

Manifestations of Dark Matter in processes with three and four Top-Quark

Проявления Темной Материи в процессах с рождением трех и четырех топ-кварков

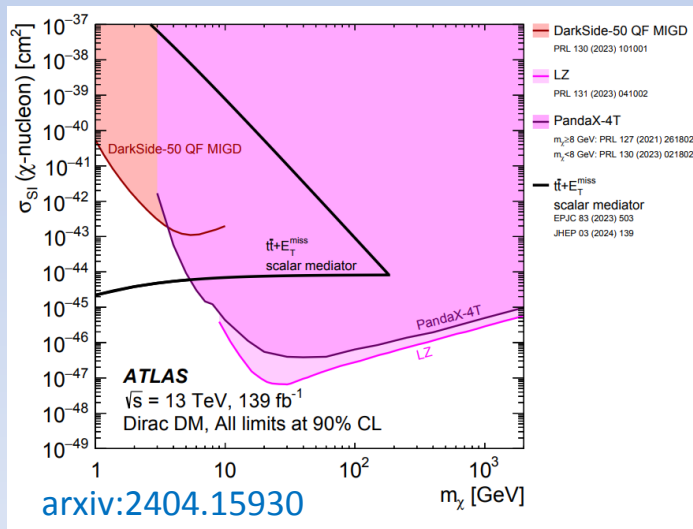
Э.Э. Абасов, Э.Э. Боос, В.Е. Буничев, П.В. Волков, Г.А. Воротников, Л.В. Дудко,
А.Д. Заборенко, Е.С. Иудин, А.А. Маркина, М.А. Перфилов, Н.А. Савкова

Введение

Астрофизические и космологические наблюдения предоставляют убедительные свидетельства существования Темной Материи.

Основные стратегии поиска Темной Материи:

- **Прямое детектирование** - регистрация рассеяния частиц ТМ на ядерных мишенях в низкофоновых подземных установках.
- **Косвенные методы поиска** - выявление продуктов аннигиляции или распада ТМ в нашей Галактике или других астрофизических средах. Поиск ведётся по характерным сигнатурам в космических лучах.
- **Коллайдерный поиск** - генерация и изучение частиц ТМ в лабораторных условиях (например, на БАК (LHC)). Наличие ТМ определяется по недостающей энергии или другим характерным признакам.



Коллайдерные эксперименты позволяют ограничить параметры моделей в области массы ТМ 1-10 ГэВ, которая остается недоступной для методов прямого детектирования.

При проведении экспериментальных поисков частиц ТМ на БАК широко используются Упрощенные модели ТМ. Основные Упрощенные Модели ТМ, используемые в процессах с участием топ-кварков на БАК:

- Со скалярным/псевдоскалярным медиатором
- С векторным/аксиально-векторным медиатором

Сравнение ограничений на сечение рассеяния ТМ на нуклонах в зависимости от массы ТМ: данные коллайдерных экспериментов и экспериментов прямого детектирования

Упрощенная модель Темной Материи со скалярным медиатором

$$L_\Phi = g_\chi \Phi \bar{\chi} \chi + \frac{g_v \Phi}{\sqrt{2}} \sum_f (y_f \bar{f} f)$$

χ - частицы темной материи

f - фермионы СМ

g_v - константа связи фермионов СМ с медиатором

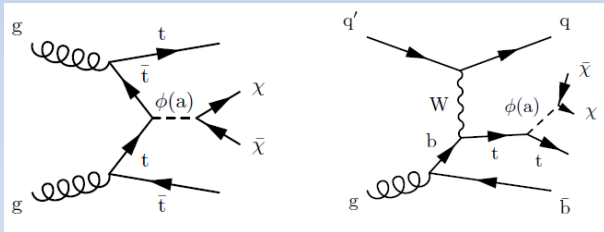
g_χ - константа связи фермионов тёмной материи и медиатора

$y_f = \sqrt{2} m_f / v$ - Юкавские константы связи со значением вакуумного среднего Хиггсовского поля, равного 246 ГэВ

Минимальный набор из четырёх свободных параметров модели: $m_\chi, m_\phi, g_\chi, g_v$

В соответствии с рекомендациями LHC Dark Matter Working Group ([arXiv:1603.04156](https://arxiv.org/abs/1603.04156)):

$$g_\chi = g_v = 1, m_\chi = 1$$



Масса скалярного медиатора $m_\phi < 400$ ГэВ - исключена
[arXiv:2107.10892](https://arxiv.org/abs/2107.10892)

Каналы распада Скалярного Медиатора, CompHEP
 при $g_\chi = g_v = 1, m_\chi = 1, m_\phi = 400$ ГэВ

Total width :				1.905268E+01 GeV	
Modes and fractions :					
b B -	0.086%	xi Xi -	84%	t T -	16%
		c C -	0.0072%	s S -	0.00017%

Ассоциативное рождение Медиатора ТМ в процессах с топ-кварками

- Используются вычислительные пакеты: CompHEP4.6 и MadGraph5_aMC@NLO
- Численные расчеты проведены методом Монте-Карло для протон-протонных столкновений ($\sqrt{S} = 14\text{ТэВ}$, LHC)
- В качестве ошибки сечений приведены только ошибки Монте-Карло вычислений
- Для всех вычислений были использованы рекомендуемые параметры модели: $g_\chi = g_\nu = 1$, $m_\chi = 1$, $m_\phi = 400\text{ ГэВ}$
- **Медиатор ТМ + одиночный топ кварк или пара топ-кварков**

CompHEP4.6

$tW^- \Phi$	
Подпроцесс	Сечение, [фб]
$dg \rightarrow tW^- \Phi$	$2.65 \times 10^{-3} \pm (1.89 \times 10^{-6})$
$bg \rightarrow tW^- \Phi$	$2.84 \pm (2.19 \times 10^{-3})$

$tW^- \bar{b} \Phi$	
Подпроцесс	Сечение, [фб]
$u\bar{u} \rightarrow tW^- \bar{b} \Phi$	$1.51 \pm (2.05 \times 10^{-2})$
$dd \rightarrow tW^- b \Phi$	$0.86 \pm (1.36 \times 10^{-3})$
$b\bar{b} \rightarrow tW^- \bar{b} \Phi$	$0.46 \pm (1.28 \times 10^{-2})$
$gg \rightarrow tW^- b \Phi$	$16.9 \pm (6.95 \times 10^{-1})$

$t\bar{t} \Phi$	
Подпроцесс	Сечение, [фб]
$u\bar{u} \rightarrow t\bar{t} \Phi$	$1.48 \pm (5.03 \times 10^{-2})$
$dd \rightarrow t\bar{t} \Phi$	$0.85 \pm (2.95 \times 10^{-2})$
$b\bar{b} \rightarrow t\bar{t} \Phi$	$0.46 \pm (3.59 \times 10^{-2})$
$gg \rightarrow t\bar{t} \Phi$	$13.74 \pm (9.26 \times 10^{-1})$

[arxiv:2505.05300](https://arxiv.org/abs/2505.05300) Верхнее ограничение на сечение рождения медиатора с $m_\phi = 400\text{ GeV}$ составляет **50 фб** на 95% уровне достоверности.

В рамках текущих экспериментальных ограничений данные процессы не могут быть исключены.

Сравнение вкладов в сечение процессов рождения 3х и 4х топ-кварков в рамках СМ

arxiv:2107.07629

Описание процесса	Сечение из MadGraph (фб)
$pp \rightarrow t\bar{t}W^-$, QCD+EW	$0.622 \pm (1.6 * 10^{-3})$
$pp \rightarrow t\bar{t}W^-$, QCD	$0.453 \pm (1.3 * 10^{-3})$
$pp \rightarrow t\bar{t}W^-$, EW	$0.452 \pm (1.3 * 10^{-3})$
Интерференция	$-0.283 (\approx 45\%)$

Описание процесса	Сечение из MadGraph (фб)
$gg \rightarrow t\bar{t}W^- \bar{b}$, QCD+EW	$15.5 \pm (4.7 * 10^{-2})$
$gg \rightarrow t\bar{t}W^- \bar{b}$, QCD	$14.0 \pm (4.6 * 10^{-2})$
$gg \rightarrow t\bar{t}W^- \bar{b}$, EW	$6.08 \pm (1.4 * 10^{-2})$
Интерференция	$-4.58 (\approx 30\%)$

Процесс	Сечение из CompHEP (фб)	Сечение из MadGraph (фб)
$gg \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$, QCD+EW	$7.71 \pm (7.55 * 10^{-3})$	$7.55 \pm (2.0 * 10^{-2})$
$gg \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$, QCD	$7.22 \pm (7.17 * 10^{-3})$	$7.16 \pm (2.5 * 10^{-2})$
$gg \rightarrow t\bar{t}\bar{t}$, EW	$2.79 \pm (6.12 * 10^{-3})$	$2.61 \pm (7.0 * 10^{-3})$
Интерференция	$-2.30 (\approx 30\%)$	$-2.22 (\approx 30\%)$

Интерференция КХД и электрослабых диаграмм – довольно большая и отрицательная, поэтому важно учитывать полный набор диаграмм для вычисления сечений данных процессов.

Ассоциативное рождение Медиатора ТМ в процессах с топ-кварками

- Медиатор ТМ + 3 или 4 топ-кварка

MadGraph5_aMC@NLO

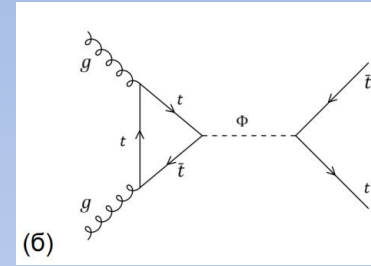
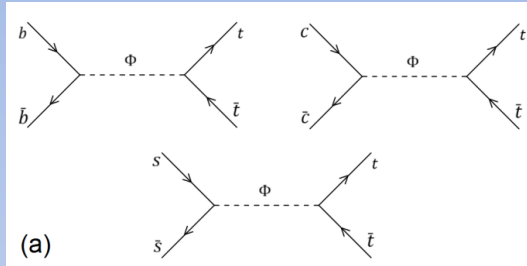
$t\bar{t}W^{-}\Phi$ all	
Подпроцесс	Сечение, [фб]
$bg \rightarrow t\bar{t}W^{-}\Phi$	$2.25 \times 10^{-4} (\pm 6.6 \times 10^{-7})$

$t\bar{t}t\bar{t}\Phi$ all	
Подпроцесс	Сечение, [фб]
$gg \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}\Phi$	$8.40 \times 10^{-4} (\pm 2.81 \times 10^{-6})$
$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}\Phi$	$4.25 \times 10^{-4} (\pm 2.57 \times 10^{-6})$

Полученные значения сечений находятся за пределами чувствительности детекторов LHC, поэтому не представляют интереса для текущих экспериментальных исследований.

Резонансное рождение медиатора ТМ в процессах с топ-кварками

- Рождение 2х топ-кварков



Процесс	Сечение (пб)
$pp \rightarrow t\bar{t}$ (СМ)*	$617.93 \pm (0.23)$
$gg \rightarrow t\bar{t}$ (СМ)*	$535.63 \pm (0.23)$
$pp \rightarrow t\bar{t}$ (СМ + ТМ)*	$618.26 \pm (0.06)$
$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ (древесные диаграммы ТМ)*	$4.282 \cdot 10^{-3} \pm (0.002 \cdot 10^{-3})$
$gg \rightarrow t\bar{t}$ (петлевая диаграмма ТМ)*	$0.917 \pm (0.025)$
$gg \rightarrow t\bar{t}$ (петлевая диаграмма ТМ)**	$0.884 \pm (0.001)$

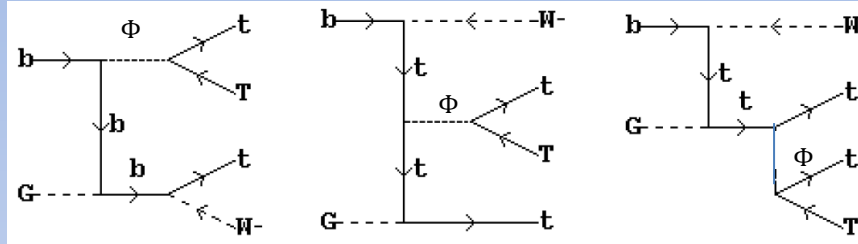
CompHEP (*), MadGraph(**)

[arxiv: 2407.08308](https://arxiv.org/abs/2407.08308)

- Сечение в рамках модели ТМ не сильно превышает сечение СМ
- Вклад как петлевых, так и древесных диаграмм с участием медиатора ТМ слишком мал по сравнению с полным сечением процесса
- Поиск рождения медиатора ТМ, распадающегося в пару топ анти-топ кварков в процессах парного рождения топ-кварков является **неперспективным**.

Резонансное рождение медиатора ТМ в процессах с топ-кварками

- Рождение 3х топ-кварков



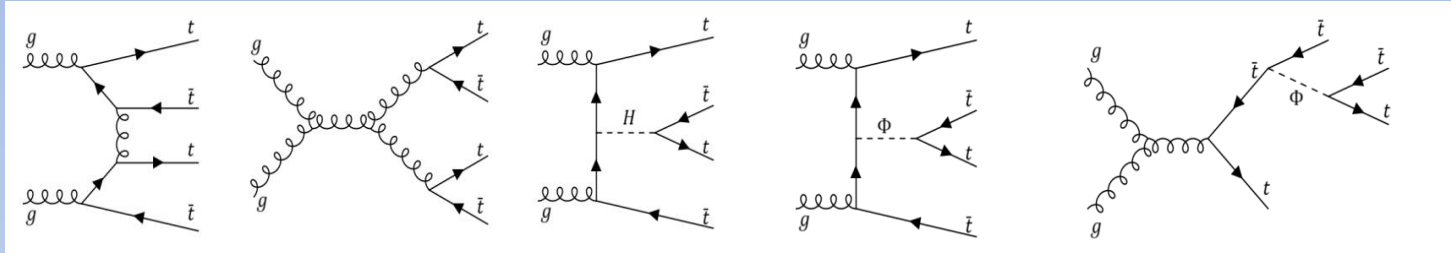
arxiv: 2407.08308

Процесс $pp \rightarrow t\bar{t}tW^-$	Сечение из MadGraph (фб)
Полный набор диаграмм в СМ	$0.62 \pm (1.6 * 10^{-3})$
Полный набор диаграмм в модели ТМ, с учетом петлевой диаграммы	$1.53 \pm (5 * 10^{-3})$
Вклад диаграмм с медиатором ТМ, без учета петлевых диаграмм	$0.90 \pm (2.4 * 10^{-3})$
Вклад петлевых диаграмм с медиатором ТМ	$1.20 * 10^{-3} \pm (3.7 * 10^{-6})$

- Петлевые диаграммы дают на несколько порядков меньшее сечение и могут не рассматриваться в данном процессе.
- Сечение диаграмм с присутствием медиатора ТМ составляет $\approx 58\%$ от полного сечения. Таким образом, данный процесс является крайне перспективным для поиска ТМ на коллайдерах.

Резонансное рождение медиатора ТМ в процессах с топ-кварками

- Рождение 4х топ-кварков



Процесс $gg \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$	Сечение из MadGraph (фб)
Полный набор диаграмм в СМ	$7.79 \pm (2.3 * 10^{-2})$
Полный набор диаграмм в модели ТМ, без учета петлевых диаграмм	$11.41 \pm (3.4 * 10^{-2})$
Полный набор диаграмм в модели ТМ, с учетом петлевых диаграмм	$11.44 \pm (3 * 10^{-2})$
Вклад диаграмм с медиатором ТМ, без учета петлевых диаграмм	$2.89 \pm (9.9 * 10^{-3})$
Вклад петлевых диаграмм с медиатором ТМ	$8.67 * 10^{-2} \pm (2.74 * 10^{-4})$

[arxiv: 2407.08308](https://arxiv.org/abs/2407.08308)

- Вклад петлевых диаграмм на 2 порядка меньше вклада остальных диаграмм с ТМ, можно не учитывать
- Сечение диаграмм с присутствием медиатора ТМ составляет $\approx 25 \%$ от полного сечения, соответственно поиск проявлений ТМ в этих процессах так же может иметь хорошие перспективы.

Резонансное рождение медиатора ТМ в процессах с топ-кварками

- Рождение 3х топ-кварков + Wb
(включает в себя процессы рождения 4х топ-кварков и 3х топ-кварков в NLO)

arxiv: 2407.08308

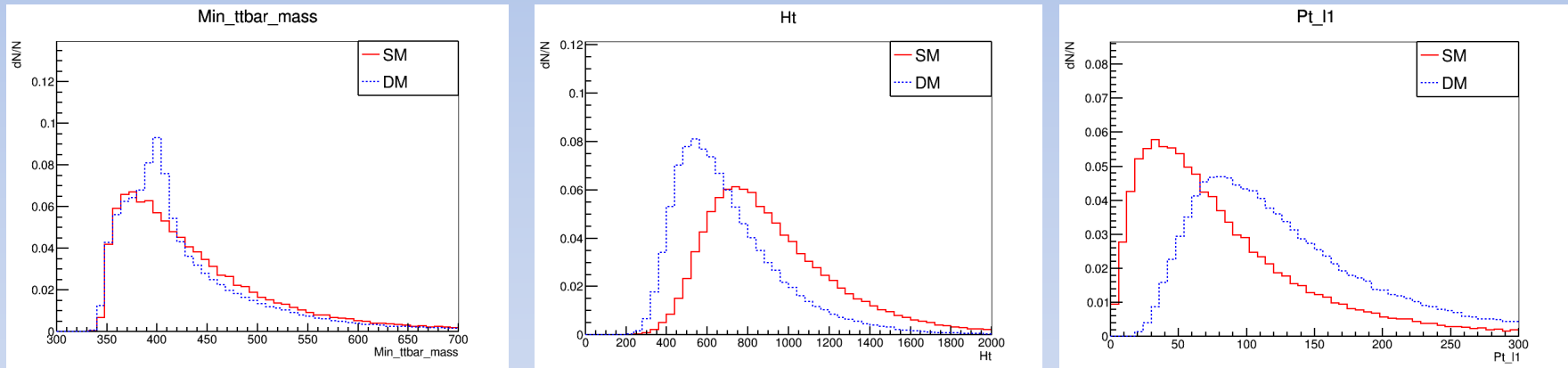
Процесс $gg \rightarrow t\bar{t}W^{-}\bar{b}$	Сечение из MadGraph (фб)
Полный набор диаграмм в СМ	$15.55 \pm (4.7 * 10^{-2})$
Полный набор диаграмм в модели ТМ, без учета петлевых диаграмм	$23.02 \pm (6.2 * 10^{-2})$
Полный набор диаграмм в модели ТМ, с учетом петлевой диаграммы	$23.16 \pm (6 * 10^{-2})$
Вклад диаграмм с медиатором ТМ, без учета петлевых диаграмм	$6.03 \pm (1.2 * 10^{-2})$
Вклад петлевых диаграмм с медиатором ТМ	$0.17 \pm (5 * 10^{-4})$

- Сечение диаграмм с присутствием медиатора ТМ составляет 26 % от полного сечения.

Планируется далее

- Следующий этап исследования - формирование списка наблюдаемых, которые будут указывать на различия между процессами в СМ и процессами с рождением медиатора ТМ. В настоящее время проводится исследование таких наблюдаемых, основанное на детальном рассмотрении свойств процессов.

Сравнение форм распределений некоторых наблюдаемых для процесса $3tWb$ в рамках СМ и модели ТМ:



Рождение тяжелого медиатора ТМ изменяет различные кинематические характеристики процесса по сравнению с таковыми в процессах СМ.

- После формирования списка различающих наблюдаемых будет подобрана оптимальная методика применения многомерных методов анализа для выделения сигнала ТМ в данных процессах и проведен статистический анализ для оценки ожидаемой значимости для современных и планируемых коллайдерных экспериментов.

Заключение

Проведено исследование вклада скалярного медиатора ТМ в процессы с рождением топ-кварков:

- ✓ Процессы ассоциативного рождения медиатора с одним и двумя топ-кварками не могут быть исключены в рамках текущих экспериментальных ограничений
- ✓ Процессы ассоциативного рождения медиатора с тремя и четырьмя топ-кварками находятся за пределами чувствительности эксперимента
- ✓ При вычислении сечений процессов рождения 3-х и 4-х топ-кварков важно учитывать полный набор диаграмм, т.к. интерференция КХД и электрослабых диаграмм – довольно большая и отрицательная
- ✓ Процессы резонансного рождения медиатора ТМ в процессах с топ-кварками чувствительны к проявлениям ТМ:
 - Для 4t-процессов вклад $\approx 25\%$
 - Для 3t-процессов вклад $\approx 58\%$
- ✓ Петлевые диаграммы с медиатором дают незначительный вклад, их можно не учитывать в вычислениях
- ✓ На данном этапе: формирование списка различающихся наблюдаемых
- ✓ Планируется: применение многомерных методов анализа для выделения сигнала ТМ в данных процессах и проведение стат. анализа для оценки ожидаемой значимости

Благодарю за внимание!

Для вычислений использовались:

Партонные функции распределения - CTEQ6L1 и NNPDF23_nlo_as_0118 из пакета LHAPDF6

Масштаб перенормировки и факторизации в генераторе задавался в соответствии с характерным масштабом процесса:

Например, для процесса $4t + H1$ – 550 ГэВ, для парного рождения топ кварков – 172.5 ГэВ, для рождения 3х и 4х топ-кварков - 350 ГэВ.