

# Физика топ-кварков на адронных коллайдерах

*Слабоспицкий С.Р.*

НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ

Москва, ФИАН, апрель 2020

# Стандартная Модель

Три фундаментальных взаимодействий описывают наш мир

- Стандартная модель      Сильное взаимодействие - квантовая хромодинамика - КХД  
    Электро-слабое взаимодействие - EW
- Гравитация

СМ: поля материи - кварки и лептоны (и соответствующие античастицы)

$$\text{кварки} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \text{лептоны} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

векторные бозоны (переносчики взаимодействий)

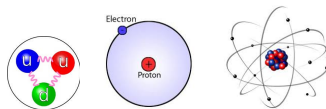
$$\gamma, W^+, W^-, Z, g$$

бозон Хиггса  $H$

всего  $N = 30$  фундаментальных частиц + гравитон (?)

# Адроны

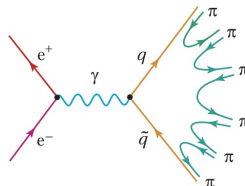
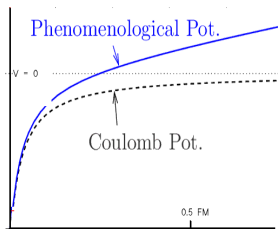
Вся наблюдаемая материя построена из кварков



Кварки не могут быть свободными (наблюдаемыми в установках) частицами. Рожденные кварки (и глюоны) за очень короткое время

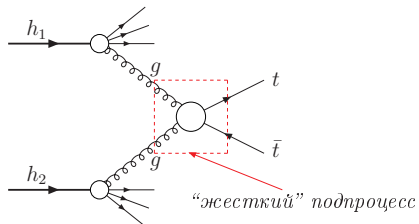
$$\tau_{hadr} \sim \frac{1}{\Lambda_{QCD}} \sim 10^{-25} \text{ сек}$$

переходят в адроны (“адроризация”)



## Рождение адронов в партонной модели

Налетающий адрон для наблюдателя выглядит как пучок *свободных* партонов. При столкновении двух адронов “жесткое” взаимодействие кварков и глюонов описывается в рамках т.в. СМ



### основная формула партонной модели

$$\sigma(h_1 h_2 \rightarrow R X) = \sum_{i,j} \int \hat{\sigma}(ij \rightarrow R) f_i^{h_1}(x_1) f_j^{h_2}(x_2) dx_1 dx_2 \quad (1)$$

где  $f_i^{h_1}(x_1)$  и  $f_j^{h_2}(x_2)$  - функции распределения партонов в адронах

# ТОП-кварк - уникальный объект СМ

## Почему мы любим $t$ -кварк ?

Топ-кварк - уникальный объект Стандартной модели (СМ)

- самый тяжелый объект СМ (кварк)
- $m_t \simeq 172.5$  ГэВ и  $|V_{tb}| \leq 1 \implies$  распадается до адронизации  $\implies$  нет “топ”-адронов !
- сохраняет информацию о спине (и поляризации)
- уникальная точность теоретических предсказаний СМ ( $d\sigma$ ,  $d\Gamma$ ,  $BR \sim \mathcal{O}(1\%)$ )
- связь с другими поколениями очень мала  $|V_{td}| \simeq 0.008$ ,  $|V_{ts}| \simeq 0.04$
- самая большая юкавовская константа связи в СМ:

$$y_t = \frac{\sqrt{2}m_t}{v} \simeq 1$$

# Взаимодействия $t$ -кварков в СМ

Лагранжиан взаимодействия  $t$ -кварков в СМ

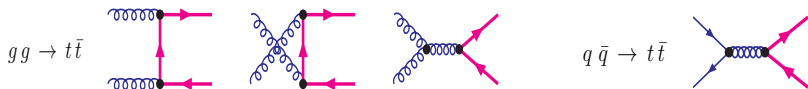
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{y_t}{\sqrt{2}} \bar{t} t H - g_s \bar{t} \gamma^\mu t^a t G_\mu^a - \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{q=d,s,b} \frac{V_{tq}}{2} \bar{t} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) q W_\mu^+ \\ & - Q_t e \bar{t} \gamma^\mu t A_\mu - \frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \bar{t} \gamma^\mu \left[ \left( \frac{1}{2} - 2Q_t \sin^2 \vartheta_W \right) - \frac{1}{2} \gamma_5 \right] t Z_\mu + \text{h.c.} \end{aligned}$$

$$y_t = \sqrt{2} \frac{m_t}{v_{ew}} \approx 1, \quad v_{ew} \approx 246 \text{ ГэВ}$$

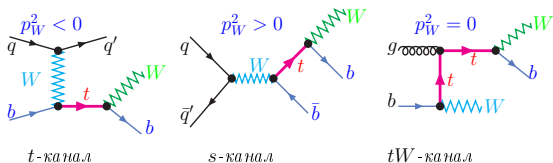
где  $v_{ew}$  - электрослабый масштаб - вакуумное среднее поля Хиггса.

# Основные механизмы образования $t$ -кварков в СМ

- рождение  $t$ -кварков в КХД



- рождение  $t$ -кварков в электрослабой теории (EW)



- особенности описания рождения в адронных столкновениях (партонная модель)
- БАК - фабрика  $t$ -кварков

## Распады $t$ -кварков в СМ

Основная мода распада  $t$ -кварка  $t \rightarrow b W^+$ ;  $W^+ \rightarrow q \bar{q}', \ell \nu$   
 ширина распада (пренебрегая  $m_b^2/m_t^2$ )

$$\Gamma_{tot} = \Gamma_t = \frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{M_W^2}{m_t^2}\right)^2 \left(1 + 2 \frac{M_W^2}{m_t^2}\right) \left[1 - \frac{2\alpha_s}{3\pi} \left(\frac{2\pi^2}{3} - \frac{5}{2}\right)\right]$$

$$G_F = 1.16637 \times 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}, \quad m_t = 172.5 \text{ ГэВ}, \quad \alpha_s(m_t) = 0.118$$

$$\Rightarrow \Gamma_t \simeq 1.35 \text{ ГэВ} \gg \Lambda_{QCD} \simeq 200 \text{ МэВ}$$

$t$ -кварк распадается до того, как успеет образовать адроны ( $t\bar{t}$ ), ( $t\bar{q}$ ), ( $tq q'$ )  
 распады  $t$ -кварка на конечные состояния определяют  $W$ -бозоном

$$BR(t \rightarrow b \ell^+ (e, \mu, \tau) \nu) \simeq 33\% \quad BR(t \rightarrow b q q') \simeq 67\%$$

Для пары  $t\bar{t}$  вероятности распада на различные конечные состояния равны

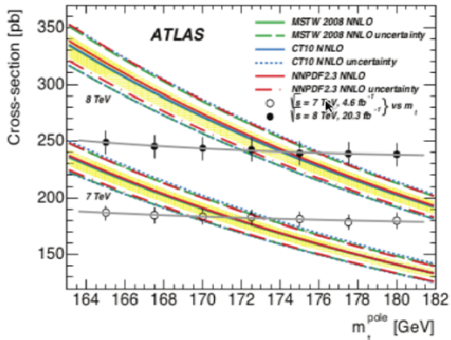
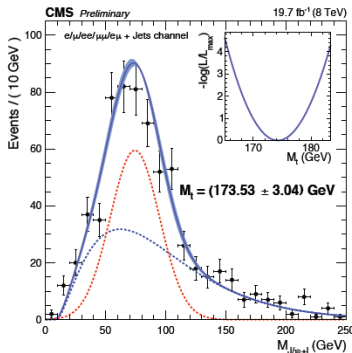
$$\begin{aligned} t\bar{t} &\rightarrow b \bar{b} q \bar{q}' q'' \bar{q}''' && \simeq 46.2\% \\ t\bar{t} &\rightarrow b \bar{b} q \bar{q}' \ell^+ \nu + b \bar{b} q \bar{q}' \ell^- \bar{\nu} && \simeq 43.5\% \\ t\bar{t} &\rightarrow b \bar{b} \ell^+ \ell^- \nu \bar{\nu} && \simeq 10.3\% \end{aligned}$$

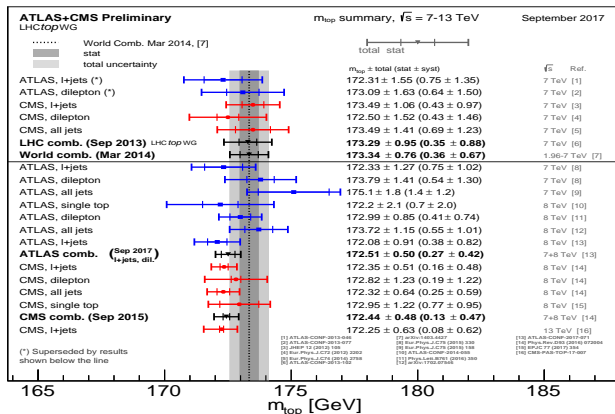
конечные состояния характеризуются наличием: 2-х  $b$ -струй; 0, 1, 2 “изолированных” заряженных лептонов; “потерянной” энергией (нейтрино) и несколькими адронными струями (не от  $b$  кварков)



# Измерения массы $t$ -кварков

- $m_t \Leftarrow M_{inv}(j_b'' W''(jj))$
- $m_t \Leftarrow M_{inv}(j_b M_T(\ell E_T^{miss}))$
- $m_t \Leftarrow M_{inv}(j_b \ell^\pm), M_{inv}(\ell^+ \ell^-)$
- $m_t \Leftarrow M_{inv}(\ell^\pm J/\psi)$
- $m_t \Leftarrow \sigma(pp \rightarrow t\bar{t}) = f(m_t)$



Измерения массы  $t$ -кварков

$$m_{top}(\text{CDF}, D\theta, \text{ATLAS}, \text{CMS}) = 173.34 \pm 0.76(0.27 \pm 0.24 \pm 0.67) \text{ GeV}$$

$$\text{CMS} \Rightarrow \Delta m_t = m_t - m_{\bar{t}} = -0.15 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst})$$

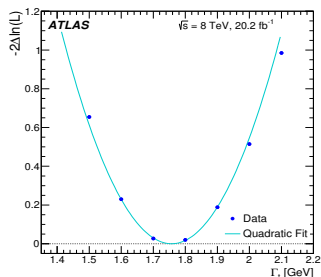
# Измерения $\Gamma_{tot}$ - полной ширины $t$ -кварка

- $\Gamma_{tot}^{SM} = 1.39$  ГэВ
- традиционные методы (ширина пика в  $M_{inv}(bW)$ ) не дают приемлимой точности

- ATLAS -  $M_{inv}^{exp}(j_b \ell^\pm)$  сравнение с моделированием событиями при различных  $\Gamma_{tot}$   
 $\Gamma_{tot} = 0.1, 0.2, 0.3, \dots 5.0$  ГэВ,  $\Delta\Gamma = 0.1$  ГэВ

- CMS - косвенное измерение

$$\Gamma_{tot} = \frac{\sigma_{t-ch}^{exp}}{B(t \rightarrow Wb)} \times \frac{\Gamma^{th}(t \rightarrow bW)}{\sigma_{t-ch}^{th}}$$



эксперимент	$\Gamma_t^{exp}$ , ГэВ	$\Gamma_{tot}^{SM}$
ATLAS	$\Gamma_t = 1.76 \pm 0.33(stat.)^{+0.79}_{-0.68}$ (syst.)	1.39 ГэВ
CMS	$\Gamma_t = 1.36 \pm 0.02(stat.)^{+0.14}_{-0.11}$ (syst.)	

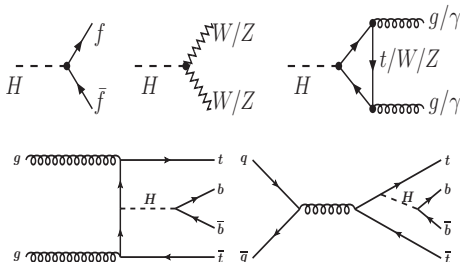
# Бозон Хиггса и $t$ -кварк

Уникальность бозона Хиггса

◇ в рамках СМ все константы взаимодействия Хиггса вычисляются ( $g, v, m_t, m_{W/Z}$ )

$$f\bar{f}H \Leftrightarrow y_f = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}; \quad y_t(m_t = 172.5 \text{ ГэВ}) = 0.99, \quad y_b(m_b = 4.5 \text{ ГэВ}) = 0.02$$

◇ взаимодействие - точное и через петли





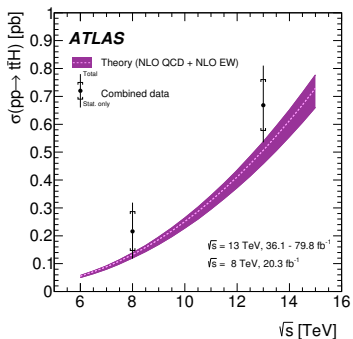
## Бозон Хиггса и $t$ -кварк

Параметр  $y_t$  можно измерять в реакциях парного и одиночного рождения  $t$ -кварков

$$pp \rightarrow t\bar{t}HX, \quad pp \rightarrow tHX$$

$$H \rightarrow b\bar{b}, WW^*, ZZ^*, \tau^+\tau^-, \gamma\gamma$$

Реконструированные сигнальные события - высокая статистическая значимость ( $\sigma > 5(6)$ )



	ATLAS	CMS
$y_t$	$1.15 \pm 0.12$	$1.26^{+0.31}_{-0.26}$

## Взаимодействие бозона Хиггса с $b$ -кварком

ATLAS и CMS провели измерения взаимодействия Хиггса с  $b$ -кварком в реакциях

$$pp \rightarrow H X, \quad H \rightarrow b\bar{b}$$

$$pp \rightarrow H V X, \quad H \rightarrow b\bar{b}, \quad V = W^\pm, Z$$

Результаты в виде отношения:

$$\mu_b = \frac{\sigma^{\text{exp}}(pp \rightarrow H X) \times \mathcal{BR}(H \rightarrow b\bar{b})}{\sigma^{\text{theor}}(pp \rightarrow H X) \times \mathcal{BR}(H \rightarrow b\bar{b})} = \frac{y_b^{\text{exp}}}{y_b^{\text{SM}}}$$

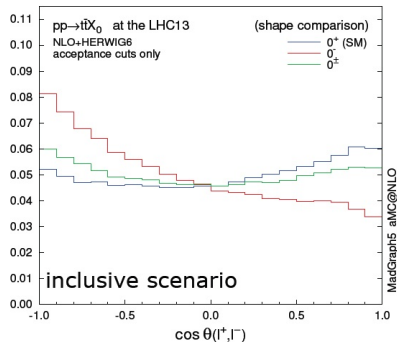
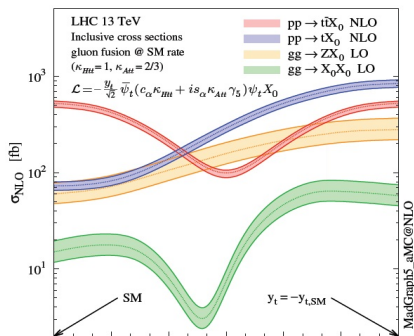
	$pp \rightarrow H W/Z X$	$pp \rightarrow H X$
CMS	$1.01 \pm 0.22$	$1.04 \pm 0.20$
ATLAS	$0.98^{+0.22}_{-0.21}$	$1.01 \pm 0.20$

- прямое наблюдение/измерение петлевого вклада в рождении Хиггса
- юкавовская константа связи Хиггса с фермионами согласуется с предсказаниями СМ

$$\mu_b \simeq 1.025 \pm 0.2, \quad y_t \simeq 1.20 \pm 0.25$$

## Аномальное взаимодействие бозона Хиггса с $t$ -кварком

$$\mathcal{L} = -\frac{y_t}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_t (c_\alpha \kappa_{Htt} + i s_\alpha \kappa_{Att} \gamma_5) \psi_t X_0$$





# Сечения рождения $t\bar{t}$ -кварков в СМ

Достигнут большой прогресс в описании рождения  $t\bar{t}$  с учетом высших порядков теории возмущений (NNLO и NNLL) при  $m_t = 172.5$  ГэВ

$\sqrt{s}$ (ТэВ)	$\sigma$ (пб)
7	$177.3^{+4.7}_{-6.8}(scale) \pm 9$ (PDF+ $\alpha_s$ )
8	$252.9^{+6.4}_{-8.6}(scale) \pm 11.7$ (PDF+ $\alpha_s$ )
13	$832.0^{+20}_{-28}(scale) \pm 35$ (PDF+ $\alpha_s$ )

основная неопределенность - PDF (возможно будет уменьшена после обработки новых данных)

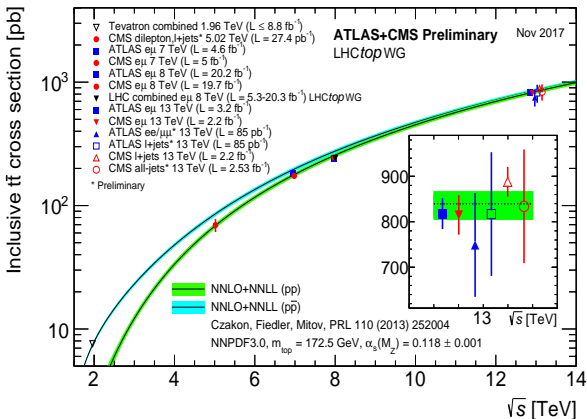
⇒ БАК (LHC) – фабрика  $t$ -кварков

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{tot} = 100 \text{ фб}^{-1} &= 10^5 \text{ пб}^{-1} & \Rightarrow & N(t\bar{t}) \simeq 8.3 \times 10^7 / \text{год} \\
 \mathcal{L}_{tot} = 250 \text{ фб}^{-1} &= 2.5 \times 10^5 \text{ пб}^{-1} & \Rightarrow & N(t\bar{t}) \simeq 1.6 \times 10^8 / \text{год} \\
 \mathcal{L}_{TOT} = 3500 \text{ фб}^{-1} &= 3.5 \times 10^6 \text{ пб}^{-1} & \Rightarrow & N(t\bar{t}) \simeq 3.0 \times 10^9 / (2016-2035)
 \end{aligned}$$

## Полные сечения образования $t\bar{t}$ на БАК

сечения рождения пары  $t\bar{t}$  измеряются в различных конечных состояниях состояниях:

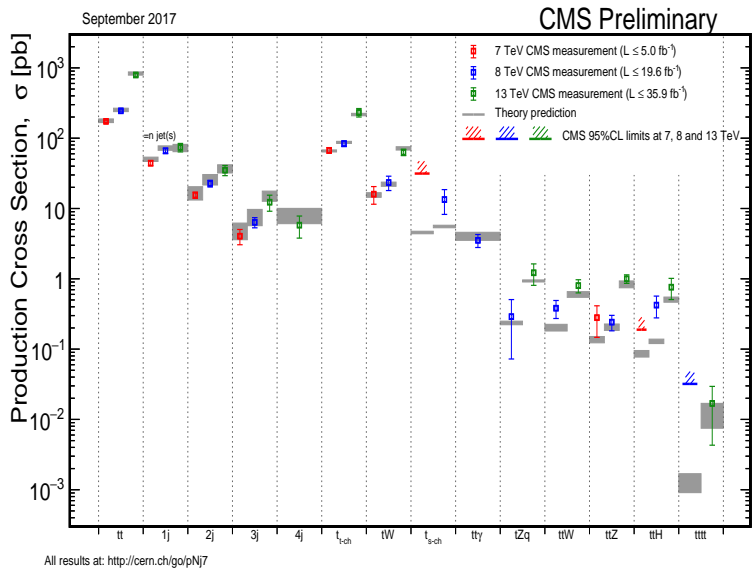
$$ee, \mu\mu, e\mu, \ell\tau_h, e/\mu + \text{jets}, \text{all jets}$$



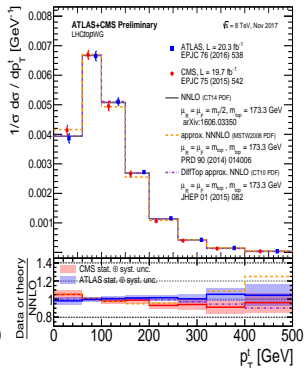
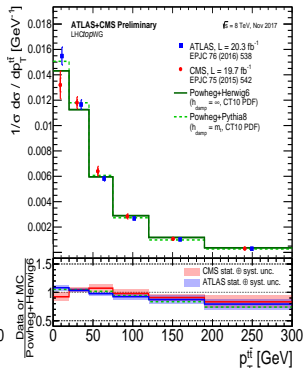
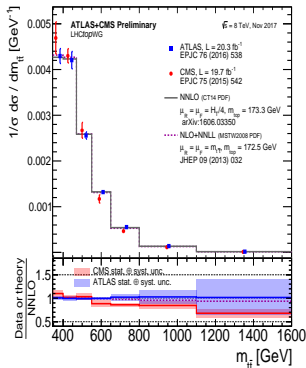
## Полные сечения образования $t\bar{t}$ на БАК

совместной анализа двух экспериментов (“LHC Top Physics Working Group”):

$\sqrt{S}$	$\sigma$ (пб) (эксперимент)	$\sigma$ (пб) (теория)
7	$173 \pm 3(stat) \pm 8(syst) \pm 6(lumi)$	$177.3^{+4.7}_{-6.8}(scale) \pm 9$ (PDF+ $\alpha_s$ )
8	$240.6 \pm 1.4(stat) \pm 5.7(syst) \pm 6.2(lumi)$	$252.9^{+6.4}_{-8.6}(scale) \pm 11.7$ (PDF+ $\alpha_s$ )
13	$836 \pm 27(stat) \pm 81(syst) \pm 100(lumi)$	$832.0^{+20}_{-28}(scale) \pm 35$ (PDF+ $\alpha_s$ )

Сечения различных процессов рождения  $t$ -кварков

## Инклюзивные спектры



# Измерения параметров $t$ -кварков

Измерения событий с рождения пары  $t\bar{t}$  с распадами на различные конечные состояния:  
 дилептоны:  $ee$ ,  $e\mu$ ,  $\mu\mu$ ,  $\ell + jets$  :  $e + jets$ ,  $\mu + jets$  и  $\ell + \tau$  позволяют измерять вероятности распада по различным каналам ( $\mathcal{B}$ , %)

$\mathcal{B}$	$t$ -кварк	CM	$W^\pm$ (LEP)
$t \rightarrow bj\bar{j}$	$66.5 \pm 0.4$ (stat) $\pm 1.3$ (syst)	$67.51 \pm 0.007$	$67.48 \pm 0.28$
$t \rightarrow be\nu$	$13.3 \pm 0.4$ (stat) $\pm 0.5$ (syst)	$12.72 \pm 0.01$	$67.48 \pm 0.20$
$t \rightarrow b\mu\nu$	$13.4 \pm 0.3$ (stat) $\pm 0.5$ (syst)	$12.72 \pm 0.01$	$12.60 \pm 0.18$
$t \rightarrow b\tau\nu$	$7.0 \pm 0.3$ (stat) $\pm 0.5$ (syst)	$7.05 \pm 0.01$	$7.2 \pm 0.12$

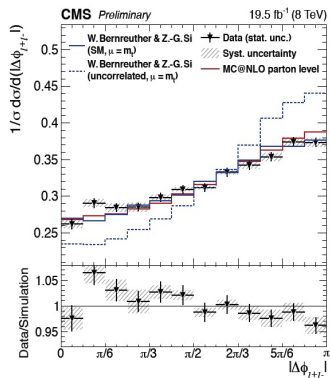
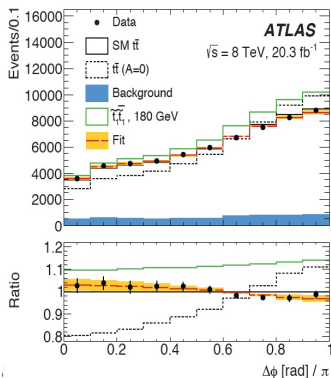
- CMS

$$pp \rightarrow t\bar{t}X, \quad t(\bar{t}) \rightarrow \ell^\pm j_b$$

$$R = \frac{\mathcal{B}(t \rightarrow bW)}{\sum_{q=s,d,s,b} \mathcal{B}(t \rightarrow qW)} = 1.014 \pm 0.003(stat) \pm 0.032(syst)$$

## Измерения параметров $t$ -кварков

- поляризованный  $t$ -кварк “передает” информацию о спине продуктам распада (угловые распределения)
- “на пороге” пара  $t\bar{t}$  кварков образуется в основном с одинаковыми спиральностями, а при больших  $\sqrt{S_{t\bar{t}}}$  - с противоположными
- $pp \rightarrow t\bar{t}X$ ,  $t \rightarrow \ell^+ X$ ,  $\bar{t} \rightarrow \ell^- X$ :  $\Delta\phi_{\ell^+\ell^-}$  чувствительно к наличию поляризации кварков

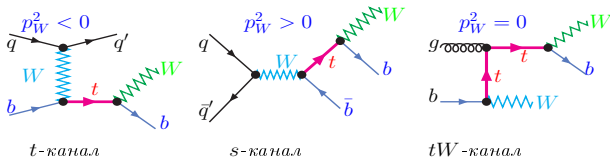


## Электрослабый механизм рождения $t$ -кварков

- сечения “одиночного” рождения  $t$ -кварков за счет EW составляет до 50% от КХД

$$\sigma_{t\text{-chan}}(t + \bar{t}) \simeq 218 \text{ пб}, \quad \sigma_{tW\text{-chan}}(t + \bar{t}) \simeq 70 \text{ пб}, \quad \sigma_{s\text{-chan}}(t + \bar{t}) \simeq 11 \text{ пб}$$

- три типа механизма рождения в зависимости от виртуальности  $W$ -бозона



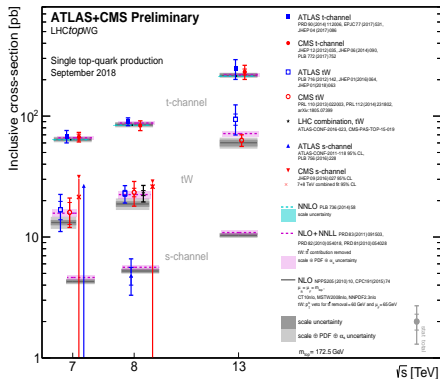
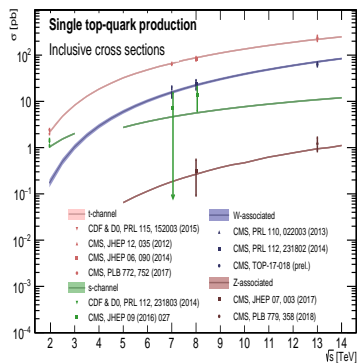
- сечения вычислены с NNLO точностью, при этом NNLO вносит небольшую поправку (взаимное сокращение КХД и EW)
- вычисления можно делать в 4F (без учета вклада начальных  $b$ -кварков) и 5F



$$\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}, \quad \sigma_{t\text{-chan}}(5F_s) = 134.0_{-0.6}^{+0.7} \text{ пб}, \quad \sigma_{t\text{-chan}}(4F_s) = 127.0_{-0.6}^{+2.0} \text{ пб}$$



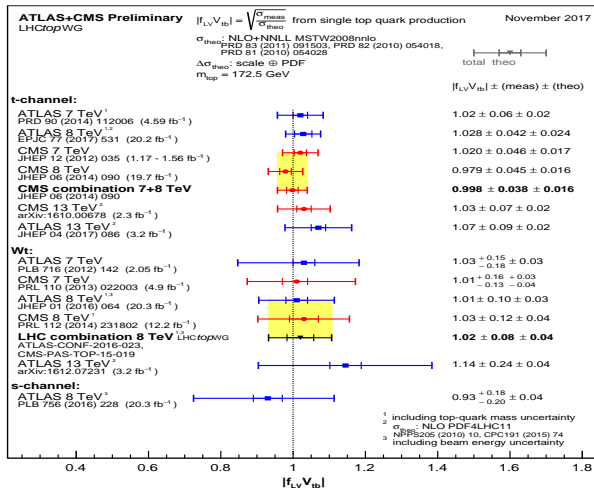
# Электрослабый механизм рождения $t$ -кварков



Измерение параметра  $|V_{tb}|$ 

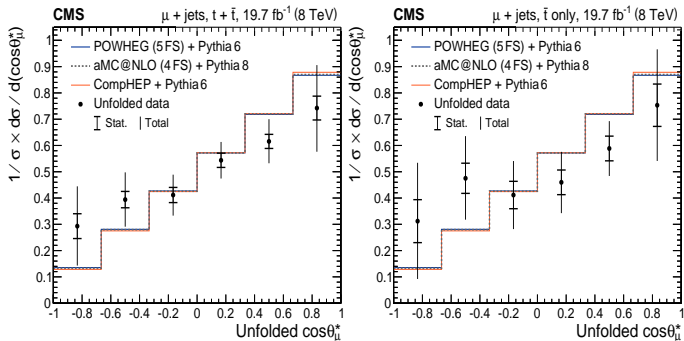
- сечение электрослабого рождения  $t$ -кварка:  $\sigma_{EW}(tX) \propto |V_{tb}|^2$

$$\Rightarrow |V_{tb}|_{EW \text{ top}} = 1.019 \pm 0.028$$



Измерение поляризации  $t$ -кварков

- CMS: поляризация  $t$ -кварка в процессах одиночного рождения:  $bu \rightarrow d t (\rightarrow \ell^+ X)$
- распределения по  $\cos \vartheta_\mu^*$  - между  $\ell^\pm$  от распада  $t$ -кварка и легким кварком
- корреляции спиновых состояний в рождении  $t$ -кварка и в его распаде

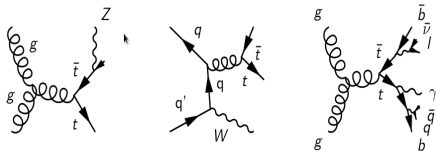


## Рождение $t$ -кварков совместно с $W/Z$ бозонами

процессы рождения  $t\bar{t}$  совместно с векторными бозонами:

$$pp \rightarrow t\bar{t} + Z, t\bar{t} + W^\pm, t\bar{t} + \gamma, \quad \text{CDF} : \sigma(p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}\gamma)_{\sqrt{s}=2 \text{ ТэВ}} = 180 \pm 80 \text{ фб}$$

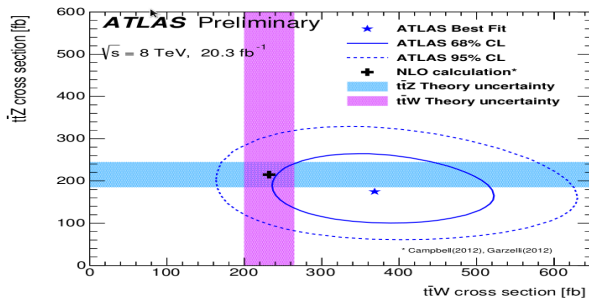
чувствительны к физике за рамками СМ



$\sigma(t\bar{t}V)$	ATLAS ( $\text{фб}$ )	CMS ( $\text{фб}$ )
$\sigma_{t\bar{t}\gamma}(7 \text{ ТэВ})$	$2000 \pm 500(\text{stat}) \pm 700(\text{syst})$	
$\sigma_{t\bar{t}\gamma}(8 \text{ ТэВ})$		$2400 \pm 200(\text{stat}) \pm 600(\text{syst})$
$\sigma_{t\bar{t}Z/\gamma^*}(7 \text{ ТэВ})$	$< 700$	$280^{+140}_{-110}(\text{stat})^{+60}_{-30}(\text{syst})$
$\sigma_{t\bar{t}Z/\gamma^*}(8 \text{ ТэВ})$	$150^{+55}_{-50}(\text{stat}) \pm 21(\text{syst})$	$200 \pm 90(\text{total})$
$\sigma_{t\bar{t}W}(8 \text{ ТэВ})$	$300^{+120}_{-100}(\text{stat})^{+70}_{-40}(\text{syst})$	$170^{+110}_{-100}(\text{total})$

Рождение  $t$ -кварков совместно с  $W/Z$  бозонами

$\sqrt{S} = 8$ ТэВ	$\sigma(\text{CM}), \phi\delta$	ATLAS ( $\phi\delta$ )	CMS ( $\phi\delta$ )
$t\bar{t} + \gamma$	$1880 \pm 500$		
$t\bar{t}Z / \gamma^*$	$215 \pm 30$	$176^{+52}_{-48}(\text{stat}) \pm 24(\text{syst})$	$242^{+65}_{-55}$
$t\bar{t}W$	$232 \pm 32$	$369^{+86}_{-79}(\text{stat}) \pm 44(\text{syst})$	$382^{+117}_{-102}$



# Роль $t$ -кварков в исследовании расширений СМ

- в рамках СМ точность теоретических предсказаний для процессов рождения и распадов  $t$ -кварка составляет доли процента
- $t$ -кварк практически со 100% вероятностью распадается по одному каналу  $t \rightarrow bW$

В поисках проявлений НФ в секторе  $t$ -кварков тестируются все возможности:

- ◇ редкие (в рамках СМ) распады  $t$ -кварков;
- ◇ отклонения в сечениях рождения  $t$ -кварков (в рамках СМ);
- ◇ рождение  $t$ -кварков за счет очень редких реакций в СМ;
- ◇ распады  $t$ -кварков по отсутствующим в СМ каналам;
- ◇ новые частицы, распадающиеся в конечные состояния, содержащие  $t$  и/или  $\bar{t}$ -кварк и, возможно, другие частицы и резонансы.

## Взаимодействия $t$ -кварков за рамками СМ

- Многочисленные расширения СМ  $\implies$  различные предсказания в секторе  $t$ -кварков со своим специфическим набором типов взаимодействий и параметров (констант связи, массы новых объектов)
- Часто различные сценарии  $\implies$  процессы с одинаковыми конечными состояниями
- **Формализм эффективной теории поля** - эффективный (феноменологический)

Лагранжиан  $\mathcal{L}_{EFT}$

калибровочно-инвариантный по отношению к калибровочной группе СМ

Лагранжиан аномальных взаимодействий  $t$ -кварков после спонтанного нарушения симметрии

$$\mathcal{L}_{EFT} = \mathcal{L}_{SM} + \kappa_4 \bar{\psi}_q \hat{O}^{(4)} \psi_t + \frac{\kappa_5}{\Lambda} \bar{\psi}_q \hat{O}^{(5)} \psi_t + \frac{\kappa_6}{\Lambda^2} \bar{\psi}_q \hat{O}^{(6)} \psi_t + \dots$$

где  $\Lambda$  - масштабный параметр НФ,  $\kappa$  - аномальные константы

- Экспериментальные результаты представляются в виде ограничений
  - ◇ на  $\kappa/\Lambda$  - величины аномальных констант взаимодействия
  - ◇ в виде пределов на вероятности редких распадов  $t$ -кварка

## Поиск эффектов новой физики в за рамками СМ

- $g t \bar{t}$
- $t W b$
- $t \rightarrow u(c) + V, V = g, \gamma, Z$
- $t \rightarrow u(c) + H$
- $t \rightarrow b + H^+$

- в рамках СМ отсутствуют на древесном уровне
- сильно подавлены (петлевые вклады), либо отсутствуют (новые частицы, например  $H^\pm$ )
- различные расширения СМ приводят существенному усилению таких процессов
- для поиска, анализа и интерпретации результатов часто используется «модельно-независимый» анализ - феноменологические лагранжианы
- различные модели  $\implies$  одинаковые типы взаимодействий
- вычисления только на древесном уровне
- аномальные константы  $\implies \Lambda = \Lambda_{\text{НФ}} \sim 1 \text{ ТэВ}$  (формфакторы - ?)

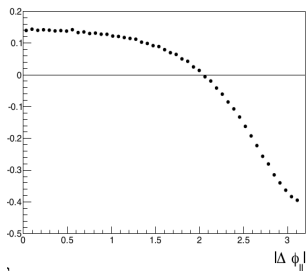


## Исследования взаимодействия $gt\bar{t}$

- отклонения от СМ в  $gt\bar{t}$  взаимодействии может проявиться в распределения по энергиям и углам
- Феноменологический лагранжиан (с аномальным хромомагнитным моментом):

$$\mathcal{L}_{eff} = \mathcal{L}_{SM} - \frac{\tilde{\mu}_t}{2} \bar{\psi}_t \sigma^{\mu\nu} \psi_t G_{\mu\nu}^a$$

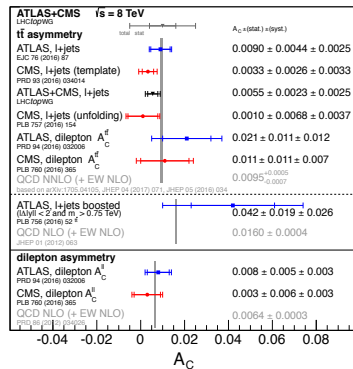
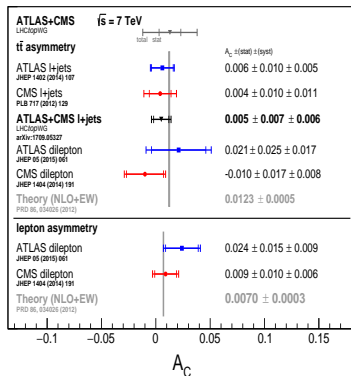
анализ распределения позволил получить ограничение  $-0.50 < Re(\tilde{\mu}_t) < 0.070(95\%CL)$



## Ассиметрия в рождении $t$ и $\bar{t}$ кварков

- асимметрия в рождении  $t$  и  $\bar{t}$  кварков

$$A_C = \frac{N(t) - N(\bar{t})}{N(t) + N(\bar{t})}$$

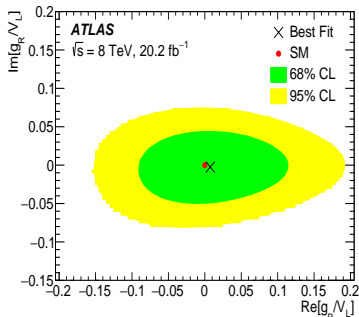
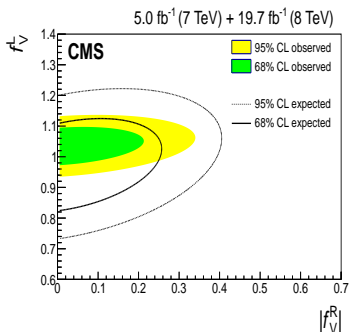


## Аномальное $tWb$ взаимодействие

эффективный Лагранжиан взаимодействия

$$\mathcal{L}_{EFT} = \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \gamma^\mu (f_V^L P_L + f_V^R P_R) t W_\mu^- + \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \frac{\sigma^{\mu\nu}}{2M_W} (f_T^L P_L + f_T^R P_R) t W_{\mu\nu}^- + h.c.$$

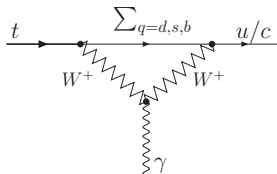
где  $W_{\mu\nu}^- = \partial_\mu W_\nu^- - \partial_\nu W_\mu^-$ , в рамках СМ:  $f_V^L = V_{tb}$ ;  $f_V^R = f_T^L = f_T^R = 0$



$$|f_V^R| < 0.16, \quad |f_T^L| < 0.057, \quad |f_T^R| < 0.048 \quad \text{at 95\% CL}$$

## Нейтральные токи с нарушением аромата $tVq$ - FCNC

FCNC взаимодействия  $tVq$ ,  $V = g, \gamma, Z, H$  сильно подавлены в рамках СМ



	СМ	two-Higgs	SUSY	экзотич. кварки
$BR(t \rightarrow qg)$	$5 \times 10^{-11}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 5 \times 10^{-4}$
$BR(t \rightarrow q\gamma)$	$5 \times 10^{-13}$	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-5}$
$BR(t \rightarrow qZ)$	$\sim 10^{-13}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-4}$	$5 \times \sim 10^{-2}$

## Нейтральные токи с нарушением аромата $tVq$

модельно независимый анализ. Феноменологический Ларганжиан

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{FCNC} = & -e \sum_{q=u,c} \frac{\kappa_q^\gamma}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_q^\gamma + i h_q^\gamma \gamma_5) q A_{\mu\nu} - g_s \sum_{q=u,c} \frac{\kappa_q^g}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} t^a (f_q^g + i h_q^g \gamma_5) q G_{\mu\nu}^a \\ & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_{q=u,c} \kappa_q^Z \bar{t} \gamma^\mu (f_q^Z - h_q^Z \gamma_5) q Z_\mu - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_{q=u,c} \frac{\tilde{\kappa}_q^Z}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (\tilde{f}_q^Z + i \tilde{h}_q^Z \gamma_5) q Z_{\mu\nu} \end{aligned}$$

ширины распадов равны:

$$\begin{aligned} \Gamma(t \rightarrow qg) &= \left( \frac{\kappa_q^g}{\Lambda} \right)^2 \frac{8}{3} \alpha_s m_t^3, & \Gamma(t \rightarrow q\gamma) &= \left( \frac{\kappa_q^\gamma}{\Lambda} \right)^2 2\alpha m_t^3, \\ \Gamma(t \rightarrow qZ)_\gamma &= \left( \kappa_q^Z \right)^2 \frac{\alpha m_t^3}{4M_Z^2 \sin^2 2\theta_W} \left( 1 - \frac{M_Z^2}{m_t^2} \right)^2 \left( 1 + 2 \frac{M_Z^2}{m_t^2} \right), \\ \Gamma(t \rightarrow qZ)_\sigma &= \left( \frac{\tilde{\kappa}_q^Z}{\Lambda} \right)^2 \frac{\alpha m_t^3}{\sin^2 2\theta_W} \left( 1 - \frac{M_Z^2}{m_t^2} \right)^2 \left( 2 + \frac{M_Z^2}{m_t^2} \right) \end{aligned}$$

## Нейтральные токи с нарушением аромата $tq$ , $t\gamma q$ , $tZq$

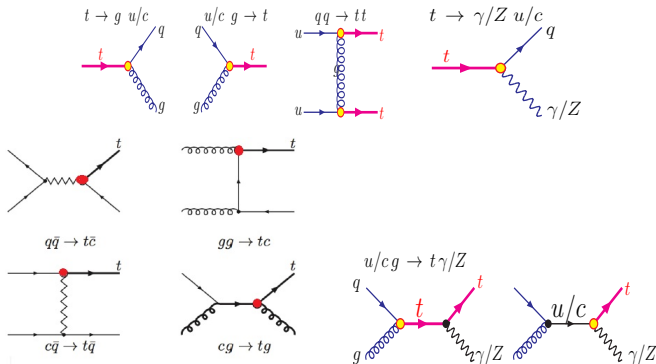
• два метода поиска:

– рождение пары  $t\bar{t}$  (СМ) с последующим поиском редких распадов:

$$pp \rightarrow t\bar{t} : t \rightarrow qg, t \rightarrow q\gamma, t \rightarrow qZ$$

– образование  $t$ -кварков (FCNC-взаимодействие) с выделением СМ-распадов  $t$ -кварка

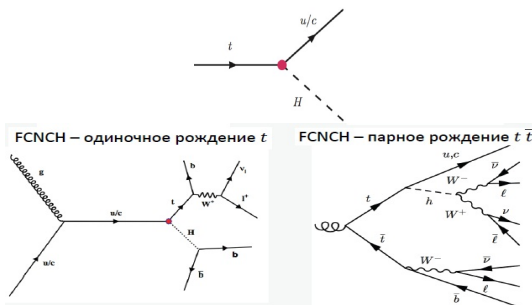
$$g u(c) \rightarrow t; uu \rightarrow tt; cg \rightarrow tg; qg \rightarrow t\gamma/Z, \dots t \rightarrow bW$$



## Нейтральные токи с нарушением аромата $tHq$

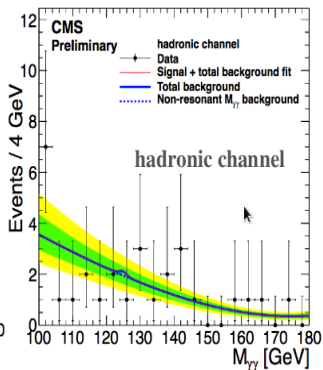
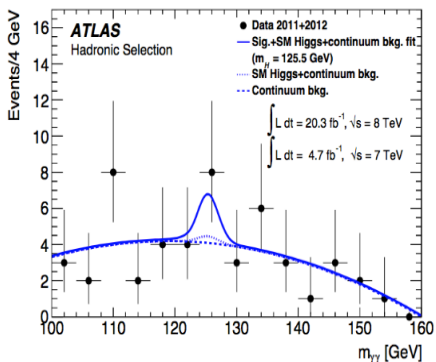
$$t \rightarrow H u/c \rightarrow \text{Higgs} + \text{FCNC} = \text{FCNH}$$

	CM	SUSY	MSSM	2HDM
$BR(t \rightarrow Hc)$	$3 \times 10^{-15}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-3}$
$BR(t \rightarrow Hu)$	$2 \times 10^{-17}$	$10^{-6}$	$8 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$



# Нейтральные токи с нарушением аромата $tHq$

$$pp \rightarrow t\bar{t}, t \rightarrow Hq, H \rightarrow \gamma\gamma$$



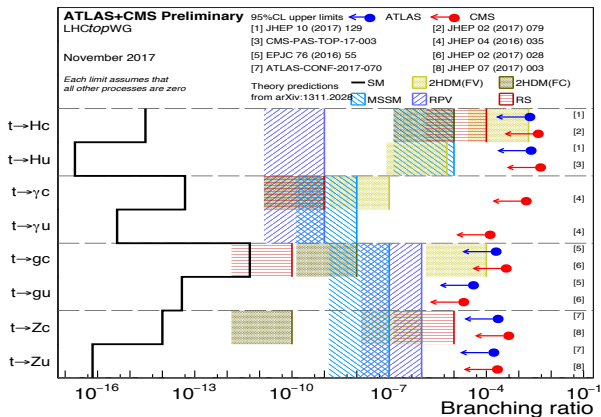


## Нейтральные токи с нарушением аромата $t \rightarrow q H/g/\gamma/Z$

лучшие ограничения (2018) на аномальные FCNC взаимодействия в секторе  $t$ -кварков

канал	$B$ (95% CL)		канал	$B$ (95% CL)	
	ATLAS	CMS		ATLAS	CMS
$t \rightarrow Hu$	$1.9 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-3}$	$t \rightarrow Hc$	$1.6 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-3}$
$t \rightarrow gu$	$4.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$t \rightarrow gc$	$20.0 \times 10^{-5}$	$41 \times 10^{-5}$
$t \rightarrow \gamma u$		$130 \times 10^{-5}$	$t \rightarrow \gamma c$		$170 \times 10^{-5}$
$t \rightarrow Zu$	$17 \times 10^{-5}$	$22 \times 10^{-5}$	$t \rightarrow Zc$	$24 \times 10^{-5}$	$44 \times 10^{-5}$

# Нейтральные токи с нарушением аромата $t \rightarrow q H/g/\gamma/Z$



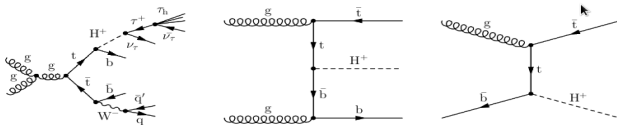
## Вклад $H^\pm$ в редкие процессы с $t$ -кварками

- Лагранжиан взаимодействия заряженного бозона Хиггса  $H^\pm$  в MSSM

$$\mathcal{L} = \frac{g}{\sqrt{2}M_W} H^+ \{ V_{ud} \bar{u} (m_u \text{ctg } \beta P_L + m_d \text{tg } \beta P_R) d + \bar{\nu} (\tan \beta m_\ell P_R) \ell \}, \quad P_{L/R} = 1/2 (1 \mp \gamma^5)$$

- две области масс заряженного бозона

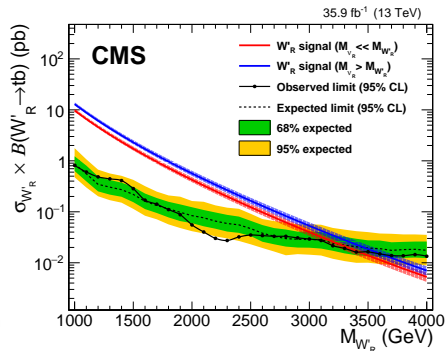
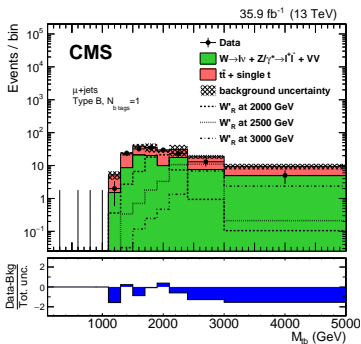
$$m_{H^\pm} = 80 - 160 \text{ ГэВ} : t \rightarrow H^\pm b \quad m_{H^\pm} > 180 \text{ ГэВ} : pp \rightarrow \bar{t} H^\pm b$$



	ATLAS	CMS
$m_H = 80 - 160$		
$B(t \rightarrow H^+ b) B(H^+ \rightarrow \tau \nu)$	0.23 - 1.3%	0.15 - 1.5%
$m_H = 180 - 1000$		
$\sigma(pp \rightarrow \bar{t} H^+) B(H^+ \rightarrow \tau \nu)$	0.76 - 4.5 пб	
$m_H = 180 - 600$		
$\sigma(pp \rightarrow \bar{t} H^+) B(H^+ \rightarrow \tau \nu)$		0.025 - 0.38 пб

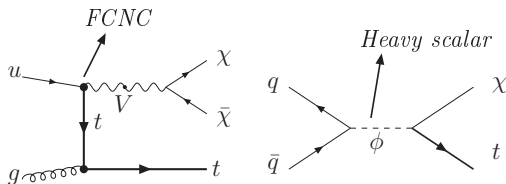
# Поиск тяжелых частиц, распадающихся на $t$ -кварки

- тяжелый заряженный векторный бозон  $W'$

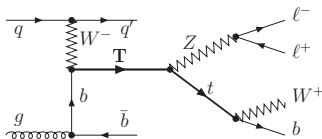


## Поиск новых тяжелых частиц, распадающихся на $t$ -кварки

SUSY теории предсказывают большое количество новых реакций с  $t$ -кварками в конечном состоянии. Одной из характеристик таких реакций является наличие большой “потерянной” энергии, уносимой новой нейтральной частицей. Например, реакции поиска рождения одиночного  $t$ -кварка с большой “потерянной” энергии (т.н. “моно-топ” можно использовать для поиска “темной материи”).

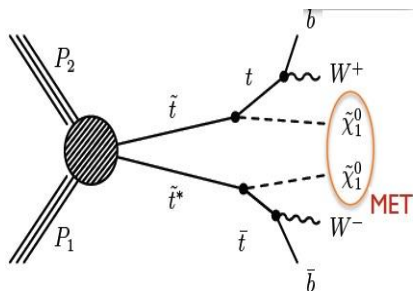


“векторные”  $t$ -кварки ( $T$ ), распадающиеся на обычный  $t$ -кварк и  $Z$ -бозон

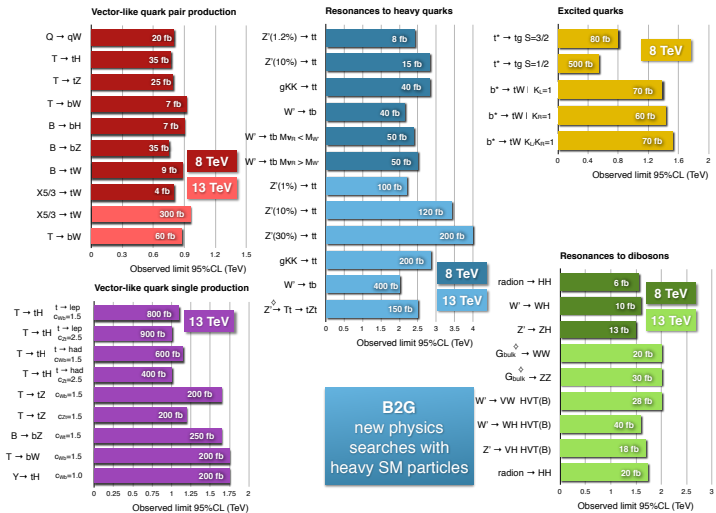


## Поиск тяжелых частиц, распадающихся на $t$ -кварки

Новые частицы могут изменить предсказания СМ. Например SUSY ( $\tilde{t} \rightarrow t \chi_1^0$ ,  $\text{spin}(\tilde{t}) = 0$ )

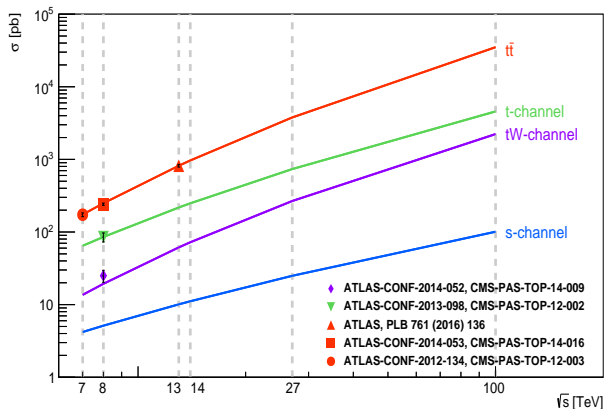


получено ограничение:  $m_t \leq m_{stop} < 195$  ГэВ

Поиск тяжелых частиц, распадающихся на  $t$ -кварки

# Физика $t$ -кварков на будущих адронных коллайдерах

ускоритель	$\sqrt{s}$ , ТэВ	$\mathcal{L}$ , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\int \mathcal{L}$ , $\text{аб}^{-1}$	$\langle \mu \rangle$
LHC	7-13	$\approx 10^{34}$	0.3	10-40
HL-LHC	14	$10^{35}$	3	140-200
HE-LHC	27	$2.5 \times 10^{35}$	12	800
SppC	75	$1.2 \times 10^{35}$	15	400-500
FCC-hh	100	$3 \times 10^{35}$	30	500-1000

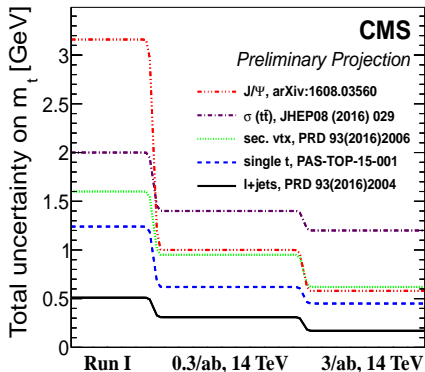




## Физика $t$ -кварков на будущих адронных коллайдерах

ождается существенное уменьшение ошибки в измерении массы  $t$ -кварка

$\int \mathcal{L} dt \phi \delta^{-1}$	30	300	3000
$M_{inv}(b+W)$	0.62	0.44	0.17
"end-point"	1.1	0.60	0.50
$J/\psi$	1.8	0.80	0.60



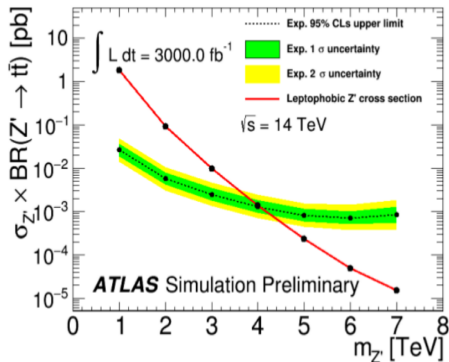
## Физика $t$ -кварков на будущих адронных коллайдерах

для HL-LHC верхние оценки (МК моделирование) для FCNC процессов (при  $3000 \text{ fb}^{-1}$  )

процесс	$\mathcal{B}$ , Run-2	$\mathcal{B}$ , HL-LHC
$t \rightarrow uH$	$49 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$
$t \rightarrow cH$	$16 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$
$t \rightarrow u\gamma$	$130 \times 10^{-5}$	$0.9 \times 10^{-5}$
$t \rightarrow c\gamma$	$170 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-5}$
$t \rightarrow uZ$	$17 \times 10^{-5}$	$13 \times 10^{-5}$
$t \rightarrow cZ$	$24 \times 10^{-5}$	$11 \times 10^{-5}$

## Физика $t$ -кварков на будущих адронных коллайдерах

- Topcolour  $Z'$  :  $pp \rightarrow Z'_0 \rightarrow t\bar{t}$
- ATLAS: будет возможно исключить  $Z'$  для масс  $M(Z'_0) < 4$  ТэВ



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- $t$ -кварк - уникальный объем Стандартной модели
- все свойства (рождение и распады) описываются в рамках т.в. СМ с уникальной точностью ( $d\sigma$ ,  $d\Gamma$ ,  $BR \ll \mathcal{O}(1\%)$ )
- все свойства описываются в рамках СМ без дополнительных феноменологических параметров
- самый тяжелый объект СМ:  $m_t \simeq 173.34$  ГэВ
- связь с другими поколениями очень мала  $|V_{td}| \simeq 0.008$ ,  $|V_{ts}| \simeq 0.04$
- самая большая юкавовская константа связи в СМ

$\implies$   $t$ -кварк – прекрасная лаборатория для поиска Новой физики

- аномальное взаимодействие:  $tWb$ ;  $tHq$ ;  $t g/\gamma/Z q$
- новые тяжелые объекты  $R(t\bar{t})$ ,  $Q \rightarrow tX, \dots$
- ...

Благодарю за внимание !