

Топ кварк – самая тяжелая из обнаруженных элементарных частиц

Э.Э. Боос
НИИЯФ МГУ

20 лет со времени открытия топ-кварка в 1995 г.

Содержание

- Топ кварк в СМ
- Основные процессы рождения и распада
- Сечения
- Масса, V_{tb} , ширина
- Роль топ-кварка в СМ. Топ-кварк и бозон Хиггса
- "New Physics" в процессах с участием топ-кварка
- Заключительные замечания

Топ-кварк в Стандартной Модели

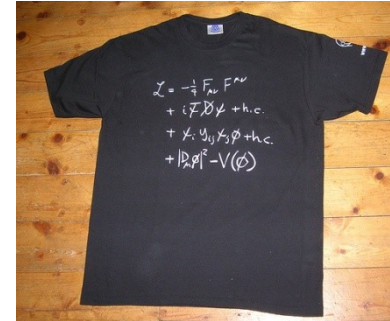
Фермион со спином 1/2

Электрический заряд +2/3

Партнер b-кварка по слабому изоспину

Триплет по цвету

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$



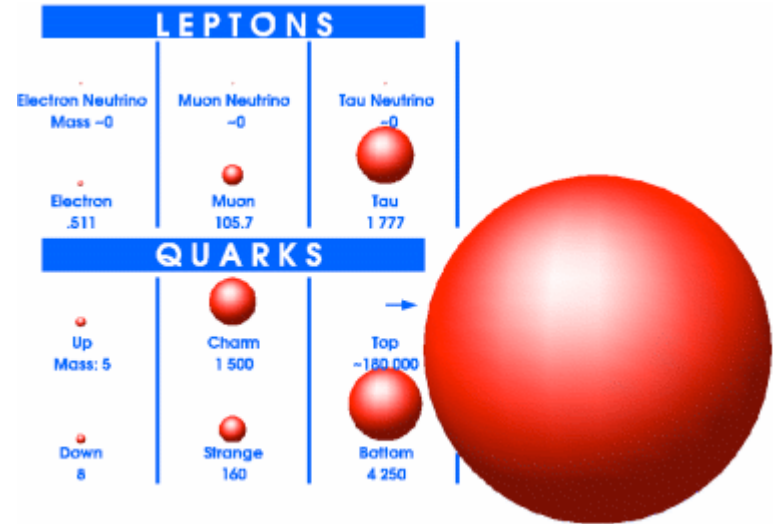
			<u>$SU(3)$</u>	<u>$SU(2)$</u>	<u>$U(1)_Y$</u>	
$Q_L^i =$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix}$	3	2	$\frac{1}{6}$
$u_R^i =$	u_R	c_R	t_R	3	1	$\frac{2}{3}$
$d_R^i =$	d_R	s_R	b_R	3	1	$-\frac{1}{3}$

В СМ вершины взаимодействия кварков однозначно фиксируются принципом калибровочной инвариантности, структурой поколений кварков и требованием минимальной размерности операторов взаимодействия.

В чем разница?

Mass

$$M_{\text{top}} = 173.34 \pm 0.76 (0.27 \pm 0.24 \pm 0.67) \text{ GeV}$$



CKM elements

$$V_{CKM} = (U_L^u)^\dagger U_L^d$$

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda = 0.2257_{-0.0010}^{+0.0009},$$

$$A = 0.814_{-0.022}^{+0.021}$$

$$\bar{\rho} = 0.135_{-0.016}^{+0.031},$$

$$\bar{\eta} = 0.349_{-0.017}^{+0.015}$$

В СМ топ-кварк распадается на W-бозон и b-кварк практически со 100% вероятностью



Ширина распада в лидирующем порядке:

$$\Gamma_{tot}^t = \frac{G_F}{8\pi\sqrt{2}} |V_{tb}|^2 m_t^3 \left(1 - \frac{M_W^2}{M_t^2}\right) \left(1 + \frac{M_W^2}{M_t^2} - 2\frac{M_W^4}{M_t^4}\right)$$

$$\Gamma(t \rightarrow bW)_{LO} \simeq 1.53 \text{ GeV}, \quad \Gamma(t \rightarrow bW)_{correc} = 1.42 \text{ GeV}$$

• топ-кварк такой тяжелый (почти как ядро золота) и точечный, то есть его структура, если она и есть, не проявляется до расстояний порядка 10^{-17} см.

186-ой изотоп ряда ядер имеет массу 173.2 ГэВ

186-ой изотоп вольфрама (W), время жизни $2 \cdot 10^{19}$ лет

186-ой изотоп осмия (Os), время жизни $2 \cdot 10^{15}$ лет

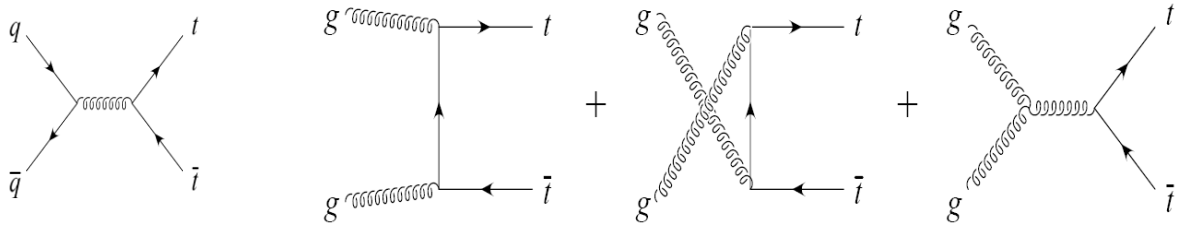
186-ой изотоп золота (Au), время жизни 10 минут

• время жизни топ-кварка ($\tau_t \sim 5 \times 10^{-25} \text{ sec}$) существенно меньше характерного времени адронизации ($\tau_{QCD} \sim 3 \times 10^{-24} \text{ sec}$). Адроны с участием топ-кварка не успевают образоваться. Процессы с участием топ-кварка – источник фундаментальной информации.

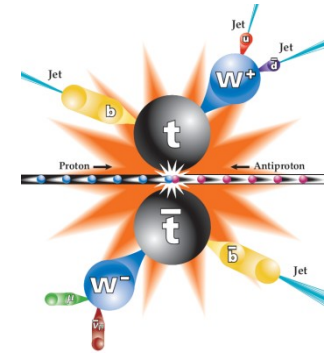
• константа Юкавы, связанная с массой и вакуумным средним ($y_t = \frac{\sqrt{2}M_{top}}{v}$) для топ-кварка численно очень близка к единице.

На адронных коллайдерах топ-кварк рождается парами или одиночно

Два механизма парного рождения (Top pair) :

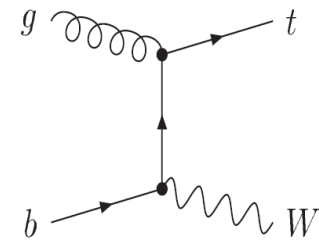
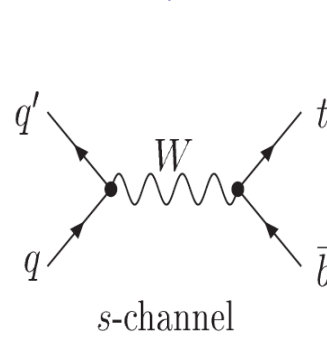
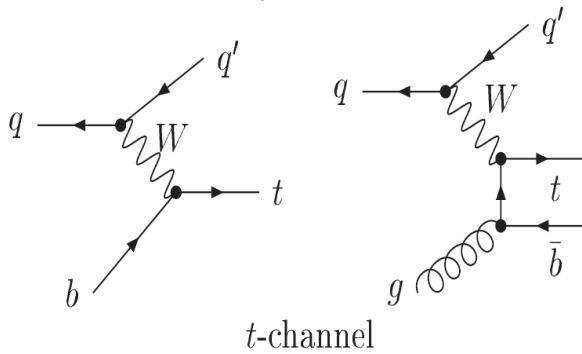


Top pair



Три механизма одиночного рождения (Single top) :

electroweak top-W-b coupling in production



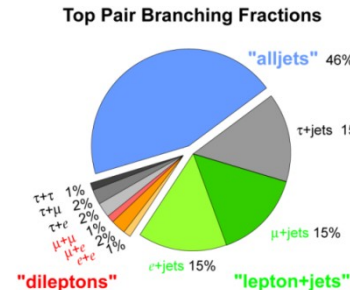
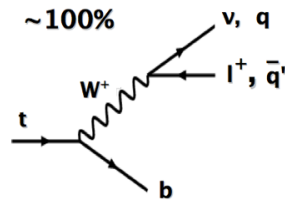
Wt associated production

t-channel ($Q_W^2 < 0$)
 Q_W^2 - W-boson virtuality

s-channel ($Q_W^2 > 0$)

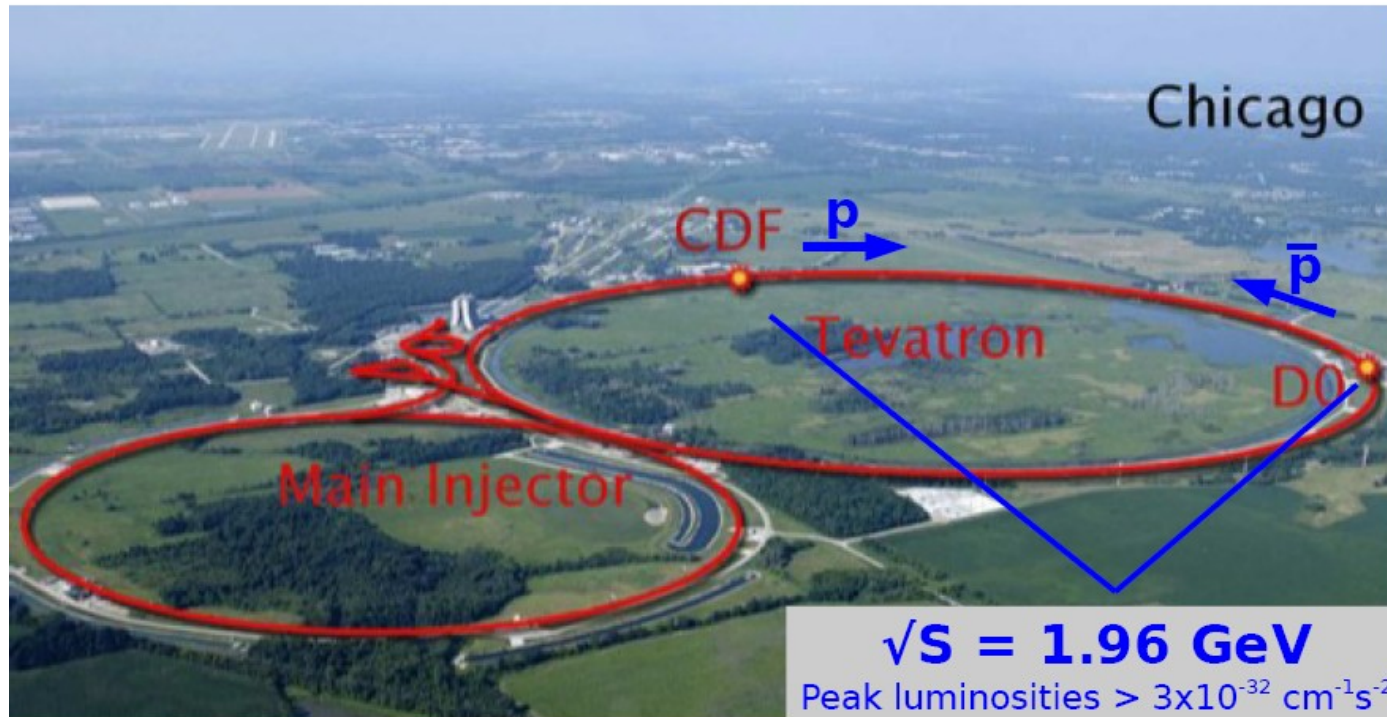
associated tW ($Q_W^2 = M_W^2$)

Сигнатуры



Открытие топ-кварка в парном рождении – 1995 г.

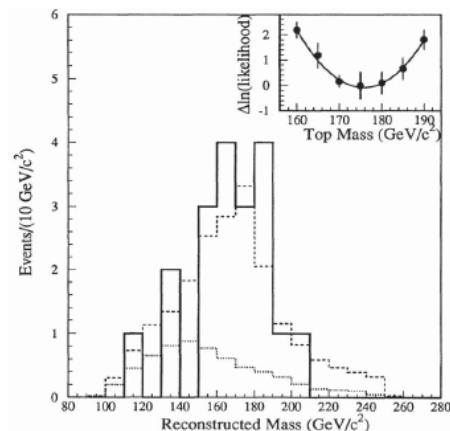
Обнаружение одиночного рождения (5 sigma effect) – 2009 г.



Обнаружение топ кварка. Первые измерения

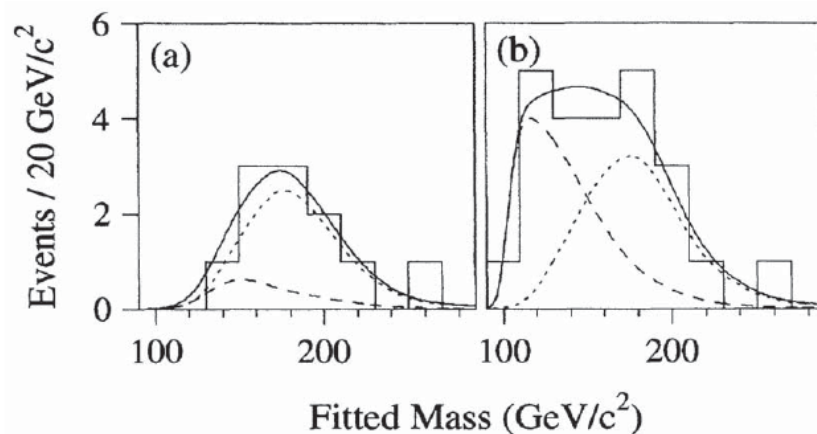
F. Abe et al. [CDF Collaboration],
Phys. Rev. Lett. 74, 2626 (1995)

S. Abachi et al. [D0 Collaboration],
Phys. Rev. Lett. 74, 2632 (1995)



$$m_t = 176 \pm 13 \text{ GeV}$$

$$\sigma(t\bar{t}) = 6.8^{+3.6}_{-2.4} \text{ pb}$$

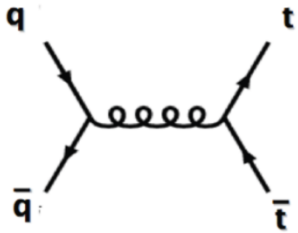


$$m_t = 199 \pm 30 \text{ GeV}$$

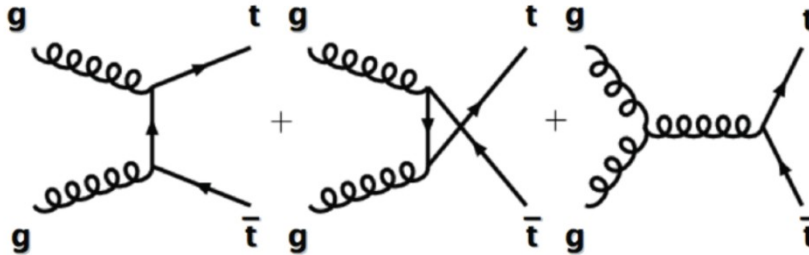
$$\sigma(t\bar{t}) = 6.4 \pm 2.2 \text{ pb}$$

Top quark production cross sections

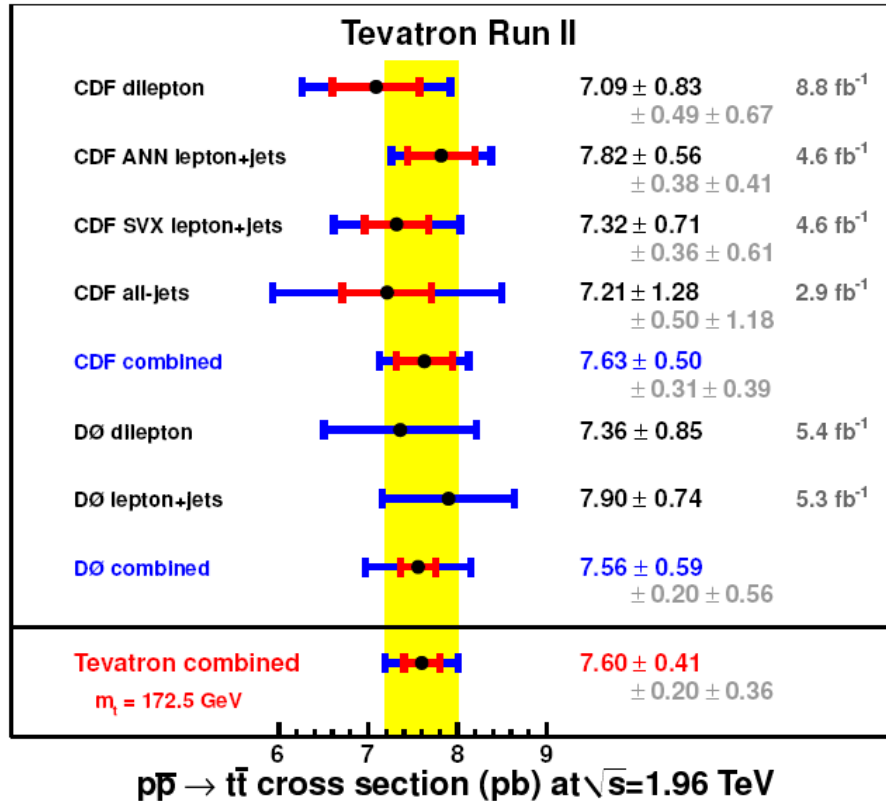
Парное рождение на Tevatron



Tevatron
(85%)



LHC
(87%)
(14 TeV)



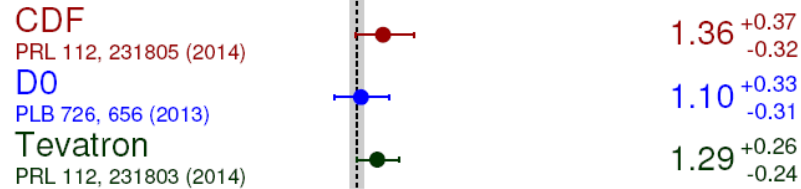
Good agreement with the SM computations in all channels

Одиночное рождение на Tevatron

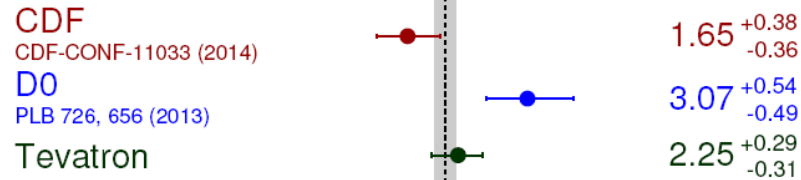


Tevatron Run II Preliminary single top quark summary
Measurement Cross section [pb]

s-channel:



t-channel:



s+t:



0 1 2 3 4
Cross section [pb]

Theory (NLO+NNLL)
PRD81 054028 (2010), PRD83 091503 (2011) $m_t = 172.5$ GeV

D0: $|V_{tb}| > 0.81$ (CL=95%) 5.4 fb^{-1}
CDF: $|V_{tb}| > 0.78$ (CL=95%) 7.5 fb^{-1}

$$|V_{tb}| = 0.96 \pm 0.09(\text{stat.} + \text{sist.}) \pm 0.05(\text{theory})$$

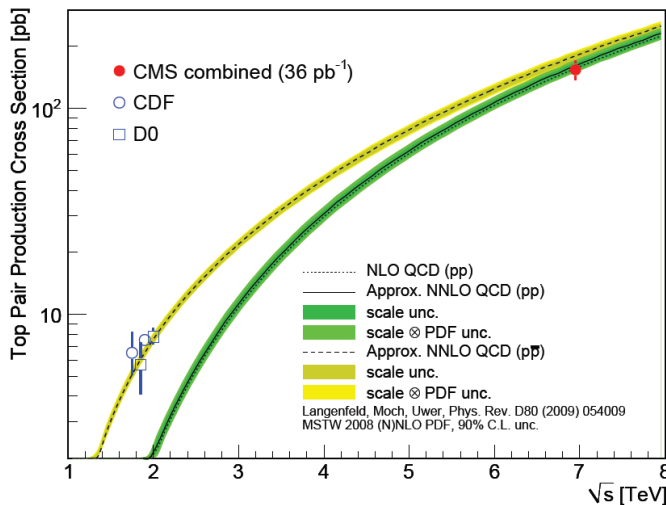
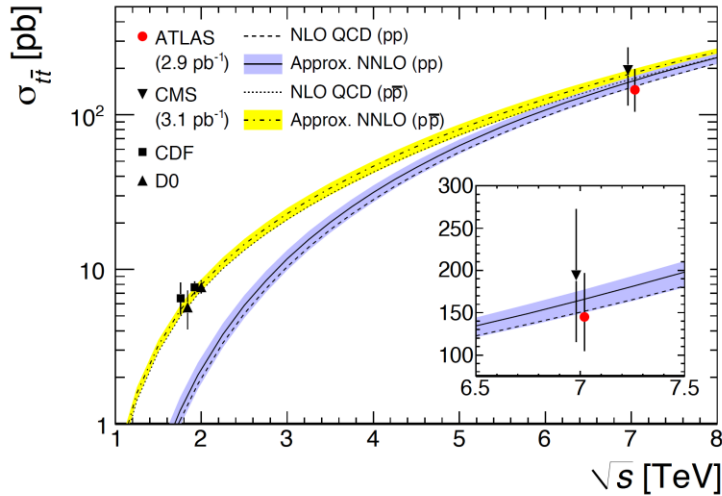
Good agreement with SM

tW-channel – too small at the Tevatron

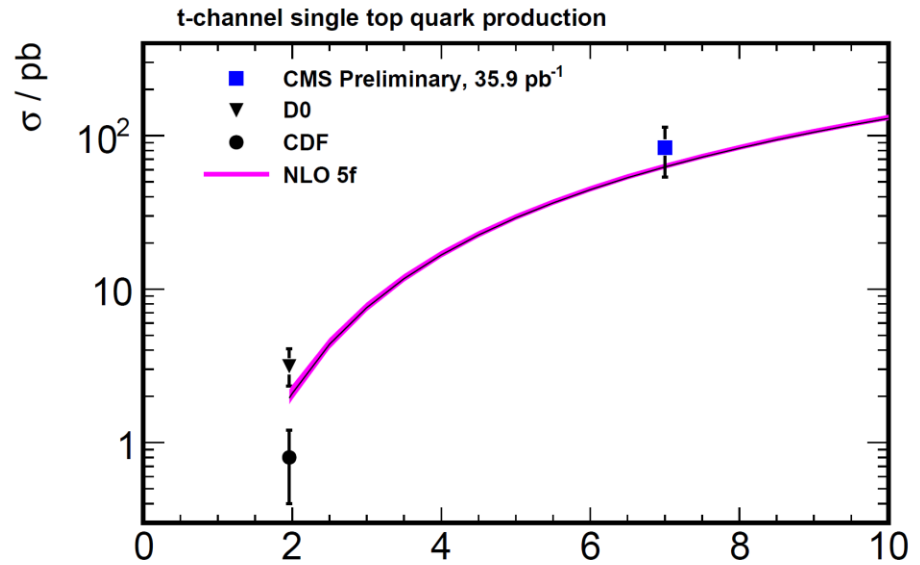
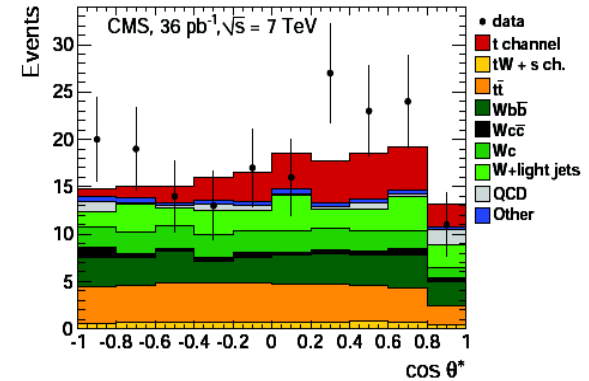
Парное и одиночное рождение топ-кварка на LHC

Phys. Lett. B695, 424 (2010) (CMS)

Eur.Phys.J. C71, 1577 (2011) (ATLAS)

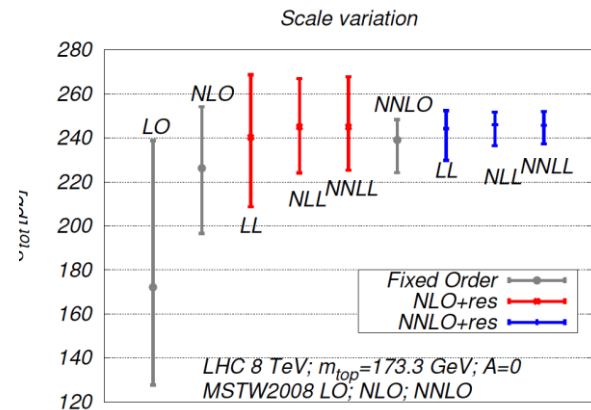
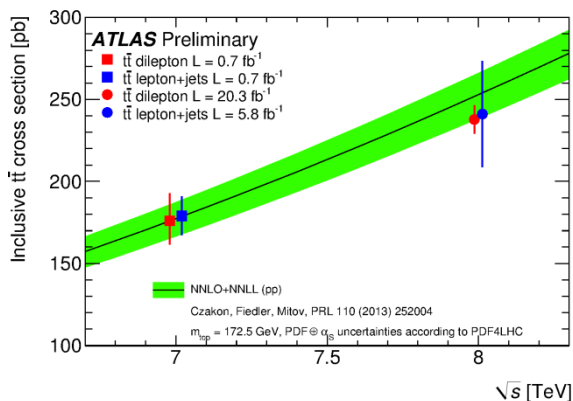
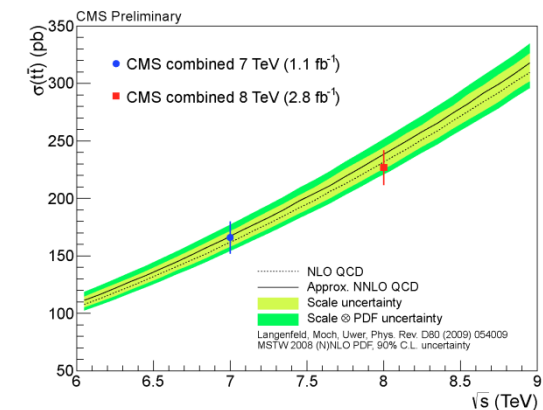
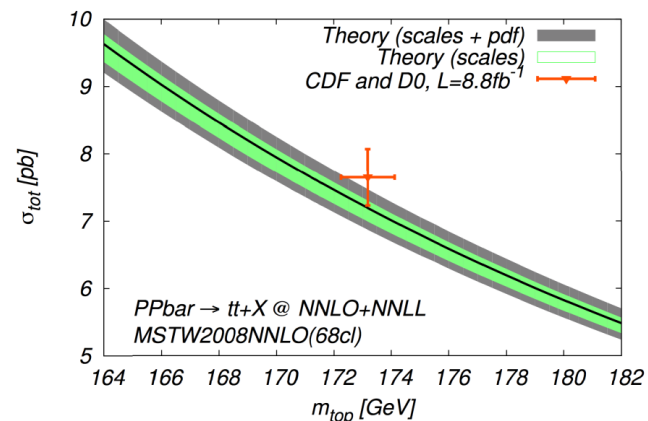
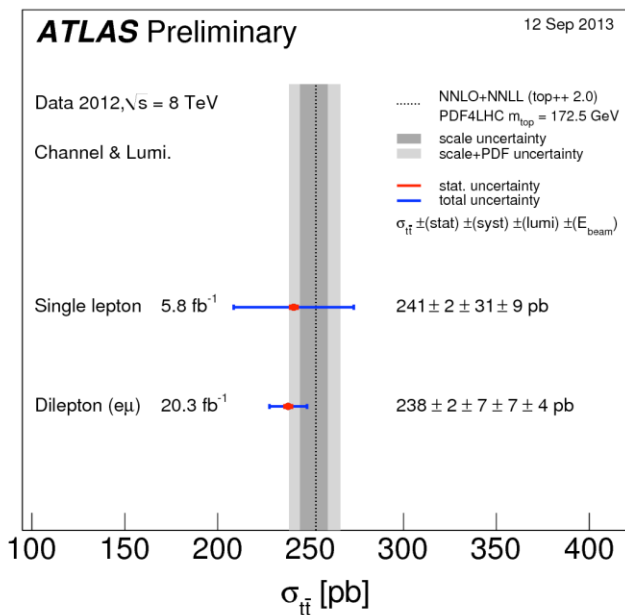
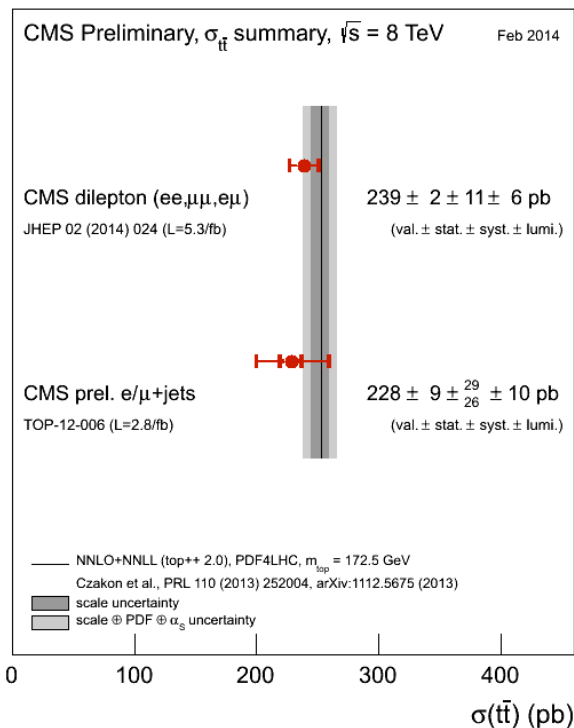


CMS PAS TOP-10-008

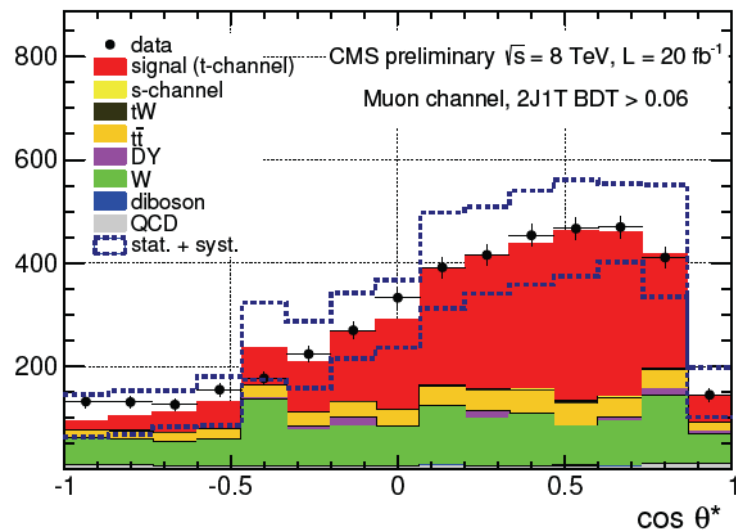
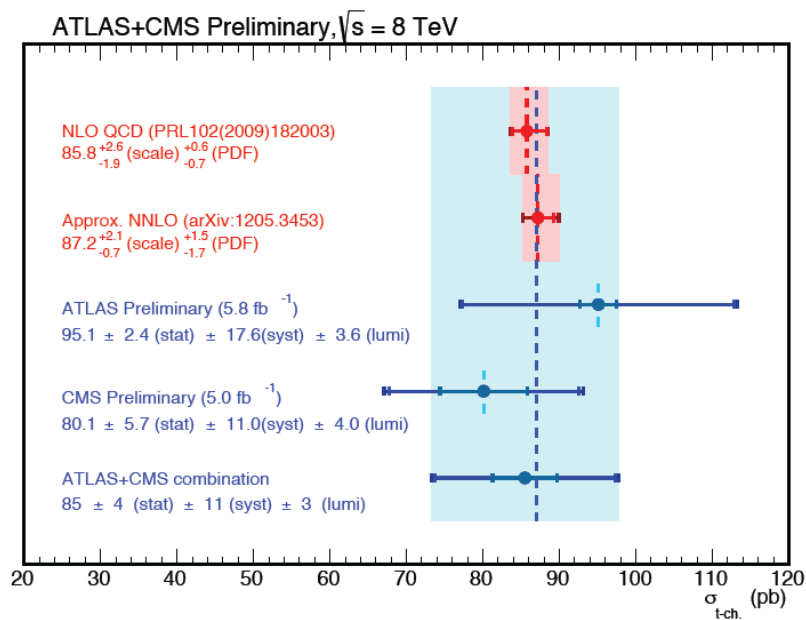
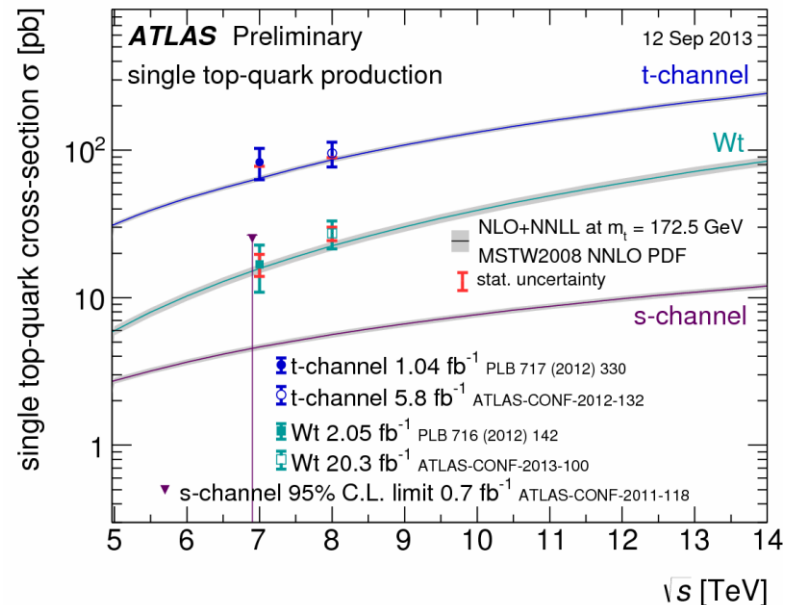
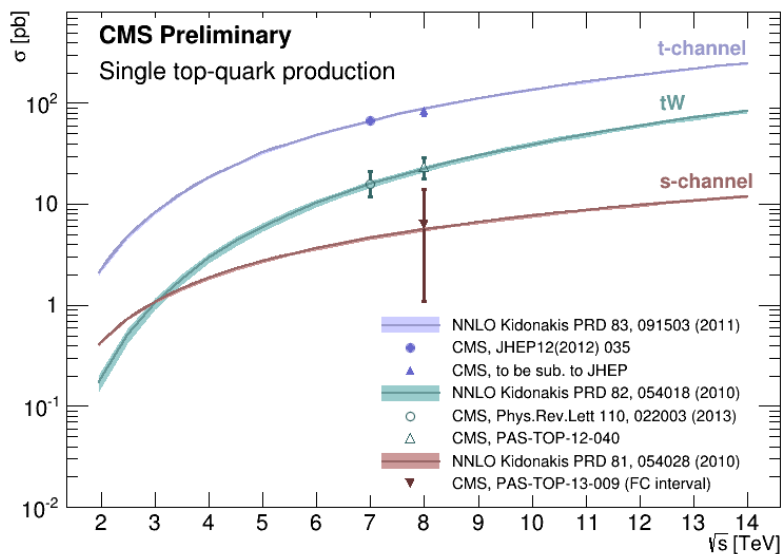


$$|V_{tb}| = \sqrt{\frac{\sigma^{exp}}{\sigma^{th}}} = 1.16 \pm 0.22(exp) \pm 0.02(th)$$

Парное рождение (согласие с SM)



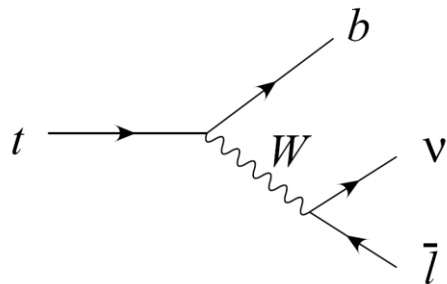
Одиночное рождение



Спиновые корреляции в одиночном рождении топ-кварка

V-A структура взаимодействия

$$d\Gamma \sim |\mathcal{M}|^2 \sim (t + ms) \cdot lb \cdot \nu$$



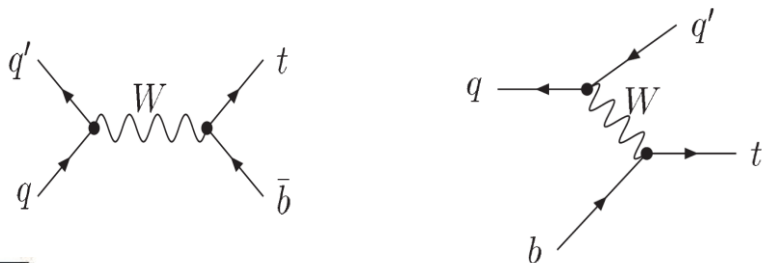
в системе покоя топ-кварка:

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d \cos \theta_\ell} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta_\ell)$$

где, угол – это угол между трех-вектором спина $s = (0, \hat{s})$ и импульсом заряженного лептона

Одиночное рождение как распад назад во времени

Mahlon, Parke;
Boos, Sherstnev

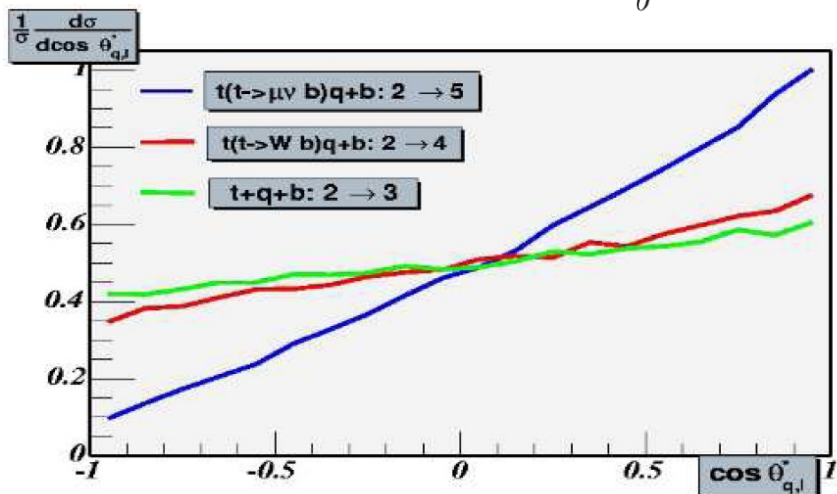


Нижняя компонента слабого изодублета – d-кварк в рождении играет роль лептона в распаде

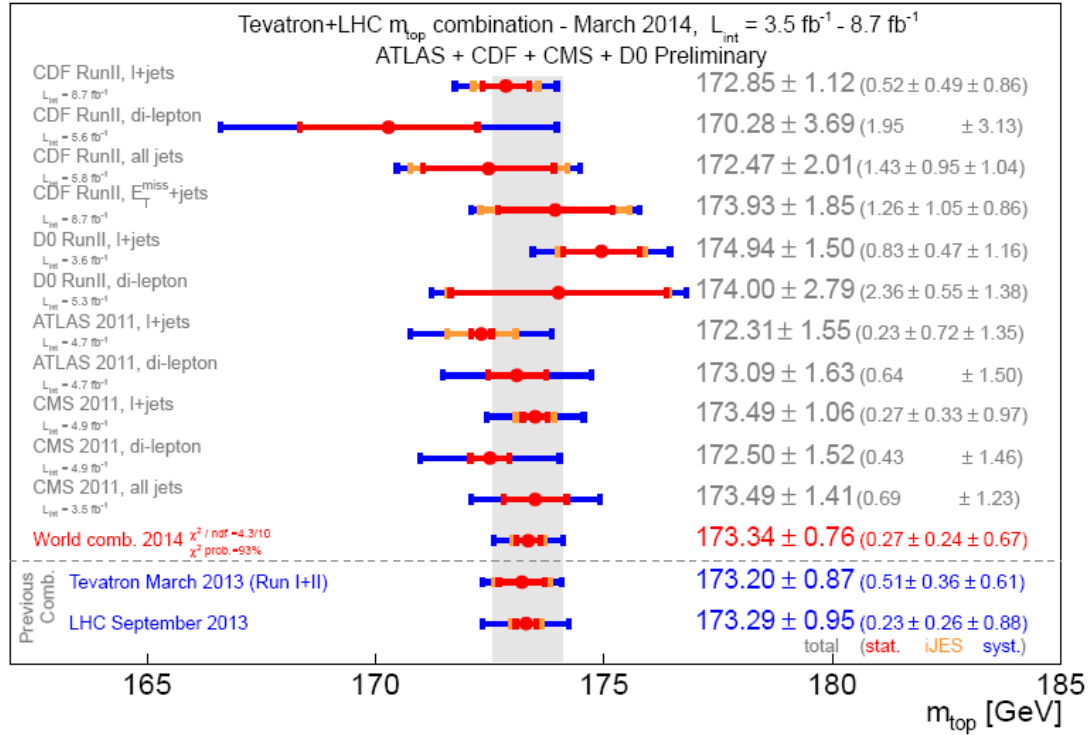
t-channel production

Наилучшая спиновая корреляционная переменная – угол между лептоном в распаде и импульсом рожденной легкой струи в системе покоя топ-кварка

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d \cos \theta_{ql}^*} = \frac{1 + P \cos \theta_{ql}^*}{2} \quad P_{top} \approx 90\%$$



Масса топ кварка наиболее точно измеренная масса из всех кварковых масс



Measurement of top and anti-top mass difference – check of CPT theorem

D0: $0.8 \pm 1.8(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{syst.})$

CMS: $-0.44 \pm 0.46(\text{stat.}) \pm 0.27(\text{syst.})$

CDF: $-1.95 \pm 1.11(\text{stat.}) \pm 0.59(\text{syst.})$

ATLAS: $0.67 \pm 0.61(\text{stat.}) \pm 0.41(\text{syst.})$

Прямое измерение параметра матрицы смешивания $|V_{tb}|$

ATLAS:

- 7 TeV: $|V_{tb}| = 1.13^{+0.14}_{-0.13}$ (t-ch., 11.9%)
 $|V_{tb}| = 1.03^{+0.16}_{-0.19}$ (tW, 17.0%)
- 8 TeV: $|V_{tb}| = 1.04^{+0.10}_{-0.11}$ (t-ch., 10.1%)
 $|V_{tb}| = 1.10 \pm 0.12$ (exp.) ± 0.03 (th.) (tW, 11.2%)

CMS:

- 7 TeV: $|V_{tb}| = 1.020 \pm 0.046$ (exp.) ± 0.017 (th.) (t-ch. 4.8%)
 $|V_{tb}| = 1.01^{+0.16}_{-0.13}$ (exp.) $+0.03-0.04$ (th.) (tW, 14.8%)
- 8 TeV: $|V_{tb}| = 0.979 \pm 0.045$ (exp.) ± 0.016 (th.) (t-ch. 4.9%)
 $|V_{tb}| = 1.03 \pm 0.12$ (exp.) ± 0.04 (th.) (tW 12.3%)

CMS combination: $|V_{tb}| = 0.998 \pm 0.038$ (exp.) ± 0.016 (th.)

Измерение ширины и времени жизни (косвенное)

$$\Gamma(t \rightarrow Wb) = \Gamma(t \rightarrow Wb)_{\text{SM}} / \sigma(\text{t-channel})_{\text{SM}} \sigma(\text{t-channel})_{\text{exp}}$$

$$\Gamma_t = \Gamma(t \rightarrow Wb) / B(t \rightarrow Wb)$$

Полная ширина распада

Время жизни

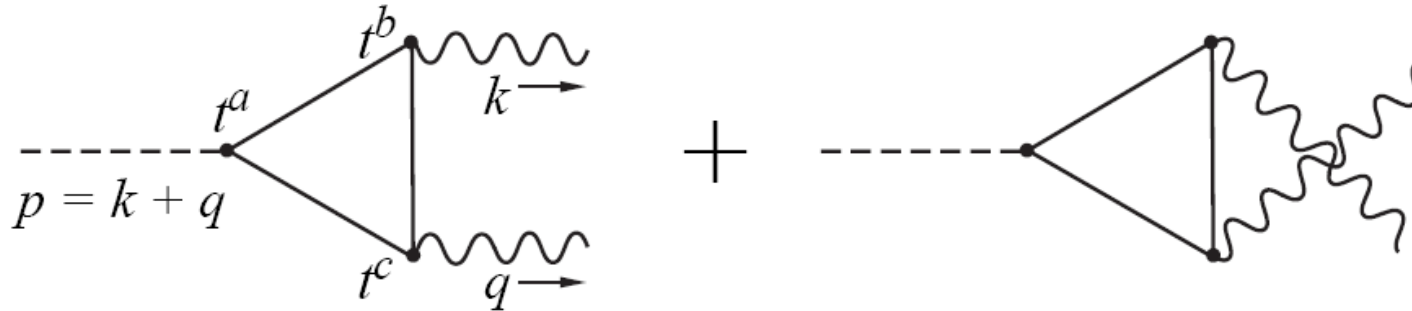
D0: $\Gamma_t = 2.00^{+0.47}_{-0.43}$ GeV

$$\tau_t = 3.29^{+0.90}_{-0.63} * 10^{-25} \text{ сек}$$

Какова роль топ кварка?

- В СМ обеспечивает сокращение киральных аномалий
- FCNC и механизм GIM для 3-х поколений
- Большая константа взаимодействия Юкавы топ кварка и бозона Хиггса: рождение бозона Хиггса в глюонном слиянии и распады в моды gg , $\gamma\gamma$, γZ ; петлевые поправки к прецизионным электрослабым наблюдаемым, в частности, поправки к массам калибровочных бозонов; стабильность вакуума СМ; проблема иерархий в СМ
- Ключевой объект в различных расширениях СМ, в частности, в МССМ сдвигает массу легкого Хиггса МССМ
- Лаборатория для поиска отклонений от СМ (различные фоновые и сигнальные процессы)

Киральные аномалии



$$\text{Аном} \sim \text{Tr} [t^a \{t^b t^c\}]_L - \text{Tr} [t^a \{t^b t^c\}]_R$$

В СМ все киральные аномалии сокращаются в каждом поколении

Одно из условий сокращения аномалии в 3-ем поколении (только при наличии топ кварка и при количестве цветов $N_c = 3$)

$$(Q_{\text{top}} + Q_b) \times N_c + Q_{\text{tau}} = 0$$

$$(2/3 - 1/3) * 3 - 1 = 0$$

ATLAS: $Q_{\text{top}} = 0.64 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.})$

(по корреляциям зарядов W^\pm и b-струй в распадах топ и анти-топ)

FCNC и механизм GIM для 3-х поколений

$$L_{Yukawa} = -\Gamma_d^{ij} \bar{Q}'_L{}^i \Phi d'_R{}^j - \Gamma_u^{ij} \bar{Q}'_L{}^i \Phi^C u'_R{}^j + h.c. \quad \Phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v+h \end{pmatrix}, \quad \Phi^C = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v+h \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$d'_{Li} = (U_L^d)_{ij} d_{Lj}; \quad d'_{Ri} = (U_R^d)_{ij} d_{Rj}; \quad u'_{Li} = (U_L^u)_{ij} u_{Lj}; \quad u'_{Ri} = (U_R^u)_{ij} u_{Rj}$$

$$(U_L^u)^\dagger M_u U_R^u = \begin{pmatrix} m_u & 0 & 0 \\ 0 & m_c & 0 \\ 0 & 0 & m_t \end{pmatrix}; \quad (U_L^d)^\dagger M_d U_R^d = \begin{pmatrix} m_d & 0 & 0 \\ 0 & m_s & 0 \\ 0 & 0 & m_b \end{pmatrix} \quad M^{ij} = \Gamma^{ij} v / \sqrt{2}$$

$$L_{Yukawa} = - \sum_{i=1}^3 [m_d^i \bar{d}^i d^i + m_u^i \bar{u}^i u^i] \cdot \left(1 + \frac{h}{v}\right) \quad m_u^3 = M_{top}$$

Нет FCNC на уровне лагранжиана: $\Psi' \rightarrow U\Psi$ $\bar{\Psi}' \hat{O}_N \Psi' \rightarrow \bar{\Psi} \hat{O} \Psi$

Заряженные токи: $u' \rightarrow (U_L^u)u, d' \rightarrow (U_L^d)d. J_C \sim (U_L^u)^\dagger U_L^d \bar{u}_L \hat{Q} d_L$

Возникает унитарная матрица смешивания в заряженных токах (СКМ):

$$V_{CKM} = (U_L^u)^\dagger U_L^d$$

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

Из условия унитарности матрицы CKM: $\sum_{k=1}^{k=3} V_{ik}^\dagger V_{kj} = \delta_{ij}$

FCNC возникают в результате испускания пары W^+ и W^- бозонов

Например, ток перехода s-кварка в b-кварк пропорционален:

$$V_{su}^\dagger V_{ub} S(p, M_u) + V_{sc}^\dagger V_{cb} S(p, M_c) + V_{st}^\dagger V_{tb} S(p, M_{top})$$

$S(p, M_{u,c,top})$ **пропагатор кварка**

Если массы кварков равны или ими можно пренебречь то:

$$V_{su}^\dagger V_{ub} + V_{sc}^\dagger V_{cb} + V_{st}^\dagger V_{tb} = 0 \quad - \quad \text{сокращение ГИМ}$$

Только при наличии топ кварка

Массы не равны и возникают вклады в осцилляции, редкие распады ...

Большая константа взаимодействия Юкавы

$$L_{top-h} = -\frac{M_{top}}{v} \cdot \bar{t}t h \quad y_t = \frac{\sqrt{2}M_{top}}{v}$$

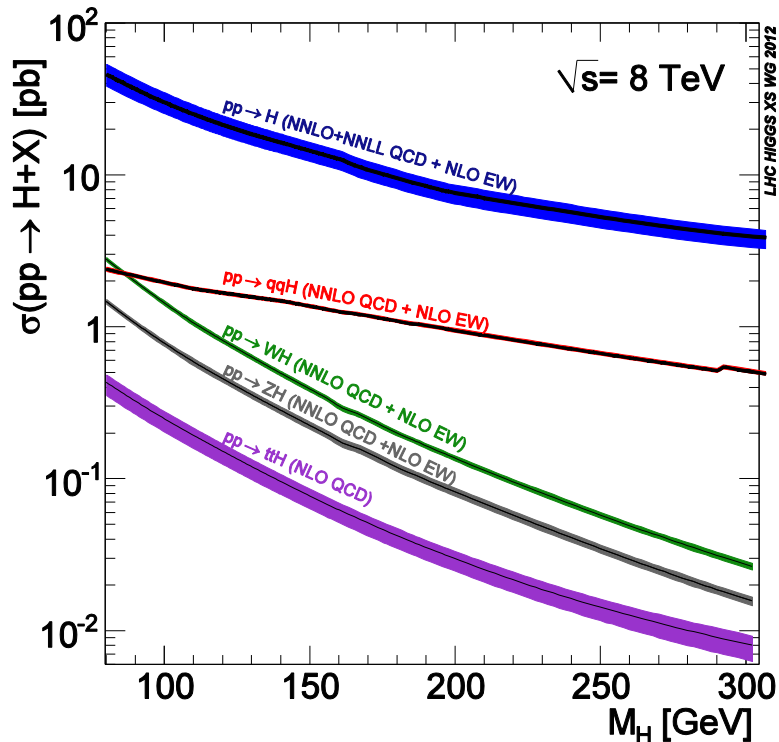
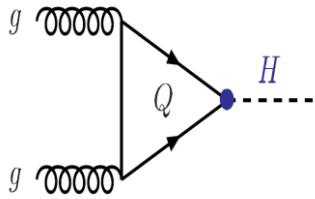
$$\hat{\sigma}(gg \rightarrow H) = \int \frac{1}{2\hat{s}} \times \frac{1}{2.8} \times \frac{1}{2.8} |\mathcal{M}_{Hgg}|^2 \frac{d^3 p_H}{(2\pi)^3 2E_H} (2\pi^4) \delta^4(\mathbf{q} - \mathbf{p}_H)$$

$$\hat{\sigma}_{LO}(gg \rightarrow H) = \frac{\pi^2}{8M_H} \Gamma_{LO}(H \rightarrow gg) \delta(\hat{s} - M_H^2)$$

$$\sigma_0^H = \frac{G_\mu \alpha_s^2(\mu_R^2)}{288\sqrt{2}\pi} \left| \frac{3}{4} \sum_q A_{1/2}^H(\tau_Q) \right|^2$$

$$\sigma = \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2$$

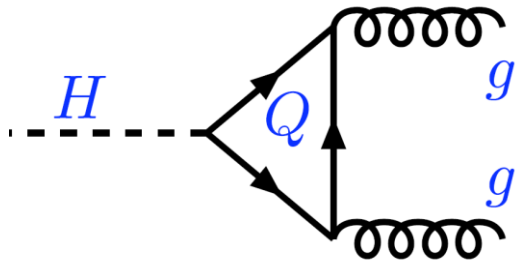
$$\frac{\pi^2 M_H}{8\hat{s}} \Gamma(H \rightarrow gg) g(x_1) g(x_2) \delta(\hat{s} - M_H^2)$$



gg - fusion

Ведущий механизм рождения

Распад в два глюона (начинается с одной петли)



$$\Gamma(H \rightarrow gg) = \frac{G_\mu \alpha_s^2 M_H^3}{36 \sqrt{2} \pi^3} \left| \frac{3}{4} \sum_Q A_{1/2}^H(\tau_Q) \right|^2$$

$$A_{1/2}^H(\tau) = 2[\tau + (\tau - 1)f(\tau)] \tau^{-2}$$

$$f(\tau) = \arcsin^2 \sqrt{\tau} \text{ for } \tau = M_H^2/4m_Q^2 \leq 1$$

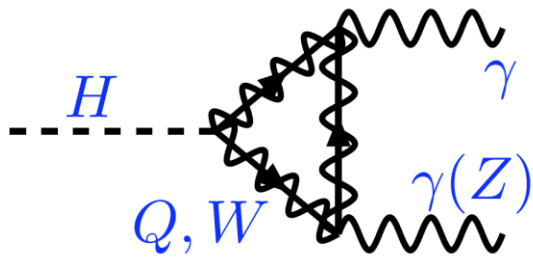
$$m_Q \rightarrow \infty, \tau_Q \sim 0 \Rightarrow A_{1/2} = \frac{4}{3} = \text{constant}$$

В СМ важен только вклад t-кварка (вклад b-кварка < 5 %)

Большие QCD поправки:

$$\Gamma = \Gamma_0 \left[1 + 18 \frac{\alpha_s}{\pi} + 156 \frac{\alpha_s^2}{\pi^2} \right] \sim \Gamma_0 [1 + 0.7 + 0.3] \sim 2\Gamma_0$$

Распады в фотоны и Z бозон



$$\Gamma = \frac{G_\mu \alpha^2 M_H^3}{128 \sqrt{2} \pi^3} \left| \sum_f N_c e_f^2 A_{\frac{1}{2}}^H(\tau_f) + A_1^H(\tau_W) \right|^2$$

$$A_{\frac{1}{2}}^H(\tau) = 2[\tau + (\tau - 1)f(\tau)] \tau^{-2}$$

$$A_1^H(\tau) = -[2\tau^2 + 3\tau + 3(2\tau - 1)f(\tau)] \tau^{-2}$$

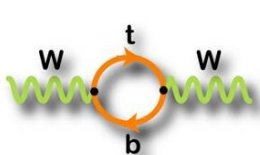
(Формула для распада γZ сложнее)

Дают вклад петли t -кварка и W -бозона. В пределе:

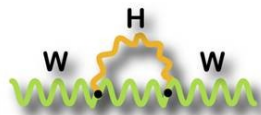
$$m_i \rightarrow \infty \Rightarrow A_{\frac{1}{2}} = \frac{4}{3} \text{ and } A_1 = -7$$

QCD поправки достаточно малы: $\frac{\alpha_s}{\pi} \sim 5\%$

Вклад в прецизионные электрослабые наблюдаемые

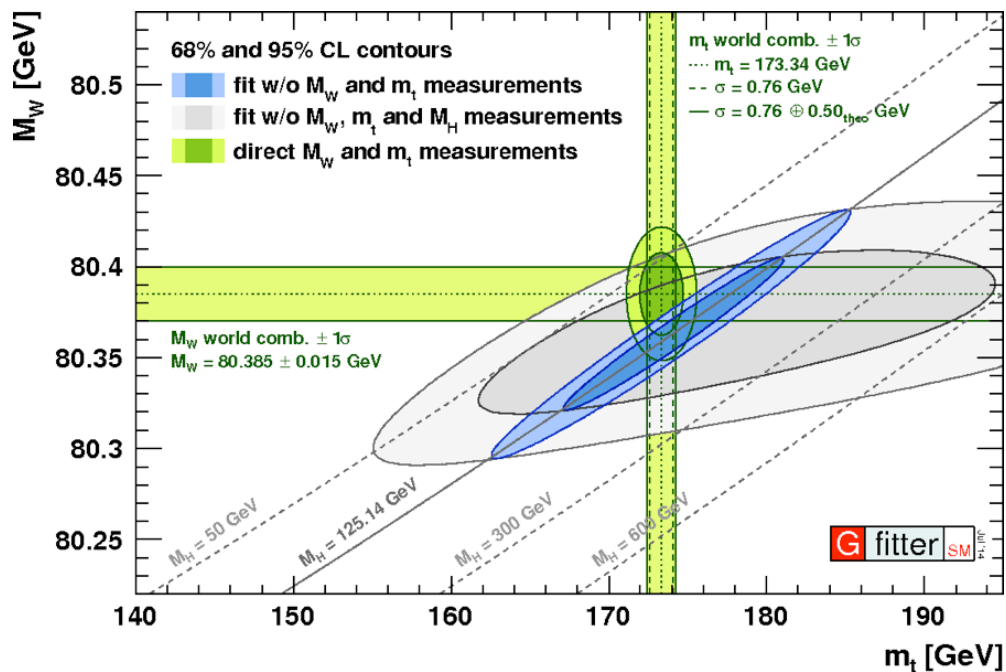


$$\sim M_{top}^2$$

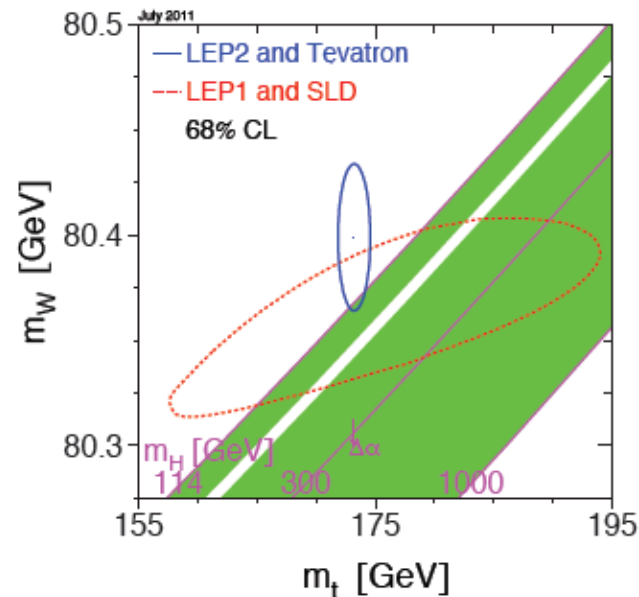


$$\sim \log(M_H^2/M_W^2)$$

Вклад продольных мод



LEP EW working group



Ограничение до прямого обнаружения

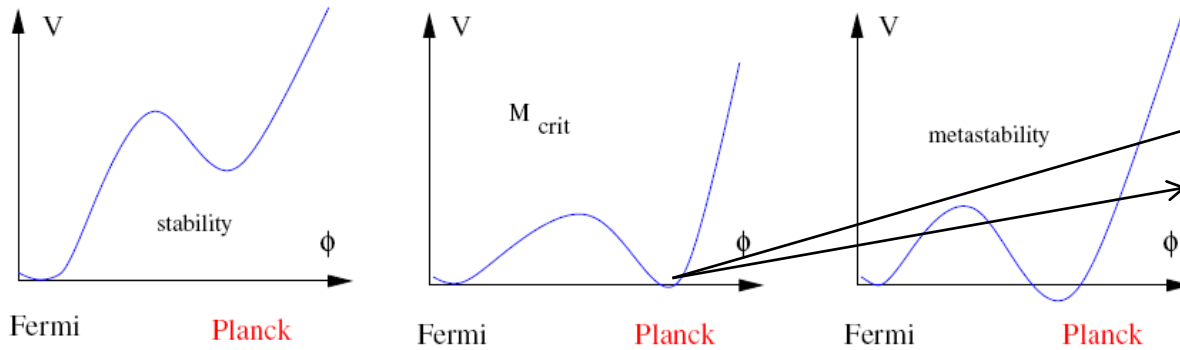
$$M_H < 155 \text{ GeV } 95\% \text{ C.L.}$$

Масса топ-кварка из фита LEP+SLD до прямого обнаружения

$$M_{top} = 177_{-8}^{+7} \text{ }_{-19}^{+17} \text{ GeV}$$

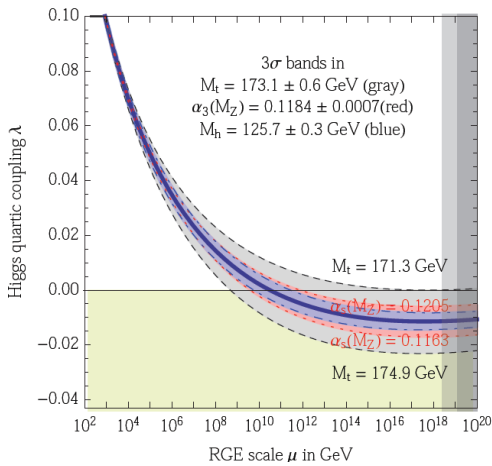
Стабильность вакуума СМ

Shaposhnikov;
Bezrukov, Shaposhnikov;
Bezrukov, Kalmykov,
Kniehl, Shaposhnikov

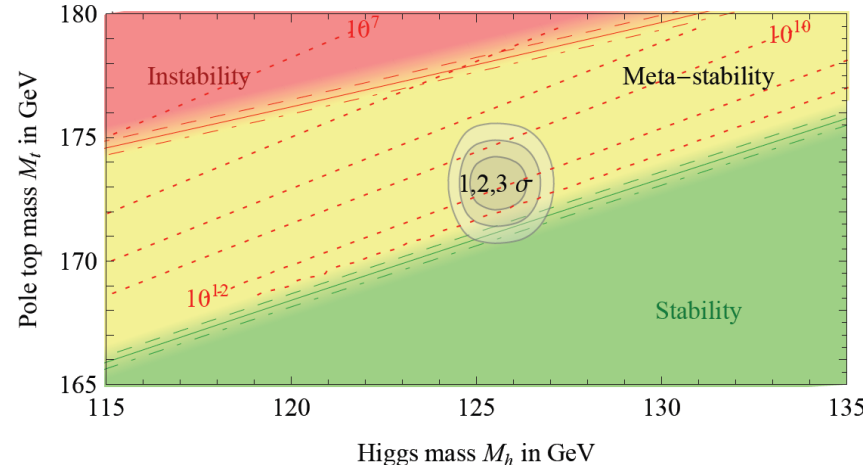


$$\lambda(\mu_0) = 0$$

$$\beta(\mu) = \frac{d}{d \ln(\mu)} \lambda(\mu) = 0, \quad \text{at } \mu = \mu_0$$



Degrassi, Di Vita, Elias-Miro, Espinosa, Giudice, Isidori, Strumia



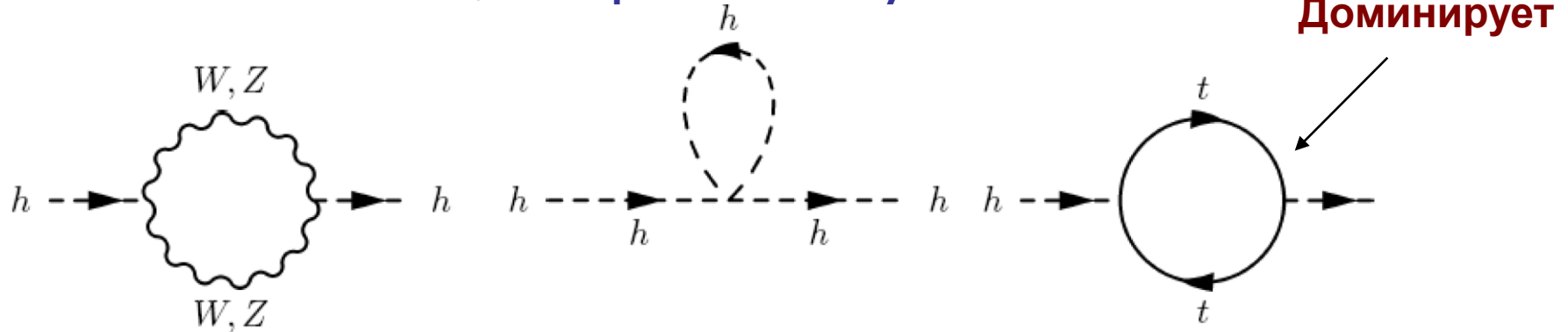
$$M_h [\text{GeV}] > 129.4 + 1.4 \left(\frac{M_t [\text{GeV}] - 173.1}{0.7} \right) - 0.5 \left(\frac{\alpha_s(M_Z) - 0.1184}{0.0007} \right) \pm 1 \Rightarrow \text{Если } M_{\text{crit}} = M_{\text{Pl}}, M_h > 129.4 \pm 1.8 \text{ GeV}$$

$M_h > 126$ GeV исключена на уровне 2σ

Основная неопределенность – масса топ кварка. Нужны более аккуратные измерения

Простейший механизм Хиггса в СМ не стабилен по отношению к петлевым квантовым поправкам (проблема натуральности СМ)

Петлевые поправки в массу бозона Хиггса



$$\delta m_H^2 = \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (2m_W^2 + m_Z^2 + m_H^2 - 4m_t^2) \Lambda^2 \approx -(0.2 \Lambda)^2$$

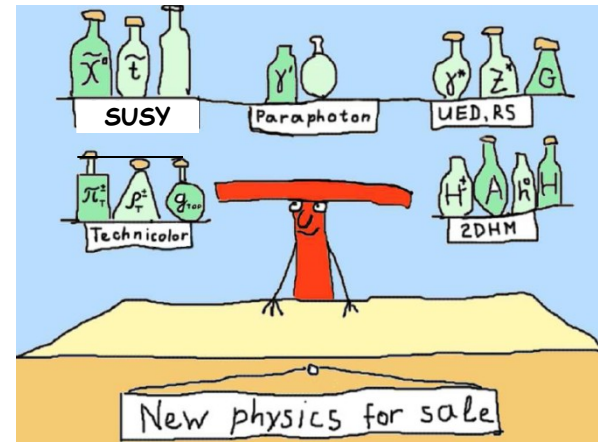
$$\delta m_H < 125 \text{ GeV (95\% CL limit on SM Higgs)} \quad \Lambda \sim 0.6-0.7 \text{ TeV}$$

В СМ нет симметрии, которая бы предохраняла массу бозона Хиггса от бодьших квадратичных поправок

Необходимо что-то в дополнение к СМ => Существование достаточно легкого партнера топ-кварка - одно из мотивированных предсказаний

Можно ожидать, что отклонения от СМ проявятся в секторе топ-кварка

New Physics via Top



Характерная энергия столкновений $>$ порога рождения

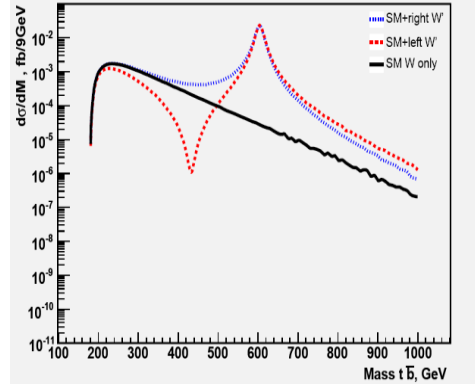
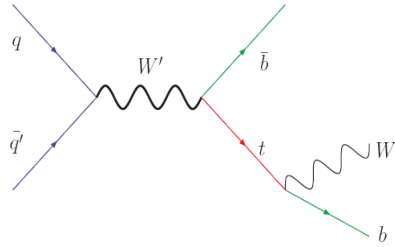
- Новые частицы
новые резонансы (KK states, W' , Z' , π_T , ρ_T ...)
партнеры топа
(stop, sbottom, heavy T or B decaying to top...)

Характерная энергия столкновений $<$ порога рождения

- Новые/аномальные взаимодействия
 Wtb anomalous couplings
FCNC
...

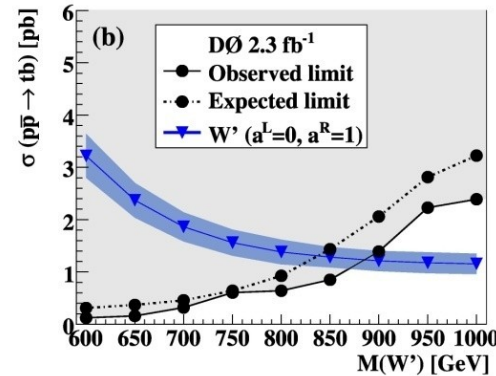
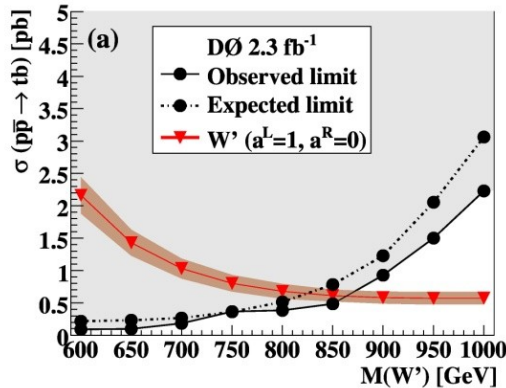
Поиски нового резонанса W'

Boos, Bunichev, Dudko, Perfilov



Отрицательная интерференция

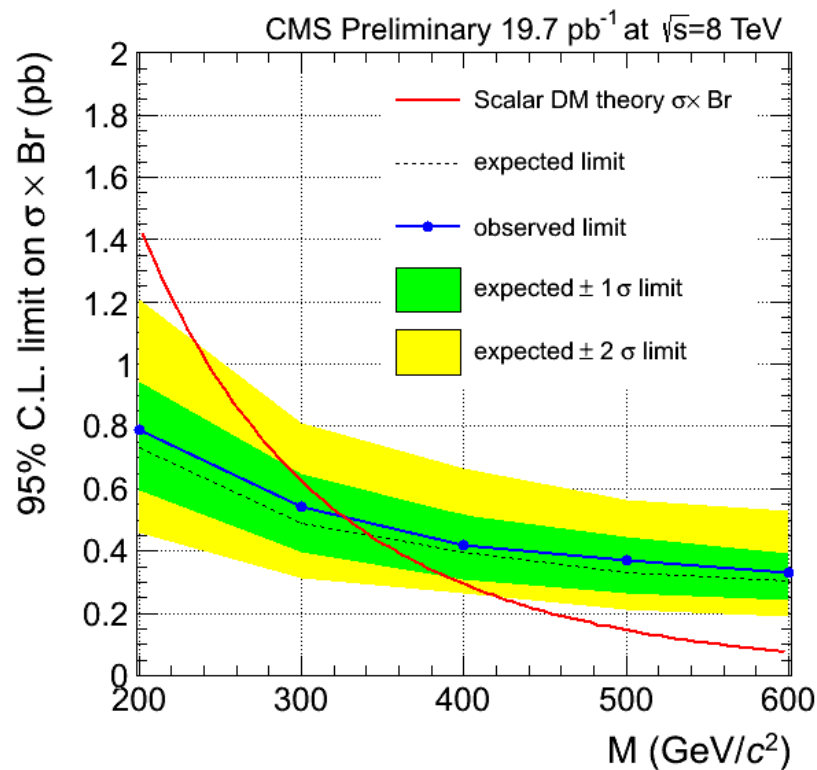
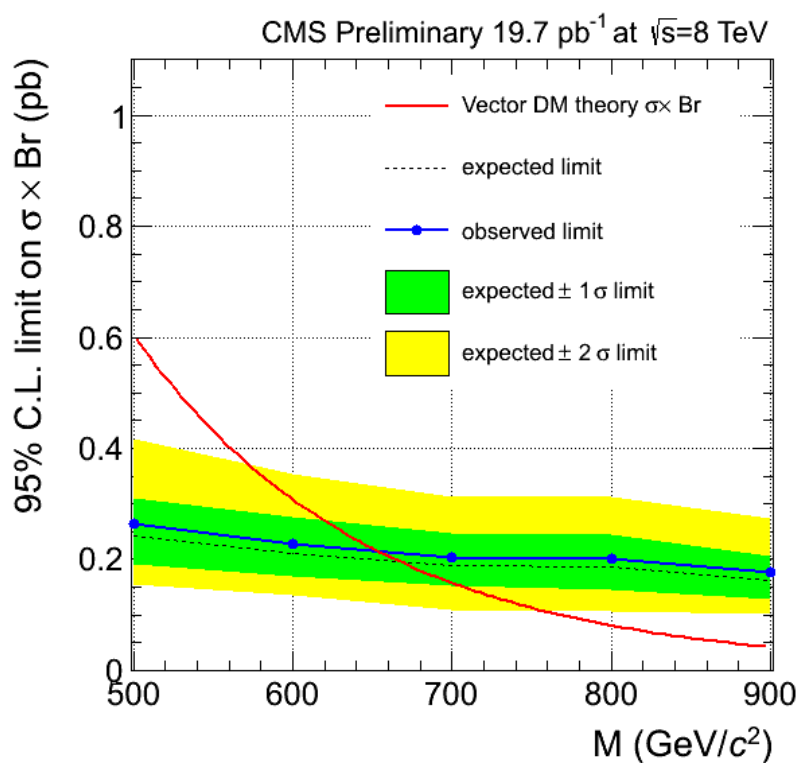
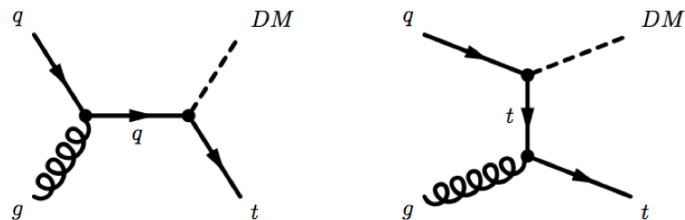
Пределы на массу W' -бозона ($D\mathcal{O}, 2.3 \text{ fb}^{-1}$): $M_{W'} > 830$ (860) GeV L(R)



ATLAS:

Model	Obs. exclusion	Exp. exclusion
W'_L no int.	1.80 TeV	1.57 TeV
W'_L	1.70 TeV	1.54 TeV
W'_R	1.92 TeV	1.75 TeV

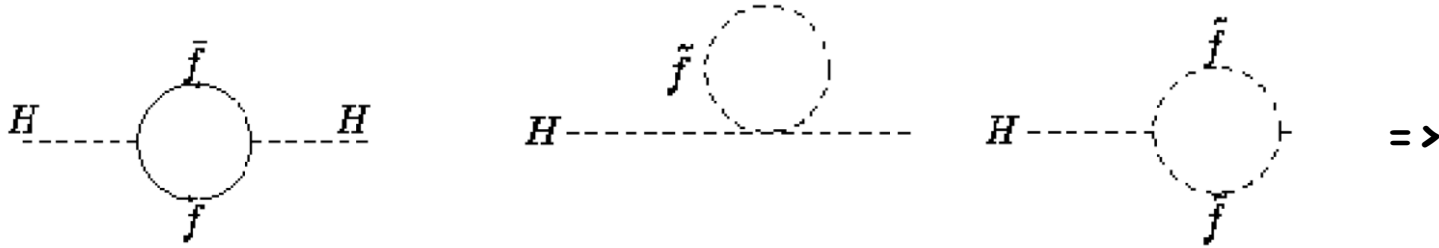
Поиски частиц темной материи в сопровождении одиночного топ-кварка



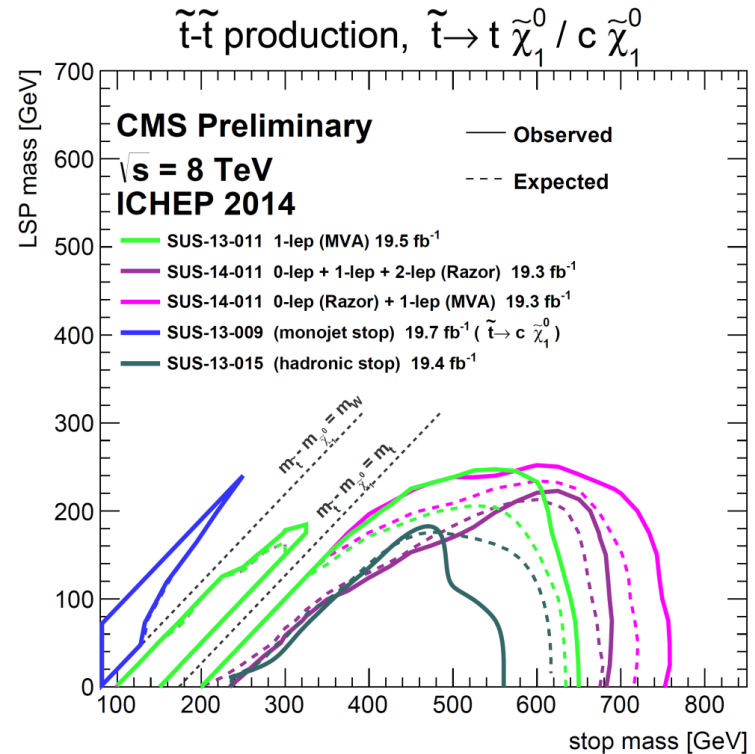
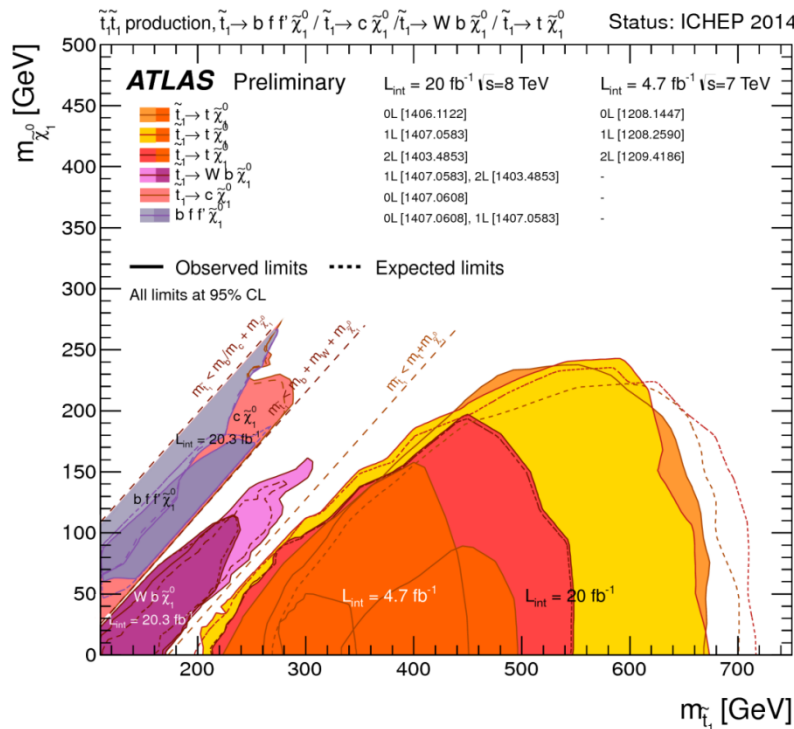
Масса векторного (скалярного) кандидата в DM меньше 655 (327) исключена на 95% C.L.

Поиски супер партнера топ-кварка (stop)

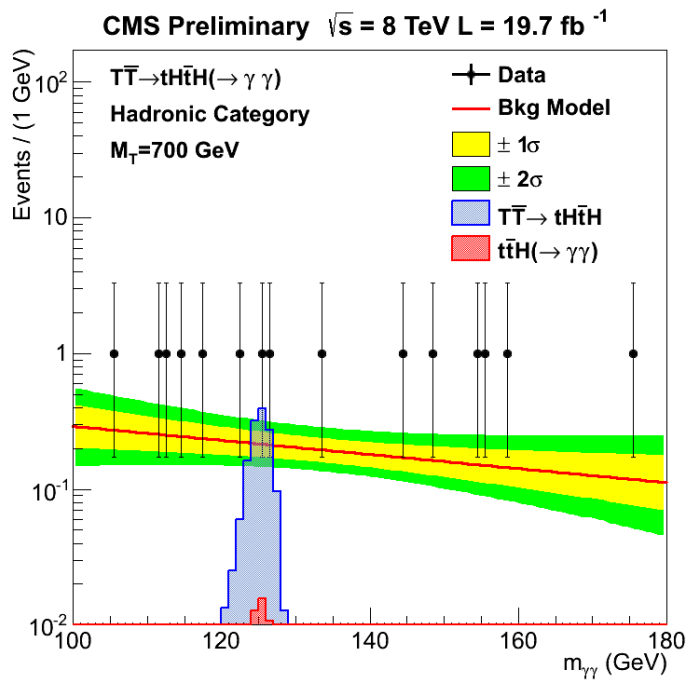
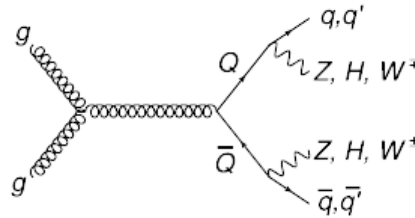
In MSSM stop (top partner) helps to cancel Λ^2 dependence



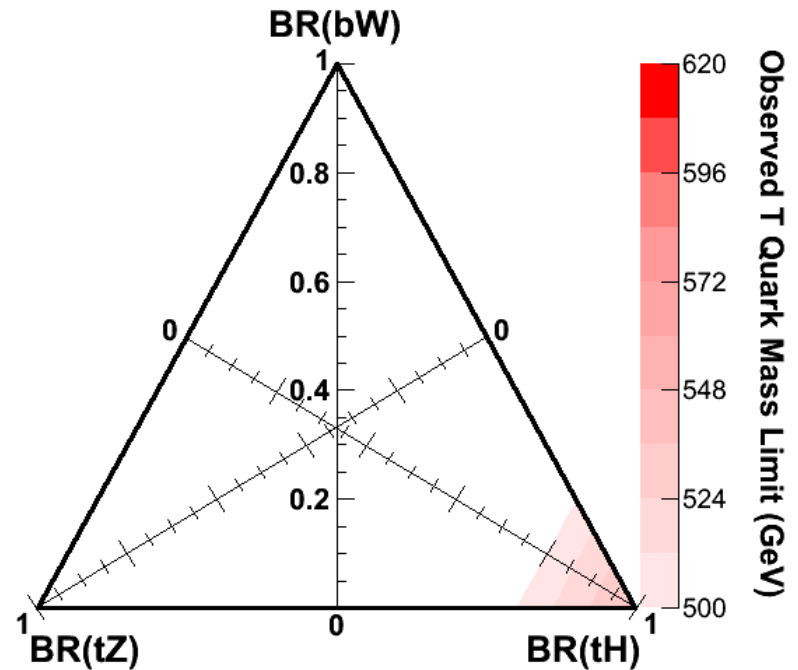
$$\Delta M_H^2|_{\text{tot}} = \frac{\lambda_f^2 N_f}{4\pi^2} \left[(m_f^2 - m_S^2) \log\left(\frac{\Lambda}{m_S}\right) + 3m_f^2 \log\left(\frac{m_S}{m_f}\right) \right] \quad M_H \text{ is protected!}$$



Поиски партнера топ-кварка T (vector like Top partner)

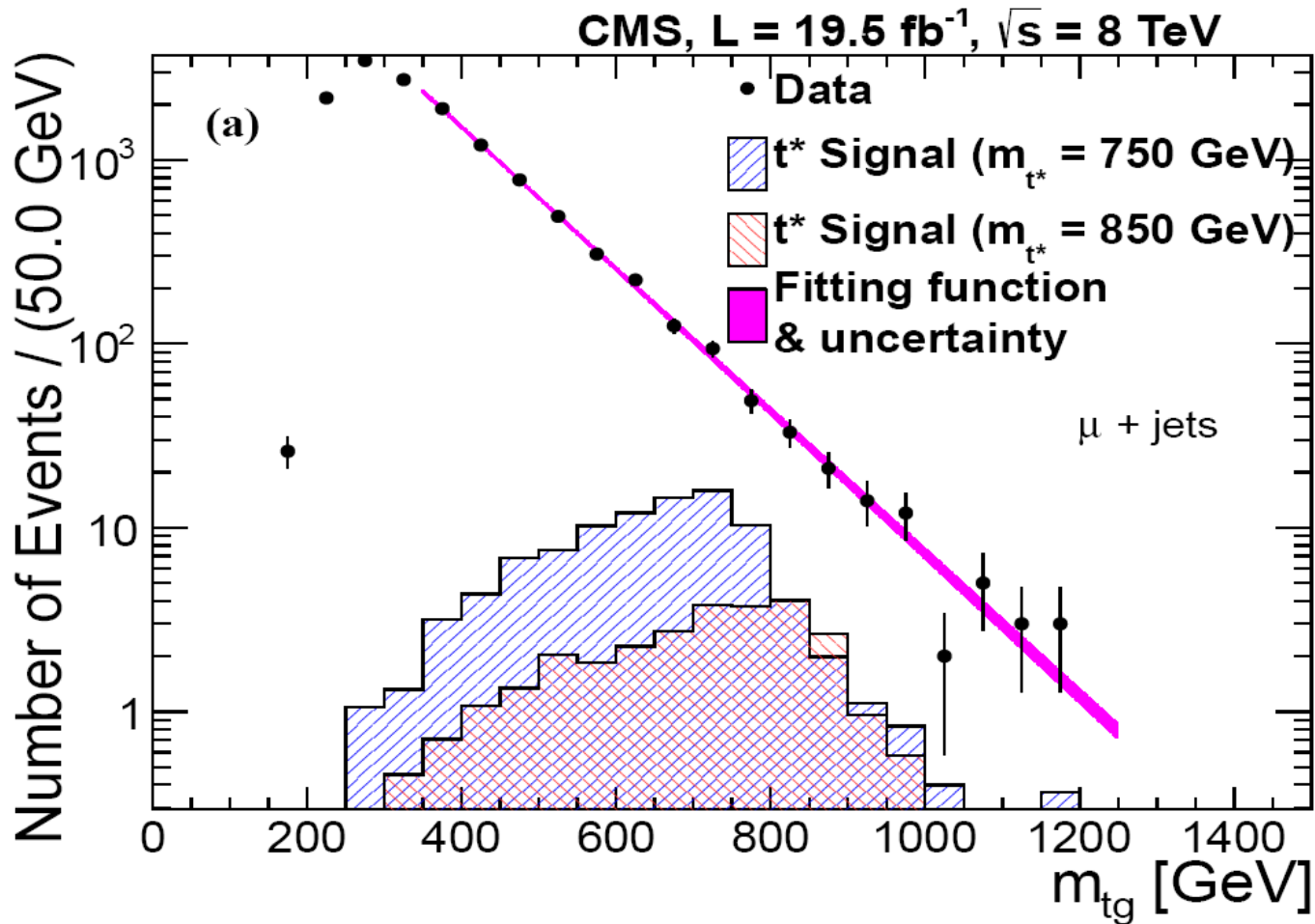


CMS Preliminary $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ $L = 19.7 \text{ fb}^{-1}$



Search for excited top quark

t^* with spin 3/2 and 100% decay mode $t^* \rightarrow t + \text{gluon}$



$M_{t^*} > 803 \text{ GeV}$ at 95% C.L.

Нейтральные токи с изменением аромата (FCNC)

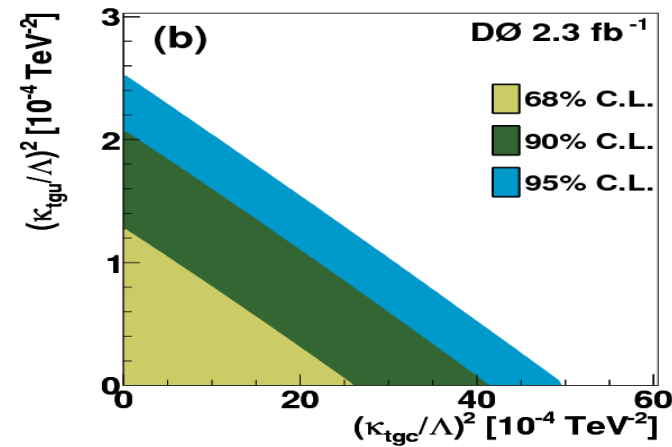
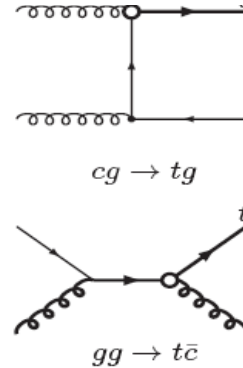
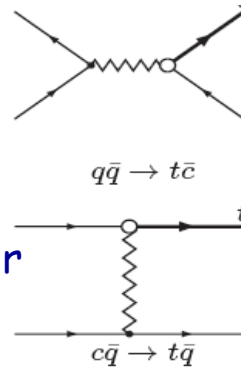
- Couplings: tqg , $tq\gamma$, tqZ , where $q = u, c$

$$\Delta\mathcal{L}^{eff} = \frac{1}{\Lambda} [\kappa_{tq}^{\gamma,Z} e\bar{t}\sigma_{\mu\nu}qF_{\gamma,Z}^{\mu\nu} + \kappa_{tq}^g g_s\bar{t}\sigma_{\mu\nu}\frac{\lambda^i}{2}qG^{i\mu\nu}] + h.c.$$

Пределы D0 на FCNC

константы связи 2.3 fb^{-1} :

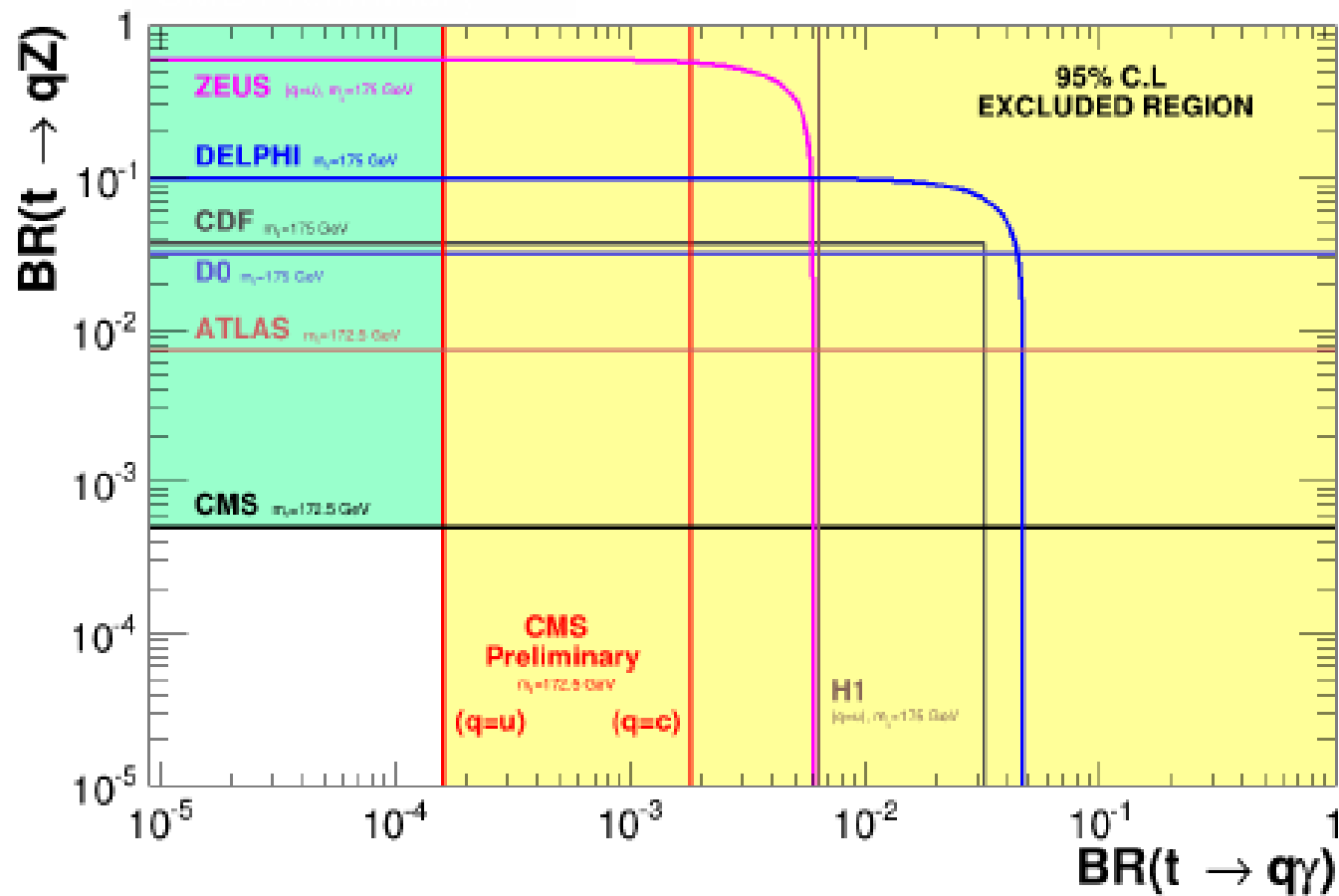
FCNC MC event samples from
SingleTop (CompHEP) generator



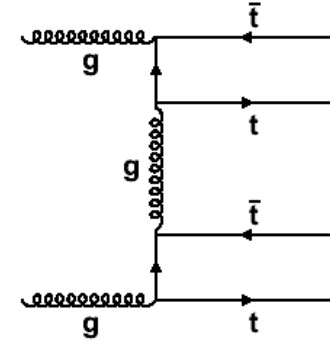
	tgu	tgc
Cross section	0.20 pb	0.27 pb
κ_{tqf}/Λ	0.013 TeV^{-1}	0.057 TeV^{-1}
$\mathcal{B}(t \rightarrow qq)$	2.0×10^{-4}	3.9×10^{-3}

	TeV	fb^{-1}	Br %	
			u	c
CDF	1.96	2.2	0.039	0.57
D0	1.96	2.3	0.02	0.39
CMS	7	4.9	0.56	7.12
CMS	7	4.9	0.035	0.34
ATLAS	8	14.2	0.0031	0.016

$t \rightarrow qg$



4 tops



At 8 TeV:

$$\sigma_{SM}(tttt) \approx 1 \text{ fb (LO)} + \sim 20\div 30\% \text{ (NLO)}$$

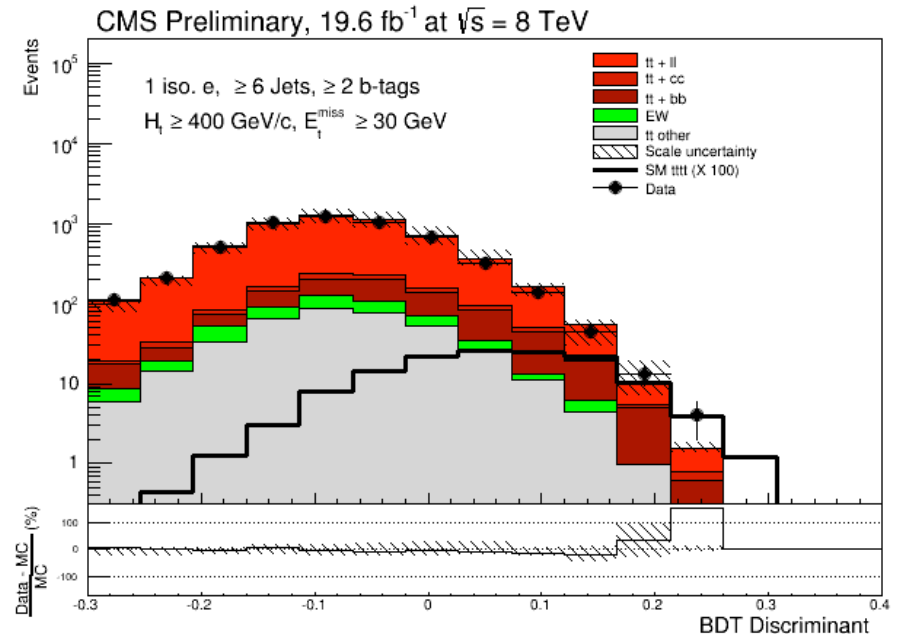
V. Barger et al., PLB687(2010)70

At 14 TeV:

$$\sigma_{SM}(tttt) \approx 15.3 \text{ fb (NLO)} \text{ (K-factor 1.27)}$$

G. Bevilacqua and M.Worec, JHEP1207(2012)111

$$\sigma(tttt) < 63 \text{ pb, } 95\% \text{ C.L.}$$



“t-collider” - V.A. Matveev at the QUARKS conference

tt→ZZ, tt→WW... (E.B., V.Bunichev, M.Dubinin, D.Gorbunov, S.Demidov, work in progress)

Заключительные замечания

Многочисленные прецизионные измерения и сложные вычисления в СМ

$$M_{\text{top}} = 173.34 \pm 0.76 (0.27 \pm 0.24 \pm 0.67) \text{ GeV Tevatron/LHC}$$

$$|V_{tb}| = 0.998 \pm 0.038(\text{exp.}) \pm 0.016(\text{th.}) \quad \text{LHC}$$

$$\sigma_{\text{tt}} = 7.6 \pm 0.41 \text{ pb} \quad (7.16 (2\%) \text{ NNLO}) \quad 1.96 \text{ TeV Tevatron}$$

$$\sigma_{\text{tt}} = 241.5 \pm 8.5 \text{ pb} \quad (245 (3\%) \text{ NNLO}) \quad 8 \text{ TeV LHC}$$

$$\sigma_{\text{t-channel}} = 2.25 \pm 0.3 \text{ pb} \quad (2.1 (3\%) \text{ NNLO}) \quad 1.96 \text{ TeV Tevatron}$$

$$\sigma_{\text{t-channel}} = 85 \pm 4(\text{stat}) \pm 11(\text{syst}) \pm 30(\text{lumi}) \text{ pb} \quad (87.2 (4\%) \text{ NNLO}) \quad 8 \text{ TeV LHC}$$

Топ-кварк играет очень важную роль как для самосогласованности СМ, так и при построении различных моделей за рамками СМ

Большое число результатов (ограничений) по поиску “новой физики” в процессах с участием топ-кварка:

аномальные взаимодействия топ-кварка с другими частицами СМ,
рождение и распады новых частиц

Перспективные направления новых поисков и точных измерений в программе исследований на LHC и на будущем линейном коллайдере