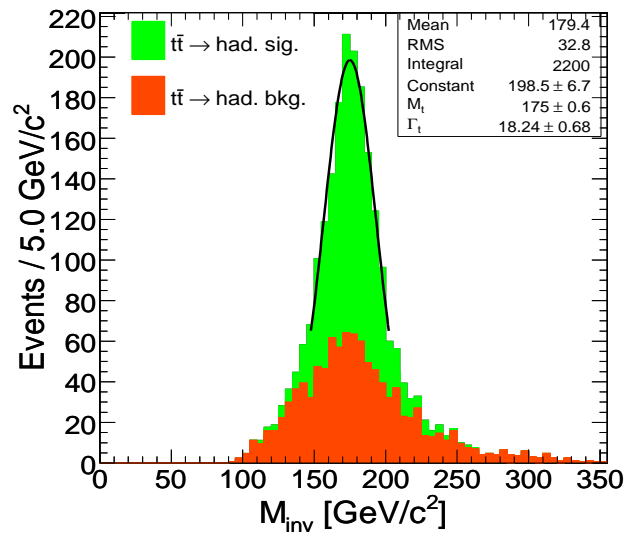
$$\epsilon(bckg) = 0.06 - 0.7\%$$

$$S/B = 26.7$$

- ◇ неопределенность в измерении сечения 13.7%, 10.5%, 9.7% при 1, 5, 10 пб⁻¹
- ◇ ожидаемая общая ошибка при $\mathcal{L} = 10$ пб⁻¹: $\Delta m_t = 1.2$ ГэВ $\Rightarrow \delta m_t \leq 0.68\%$

- заряд топ-кварка (ATLAS): $Q_t = Q_W + \tilde{Q}_b$, $Q_t = 0.67 \pm 0.06 \pm 0.08$

- адронный канал: $t\bar{t} \rightarrow BBjjjj$
 - ◇ критерии отбора: $N_j = 6 - 8$, $p_T > 30$ ГэВ, $|\eta| < 2.4$,
 - ◇ две струи $p_T = 100 - 300$ ГэВ,
 - ◇ топологическое обрезание: “центральность” ≥ 0.6 , аппланарность ≥ 0.024
 - ◇ $\Sigma_3 E_T = \Sigma_j - E_{T1} - E_{T2} \geq 148$ ГэВ
 - ◇ две B -меченные струи



$$S/B = 1/9$$

$$S/\sqrt{S+B} = 24$$

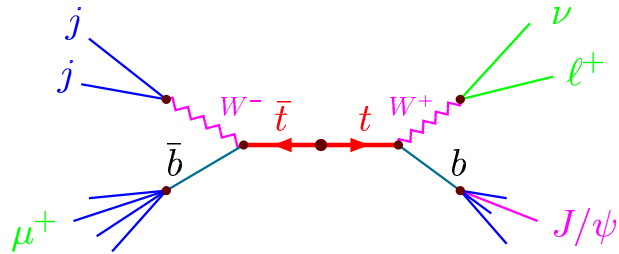
$$\text{эффективность отбора: } \varepsilon = 2.7\%$$

при $\mathcal{L} = 1 \text{ пб}^{-1}$

$$\Delta\sigma/\sigma = 3\%(stat) \pm 20\%(syst) \pm 5\%(lumi)$$

$$\Delta M_t = 0.6(stat) \pm 4.2(syst) \text{ ГэВ при } M_t = 175 \text{ GeV}$$

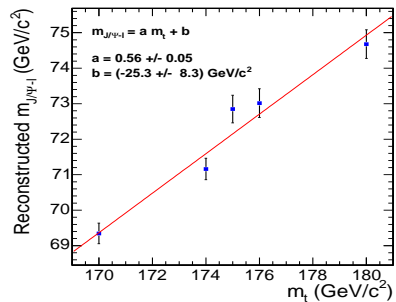
- измерение m_t в распаде $t \rightarrow \ell J/\psi X$



$$t \rightarrow bW^+, W \rightarrow \ell\nu, b \rightarrow J/\psi X$$

$$\Rightarrow t \rightarrow \ell J/\psi X$$

- ◇ величина инвариантной массы системы $(\mu J/\psi)$ скоррелирована с m_t
- ◇ не зависит от неопределенности в реконструкции энергии струй
- ◇ только $\mathcal{O}(10^3)$ событий/год ожидается при высокой светимости (100 пб^{-1})
- ◇ $J/\psi \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ при $2.8 < m(\ell\ell) < 3.2 \text{ ГэВ}$
- ◇ $W \rightarrow \ell\nu$: изолированный лептон с $p_T > 40 \text{ ГэВ}$
- ◇ дополнительных критерий: $\Sigma_{jets} p_T > 100 \text{ ГэВ}$



$$M_{\ell J/\psi}^{max} = (0.56 \pm 0.05)M_t - (25.3 \pm 8.3) \text{ (ГэВ)}$$

- при $20(50) \text{ фб}^{-1}$ $\Delta M_t = 1.2(0.6) \text{ (stat)} \text{ ГэВ}, 1.37 \text{ (theor)} \text{ ГэВ}, 0.54 \text{ (exp.)} \text{ ГэВ}$

Перспективы измерения M_t

- при полном моделировании событий возможно ожидать:

$$\mathcal{L} = 1 \text{ фб}^{-1}$$

$$\Delta M_t(\text{ди-лептонный}) = \pm 1.5(\text{stat}) \pm 2.9(\text{syst}) \text{ ГэВ}$$

$$\Delta M_t(\text{полу-лептонный}) = \pm 0.7(\text{stat}) \pm 1.9(\text{syst}) \text{ ГэВ}$$

$$\Delta M_t(\text{адронный}) = \pm 0.6(\text{stat}) \pm 4.2(\text{syst}) \text{ ГэВ}$$

$$\mathcal{L} = 10 \text{ фб}^{-1}$$

$$\Delta M_t(\text{ди-лептонный}) = \pm 0.5(\text{stat}) \pm 1.1(\text{syst}) \text{ ГэВ}$$

$$\Delta M_t(\text{полу-лептонный}) = \pm 0.2(\text{stat}) \pm 1.1(\text{syst}) \text{ ГэВ}$$

$$\mathcal{L} = 20 \text{ фб}^{-1}$$

$$\Delta M_t(J/\Psi) = \pm 1.2(\text{stat}) \pm 1.5(\text{syst}) \text{ ГэВ}$$

- $\Delta M_t = \mathcal{O}(1 \text{ ГэВ})$ при $\mathcal{L} = 10 - 20 \text{ фб}^{-1}$

Измерение спиновых корреляций рождении $t\bar{t}$

спиновые корреляции можно описать асимметрией

$$\mathcal{A} = \frac{N(t_L\bar{t}_L + t_R\bar{t}_R) - N(t_L\bar{t}_R + t_R\bar{t}_L)}{N(t_L\bar{t}_L + t_R\bar{t}_R) + N(t_L\bar{t}_R + t_R\bar{t}_L)}$$

$$\mathcal{A}(gg) = +0.431 \pm 0.002, \quad \mathcal{A}(q\bar{q}) = -0.469 \pm 0.003,$$

$$\mathcal{A}[t\bar{t} = gg(87\%) + q\bar{q}(13\%)] = 0.311 \pm 0.003$$

- ◇ полу-лептонный канал: $t\bar{t} \rightarrow bW^+\bar{b}W^- \rightarrow \ell^\pm \nu b\bar{b}q\bar{q}$
- спиновые корреляции возможно измерять при одновременном отборе двух заряженных лептонов (θ^* – угол вылета фермиона в системе покоя t)

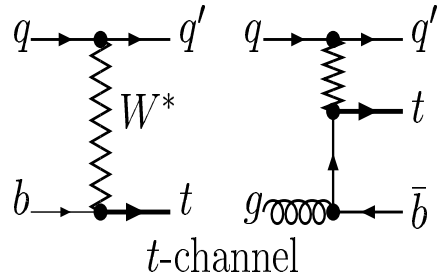
$$\frac{1}{N} \frac{d^2 N}{d \cos \theta_+^* d \cos \theta_-^*} = \frac{1}{4} (1 - \mathcal{A} \cos \theta_+^* \cos \theta_-^*)$$

- ◇ два конечных состояния: $\ell^\pm + B$ и $\ell^\pm + \text{jet}$ (от W)

$$\mathcal{A}_{\ell B} = 0.375 \pm 0.011(\text{stat}) \begin{matrix} +0.055 \\ -0.096 \end{matrix}(\text{syst}), \quad \mathcal{A}_{\ell j} = 0.346 \pm 0.021(\text{stat}) \begin{matrix} +0.026 \\ -0.055 \end{matrix}(\text{syst})$$

Одиночное рождение топ кварков

- “двойной” счет: t -канал: $2 \rightarrow 2 + 2 \rightarrow 3$

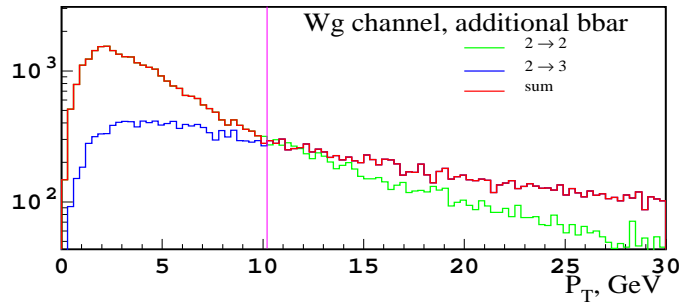


SingleTop: E.Boos, L.Dudko, V.Savrin, CMS Note 2000/065

TopReX: S.Slabospitsky and L.Sonnenschein

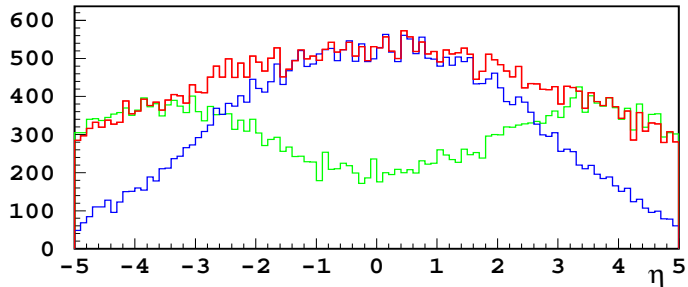
$2 \rightarrow 2$ $qb \rightarrow q't + \bar{b}$ PYTHIA

$2 \rightarrow 3$ $qg \rightarrow q't + \bar{b}$ жесткий процесс

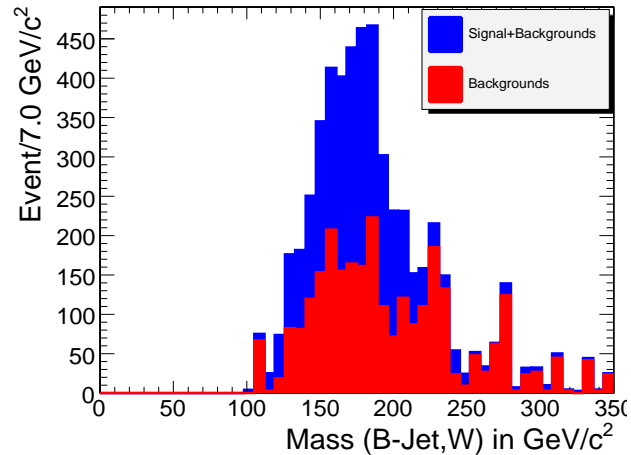
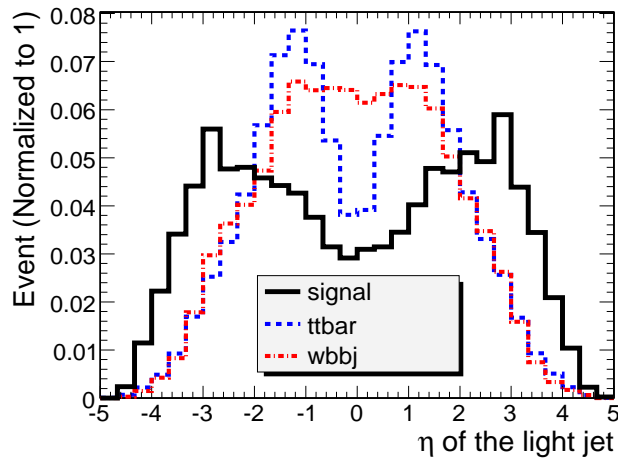


$$\sigma(pp \rightarrow tX) = \sigma^{(2 \rightarrow 2)}(pp \rightarrow tq; p_{\perp}(\bar{b}_{\text{PYTHIA}}) < p_0) + \sigma^{(2 \rightarrow 3)}(pp \rightarrow tq\bar{b}_{\text{hard}}; p_{\perp}(\bar{b}) \geq p_0)$$

при $p_0 \simeq 10$ ГэВ



- t -канал: характерная черта - образование “легкой” адронной струи в передней/задней области: $|\eta|2 - 4$
- основной фон ожидается от: $t\bar{t}$, рождение $W + \text{jets}$, $Wb\bar{b}$, $WZ + \text{jets}$



- измерение быстрой передней струи эффективно подавляет фон
- при 10 pb^{-1} : $S/B = 1.26$, $S/\sqrt{S+B} = 36$ (stat only), $S/\sqrt{S+B + \sum_i \Delta_i^2} = 8.8$

$$\text{ATLAS} \quad \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = 1.8\% \pm 8.5\%(\text{sys}) \pm 5.2(\text{lumi}) = 10\%$$

$$\text{CMS} \quad \frac{\Delta\sigma}{\sigma} = 2.7\% \pm 8.0\%(\text{sys}) \pm 8.7(\text{lumi}) = 12\%$$

- tW - канал $gb \rightarrow tW$, ди-лептонный (оба $W \rightarrow \ell\nu$) и полу-лептонный (10 фб^{-1}):

$$\text{ATLAS}(1\ell) \quad \Delta\sigma/\sigma = 6.6\% \pm 17.7\%(sys) \pm 7.9(lumi) = 20\%$$

$$\text{CMS}(1\ell) \quad \Delta\sigma/\sigma = 7.5\% \pm 15.6\%(sys) \pm 7.8(lumi) = 19\%$$

$$\text{CMS}(2\ell) \quad \Delta\sigma/\sigma = 8.8\% \pm 22.8\%(sys) \pm 5.4(lumi) = 24\%$$

- s -канал: $q\bar{q}' \rightarrow W^* \rightarrow t\bar{b}$, $W \rightarrow \ell\nu$ при 10 пб^{-1} :

$$\text{ATLAS} \quad \Delta\sigma/\sigma = 20\% \pm 45\%(sys) \pm 18(lumi) = 52\%$$

$$\text{CMS} \quad \Delta\sigma/\sigma = 18\% \pm 31\%(sys) \pm 19(lumi) = 41\%$$

- Поиск FCNC в распадах топ кварка:

$$\diamond t \rightarrow gq, t \rightarrow \gamma q \text{ и } t \rightarrow Zq$$

ожидаемые результаты при 10 фб^{-1} :

$$B(t \rightarrow gq) < 10^{-2}, \quad B(t \rightarrow \gamma q) < 8.4 \times 10^{-4}, \quad B(t \rightarrow Zq) < 14.9 \times 10^{-4}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- физика топ кварков – одно из приоритетных направлений исследований в Физике Высоких Энергий
- точные измерения свойств и механизмов рождения (сечение образования, масса, ширина, вероятность распадов, спин, ... - прекрасный тест СМ
- топ кварк является фоном для многих редких процессов
- топ кварк - прекрасная лаборатория для исследования Новой Физики вне рамок СМ
- ЛНС - фабрика топ кварков