

Восстановление угловых корреляций в процессе ассоциированного рождения топ-кварка и медиатора темной материи

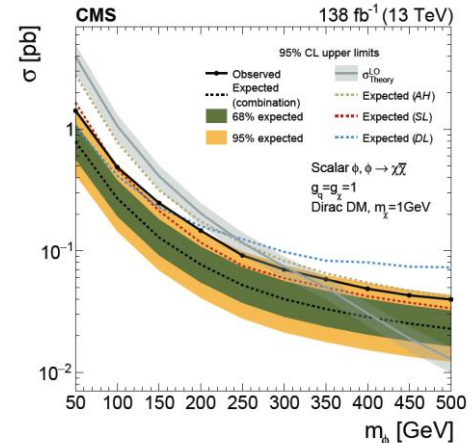
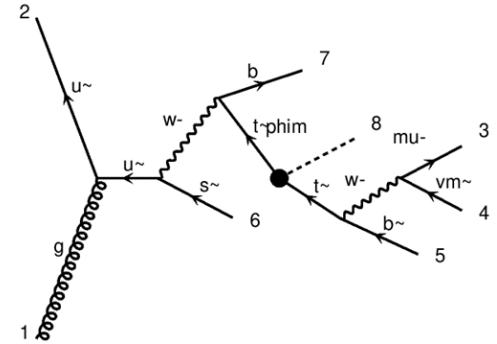
Абасов Э.Э., Васильев А.В., Волков П.В., Воротников Г.А., Дудко Л.В., Заборенко А.Д.,
Иудин Е.С., Маркина А.А., Перфилов М.А.

Введение

Исследуются проявления темной материи в рамках Упрощенной Модели со скалярным медиатором в процессе рождения топ-кварка

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

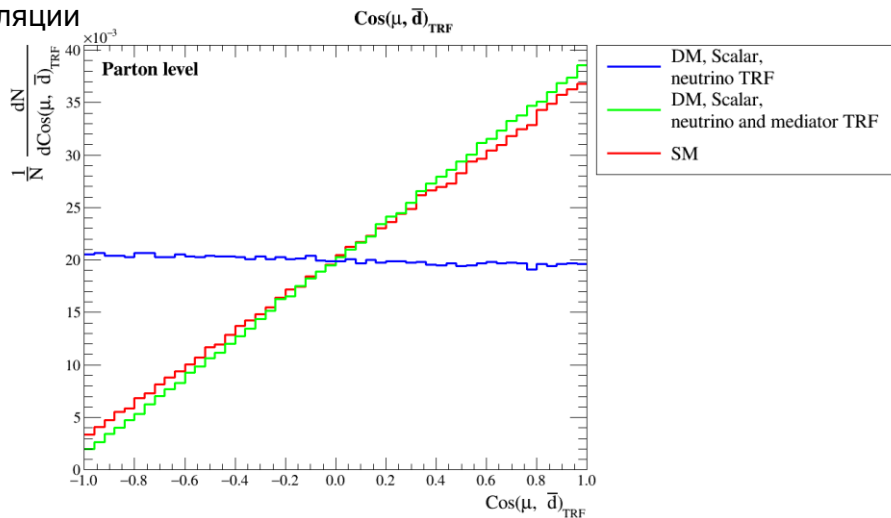
- Скалярный медиатор не меняет конечное состояние (набор частиц), влияет только на кинематику, рассматривается как наиболее сложный случай (псевдоскалярный и векторный медиаторы проще для выделения)
- Медиатор и нейтрино не регистрируются в детекторе. Как разделить вклады этих частиц?
- Разделение необходимо для восстановления угловой переменной на основе спиновых корреляций



Текущие ограничения на массу медиатора [[arxiv:1901.01553](https://arxiv.org/abs/1901.01553)]

Спиновые корреляции топ-кварка

- Корреляции в СМ $|M^2| \propto m_t^2 E_{\bar{d}} E_{\bar{\ell}} (1 + \cos \theta_{\bar{d}\bar{\ell}})$ [<https://arxiv.org/abs/hep-ph/9611367>]
- Тяжелый скалярный медиатор не меняет поляризацию, но изменяет систему отсчета топ-кварка; вычисления, проведенные только с учетом нейтрино, нарушают корреляции, характерные для СМ (neutrino TRF)
- Учет медиатора в восстановлении системы покоя (neutrino and mediator TRF) восстанавливает спиновые корреляции



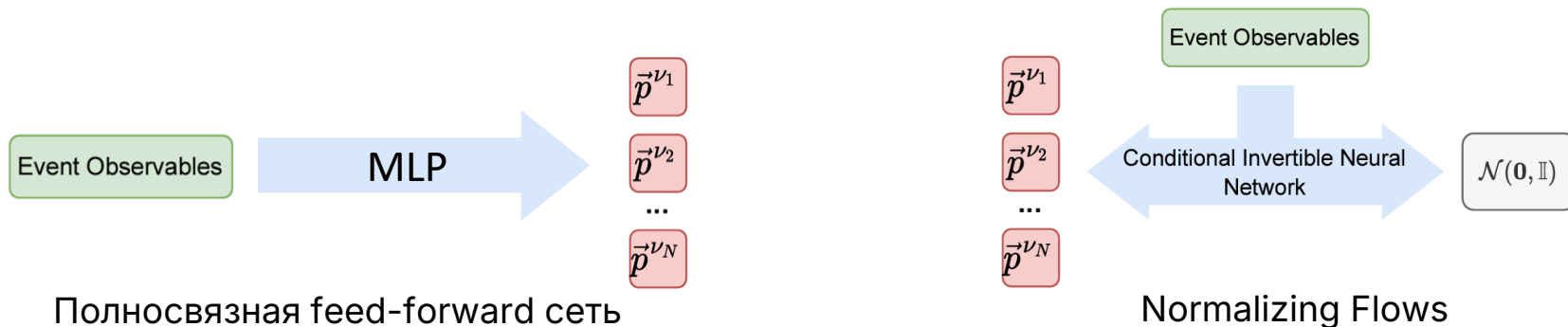
Восстановление спиновых корреляций

- Были проведены аналитические расчеты, однако из них не следуют строгие аналитические ограничения [[arxiv:2406.07704](https://arxiv.org/abs/2406.07704)]

$$p_{\nu_z} = -\frac{\tilde{A} + p_{\nu_x}p_{1b_x} + p_{\nu_y}p_{1b_y}}{p_{1b_z}}$$

$$p_{\nu_x} = \pm\sqrt{dp_{\nu_y}^2 + ep_{\nu_y} + f} - \frac{\tilde{C}_x}{\tilde{C}_{x^2}} - \frac{\tilde{C}_{xy}}{\tilde{C}_{x^2}}p_{\nu_y}$$

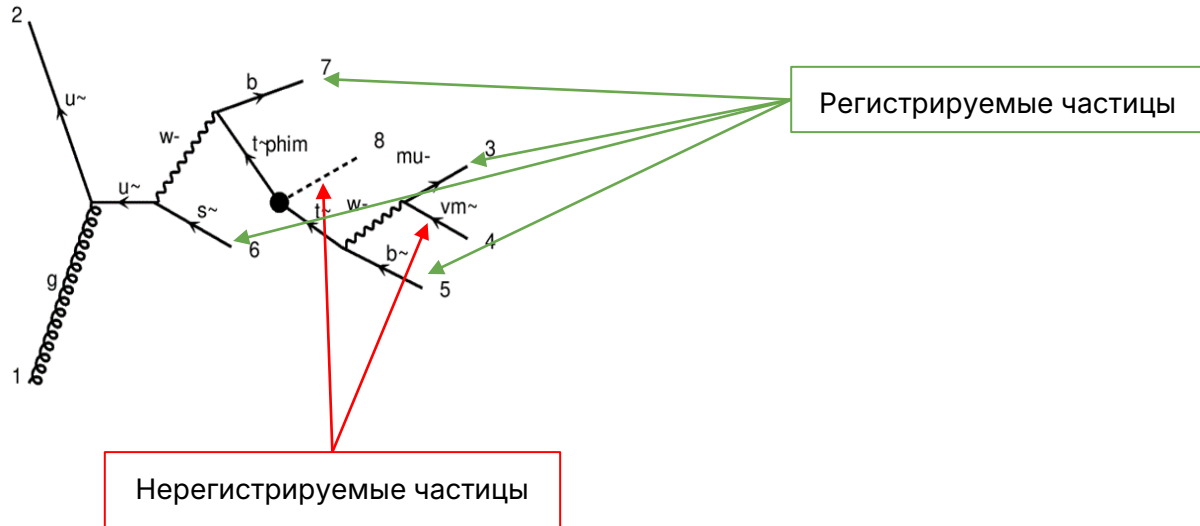
- Альтернативный подход – использование машинного обучения для восстановления импульсов – задача регрессии
 - В качестве базового решения выбрана полносвязная нейронная сеть, на ней проведена вся цепочка анализа
 - Основная сеть в работе – архитектура v-Flows на базе Normalizing Flows [[arXiv:2207.00664](https://arxiv.org/abs/2207.00664)]



Сравнение результатов применения моделей

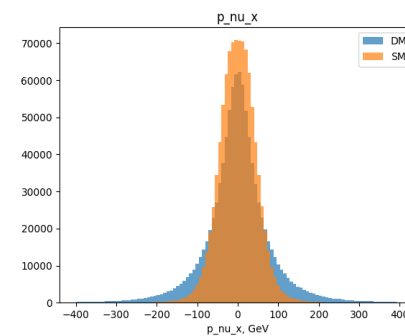
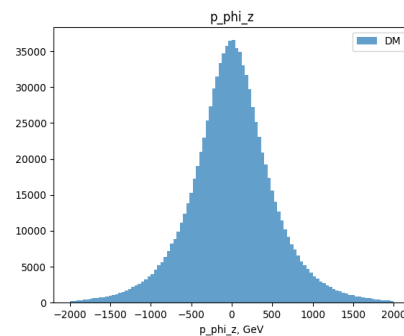
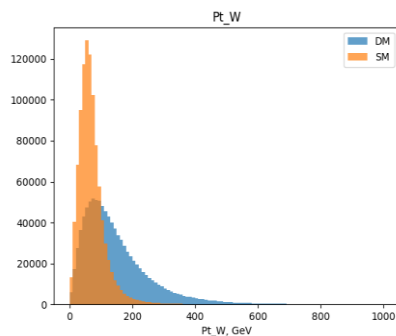
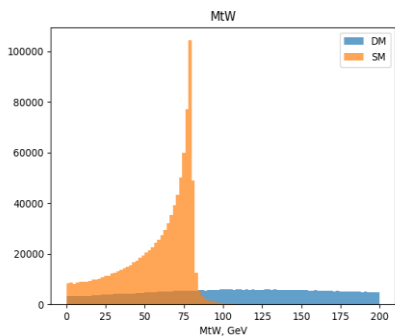
Формулировка задачи

- Источник данных - Монте Карло генераторы CompHEP и MadGraph5, проведено сравнение между генераторами
- На входе модели - импульсы регистрируемых частиц (лептон, b-кварк, лёгкий кварк) и построенные из них вспомогательные переменные
- На выходе - импульсы неизвестных частиц - нейтрино и медиатора



Данные

- Компоненты импульса медиатора для событий в рамках SM полагаются равными 0
- Сети тренируются на 1/1 смеси наборов данных SM и DM
- 40 входных, 6 выходных переменных

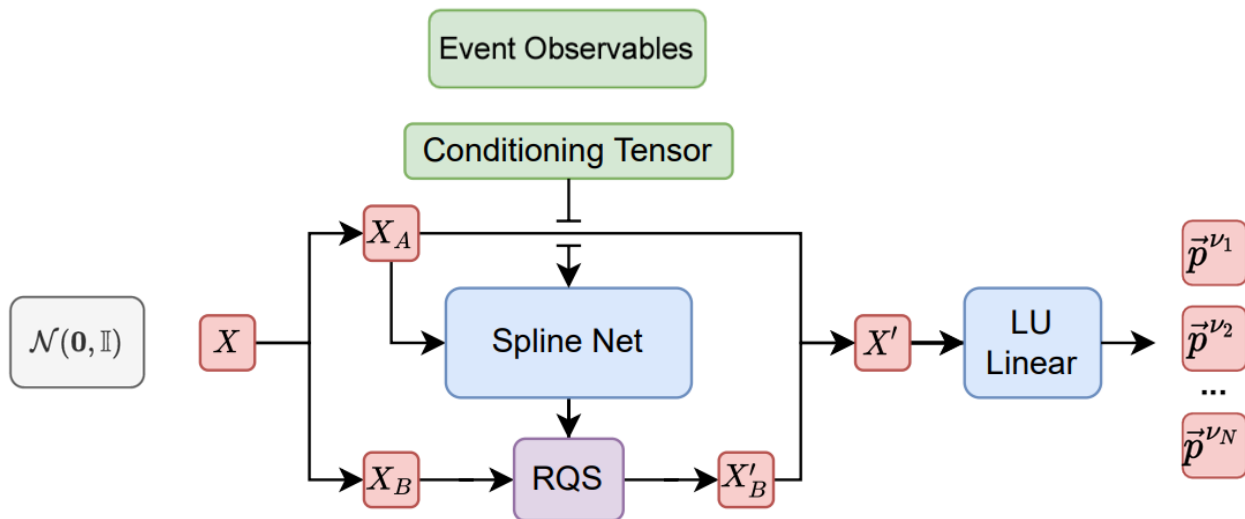


Характерные распределения для
входных переменных

Характерные распределения для
целевых переменных

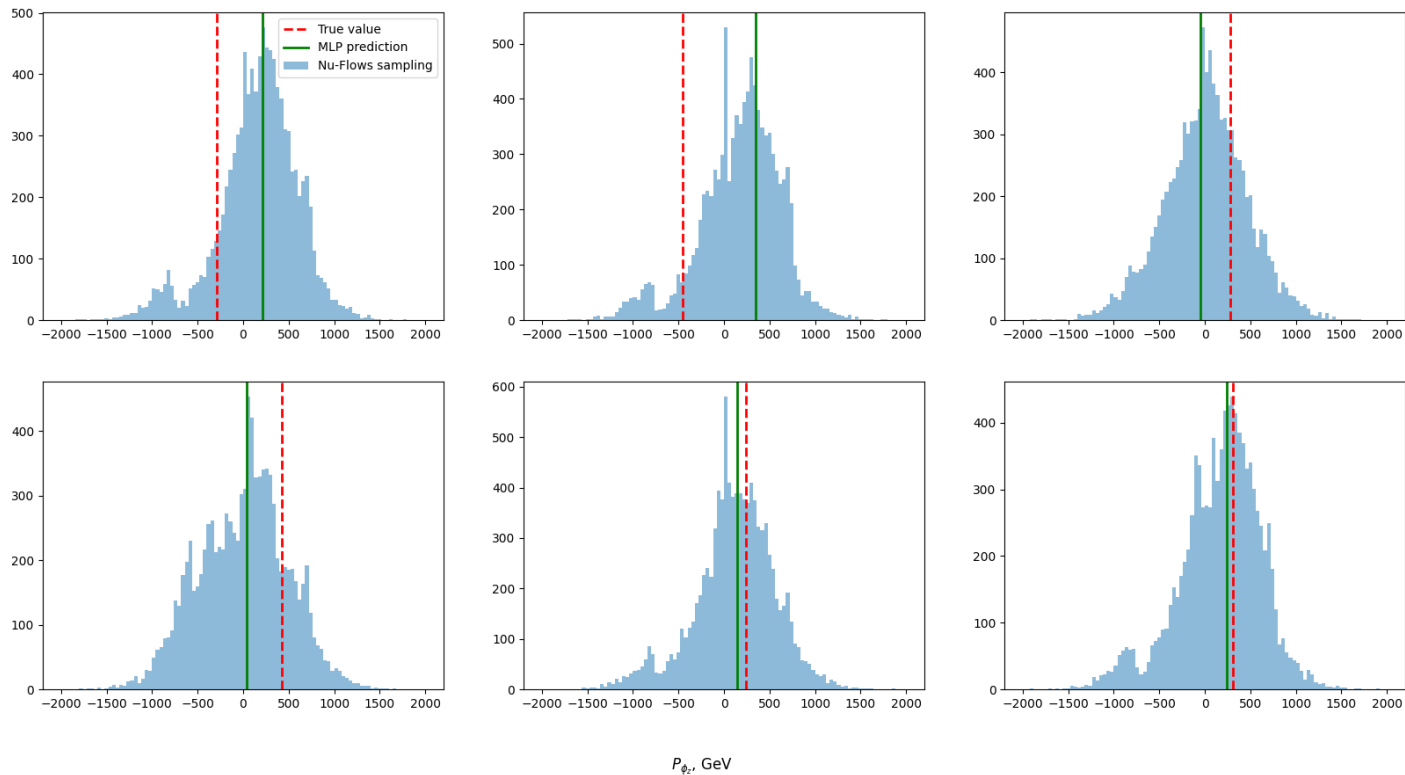
Модели: Normalizing Flows

- Архитектуры Normalizing Flows основаны на обучении обратимого преобразования между известным распределением и целевой переменной, в отличие от классических нейронных сетей, на выходе Normalizing Flows – распределение вероятности целевой переменной, а не одно число
- Используется полная многомерная плотность вероятности, данные модели могут лучше сохранять зависимости между переменными



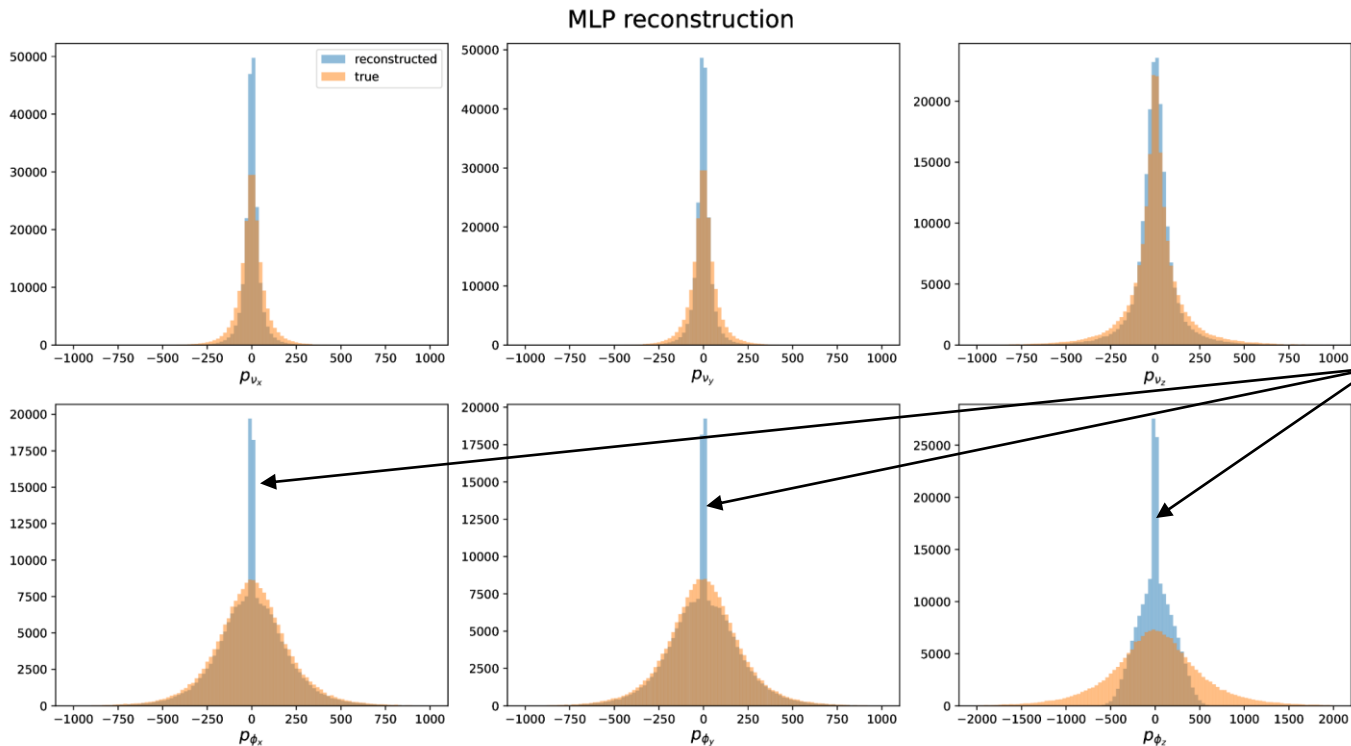
Блок сети ν -Flows (детали в [arXiv:2207.00664](https://arxiv.org/abs/2207.00664))

Результаты: Normalizing Flows



Сравнение реконструкции различных методов для случайных 6 событий

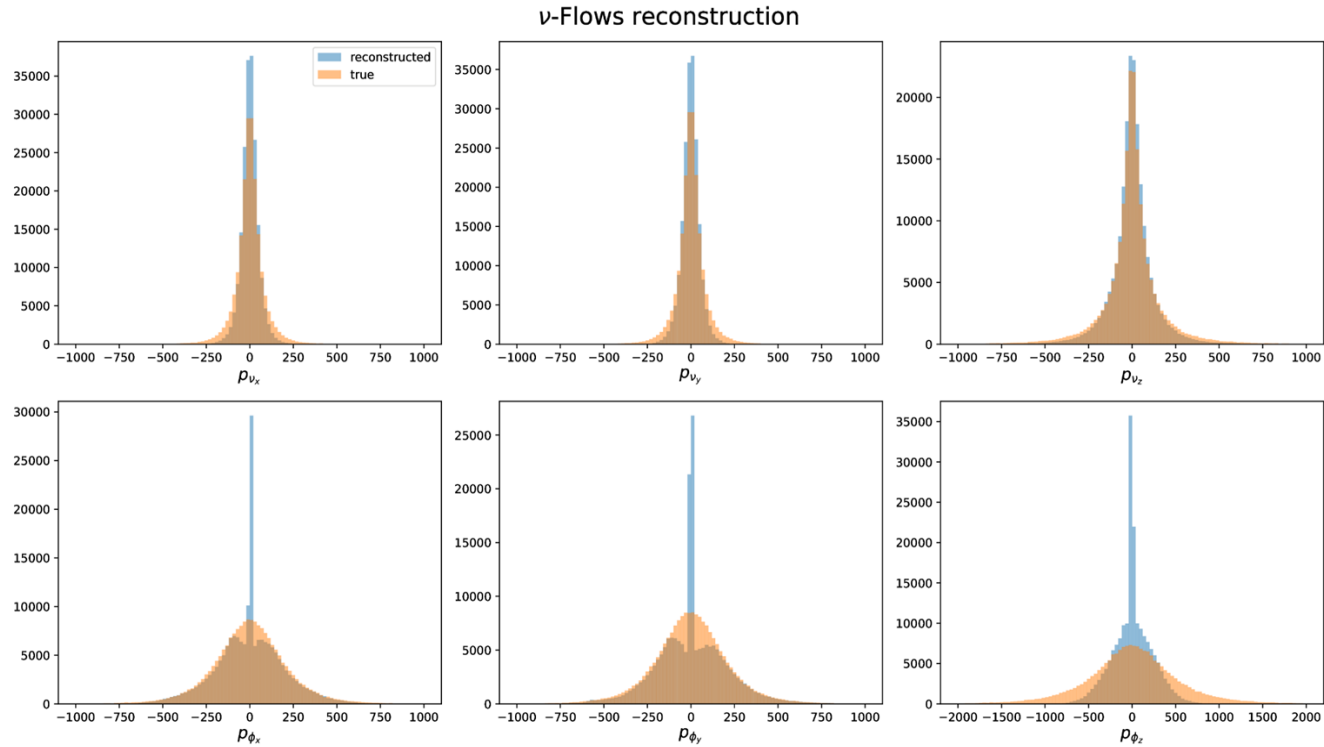
Результаты: MLP



«Ошибка
классификации»
сети

Сравнение реконструкции различных методов для интегральных распределений импульсов частиц

Результаты: ν -Flows



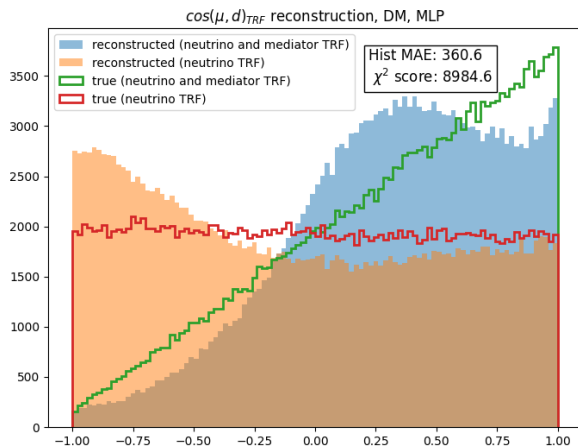
Сравнение реконструкции различных методов для интегральных распределений импульсов частиц

Результаты: целевая переменная

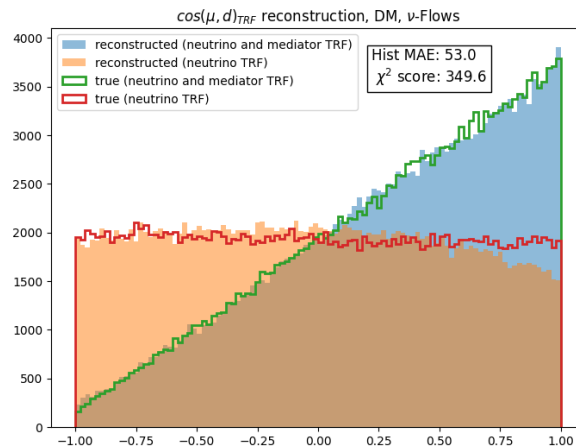
Метрики:

- Hist MAE – Mean Absolute Error, примененная не к исходным данным, а построенным на них гистограммам целевой переменной
- χ^2 -score - статистика χ^2 , рассчитанная на гистограммах

MLP



ν -Flows



Сравнение реконструкции различных методов для целевой переменной

Распад медиатора ТМ на $t\bar{t}$

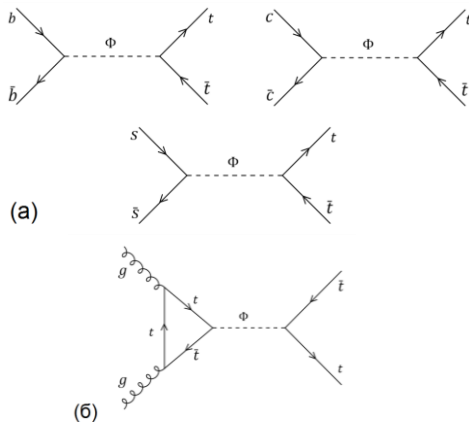
- Бренчинг распада скалярного медиатора Φ с массой 400 ГэВ на пару частиц ТМ составляет 84%
- анализ процессов $t + \Phi$, $t\bar{t} + \Phi$
- Альтернативный подход: медиатор ТМ может распадаться на пару топ и антитоп-кварков, бренчинг - 16%, что дает возможность изучать проявления ТМ в рождении топ-кварков

Для парного рождения топ-кварков (доминирующий процесс на LHC):

Параметры [[arXiv:1603.04156](https://arxiv.org/abs/1603.04156)]:

- Масса медиатора 400 ГэВ
- Константы связи с фермионами СМ и ТМ = 1

Вклад
ТМ 0.1%



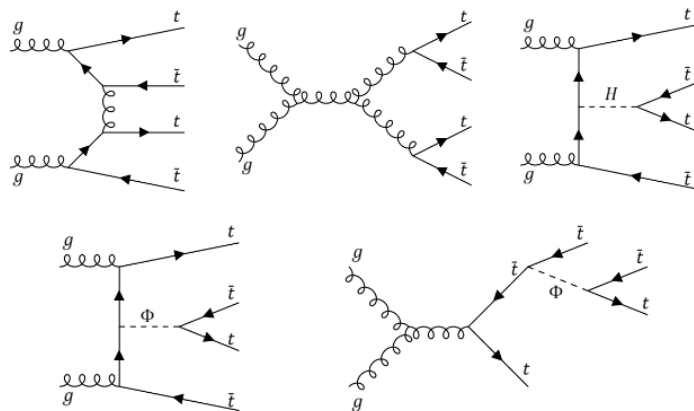
Процесс	Сечение (пб)
$pp \rightarrow t\bar{t}$ (СМ)*	617.93 ± 0.23
$gg \rightarrow t\bar{t}$ (СМ)*	535.63 ± 0.23
$pp \rightarrow t\bar{t}$ (СМ + ТМ)*	618.26 ± 0.06
$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ (древесные диаграммы ТМ)*	$(4.282 \pm 0.002) \cdot 10^{-3}$
$gg \rightarrow t\bar{t}$ (петлевая диаграмма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

*- CompHEP

** - MadGraph5

Процессы рождения 4-х топ-кварков (LO)

- Один из самых редких процессов, доступных для изучения на LHC на данный момент



Процесс	Сечение из CompHEP (фб)	Сечение из MadGraph (фб)
$gg \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$ (CM)	$7.71 \pm 7.55 * 10^{-3}$	$7.79 \pm 2.3 * 10^{-2}$
$gg \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$ (CM + TM)	$11.15 \pm 1.60 * 10^{-2}$	$11.41 \pm 3.4 * 10^{-2}$

Вклад ТМ
~30%

Процессы рождения 3-х топ-кварков

- Процесс $pp \rightarrow t\bar{t}tW^-$
- Находится на пределе чувствительности современных коллайдеров

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, без учета петлевых диаграмм	$1.54 \pm 5 * 10^{-3}$
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	$1.20 * 10^{-3} \pm 3.7 * 10^{-6}$

Вклад
ТМ 60%

Процессы рождения 3-х и 4-х топ-кварков

- Процессы $t\bar{t}tW^-$ в NLO и $t\bar{t}t\bar{t}$ имеют одинаковую сигнатуру $t\bar{t}tW^-b$
- Вклад $t\bar{t}t\bar{t}$ доминирует

Вклад ТМ
30%

Процесс $gg \rightarrow t\bar{t}tW^-b$	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	$0.17 \pm 5 * 10^{-4}$

Описание процесса	Сечение из MadGraph (фб)
$pp \rightarrow t\bar{t}tW^-$, QCD+EW	$0.622 \pm 1.6 * 10^{-3}$
$pp \rightarrow t\bar{t}tW^-$, QCD	$0.453 \pm 1.3 * 10^{-3}$
$pp \rightarrow t\bar{t}tW^-$, EW	$0.452 \pm 1.3 * 10^{-3}$
$pp \rightarrow t\bar{t}tW^-$, QCD+EW+DM	$1.54 \pm 5 * 10^{-3}$
$gg \rightarrow t\bar{t}tW^-b$, QCD+EW	$15.5 \pm 4.7 * 10^{-2}$
$gg \rightarrow t\bar{t}tW^-b$, QCD	$14.0 \pm 4.6 * 10^{-2}$
$gg \rightarrow t\bar{t}tW^-b$, EW	$6.08 \pm 1.4 * 10^{-2}$
$gg \rightarrow t\bar{t}tW^-b$, QCD+EW+DM	$23.02 \pm 6 * 10^{-2}$

QCD - вклад только КХД диаграмм, **EW** - вклад электрослабых диаграмм **QCD+EW**- полный набор диаграмм в рамках СМ, **QCD+EW+DM** – полный набор диаграмм в модели ТМ, без учета петлевых диаграмм

Заключение

- Восстановление угловой переменной, характеризующей спиновые корреляции, методом v -Flows в процессе одиночного рождения топ-кварка с темной материей позволит повысить чувствительность экспериментальных анализов
- На партонном уровне достигнуто полное восстановление угловых корреляций топ-кварка, что позволяет использовать данный метод на реальных данных после применения процедуры unfolding-a.
- Редкие процессы рождения 4-х и 3-х топ-кварков обладают существенным потенциалом и вклад ТМ может составить 30% и 60% от полного сечения для рекомендованных к вычислениям параметров упрощенной модели ТМ.
[\[arxiv:2407.08308\]](https://arxiv.org/abs/2407.08308)

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 5 "Физика частиц и космология"