

**Поиск медиаторов тёмной материи
с помощью спиновых корреляций
в процессах одиночного рождения топ кварка**

Вячеслав Буничев

в сотрудничестве с Э.Э. Боосом и Л.В. Дудко

НИИЯФ им Скобельцына МГУ им. Ломоносова

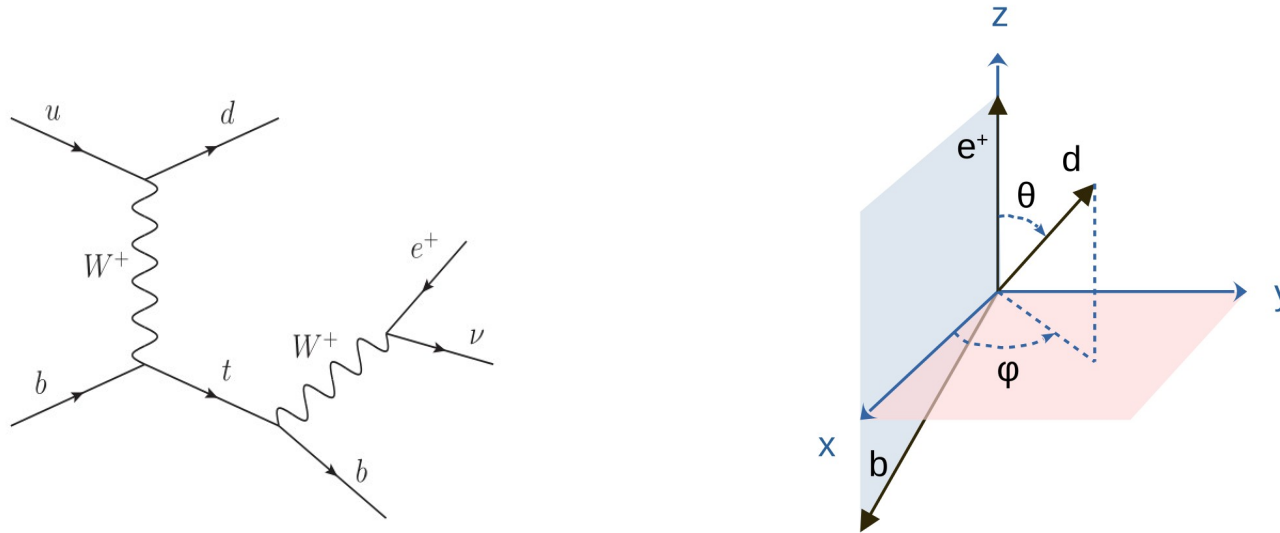
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвящённая 70-летию В.А. Рубакова.

Перспективность процессов одиночного рождения топ кварка для поиска тёмной материи

- В популярных моделях тёмной материи взаимодействие частиц Стандартной Модели (СМ) с частицами тёмной материи осуществляется через обмен частицами-медиаторами. Параметры взаимодействия скалярных частиц медиаторов с фермионами СМ пропорциональны массе этих фермионов. Поэтому изучение процессов с участием массивных фермионов третьего поколения, таких как топ кварк, представляет особый интерес.
- Кроме того, в электрослабых процессах топ кварк может рождаться сильно поляризованным, что обусловлено (V-A) структурой вершин таких взаимодействий. При распаде топ кварка, его начальная поляризация транслируется на его продукты распада и проявляется в энергетических спектрах частиц из распада, а также в спиновых корреляциях между начальными и конечными состояниями.
- Участие медиатора в процессах с топ кварком может проявиться в изменении корреляций.

Процессы одиночного рождения топ кварка на LHC в рамках СМ

В t-канальном процессе одиночного рождения топ кварка, в его системе отчёта, направление спина топ-кварка коррелирует с направлением импульса d-кварка.



θ — угол между импульсом заряженного лептона e^+ и направлением оси квантования спина топ-кварка (т.е. импульсом d -кварка),

ϕ — угол в плоскости, перпендикулярной импульсу e^+ , откладываемый от линии пересечения с плоскостью, образованной векторами b и e^+ .

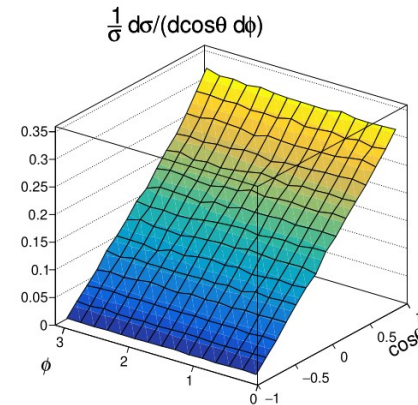
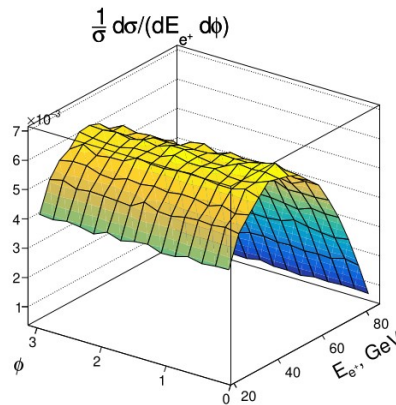
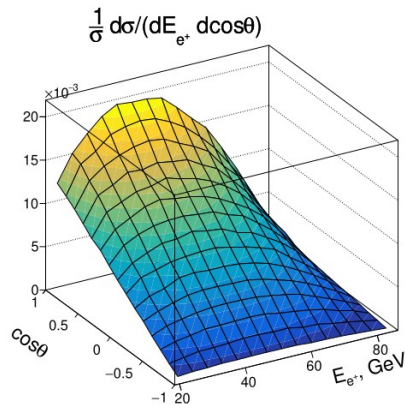
Угол ϕ можно выразить через углы между векторами b , d и e^+ :

$$\phi = \arccos \left(\frac{\cos \theta_{bd} - \cos \theta_{be} \cdot \cos \theta_{de}}{\sin \theta_{be} \cdot \sin \theta_{de}} \right)$$

Процессы одиночного рождения топ кварка на LHC в рамках СМ

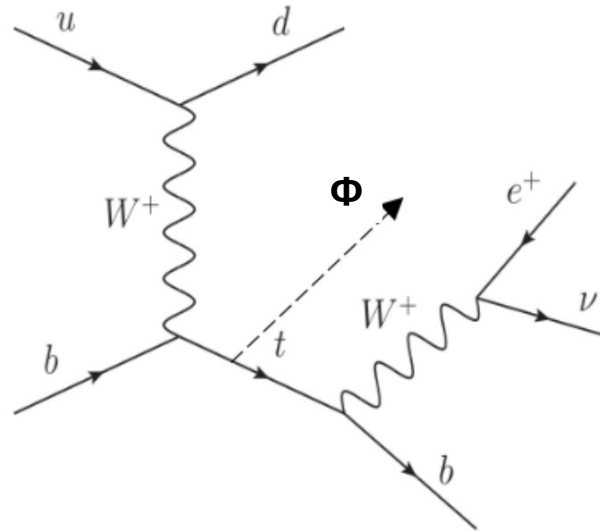
- В работе [E.Boos, V.Bunichev, Phys. Rev. D 101, 5, 055012 (2020)] впервые получены точные аналитические выражения для трижды и дважды дифференциального сечения полного процесса рождения топ кварка с его последующим распадом ($2 \rightarrow 4$).
- Выражения получены для системы отсчета топ кварка в виде функций энергии позитрона из распада топ кварка и углов ориентации спина топ кварка.

$$\frac{d\sigma_{SM}(\hat{s})_{ub \rightarrow db\nu e^+}}{d\epsilon \cdot d\cos\theta \cdot d\phi} = \frac{\alpha^2 \cdot V_{ud}^2 \cdot V_{tb}^2}{8 \cdot 3 \cdot \sin^4 \Theta_W \cdot m_W^2 \cdot (1 - r^2)^2 (1 + 2r^2)} \cdot \frac{(\hat{s} - m_t^2)^2}{\hat{s}(\hat{s} - m_t^2 + m_W^2)} \cdot (1 - \epsilon) \cdot \epsilon \cdot (1 + \cos\theta)$$



- Отклонение от соответствующих профилей распределений СМ в экспериментальных данных должно свидетельствовать о проявлении вклада новой физики.

Ассоциированное рождение топ кварка с медиаторами ТМ



- В данной работе мы рассмотрели несколько наиболее общих сценариев с участием частиц тёмной материи и её медиаторов. Мы провели оценку возможности идентификации и определения свойств частиц-медиаторов в процессах одиночного рождения топ кварка для случаев скалярного, псевдоскалярного и векторного медиатора.
- Для массы медиатора мы взяли актуальное значение нижней границы экспериментального предела для этой частицы равного **400 ГэВ**.
- Параметры взаимодействия медиатора в нашем исследовании не играют роли, так как мы исследуем профили нормированных распределений.

Эффективные лагранжианы взаимодействия медиаторов с фермионами

Лагранжиан взаимодействия скалярного медиатора с фермионами СМ и фермионами ТМ:

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{\phi} = -\xi \sum_i \frac{m_i}{v} \phi \bar{\psi}_i \psi_i - g_D \phi \bar{\chi} \chi,$$

где ξ - параметр взаимодействия скалярного медиатора ϕ с фермионами СМ, $v=246$, GeV — вакуумное среднее поля Хиггса СМ, g_D - параметр взаимодействия скалярного медиатора ϕ с фермионами тёмной материи χ .

Лагранжиан взаимодействия псевдоскалярного медиатора с фермионами СМ и фермионами ТМ:

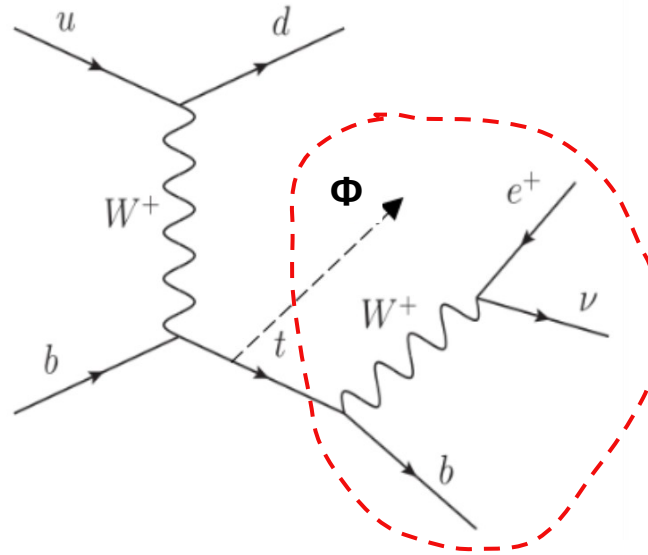
$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{\phi} = -i\xi \sum_i \frac{m_i}{v} \phi \bar{\psi}_i \gamma_5 \psi_i - ig_D \phi \bar{\chi} \gamma_5 \chi,$$

Лагранжиан взаимодействия векторного медиатора A' с фермионами СМ и фермионами ТМ:

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{A'} = -\varepsilon e A'_{\mu} j_{EM}^{\mu} - e_D A'_{\mu} j_{DM}^{\mu}.$$

где εe - параметр взаимодействия векторного медиатора A' с электромагнитным током СМ j_{EM}^{μ} , e_D - параметр взаимодействия векторного медиатора A' с фермионами тёмной материи χ .

Выбор системы отсчета для построения многомерных распределений

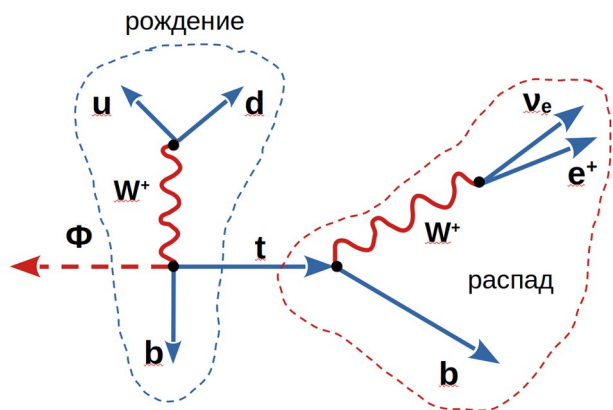


- Для сравнения со Стандартной Моделью нужно провести анализ соответствующих двумерных распределений в системе кластера, соответствующего продуктам распада топ кварка. Для этого нужно отделить импульс нейтрино от импульса кластера продуктов распада медиатора.
- Однако, на практике эта задача является труднореализуемой, так как эти частицы не регистрируются детектором и определяются как суммарный потерянный четырёх-импульс.
- Учитывая это обстоятельство, далее мы будем строить распределения в системе общего кластера, соответствующего продуктам распада топ кварка и медиатора ($t\Phi$).

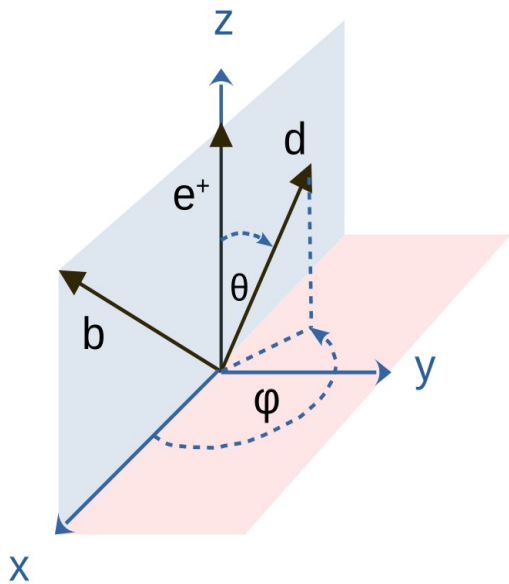
Кинематика b , d и e^+ в системе кластера ($t\Phi$)

- В системе ($t\Phi$) направления конечных состояний b и e^+ расположены ближе друг к другу, чем в случае СМ.
- Направление d -кварка сохраняет свою ориентацию относительно e^+ .
- Для случая модели с псевдоскаляром направление вектора d ближе к направлению конечного состояния b .

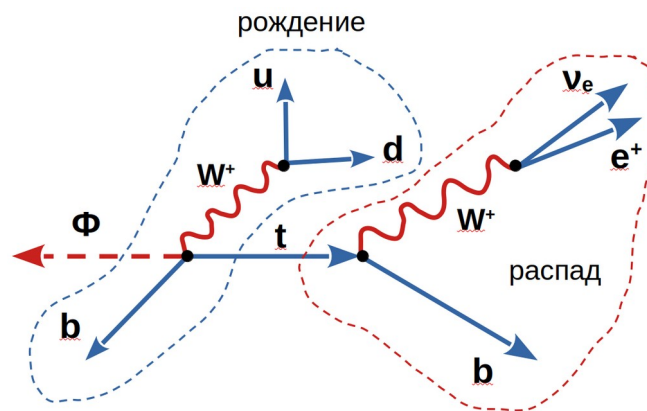
СМ + скаляр



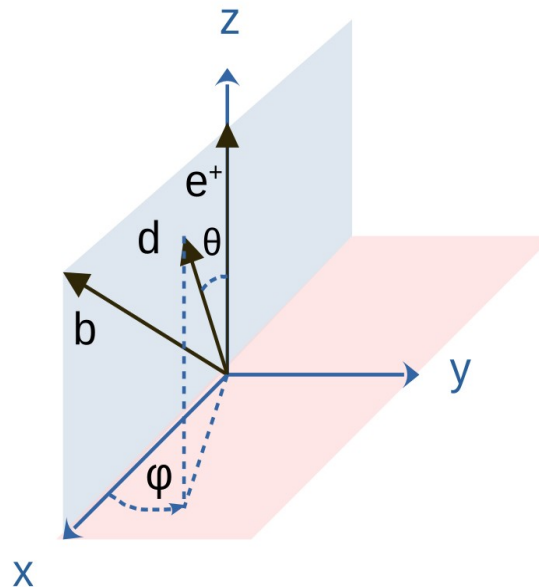
Преобладают большие значения угла ϕ .



СМ + псевдоскаляр



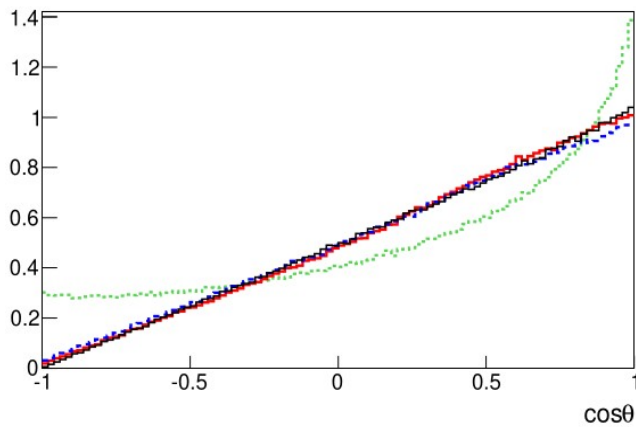
Преобладают малые значения угла ϕ .



Одномерные дифференциальные сечения для моделей с медиаторами в системе кластера ($t\Phi$)

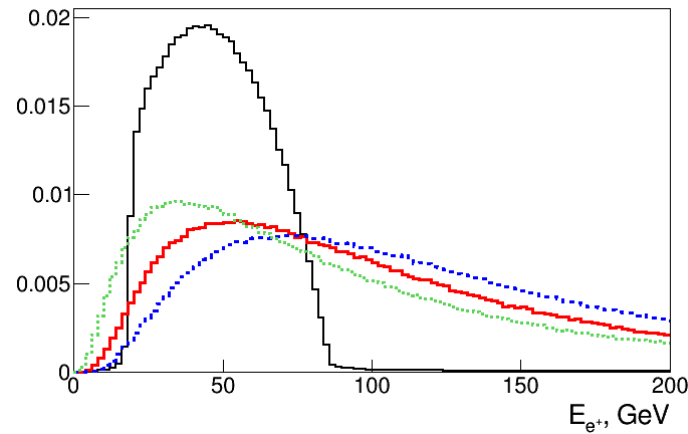
В системе ($t\Phi$) импульс d -кварка сохраняет свою ориентацию относительно e^+

$\cos\theta$



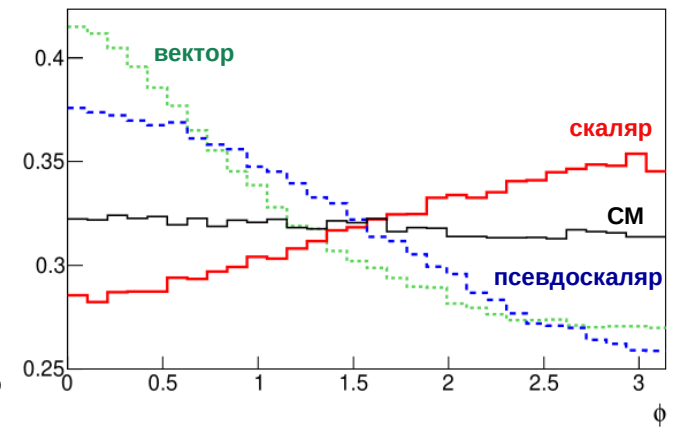
В системе ($t\Phi$) увеличивается диапазон значений энергии e^+ и b

E_{e^+}



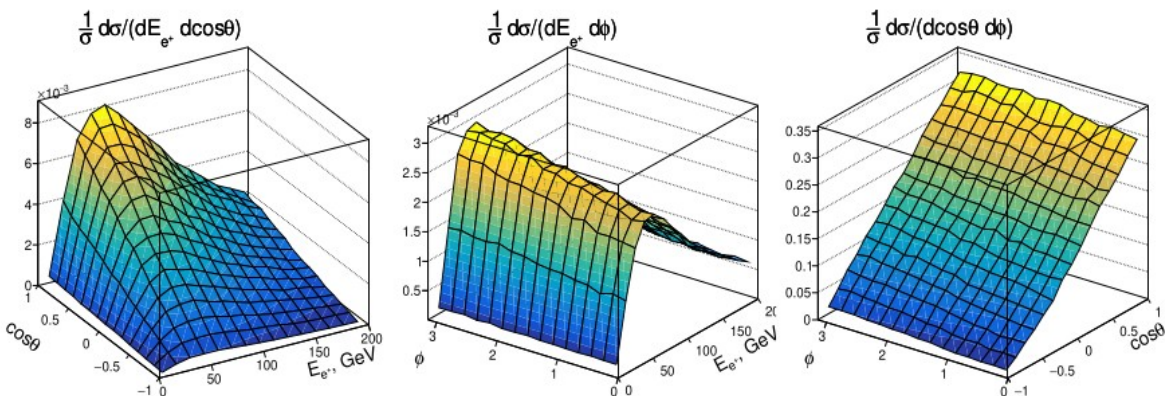
Из-за изменения кинематики b и e^+ в системе ($t\Phi$) меняется угол φ ориентации вектора d относительно плоскости (b, e^+)

φ

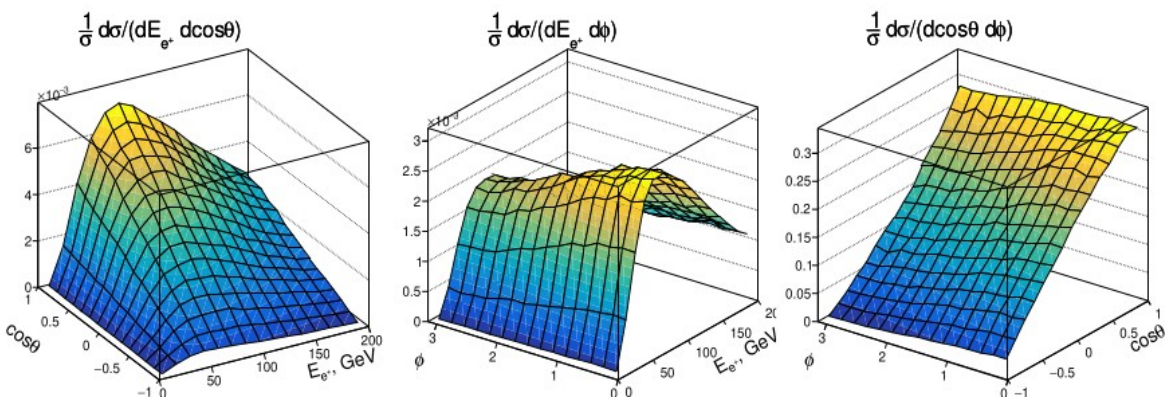


Двумерные дифференциальные сечения для моделей с медиаторами в системе кластера (tΦ)

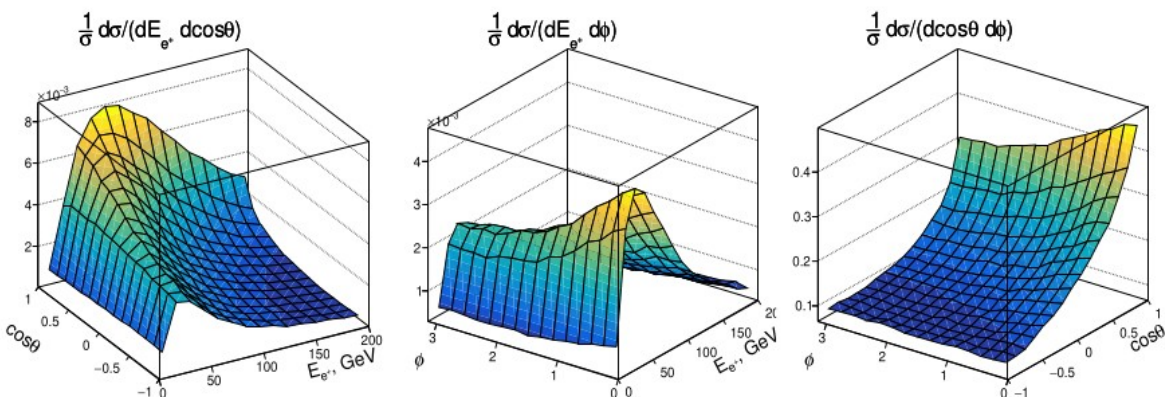
SM + скалярный медиатор



SM + псевдоскалярный медиатор

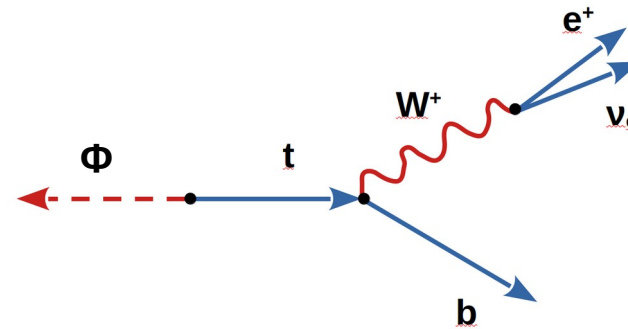


SM + векторный медиатор

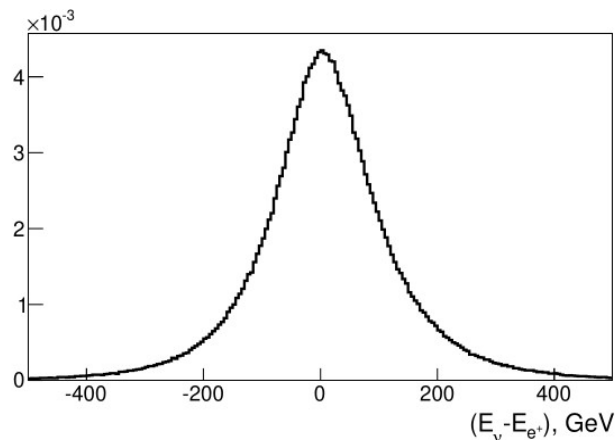


Измерение массы медиатора

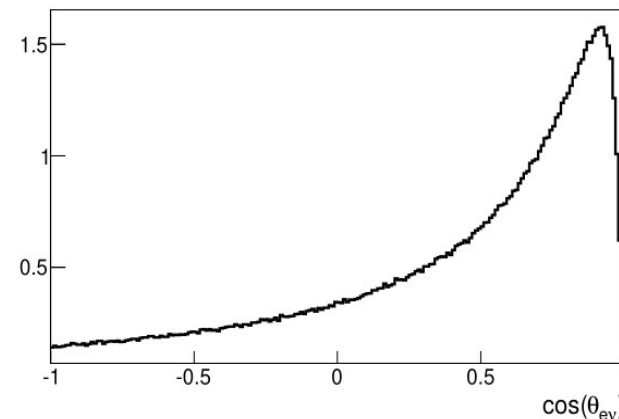
- В системе кластера ($t\Phi$) топ кварк и медиатор летят в противоположные стороны. Модули их трёхмерных импульсов равны друг другу.



- В системе ($t\Phi$), в случае достаточно большой массы медиатора, топ кварк имеет большой импульс, часть которого передаёт при распаде W -бозону, а он передаёт его **позитрону** и **нейтрину**. Таким образом, в этой системе **позитрон** и **нейтрин** летят сонаправленно в узком секторе, а значения их энергии близки друг к другу:



Распределение разности энергии нейтрини и позитрона в системе кластера ($t\Phi$).



Распределение косинуса угла между направлением движения нейтрини и позитрона в системе кластера ($t\Phi$).

Измерение массы медиатора

Таким образом, в большинстве случаев импульсы нейтрино и позитрона совпадают, и мы можем заменить импульс нейтрино на импульс позитрона в системе $(t\Phi)$. Согласно релятивистскому соотношению, масса медиатора равна:

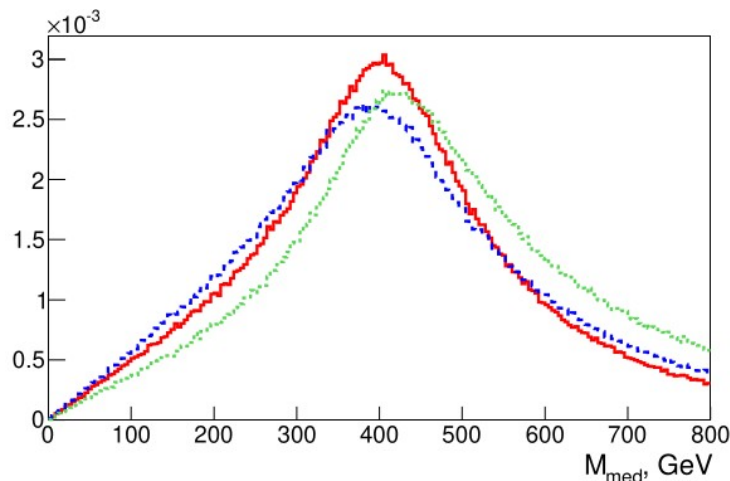
$$M_\phi = \sqrt{E_\phi^2 - \mathbf{p}_\phi^2} = \sqrt{(E_{miss} - E_\nu)^2 - (\mathbf{p}_{miss} - \mathbf{p}_\nu)^2}$$

Так как трёхмерный импульс медиатора равен суммарному импульсу продуктов распада топ кварка с противоположным знаком, а импульс нейтрино равен импульсу позитрона, можно записать:

$$M_\phi = \sqrt{(E_{miss} - E_{e^+})^2 - (\mathbf{p}_b + 2\mathbf{p}_{e^+})^2}$$

где E_{miss} - общая потерянная энергия в системе отсчета кластера $(t\Phi)$.

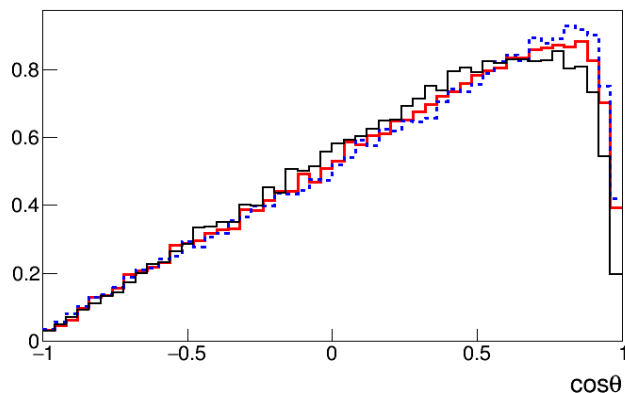
Распределение по переменной M_ϕ в системе отсчёта кластера, соответствующего продуктам распада топ кварка и медиатора: **скалярного** (красная сплошная линия), **псевдоскалярного** (синяя штриховая линия), **векторного** (зелёная точечная линия):



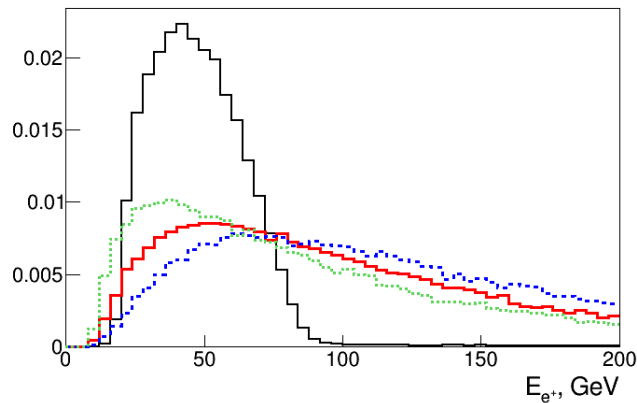
Положение максимума этого распределения соответствует значению массы медиатора. Схема работает для случаев достаточно тяжёлого медиатора, где в системе кластера (W-бозон, b-кварк, медиатор) W-бозон летит быстро.

Кинематические распределения в системе кластера (tФ) с учётом моделирования отклика детектора CMS

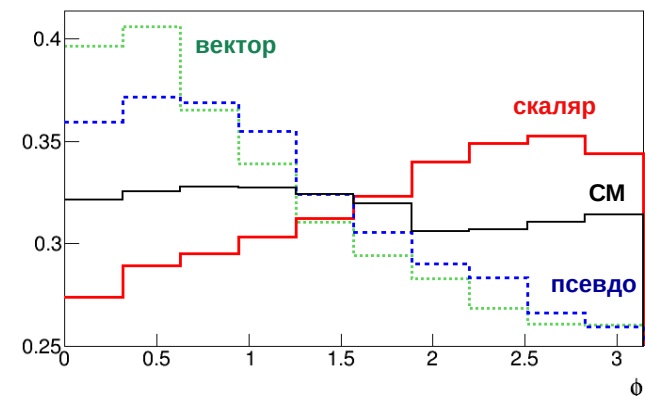
$\cos\theta$



E_{e^+}



ϕ



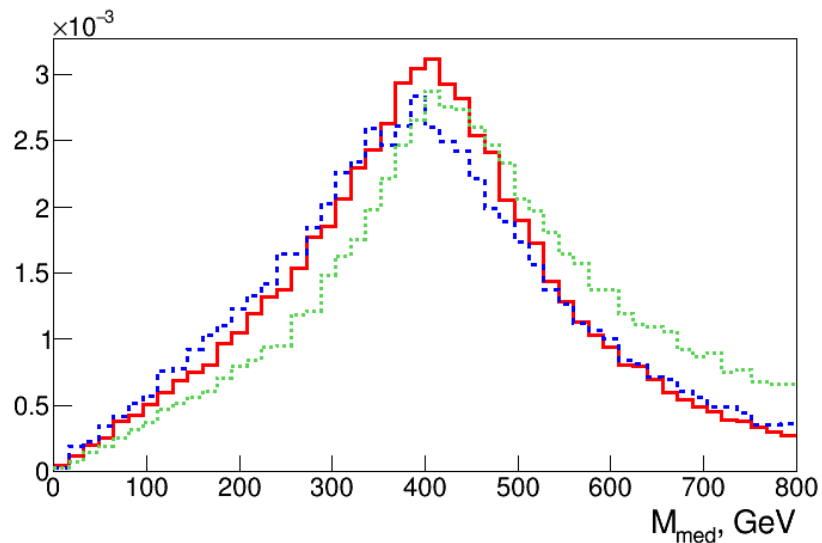
Реконструкция массы медиатора.

SM

SM + скалярный
медиатор

SM + псевдоскалярный
медиатор

SM + векторный
медиатор



Переменную M_ϕ можно также использовать для отделения сигнала с ТМ от фона СМ.

Полученные результаты

- Предложен новый метод поиска и идентификации медиаторов тёмной материи.
- Предложен новый метод точного измерения массы частицы-медиатора в процессах одиночного рождения топ кварка.
- Проведено полное моделирование процессов с учётом отклика детекторов коллайдера LHC.

Исследование проводится в рамках научной программы Национального центра физики и математики, проекта «Физика элементарных частиц и космология».