

**Поиски новой физики в процессах парного
рождения ТОП кварков в эксперименте
АТЛАС.**

Yu. Naryshkin

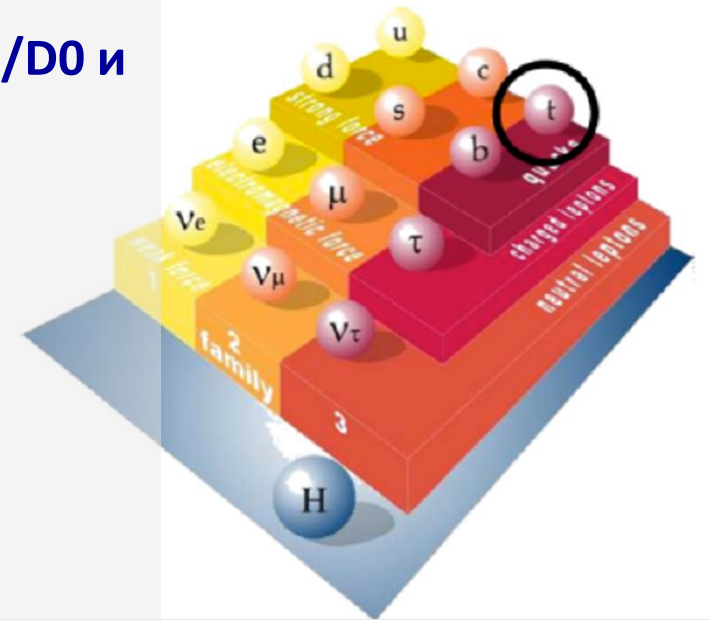
Семинар ОФВЭ ПИЯФ, 25.02.2020

Outline

1. Введение
2. Рождение и распад топ кварка
3. Чем интересен топ кварк?
4. Поиски новой физики без учета спина
5. Поиски новой физики с исследованием спиновых корреляций $t\bar{t}$
6. Заключение

ТОП кварк в СМ: основные свойства

- Открыт в экспериментах CDF/D0 на Тэватроне в 1995 при рождении пар $t\bar{t}$
- Рождение одиночного топ-кварка открыто в 2009 в экспериментах CDF/D0 и подтверждено в экспериментах 2011 ATLAS/CMS на БАК.
- Топ кварк является самой тяжелой из всех открытых частиц:
$$m_T = 173.0 \pm 0.4 \text{ ГэВ}$$
- Имеет малое время жизни:
$$\tau_t = 5 \times 10^{-25} \text{ с}$$
- В pp -взаимодействиях топ кварк рождается, в основном парами ($t\bar{t}$) в сильном взаимодействии или один за счет слабого взаимодействия.

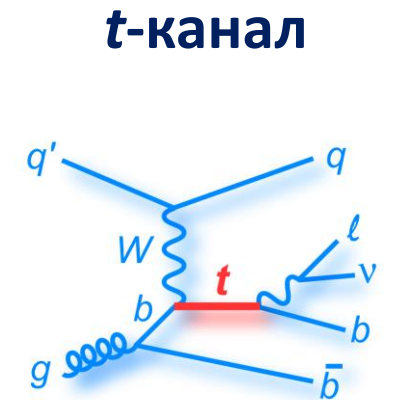
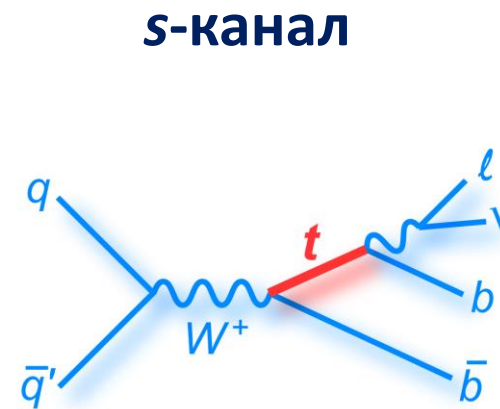
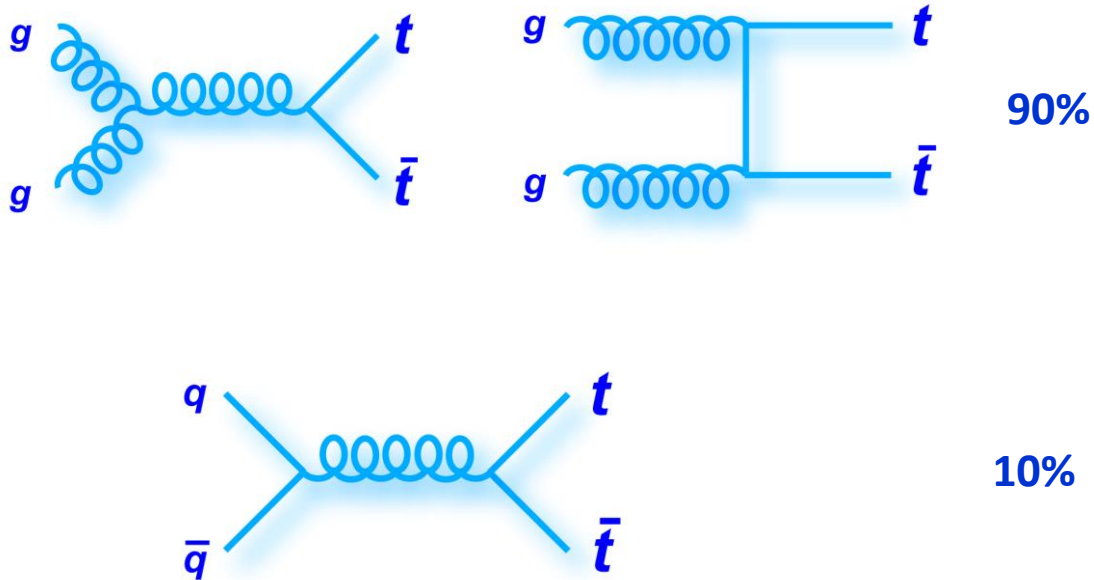


ТОП кварк в СМ: рождение

В pp-взаимодействиях на БАК топ кварк рождается:

парами ($t\bar{t}$) в сильном взаимодействии

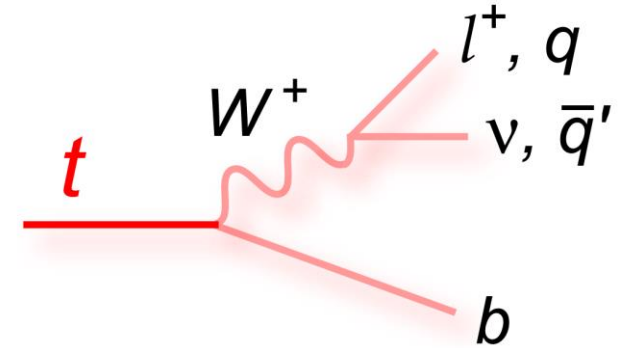
одиночное рождение за счет слабого взаимодействия



ТОП кварк в СМ: распад

Основной канал распада на W -бозон и b -кварк:

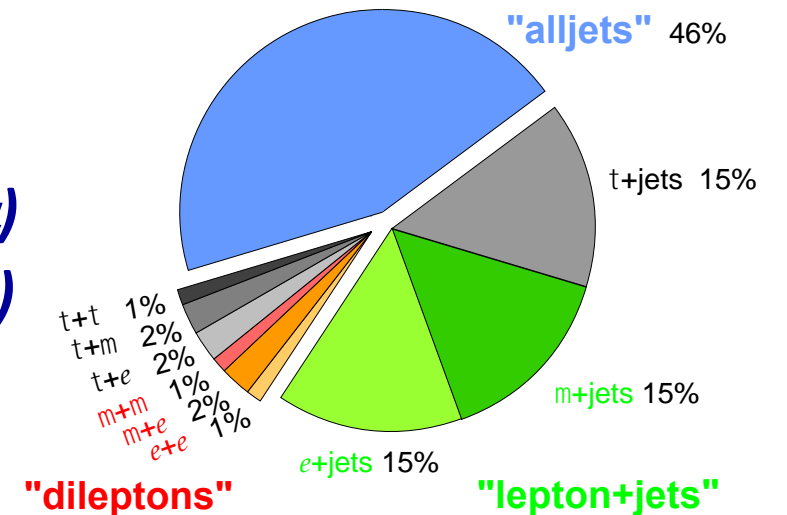
$$t \rightarrow Wb \quad (99.8\%)$$



Конечные состояния для $t\bar{t}$ событий:

all jets:	6 jets	46%
"lepton+jets":	1 lepton + 4 jets + E_T^{miss}	30% (e, μ)
"dileptons":	2 leptons + 2 jets + E_T^{miss}	4% (e, μ)

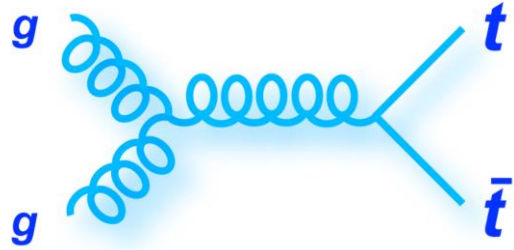
Top Pair Branching Fractions



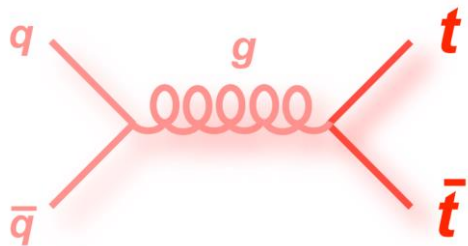
Чем интересен ТОП кварк?

- Распадается до адронизации (маленькое время жизни), тем самым позволяя прямо изучать его свойства
- Продукты распада топ-кварка несут полную информацию о его спине
- Прямое измерение элемента матрицы CKM $|V_{tb}|$
- Проверка pQCD в NNLO, определение PDFs протона.
- Поиски "новой физики": темная материя, новые бозоны Хиггса, дополнительные измерения, векторные кварки, техницвет, SUSY, EFT
- Рождение пар $t\bar{t}$ является одним из основных фоновых процессов при поисках "новой физики".

Матрица плотности $t\bar{t}$



$$g(p_1) + g(p_2) \rightarrow t(k_1, s_1) + \bar{t}(k_2, s_2)$$



$$q(p_1) + \bar{q}(p_2) \rightarrow t(k_1, s_1) + \bar{t}(k_2, s_2)$$

Матрица плотности для этих процессов может быть записана в виде:

$$R_{\alpha_1 \alpha_2, \beta_1 \beta_2}^{pr} = \bar{\Sigma} \langle t(k_1, \alpha_2), \bar{t}(k_2, \beta_2) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle^* \times \langle t(k_1, \alpha_1), \bar{t}(k_2, \beta_1) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle$$

$pr \equiv a, b = gg, q\bar{q}$ - механизмы рождения $t\bar{t}$ -пар
 $t(k_1, \alpha_2), \bar{t}(k_2, \beta_2)$ - волновые функции топ, анти-топ кварков

α, β - helicity топ и анти-топ кварков.

Усреднение проводится по всем спиновым и цветовым состояниям начальных глюонов (кварков).

Bernreuther, Heisler, Si, JHEP 1512, 026 (2015)

Матрица плотности $t\bar{t}$

$$R_{\alpha_1\alpha_2,\beta_1\beta_2}^{pr} = \bar{\Sigma} \langle t(k_1, \alpha_2), \bar{t}(k_2, \beta_2) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle^* \times \langle t(k_1, \alpha_1), \bar{t}(k_2, \beta_1) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle$$

Матрицу R_I можно записать в виде:

$$R_{pr} = f_{pr} \left[A^{Pr} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} + \tilde{B}_i^{pr+} \sigma^i \otimes \mathbf{I} + \tilde{B}_i^{pr-} \mathbf{I} \otimes \sigma^i + \tilde{C}_{ij}^{pr} \sigma^i \otimes \sigma^j \right]$$

$$f_{gg} = \frac{(4\pi\alpha_s)^2}{N_c(N_c^2-1)} \quad f_{q\bar{q}} = \frac{(N_c^2-1)(4\pi\alpha_s)^2}{N_c^2}$$

где: σ^i - матрицы Паули

N_c - число цветных состояний

\mathbf{I} - единичные матрицы

A - неполяризованное сечение

$\tilde{B}_i^{I\pm}, \tilde{C}_{ij}^I$ - поляризация и коэффициенты корреляции

B_a, B_b - поляризация ($a, b = k, r, n$)

$C(a, b)$ - коэффициенты корреляции

(+) (-) обозначения для топ анти-топ кварков

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

Bernreuther, Heisler, Si, JHEP 1512, 026 (2015)

Матрица плотности $t\bar{t}$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$



Определяет неполяризованное сечение (кинематические распределения e.g. $mt\bar{t}$ distribution etc.)

- проверка КХД вычислений
- поиски "новой физики":
 - Новые тяжелые бозоны Хиггса
 - Темная материя
 - Техницвет (topcolor)
 - Дополнительные измерения

Поиск $t\bar{t}$ -резонансов: *heavy* Higgs A/H

Расширения Стандартной модели, как например 2HDM (двухдублетная Хиггсовская модель), предсказывает новые бозоны Хиггса: CP-четные h и H , CP-нечетный псевдоскаляр A , заряженные H^\pm , H .

➤ Исследовался канал распада:
 $t(\bar{t}) \rightarrow bW(l\nu) + bW(\text{hadr.})$

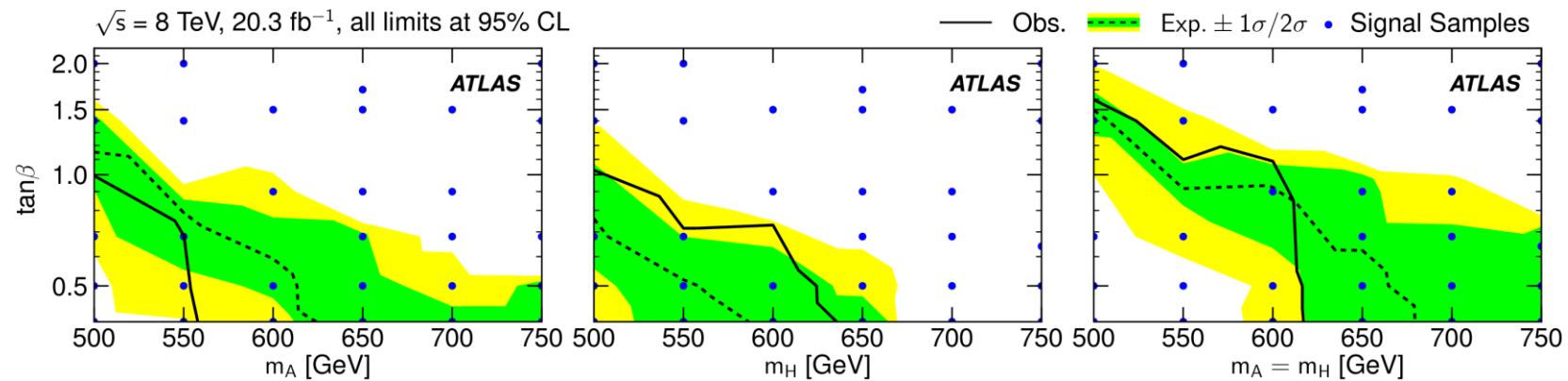
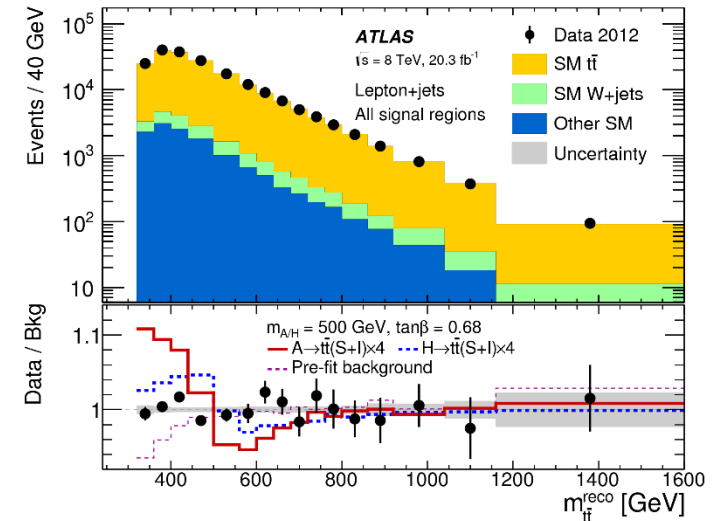
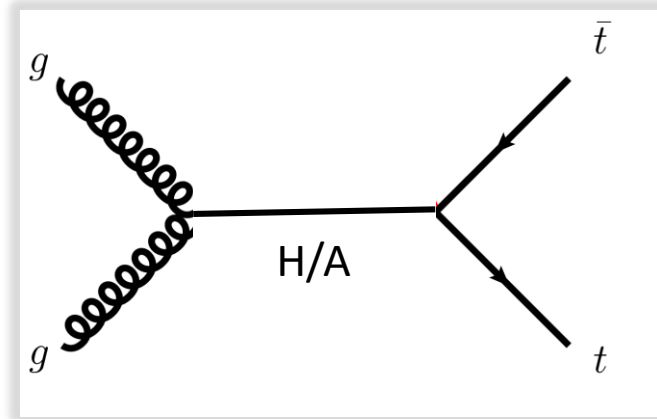
➤ Данные 2012 ($\sqrt{s}=8$ ТэВ) 20.3 fb^{-1}

➤ События с одним лептоном, 4 струями и недостающей поперечной энергией

➤ Анализировался спектр по инвариантной массе пар $t(\bar{t})$

Отклонений от СМ не обнаружено.

Получены верхние пределы на параметры 2HDM: $\tan\beta$, m_A , m_H



[Phys. Rev. Lett. 119 \(2017\) 191803](https://arxiv.org/abs/1705.08020)

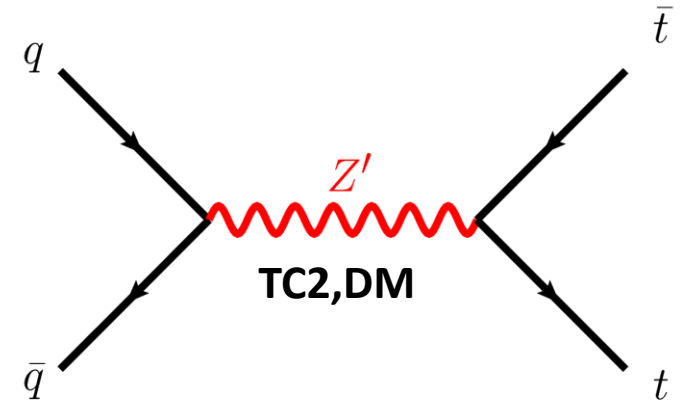
Поиск $t\bar{t}$ -резонансов: Z' DM и TC2

Поиски “тёмной материи” и “техницвета”

поиск ТМ на БАК: моно- X , ассоциативное рождение, поиски “темного” медиатора (например Z').

Для интерпретации использовались упрощенные модели с векторным или аксиально векторным медиатором (5 параметров). arXiv:1703.05703

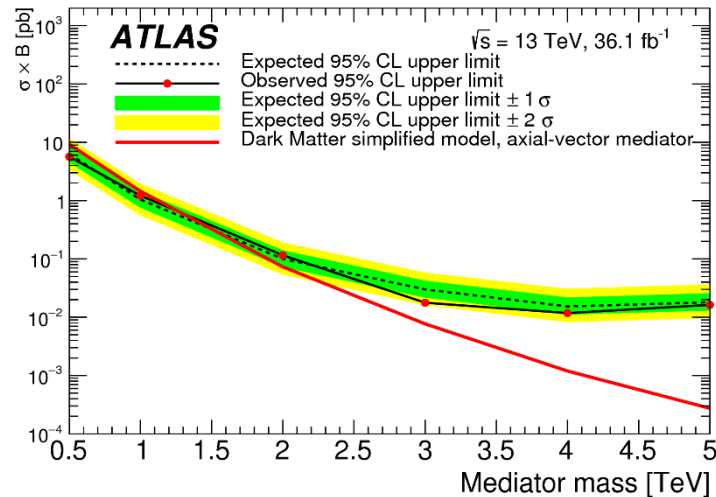
Техницвет TC2 (топколор): т.н. “лептофобный” бозон, который является связанным состоянием топ и анти-топ кварков и взаимодействует только с кварками первого (d,u) и третьего поколения (b,t) (3 параметра). В этой модели новый бозон играет роль бозона Хиггса *SM Phys. Rev. D 49 (1994) 4454, Phys. Lett. B 345 (1995) 483*



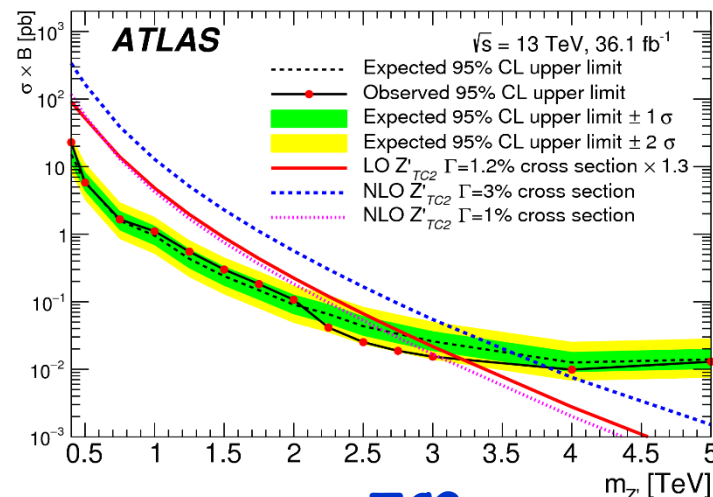
Eur. Phys. J. C 78 (2018) 565

Поиск $t\bar{t}$ -резонансов: Z' (TC2) и DM

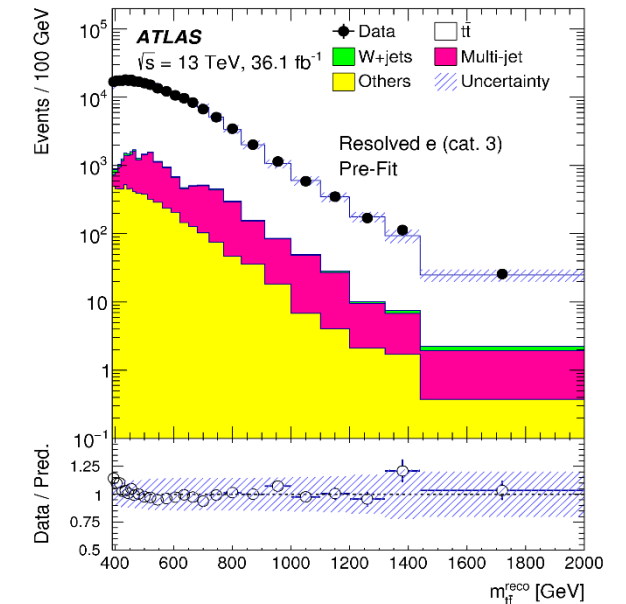
- Исследовался канал распада: "лептон+струи"
- События с одним лептоном, 4 струями и недостающей поперечной энергией
- Данные 2015,2016 ($\sqrt{s}=13$ ТэВ) 36.1 fb^{-1}
- Анализировался спектр по инвариантной массе пар $t(\bar{t})$



DM



TC2



Получены пределы: $m_{Z'}(TC2) < 3.2 \text{ ТэВ}$, $m_{Z'}(DM) < 1.4 \text{ ТэВ}$

[Eur. Phys. J. C 78 \(2018\) 565](#)

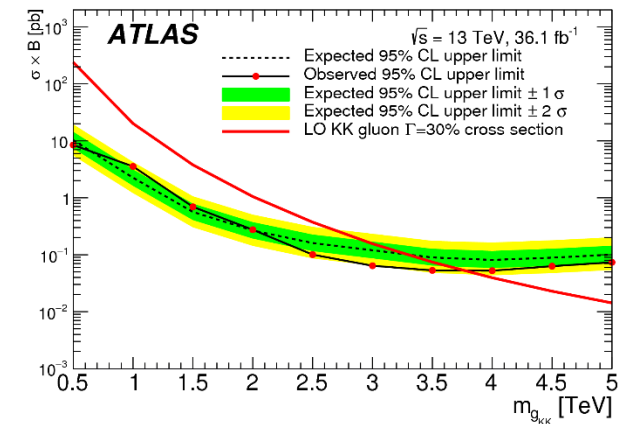
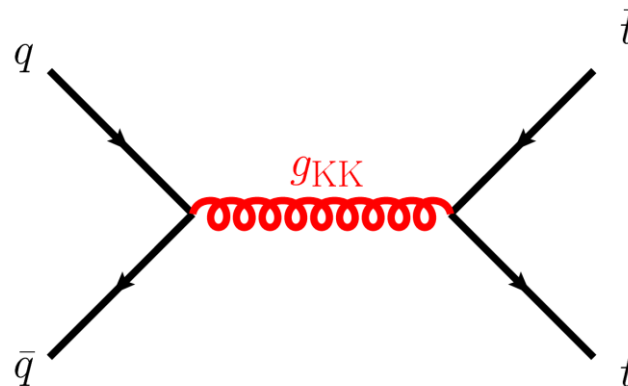
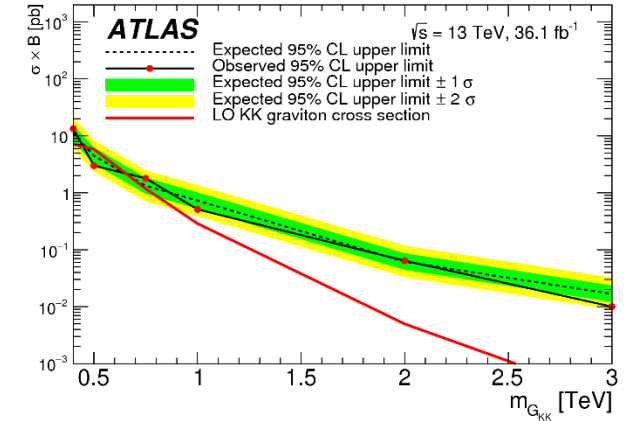
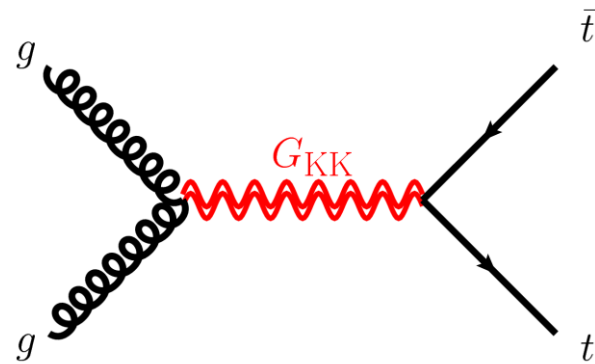
Поиск $t\bar{t}$ - резонансов: G_{KK} - гравитон и g_{KK} — ГЛЮОН

Модели дополнительных измерений: Randall-Sundrum (RS1). В модели - две "браны" (гиперповерхности), на одной - три взаимодействия (SM) на другой - гравитация.

Поиски первого возбужденного состояния KK - гравитона G_{KK} и KK - глюона g_{KK}

- Исследовался канал распада: $t(\bar{t}) \rightarrow bW(l\nu) + bW(hadr.)$
- Данные 2012 ($\sqrt{s}=8$ ТэВ) 20.3 fb^{-1}
- Анализировался спектр по инвариантной массе пар $t(\bar{t})$

Пределы на массы KK гравитона $m_{G_{KK}}$ [0.45, 0.65] ТэВ и KK глюона $m_{g_{KK}} < 3.8$ ТэВ (15%), $m_{g_{KK}} < 3.7$ ТэВ (30%)

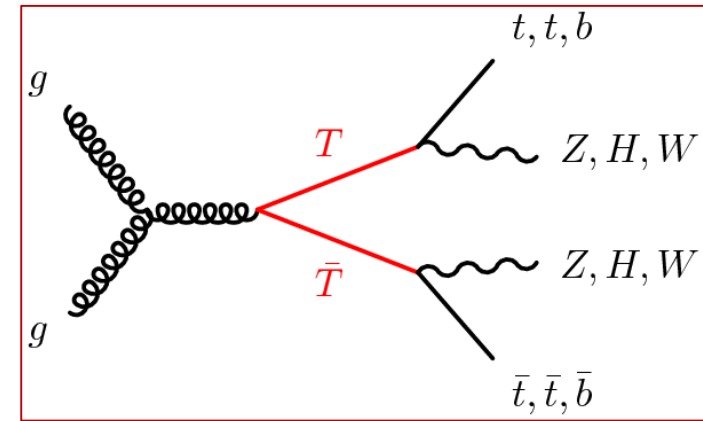


[Eur. Phys. J. C 78 \(2018\) 565](#)

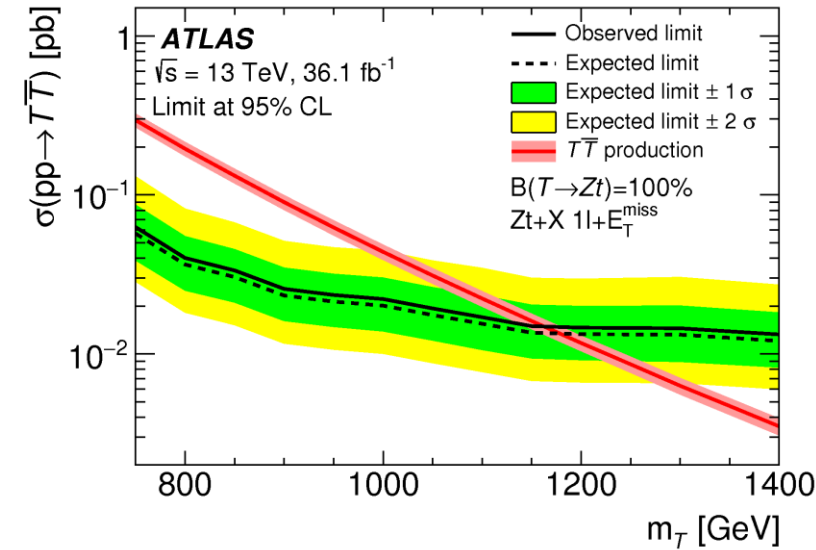
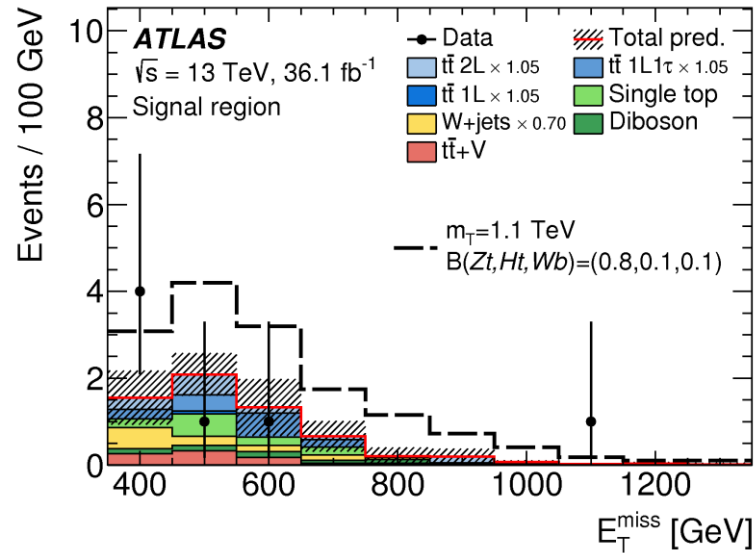
Vector like t-quarks

Модели "малого Хиггса" и "составного Хиггса"
 Векторные кварки взаимодействуют только через векторный ток

Поиск векторного партнера топ кварка с зарядом $+3/2$



- Исследовался канал распада лептон+струи (одним лептоном, 4 струями и недостающей поперечной энергией):
 $t(\bar{t}) \rightarrow bW(l\nu) + bW(hadr.)$
- Данные 2012 ($\sqrt{s}=8$ ТэВ) 20.3 fb^{-1}
- Анализировался спектр по "недостающей" поперечной энергии.



	наблюдаемый	ожидаемый
$T \rightarrow Zt$	1.16 ТэВ	1.17 ТэВ

[JHEP 08 \(2017\) 052](#)

Сечение рождения пар $t\bar{t}$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d^2\sigma}{d\cos\theta_a^+ d\cos\theta_b^-} = \frac{1}{4} (1 + B_a^+ \cos\theta_a^+ + B_b^- \cos\theta_b^- - C(a,b) \cos\theta_a^+ \cos\theta_b^-)$$

B_a, B_b - поляризация ($a, b = k, r, n$)

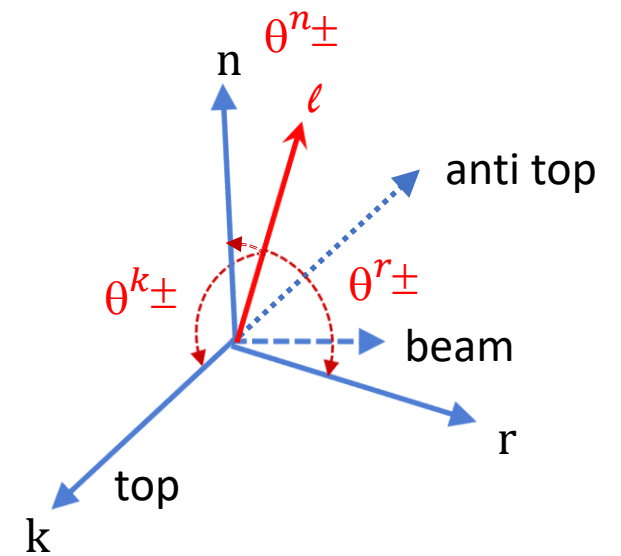
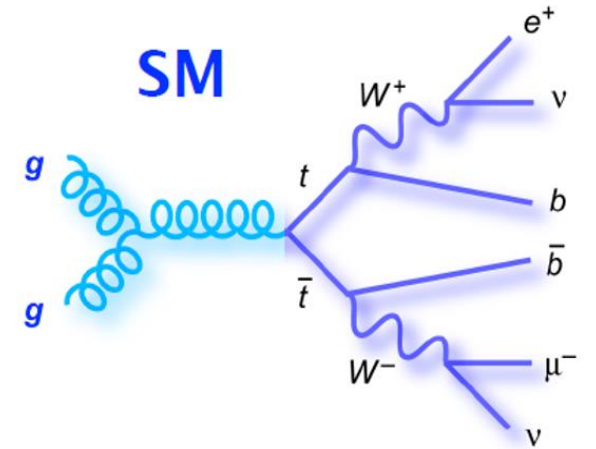
$C(a, b)$ - коэффициенты корреляции

(+) (-) обозначения для топ анти-топ кварков

θ_a, θ_b - углы между импульсом лептона от распада W -бозона и импульсом топ кварка в системе покоя топ кварка

$$B_a = 3 \langle \cos\theta_a \rangle$$

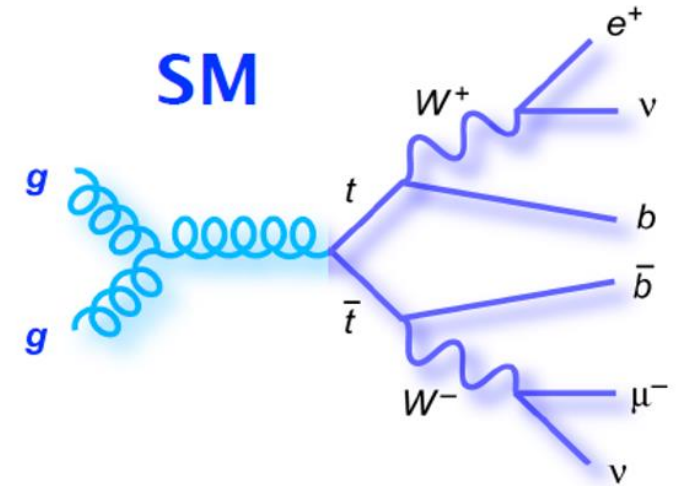
$$C(a, b) = -9 \langle \cos\theta_a^+ \cos\theta_b^- \rangle$$



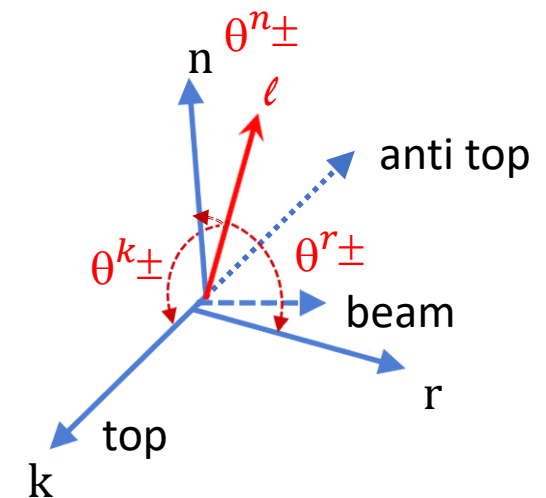
Спиновая матрица плотности $t\bar{t}$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

- Анализ данных проводится в “дилептонном” канале ($e\mu$)
- Кинематика топ кварка реконструируется т.н. “neutrino weighted” методом.
- Вычисляются “наблюдаемые”, которые “связаны” с коэффициентами корреляции.
- Наблюдаемые вычисляются с помощью распределений по \cos углов между импульсом лептона от распада W -бозона и осями в ортонормированном базисе и в системе с.ц.м. $t\bar{t}$ кварков.
- Считается, что спин топ кварка направлен по его импульсу
- Полученные наблюдаемые поправляются на аксептанс детектора (unfolding) (для анализа на “партонном” уровне и уровне стабильных частиц)
- Наблюдаемые сравниваются с МС расчетами, полученными на основе СМ.



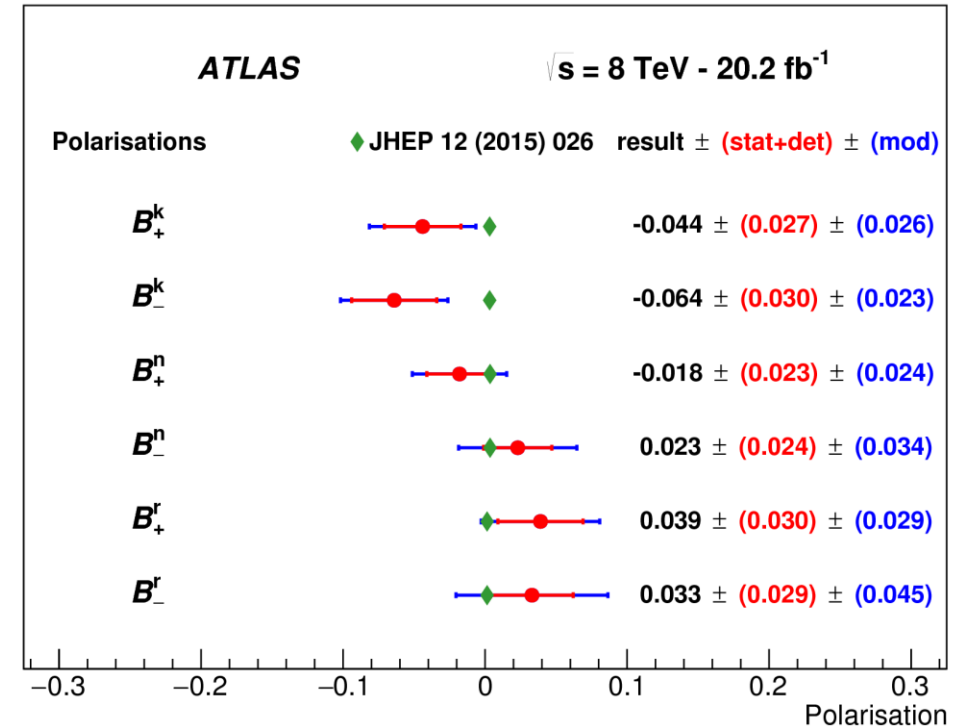
Ортонормированный базис: $\{k, r, n\}$



Спиновая матрица плотности $t\bar{t}$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

- Стандартная модель предсказывает нулевую поляризацию.
- Отличие поляризации от 0 – намек на “новую физику”, например существование **НОВЫХ ТЯЖЕЛЫХ РЕЗОНАНСОВ** (arXiv:0911.3622).
- По результатам LHC Run I при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ для полной светимости 20.2 фб⁻¹ отклонения от СМ не обнаружено.



Спиновая матрица плотности $t\bar{t}$

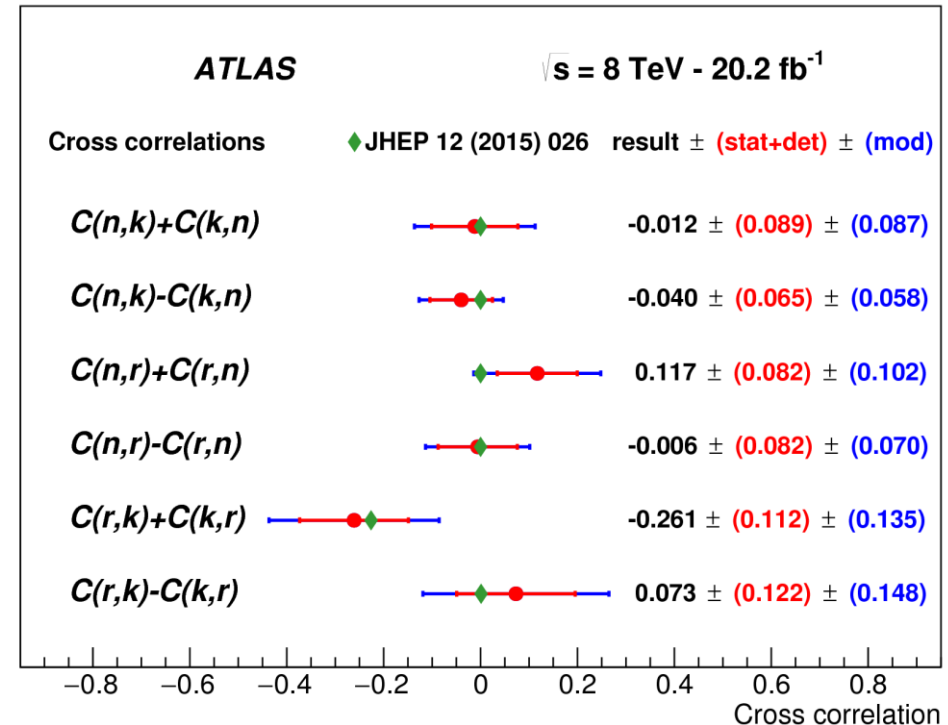
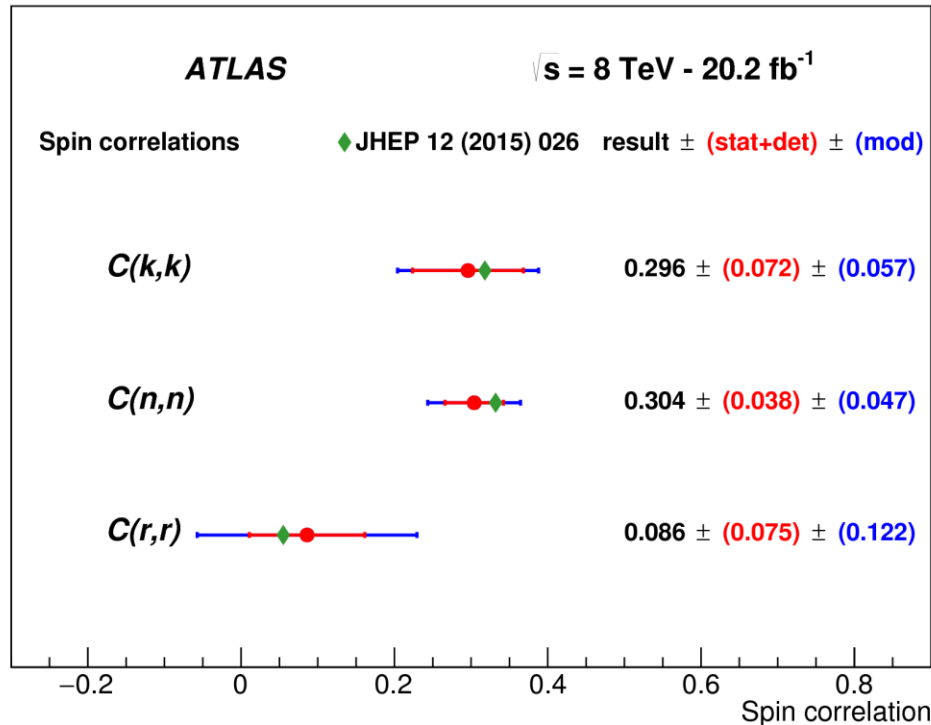
$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} & & \\ & \mathbf{x} & \\ & & \mathbf{x} \end{pmatrix}$$

spin correlation

$$\begin{pmatrix} & \mathbf{x} & \mathbf{x} \\ \mathbf{x} & & \mathbf{x} \\ \mathbf{x} & \mathbf{x} & \end{pmatrix}$$

cross correlation

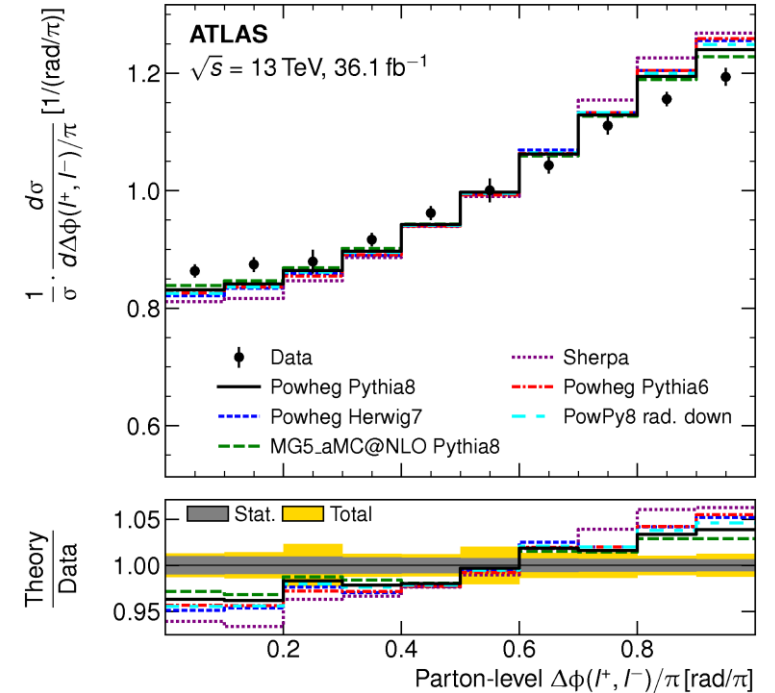


Корреляция спинов топ и анти топ кварков

Двойная спиновая асимметрия:

$$A = \frac{N_{like} - N_{unlike}}{N_{like} + N_{unlike}} = \frac{N(\uparrow\uparrow) + N(\downarrow\downarrow) - N(\uparrow\downarrow) - N(\downarrow\uparrow)}{N(\uparrow\uparrow) + N(\downarrow\downarrow) + N(\uparrow\downarrow) + N(\downarrow\uparrow)}$$

- Для определения корреляций используются распределения по переменным: $\Delta\phi$ и $\Delta\eta$
- Полученные корреляции сравниваются с предсказаниями *СМ* и расширений *СМ*.
- Для сравнения со *СМ* моделируются события с учетом спиновых корреляций (x_{spin}) и без их учета (x_{nospin}).



- Нормированное сечение для данных фитируется как функция f_{SM} в i -ом бине:

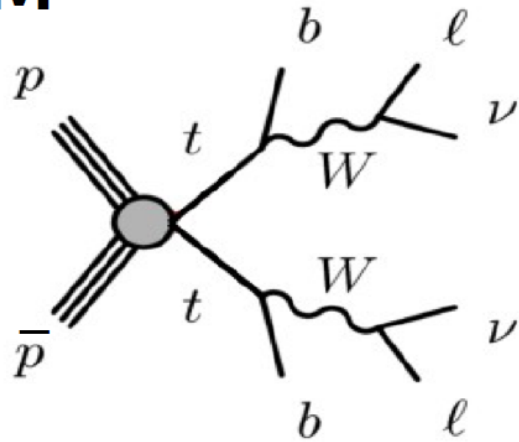
$$x_i = f_{SM} \cdot x_{spin,i} + (1 - f_{SM}) \cdot x_{nospin,i} \quad f_{SM} - \text{доля «СМ-подобных» корреляций}$$

- По результатам части Run II (36.1 фб⁻¹): $f_{SM} = 1,249 \pm 0,024 (stat) \pm 0,061 (syst) \pm 0,040 (theory)$

SUSY interpretation: $\tilde{t} \rightarrow t \tilde{\chi}_1^0$

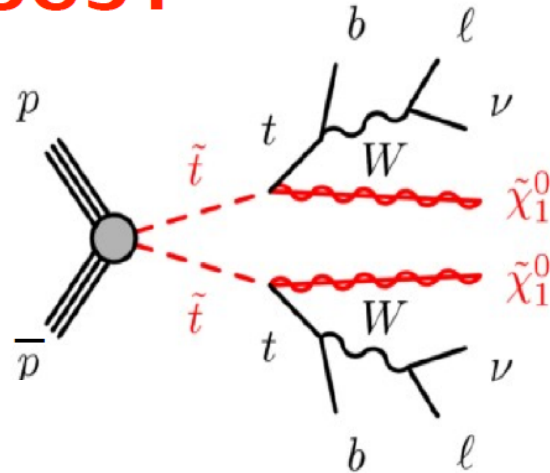
- Суперсимметричный партнер топ кварка топ скварк (или стоп кварк) \tilde{t}
- спин \tilde{t} кварка = 0 \Rightarrow отсутствие корреляций при рождении $t\bar{t}$

SM

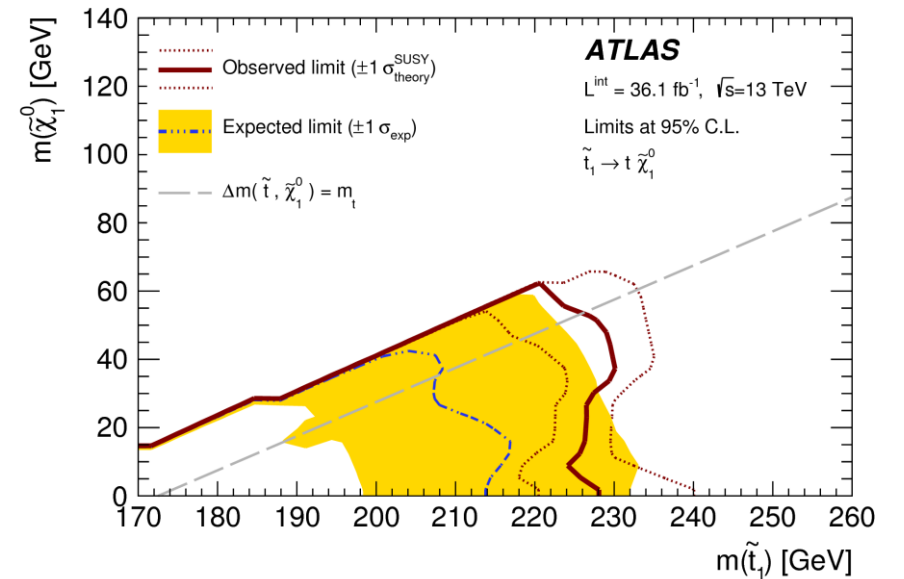
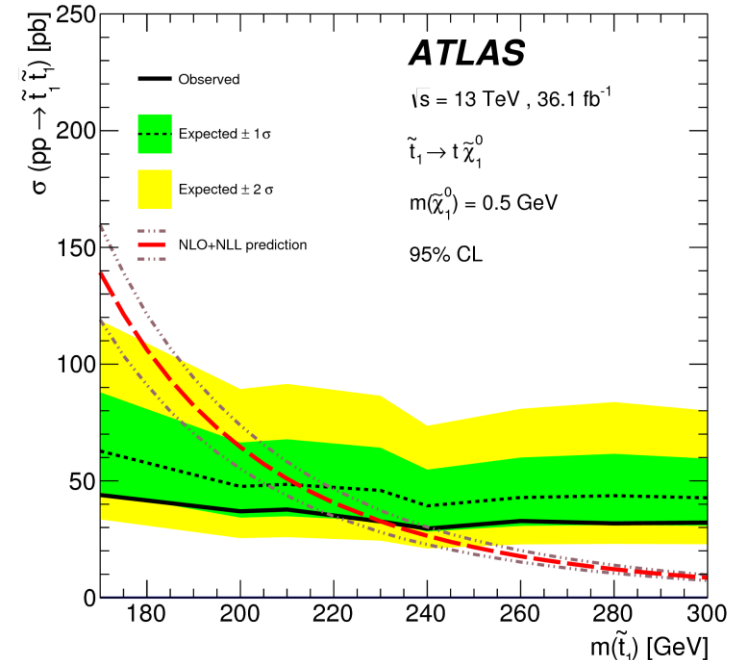


\rightarrow SM spin correlation

SUSY



\rightarrow no spin correlation



Новая физика и спиновые корреляции

Гравитон: спин RS гравитона = 2 \Rightarrow сильные корреляции
 $t\bar{t}$ пар в области массового пика в процессе: $G^{(1)} \rightarrow t\bar{t}$

Такая интерпретация на БАК в ATLAS пока не проводилась

outline

- Топ-кварк является уникальным объектом для поиска явлений новой физики, поиски которых проходят на БАК: новые тяжелые бозоны Хиггса, темная материя, SUSY ...
- К настоящему моменту по результатам Run I и части Run II отклонений от предсказаний СМ не обнаружено
- В настоящее время в ATLAS и CMS проводится анализ данных всего Run II (ATLAS 139 fb⁻¹)

Backup

Backgrounds

- The main backgrounds for production $t\bar{t}$ study are:

- Single top production in the Wt channel:

- Drell-Yan process (γ^*/Z) with additional jets:

- Diboson production (WW , ZZ and WZ):

- Fake background coming from processes with non-prompt leptons

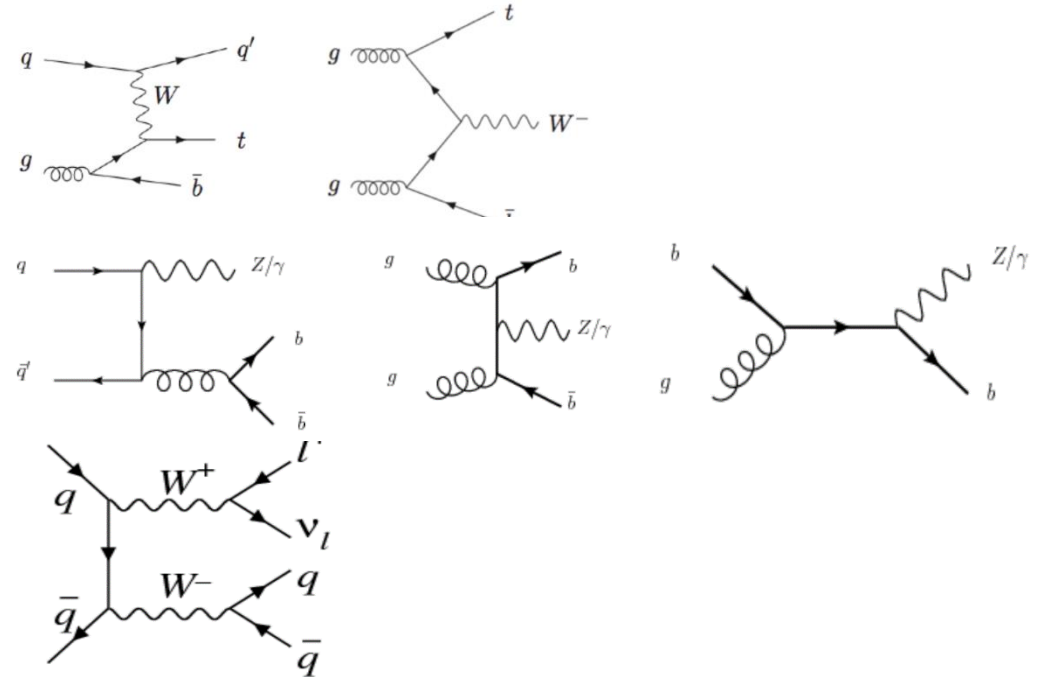


Table 1: Observables and their corresponding measured coefficients, production spin density matrix coefficient functions, and P and CP symmetry properties. For the laboratory-frame asymmetries shown in the last two rows, there is no direct correspondence with the coefficient functions.

Observable	Measured coefficient	Coefficient function	Symmetries
$\cos \theta_1^k$	B_1^k	b_k^+	P-odd, CP-even
$\cos \theta_2^k$	B_2^k	b_k^-	P-odd, CP-even
$\cos \theta_1^r$	B_1^r	b_r^+	P-odd, CP-even
$\cos \theta_2^r$	B_2^r	b_r^-	P-odd, CP-even
$\cos \theta_1^n$	B_1^n	b_n^+	P-even, CP-even
$\cos \theta_2^n$	B_2^n	b_n^-	P-even, CP-even
$\cos \theta_1^{k*}$	B_1^{k*}	b_k^+	P-odd, CP-even
$\cos \theta_2^{k*}$	B_2^{k*}	b_k^-	P-odd, CP-even
$\cos \theta_1^{r*}$	B_1^{r*}	b_r^+	P-odd, CP-even
$\cos \theta_2^{r*}$	B_2^{r*}	b_r^-	P-odd, CP-even
$\cos \theta_1^k \cos \theta_2^k$	C_{kk}	c_{kk}	P-even, CP-even
$\cos \theta_1^r \cos \theta_2^r$	C_{rr}	c_{rr}	P-even, CP-even
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^n$	C_{nn}	c_{nn}	P-even, CP-even
$\cos \theta_1^r \cos \theta_2^k + \cos \theta_1^k \cos \theta_2^r$	$C_{rk} + C_{kr}$	c_{rk}	P-even, CP-even
$\cos \theta_1^r \cos \theta_2^k - \cos \theta_1^k \cos \theta_2^r$	$C_{rk} - C_{kr}$	c_n	P-even, CP-odd
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^r + \cos \theta_1^r \cos \theta_2^n$	$C_{nr} + C_{rn}$	c_{nr}	P-odd, CP-even
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^r - \cos \theta_1^r \cos \theta_2^n$	$C_{nr} - C_{rn}$	c_k	P-odd, CP-odd
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^k + \cos \theta_1^k \cos \theta_2^n$	$C_{nk} + C_{kn}$	c_{kn}	P-odd, CP-even
$\cos \theta_1^n \cos \theta_2^k - \cos \theta_1^k \cos \theta_2^n$	$C_{nk} - C_{kn}$	$-c_r$	P-odd, CP-odd
$\cos \varphi$	D	$-(c_{kk} + c_{rr} + c_{nn})/3$	P-even, CP-even
$\cos \varphi_{\text{lab}}$	$A_{\cos \varphi}^{\text{lab}}$	—	—
$ \Delta \phi_{\ell\ell} $	$A_{ \Delta \phi_{\ell\ell} }$	—	—

observables

Expectation values	NLO predictions	Observables
B_+^k	0.0030 ± 0.0010	$\cos \theta_+^k$
B_-^k	0.0034 ± 0.0010	$\cos \theta_-^k$
B_+^n	0.0035 ± 0.0004	$\cos \theta_+^n$
B_-^n	0.0035 ± 0.0004	$\cos \theta_-^n$
B_+^r	0.0013 ± 0.0010	$\cos \theta_+^r$
B_-^r	0.0015 ± 0.0010	$\cos \theta_-^r$
$C(k, k)$	0.318 ± 0.003	$\cos \theta_+^k \cos \theta_-^k$
$C(n, n)$	0.332 ± 0.002	$\cos \theta_+^n \cos \theta_-^n$
$C(r, r)$	0.055 ± 0.009	$\cos \theta_+^r \cos \theta_-^r$
$C(n, k) + C(k, n)$	0.0023	$\cos \theta_+^n \cos \theta_-^k + \cos \theta_+^k \cos \theta_-^n$
$C(n, k) - C(k, n)$	0	$\cos \theta_+^n \cos \theta_-^k - \cos \theta_+^k \cos \theta_-^n$
$C(n, r) + C(r, n)$	0.0010	$\cos \theta_+^n \cos \theta_-^r + \cos \theta_+^r \cos \theta_-^n$
$C(n, r) - C(r, n)$	0	$\cos \theta_+^n \cos \theta_-^r - \cos \theta_+^r \cos \theta_-^n$
$C(r, k) + C(k, r)$	-0.226 ± 0.004	$\cos \theta_+^r \cos \theta_-^k + \cos \theta_+^k \cos \theta_-^r$
$C(r, k) - C(k, r)$	0	$\cos \theta_+^r \cos \theta_-^k - \cos \theta_+^k \cos \theta_-^r$

Table 1: List of the observables and corresponding expectation values measured in this analysis. The SM predictions at NLO are also shown [19]; expectation values predicted to be 0 at NLO are exactly 0 due to term cancellations. The expectation values can be obtained from the corresponding observables using the relations from Equations (2) and (4). The uncertainties on the predictions refer to scale uncertainties only; values below 10^{-4} are not quoted.

Neutrino weighted method.

- 1. Кинематика события рождения пар $t\bar{t}$ реконструируется не полностью, известны только импульсы двух лептонов и b -струй и недостающая поперечная энергия $E_T^{miss} \Rightarrow$ для полной реконструкции события необходимо восстановить импульсы обоих нейтрино.
- 2. Фиксируя массу W -бозона и топ кварка ($m_W = 81$ ГэВ, $m_{top} = 172.5$ ГэВ) получаем следующие уравнения:

$$(p_l + p_\nu)^2 = m_W^2$$
$$(p_l + p_\nu + p_b)^2 = m_{top}^2$$

где p_l, p_ν, p_b - четырех импульсы лептона, нейтрино и b -струи

- сканируем псевдо быстру (η) для нейтрино в интервале $-5,5$ с шагом 0.2 , для каждого значения η , с использованием уравнений представленных выше, вычисляем импульс нейтрино, для t и $t\bar{t}$ кинематики.
- Определяем вес w для каждого события $t\bar{t}$ по формуле:

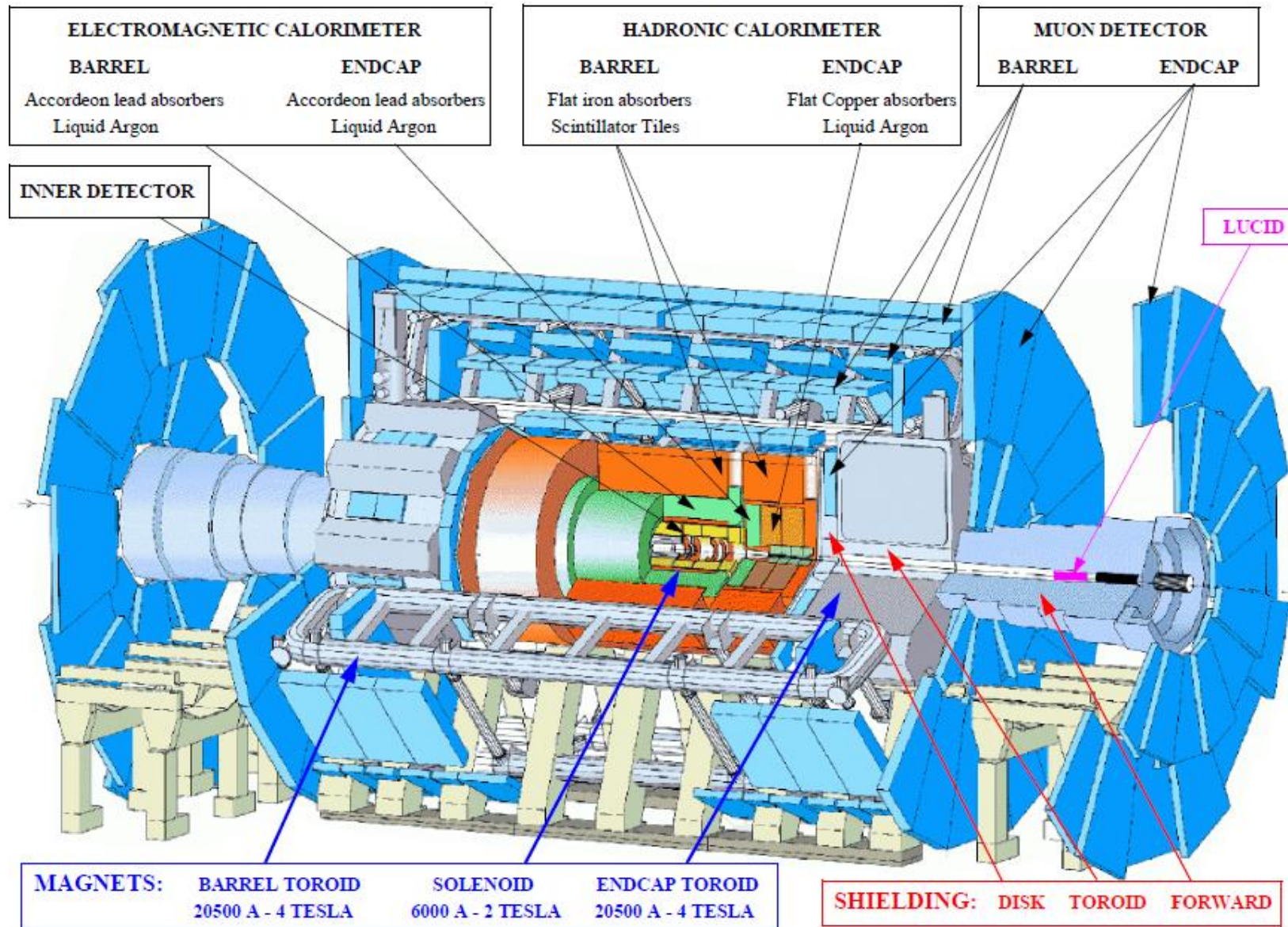
$$w = \exp\left(\frac{-\Delta E_x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-\Delta E_y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

- Где $\Delta E_{x,y} = E_{x,y}^{miss} - (E_{x,y}^{V_1} + E_{x,y}^{V_2})$
- $\sigma_{x,y}$ - разрешение по недостающей энергии.
- Кинематика с максимальным весом используется далее для реконструкции наблюдаемых.

Kinematic Likelihood Fitter (KLFitter).

- KLFitter используется для более точного определения кинематики $t\bar{t}$ событий.
- Реализация алгоритма KLFitter зависит от конкретного конечного состояния $t\bar{t}$ события (полу лептонный канал, двух лептонный канал, адронный канал ...)
- Сначала, в первом приближении определяется кинематика процесса с помощью какого-нибудь метода, например, NW метода (это зависит от конкретного конечного состояния).
- Далее определяется функция правдоподобия (вид этой функции так же зависит от конечного состояния).
- Далее находится минимум функции правдоподобия. Во время процедуры **фитирования**, 4х вектор используемых объектов варьируется согласно т.н. “transfer functions” детектора для выбора параметров (компонент импульса), которые лучше соответствуют кинематике события $t\bar{t}$.
- Рассматриваются различные возможные комбинации объектов в событии.
- Для каждой рассматриваемой комбинации объектов находится максимум функции правдоподобия. После фитирования каждой комбинации объектов в событии выбирается комбинация с наибольшей вероятностью, кинематика которой и используется при дальнейшем анализе $t\bar{t}$ события.

Детектор “АТЛАС”

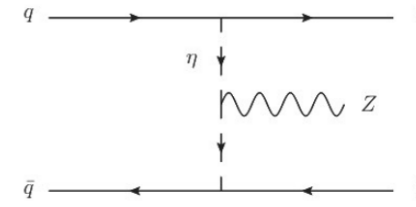
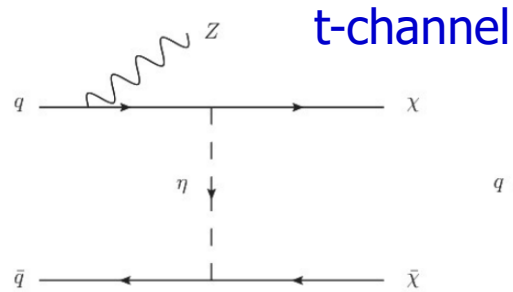
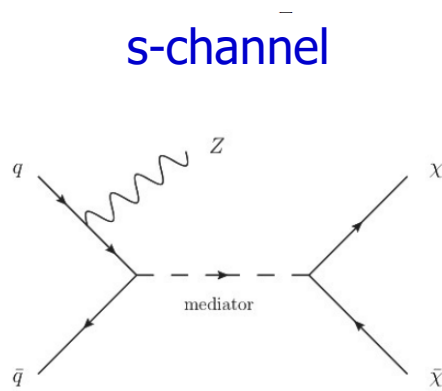


Спиновая матрица плотности $t\bar{t}$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j} \begin{pmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{ij} = & c_{kk} \hat{k}_i \hat{k}_j + c_{rr} \hat{r}_i \hat{r}_j + c_{nn} \hat{n}_i \hat{n}_j \\ & + c_{rk} (\hat{r}_i \hat{k}_j + \hat{k}_i \hat{r}_j) + c_{nr} (\hat{n}_i \hat{r}_j + \hat{r}_i \hat{n}_j) + c_{kn} (\hat{k}_i \hat{n}_j + \hat{n}_i \hat{k}_j) \\ & + c_n (\hat{r}_i \hat{k}_j + \hat{k}_i \hat{r}_j) + c_k (\hat{n}_i \hat{r}_j + \hat{r}_i \hat{n}_j) + c_r (\hat{k}_i \hat{n}_j + \hat{n}_i \hat{k}_j) \end{aligned}$$

Simplified models



Медиаторы:

для s - канала: vector, axial,
scalar, pseudoscalar
для t - канала: colored scalar mediator.

Теория содержит 5 параметров:

WIMP mass: m_χ

Mediator mass: M

Mediator width: Γ

Coupling between the mediator and the WIMP: g_χ

Coupling between the mediator and the SM particle: g_q

Рекомендации DM форума:

m_χ (GeV)	m_{med} (GeV)										
1	10	20	50	100	200	300	500	700	1000	2000	10000
10	10	15	50	100		300	500				10000
30	10			100		300	500	700			
50	10		50	95	200	300	500	700			10000
100				100		300	500	700			
150	10				200	295	500		1000		10000
500	10						500		995	2000	10000
1000	10								1000	1995	10000

black = recommended, bold = requested/simulated initially, red = requested/simulated later to improve limit

Моделирование проводилось с использованием MadGraph

Константы связи:

S-channel, vector and axial-vector case: $g_\chi = 1.0$, $g_q = 0.25$

S-channel, scalar and pseudoscalar case: $g_\chi = g_q = 1.0$

T-channel, coloured scalar case: $g_\chi = g_q = 3.0$

Kinematic Likelihood Fitter.

- 1. Кинематика события рождения пар $t\bar{t}b\bar{b}$ реконструируется не полностью, известны только импульсы двух лептонов и b -струй и недостающая поперечная энергия $E_T^{miss} \Rightarrow$ для полной реконструкции события необходимо восстановить импульсы обоих нейтрино.
- Составляется функция правдоподобия:

$$\begin{aligned} L = & B(m_{q_1q_2q_3} | m_{top}, \Gamma_{top}) \cdot \exp\left(-4 \cdot \ln 2 \cdot \frac{(m_{q_1q_2} - m_W)^2}{\Gamma_W^2}\right) \\ & \times B(m_{q_4l\nu} | m_{top}, \Gamma_{top}) \cdot B(m_{l\nu} | m_W, \Gamma_W) \\ & \times \prod_{i=1}^4 W_{jet}(E_{jet,i}^{meas} | E_{jet,i}) \cdot W_l(E_l^{meas} | E_l) \\ & \times W_{miss}(E_x^{miss} | p_x^\nu) \cdot W_{miss}(E_y^{miss} | p_y^\nu) \end{aligned}$$

- где: B -функция Брейта-Вигнера, W - "transfer function" которая определяется как
- Свободные параметры определяются: The free parameters are the same as for the chi 2-method plus the three momentum components of the neutrino, corresponding to the second minimization option of the chi 2-method.
- Находится максимум функции наибольшего правдоподобия для каждой перестановки (импульсов струй).