

Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ
Основные результаты полученные в 2025 году.

Исследования проводятся в рамках НИР:

бюджетная тема 3.2

"Экспериментальные исследования по физике тяжёлых кварков, электрослабых и нестандартных взаимодействий при высоких энергиях.»

ЦИТИС: 122081000003-9

ПН: 08; ТП: 01; ПНР:3

Координаторы темы - Э.Э.Боос и Л.В. Дудко.

Реферат

Продолжены комплексные исследования процессов с рождением топ-кварка. Проведены вычисления возможного проявления темной материи (ТМ) в процессах с топ-кварком. Показана значительная чувствительность процессов с тремя и четырьмя топ-кварками к проявлению темной материи в моделях со скалярным и псевдоскалярным медиатором. Предложена методика экспериментального поиска проявления темной материи в этих процессах. Исследованы возможные проявления отклонений от предсказаний Стандартной модели (СМ) параметризованные в виде эффективной теории поля (SMEFT) проявляющиеся в процессах с рождением трех и четырех топ-кварков. Вычислены ожидаемые ограничения на коэффициенты Вильсона для всех основных операторов SMEFT проявляющихся в таких процессах. Сложность исследуемых процессов диктует развитие методов их анализа. Процессы с рождением четырех топ-кварков имеют 12 партонных в конечном состоянии, что представляет значительные комбинаторные, вычислительные и другие сложности для их экспериментального исследования. Для решения этих проблем были созданы первые базовые, универсальные модели нейронных сетей трансформерной архитектуры для обобщенного исследования процессов с рождением одного, двух, трех и четырех топ-кварков, и фоновых к ним процессов. Продемонстрирована универсальность и эффективность таких моделей для поиска «новой физики» и сформулированы следующие этапы развития этого направления. Официальное сотрудничество организаций РФ и ЦЕРН закончено, но сотрудники, чьи аспиранты участвуют в анализе данных ЦЕРН, по решению коллаборации оставлены в листе авторов и продолжают совместные исследования с коллегами из топ-группы коллаборации CMS. В рамках исследований в эксперименте CMS (CERN, LHC) продолжен анализ и защита полученных экспериментальных результатов по поиску нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка, глюона и u - или s -кварка (FCNC). Проведено комплексное исследование фонового процесса множественного рождения струй, одна из которых ложно идентифицируется в качестве мюона. Эти фоновые процессы представляют значительные сложности для моделирования и оценки их влияния на полученные результаты. Сравнение различных методов их моделирования в различных сигнальных и контрольных областях позволило с уверенностью оценить неопределенность вклада таких

событий, и объяснить проявляющиеся рассогласования различных способов моделирования. Параллельно с анализом полного набора данных CMS в рамках нашего продолжающегося до конца 2026 года участия в эксперименте CMS, проводится работа по использованию открытых данных коллайдера LHC в рамках проекта OpenData в CERN. Открытые данные содержат порядка 15% процентов доступной статистики экспериментов, но доступны для анализа любой научной группой. Использование открытых данных позволит проводить исследования в коллайдерных экспериментах без прямого участия в коллаборациях ЦЕРН, но с использованием богатого накопленного опыта работы с такими данными, на основе создаваемых передовых методов анализа, теоретических и феноменологических исследований проводимых в нашей научной группе.

В 2025 году были продолжены исследования в рамках эксперимента MPD мегасайенс-проекта комплекса «NICA» (ОИЯИ, Дубна). На базе генератора PУТНIA с добавленным пакетом Angantyr проводился анализ рождения частиц в релятивистских столкновениях ядер в области энергий NICA, соответствующей первой очереди пуска коллайдера. Впервые получены данные с одной из последних версий PУТНIA/Angantyr 8.313 с использованием пакета SoftQCD в области нижней границы энергий NICA $\sqrt{s_{NN}} \simeq 4 - 5 \text{ GeV}$ и нижней кинематической границы генератора PУТНIA. Анализ результатов показал существенное улучшение согласия с экспериментальными данными AGS и данными, полученными в условиях 4π -геометрии в пузырьковой камере, по сравнению с предыдущими исследованиями (в PУТНIA/Angantyr 8.310, пакет SoftQCD не включён). Включение пакета SoftQCD также существенно улучшило результаты фитирования двумерных поверхностей как функции энергий сталкивающихся ядер и их масс, $f(E, A)$, в рамках предложенного ранее метода по исследованию поиска границ деконфайнмента. Полученные результаты, указывают на однородность искомой поверхности с хорошим значением критерия согласия, что делает генератор PУТНIA/Angantyr инструментом, представляющим значительный интерес в качестве фона для выделения возможных проявлений коллективных эффектов, таких как кварк-глюонная плазма, в исследованиях по столкновению тяжёлых ионов.

В рамках коллаборации [BM@N](#) проведён анализ рождения протонов, дейтронов и тритонов во взаимодействиях пучка Ag с мишенями C, Al, Cu, Sn и Pb, на детекторе BM@N при энергии Нуклотрона 3,2 А ГэВ. Были получены результаты по выходу протонов, дейтронов и тритонов и проведено сравнение их характеристик с предсказаниями различных моделей и другими экспериментами.

Для математического обеспечения эксперимента MPD ведутся работы по подготовке юстировки частей детектора по экспериментальным данным. Прделана работа по моделированию StrawEndCap трека детектора SPD с целью нахождения наиболее оптимальной конфигурации этого детектора.

До конца 2026 года продолжается участие сотрудников НИИЯФ МГУ в эксперименте CMS (CERN, LHC). В рамках этих исследований создано моделирование калориметра ZDC установки CMS в составе общего программного пакета реконструкции CMSSW. На основе полного моделирования создана библиотека ливней, позволяющая многократное ускорение моделирования физических событий.

Продолжена разработка методов юстировки детектора и ПО для эксперимента LHCb в третьем периоде работы LHC (Run 3) в рамках проекта RTA (Real Time Analysis). Выдвинут принципиально новый метод для триггерных линий в первом триггере высокого уровня (HLT1) для радикального усиления эффективности процедуры юстировки RICH детекторов установки LHCb.

Продолжаются теоретические исследования. В гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне учтена поправка к приближению медленного скатывания связанная с Гаусс-Бонне взаимодействием в терминах чисел е-фолдингов двумя способами. Предложены уточнения медленного скатывания в скалярно-тензорной теории. Проанализирована стабильность решений де Ситтера и построена фазовая диаграмма в модели модифицированной гравитации представленной функцией от суммы скаляров Риччи и Гаусса-Бонне умноженного на постоянную.

Получены физические решения для фермионного и векторного полей в пространстве-времени черной дыры Шварцшильда, вычислена нормировка таких решений, отмечено удвоение некоторых состояний энергетического спектра физических полей по сравнению с пространством Минковского.

Изучены возможности поисков ассоциативного образования частиц темной материи с парой тау-лептонов в электрон-позитронных столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 7 \text{ GeV}$, принимая во внимание параметры пучка сталкивающихся частиц будущего коллайдера, эффекты ISR и учитывая эффективность реконструкции тау-лептонов конечного состояния. Получены доверительные области чувствительности коллайдера к процессам образования частиц легкой ТМ, опосредованного скалярными и векторными медиаторами, в зависимости от параметров модели (масс новых частиц и значений констант связей) с учетом существующих экспериментальных ограничений.

Применив теорию полевой эмиссии из металлов и полученные нами ранее модификации полей пучка позитронов под воздействием внешних проводников и магнетиков, вычислены величины токов эмиссии из коллиматоров будущего Кольцевого Электрон-Позитронного Коллайдера (CEPC) в КНР. Показано, что при малых полуширинах зазора коллиматоров, эмиссия электронов может привести к значительной деградации пучка коллайдера.

Введение

а) Физика топ кварка.

Существующие экспериментальные данные не позволяют предпочесть какой-то выделенный сценарий за рамками Стандартной модели (SM), и существенные усилия

концентрируются на модельно-независимом поиске возможных отклонений от предсказаний СМ. В основе модельно-независимого поиска выбран подход эффективной теории поля, включающей эффективные операторы высших размерностей, сохраняющих симметрии СМ. Такие операторы способны описать все возможные новые взаимодействия частиц СМ между собой, возникающие вследствие их взаимодействия с пока не наблюдаемыми гипотетическими частицами. Формализм эффективной теории поля позволяет исследовать проявления конкретных модельно-независимых операторов, обусловленных моделями за рамками СМ, в различных процессах. Такой подход должен привести к более жестким модельно-независимым ограничениям на коэффициенты при возможных операторах. С другой стороны, возможное проявление конкретных операторов является следствием определенного класса расширений СМ, и такая связь может быть использована для увеличения чувствительности к проявлению таких расширений СМ. Иерархию масс кварков замыкает t -кварк с зарядом $2/3$ из третьего поколения (дублета) фермионов СМ. Топ-кварк является наиболее тяжелым из фундаментальных (бесструктурных) объектов микромира. Обладая массой, сравнимой с массой ядра золота, топ-кварк является точечным в рамках СМ. Время жизни топ-кварка ($\sim 10^{-25}$ с) настолько мало, что он распадается до того, как образовать связанные адронные состояния. Большая масса и ряд других необычных свойств топ-кварка позволяют предположить, что именно во взаимодействиях топ-кварка проявятся первые отклонения от предсказаний СМ и указания на «Новую физику».

б) Физика дифракционных процессов и партонная структура частиц.

Дифракционные процессы — это класс адронных взаимодействий, в которых рассеяние сталкивающихся частиц обусловлено обменом объектом (померон), имеющим нулевые квантовые числа и называемым померон. Процессы такого рода обычно характеризуются быстрым летящим вперед нуклоном или нуклонным состоянием, отделенным разрывом в распределении по скорости от адронного конечного состояния, образованного в центральной области события.

Физическая природа померона пока что не до конца понятна в рамках Квантовой Хромодинамики (КХД) и описывается различными теоретическими моделями. Фотон-померонное взаимодействие обусловлено процессами, в которых фотон или померон действует как источник кварков и глюонов, участвующих затем в КХД рассеянии (resolved processes) и в процессах, где фотон или померон взаимодействует как целое (direct processes). Если гипотеза факторизации справедлива, аналогичная партонная структура должна быть верной и для процессов прямого фоторождения, так же как и для глубоко-неупругого рассеяния (ГНР), хотя в процессах с структурным (resolved) фотоном может присутствовать дополнительные эффекты поглощения.

Жесткие фотоны также рождаются во «фрагментационных процессах», в которых фотон излучается в струе адронов.

в) Физика взаимодействий с ядрами.

Изучение характеристик множественного рождения в столкновениях ядер даёт информацию о начальной стадии взаимодействия (initial state), определяющей возможное дальнейшее развитие фазы кварк-глюонной плазмы. Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях — одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики высоких энергий. Эксперименты по столкновению тяжёлых ионов, в которых создаются условия сверхвысоких температур и плотностей, интенсивно ведутся или планируются на ускорителях в различных научных центрах Европы и США (RHIC, LHC, NICA, FAIR).

Интерес к таким исследованиям обусловлен тем, что эти эксперименты дают возможность изучить параметры уравнения состояния сильно взаимодействующей материи при высоких температурах и плотностях, при которых проявляется кварк-глюонная структура нуклонов и создаются условия для фазового перехода — образования кварк-глюонной плазмы, нового состояния ядерной материи, когда адроны как составные объекты теряют свою идентичность

и переплавляясь в некую субстанцию из своих компонентов — кварков и глюонов. Обнаружение и измерение окрестности критической точки такого фазового перехода имеет принципиальное значение. Имеющаяся к настоящему времени совокупность экспериментальных данных и теоретических моделей, дают основание предполагать, что эта критическая точка находится в диапазоне энергий сооружаемого в России комплекса NICA.

Результаты

1.1 Исследования топ-кварка в эксперименте CMS (ЦЕРН, БАК)

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

Официальное сотрудничество организаций РФ и ЦЕРН закончено, но сотрудники, чьи аспиранты участвуют в анализе данных ЦЕРН, по решению коллаборации оставлены в листе авторов и продолжают совместные исследования с коллегами из топ-группы коллаборации CMS. Сотрудники НИИЯФ в 2025 году продолжали активное участие в анализе данных CMS, выступали на митингах удаленно, результаты группы были включены в публикации коллаборации CMS в ЦЕРНе.

Продолжена работа по защите в коллаборации результатов, полученных группой НИИЯФ МГУ в эксперименте CMS, по поиску нейтральных токов, меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка, глюона и u - или s -кварка ($FCNC$ tcg и tug) в событиях одиночного рождения топ-кварка, с использованием данных детектора CMS, набранных в 2016-2018 годах. Для ряда сотрудников НИИЯФ МГУ продлено участие в коллаборации CMS до конца 2026 года, в связи с необходимостью завершения проводимых анализов необходимых для защиты диссертаций участвующих аспирантов. Продолжена серия обсуждений с внутриколлаборационными экспертами по выявлению потенциально проблемных мест анализа и приведению его к публикационным требованиям CMS. В рамках интенсивного обсуждения был существенно доработан препринт коллаборации с описанием анализа [http://www-hep.sinp.msu.ru/hep/open_docs/CMS-AN-16-371.pdf].

Было проведено масштабное исследование одного из важнейших фоновых процессов, процесса множественного рождения адронных струй одна из которых ложно идентифицируется в качестве мюона (КХД фон). Это сложный процесс для стандартных Монте-Карло (МК) методов моделирования, в связи с чем, как правило, используется моделирование на основе области данных, ортогональной по т. н. изолированности лептона. Оба метода демонстрируют определённые расхождения в сигнальной области анализа. Выяснение причин этих расхождений является одной из ключевых задач для одобрения анализа к публикации.

Было показано, что моделирование, полученное на основе данных, имеет чистоту порядка 95%, достаточную для использования в анализе. Также, было показано, что расхождения в моделировании КХД фона из данных, по крайней мере, частично, обусловлены использованным методом отбора событий. Хотя ранее считалось, что КХД фон не зависит от изолированности лептона, что и обусловило широкое применение этого метода в экспериментальном анализе, было продемонстрировано, что распределения некоторых наблюдаемых могут существенно изменяться в зависимости от используемого диапазона изолированности.

Существующее МК моделирование КХД фона обладает относительно низкой статистикой, в силу целого ряда сложностей его моделирования. Низкая статистика приводит к необходимости ослабления критериев отбора событий. Было показано, что наблюдаемые расхождения различных способов моделирования частично обусловлены ослаблением обрезания по изолированности лептона. Также было показано, что несмотря на сохраняющуюся значительную статистическую ошибку МК КХД и значительную неравномерность весов внутри набора событий, статистическая значимость отобранных

событий достаточно для проведения анализа при применении продвинутых методов фитирования данных.

Было показано, что после применения специализированной искусственной нейронной сети глубокого обучения (QCD DNN) для выделения и удаления КХД событий, наблюдаемое расхождение между обоими методами моделирования КХД фона снижается до уровня статистической ошибки. Было показано, что эффективность QCD DNN слабо зависит от используемого метода при тренировке и применении, а также сохранение высокой эффективности сети в смежных, контрольных областях анализа.

Была найдена контрольная область для КХД фона, удовлетворяющая требованиям независимости от сигнальной, при достаточном её кинематическом подобии сигнальной области. Эта область может быть использована для получения нормировочного коэффициента КХД фона независимо от сигнальной области, что является одним из выдвинутых экспертами требований, для проверки полученных результатов.

В процесс обучения нейронных сетей был добавлен критерий ранней остановки на основе величины статистической ошибки, для избежания ситуации перетренировки сетей в условиях ограниченных тренировочных наборов. Также была внедрена и проведена автоматизированная оптимизация гиперпараметров DNN, таких как число скрытых слоёв и нейронов на слой, передаточные функции между слоями, величины т. н. дропаута (искусственного шума) и других. Это позволило улучшить их эффективность по сравнению с сетями, применявшимися ранее, при одновременной минимизации расхождений между тренировочным и тестовым наборами.

Полученные результаты несколько раз представлялись на внутриколлекторных семинарах. На рисунках представлены графики подтверждающие полученные выводы.

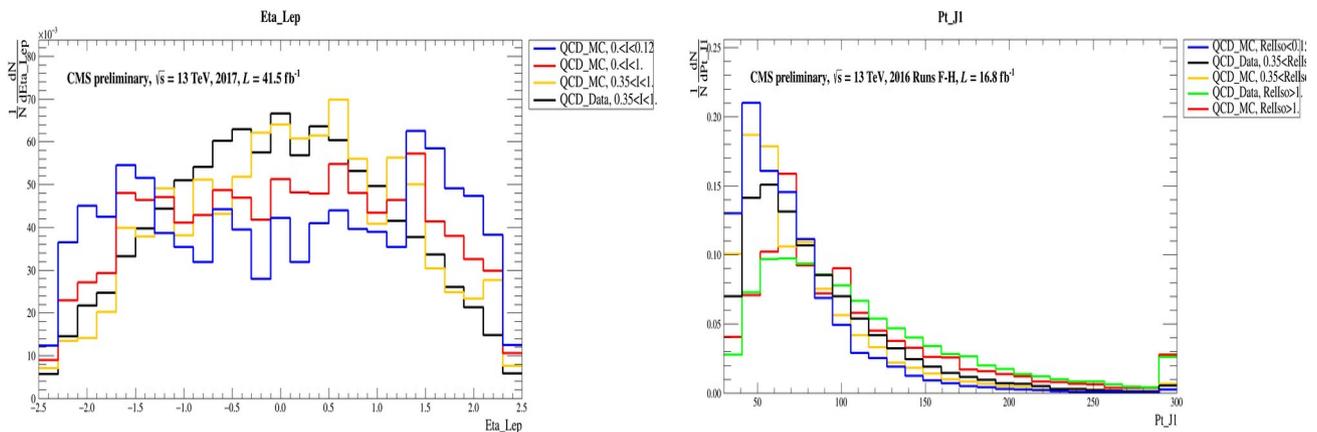


Рис. 1 Демонстрация зависимости формы наблюдаемых для шаблонов КХД из МК и КХД из данных от области отбора шаблона.

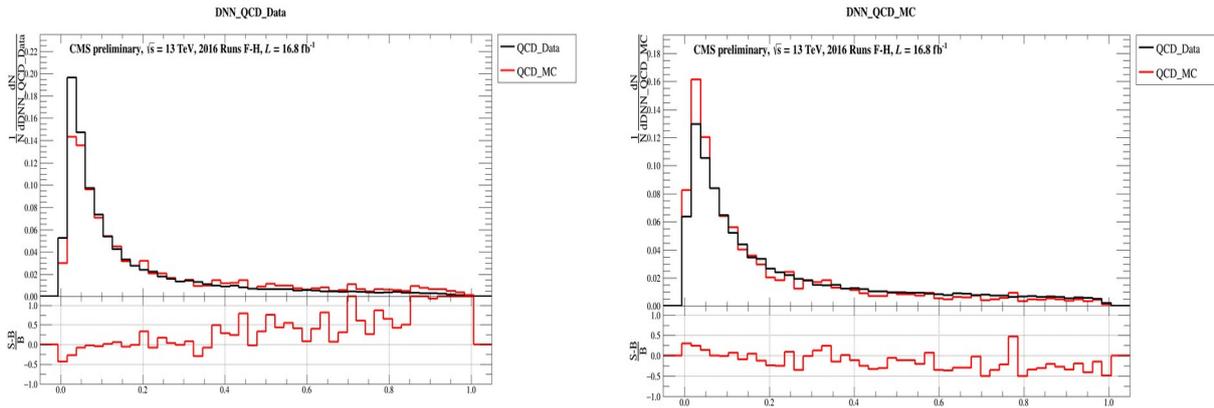


Рис.2 Сравнение распределений шаблонов КХД из МК и КХД из данных, в зависимости от использованного тренировочного набора DNN QCD — QCD из данных (слева) и КХД из МК (справа)

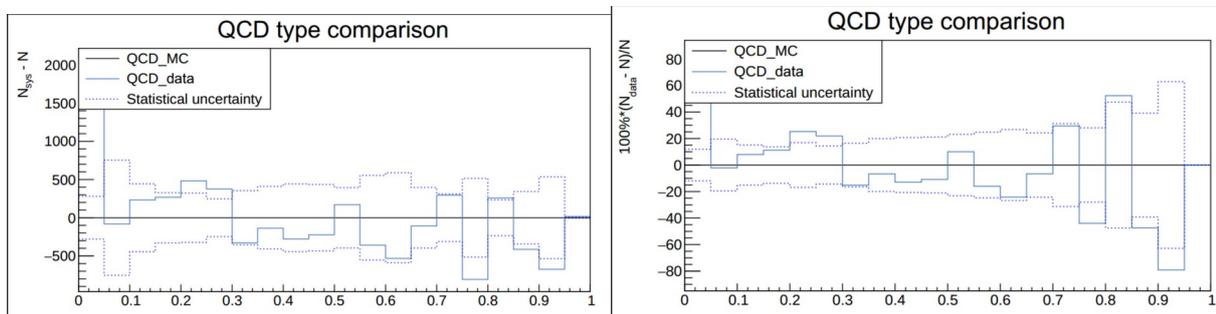


Рис. 3 Сравнение разницы распределений КХД из МК и из данных с величиной статистической погрешности в абсолютной и относительной величине.

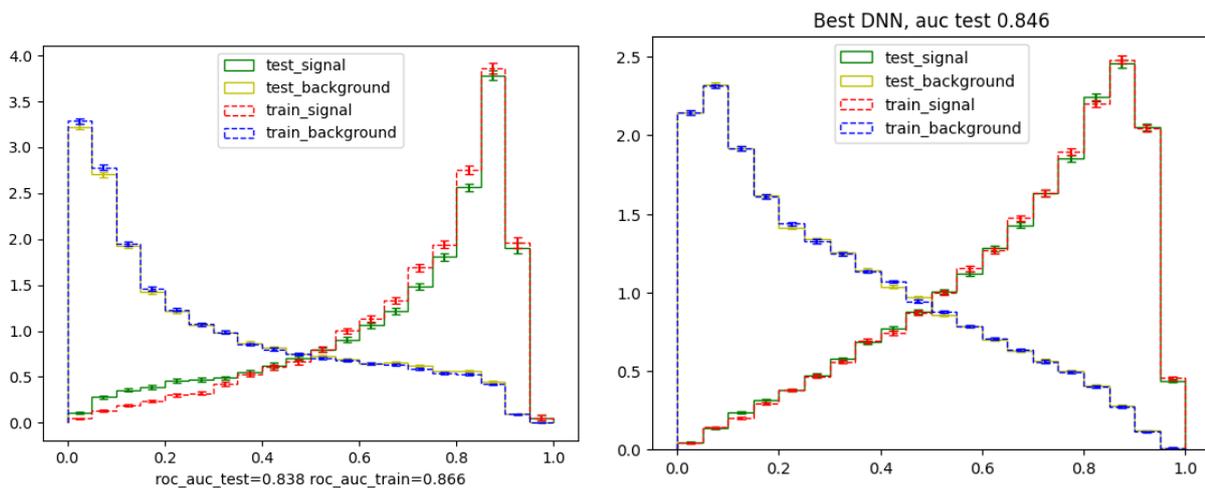
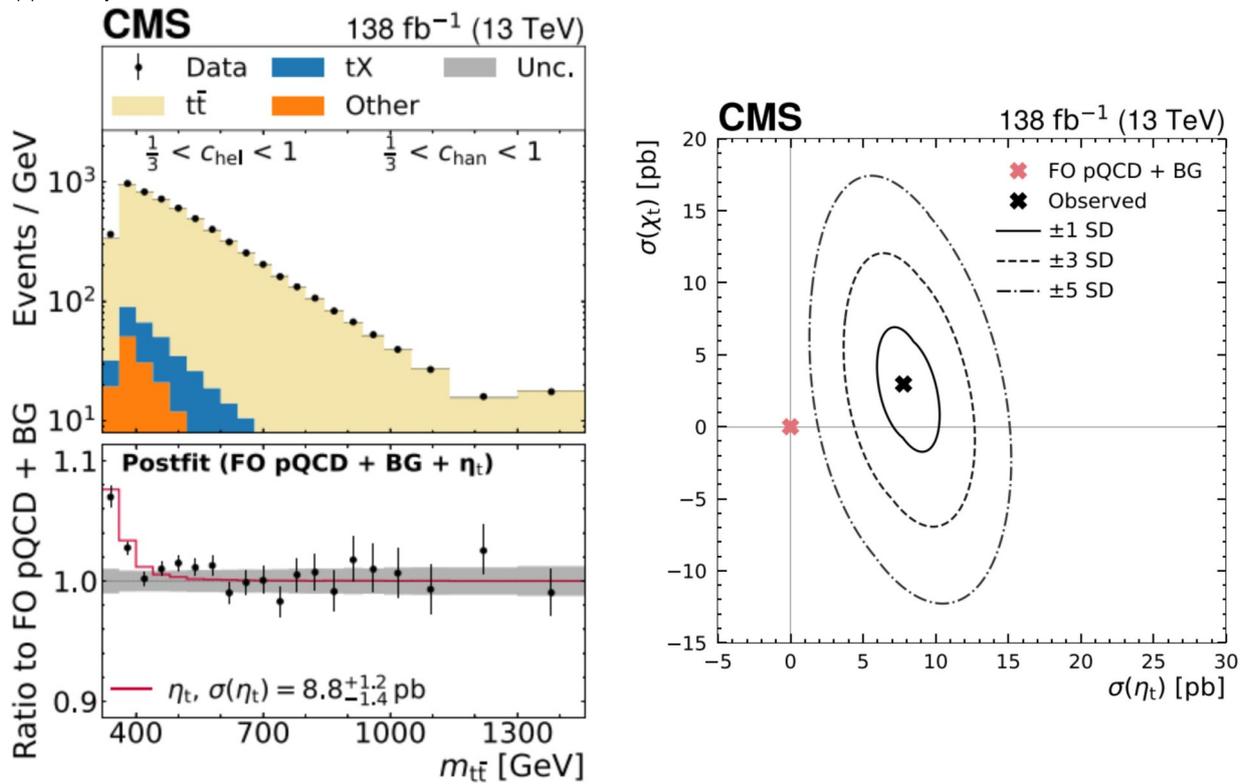


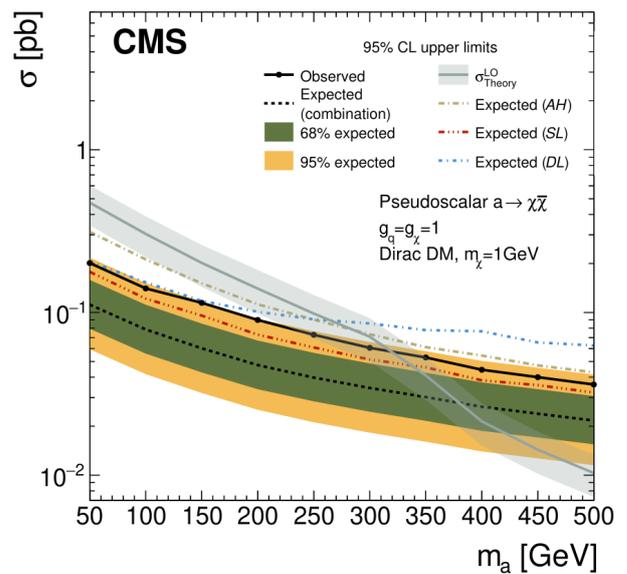
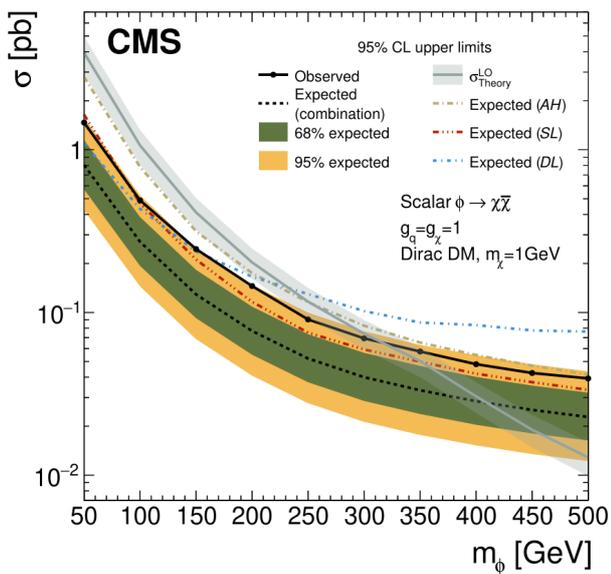
Рис 4. Сравнение выхода DNN для выделения FCNC tag до (слева) и после (справа) внедрения автоматизированной оптимизации и критерия ранней остановки тренировки

В 2025 завершен анализ проявления связанного состояния двух топ-кварков под порогом рождения по массе двух топ-кварков [*Rept.Prog.Phys.* 88 (2025) 8, 087801; e-Print: [2503.22382](https://arxiv.org/abs/2503.22382) [hep-ex]]. Полученные измерения позволили объявить об открытии резонанса, интерпретируемого как топониум (связанного состояния двух топ-кварков) с сечением рождения $8.8 +1.2/-1.4$ пб и статистической значимостью более 5 стандартных отклонений.

На рисунках показаны проявление резонанса в распределении по инвариантной массе двух топ-кварков в области ниже 360 ГэВ и статистическая значимость измерения в двух разных моделях резонанса.



Проведен экспериментальный поиск проявления темной материи в процессах с рождением одного и двух топ-кварков. В рамках моделей со скалярным или псевдоскалярным медиатором получены верхние ограничения на массу медиатора 300 ГэВ, при ожидаемом ограничении 400 ГэВ, что стало следствием отклонения в 1.9 стандартных отклонений на массе 150 ГэВ [*JHEP* 08 (2025) 085]. Для модели векторного или аксиально-векторного медиатора верхние ограничения на массу составили 1.85 ТэВ [*JHEP* 09 (2025) 141]. На рисунках приведены ограничения для скалярного и псевдоскалярного медиаторов.



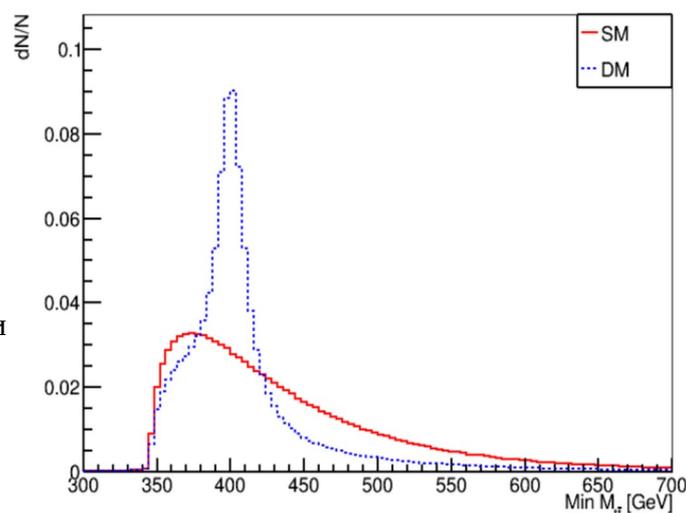
1.2 Феноменологические исследования возможного проявления «новой физики» в процессах с топ-кварком

(Э.Э. Боос, Г.А. Воротников, П.В. Волков, Л.В. Дудко, А.Д. Заборенко, Э.Э. Абасов, А.А. Маркина, М.А. Перфилов, Е.С. Иудин, Н.А. Савкова, К.В. Харитонов, О.С. Василевский, Д.Э. Горин)

Исследовано возможное проявление темной материи (DM) в процессах с рождением одного, двух, трех и четырех топ-кварков. Рассмотрены основные используемые упрощенные модели с скалярным и псевдоскалярным медиатором с характерными единичными константами связи, основанными на рекомендациях рабочей группы (LHC-DM-WG) по исследованию темной материи на коллайдере БАК (ЦЕРН). Проведены вычисления ассоциативного рождения медиатора темной материи, в ассоциации с рождением 1, 2, 3-х и 4-х топ-кварков и показана низкая чувствительность таких процессов к возможному рождению темной материи [*Phys.Part.Nucl.* 56 (2025) 2, 440-446, *Phys.Part.Nucl.* 56 (2025) 2, 429-433]. Именно в таких процессах проводят основные экспериментальные поиски темной материи в процессах с топ-кварком. В этих процессах медиатор темной материи проявляется в виде недостающего поперечного импульса, но помимо темной материи в недостающий поперечный импульс дают вклад нейтрино, что приводит к сложностям выделения вклада от нескольких не регистрируемых частиц. Был предложен новый метод восстановления таких не регистрируемых частиц. Метод основан на современной архитектуре нейронных сетей нормированных потоков (normalizing flows). Предложенный метод показал высокую эффективность по сравнению с обычными нейронными сетями и другими методами [[2504.14303](#) принято к публикации в «Ядерная физика», [2510.11644](#) принято к публикации в «Вестник МГУ»].

Далее, был обнаружен и детально исследован эффект резонансного рождения медиатора темной материи распадающегося в пару топ-анти топ-кварков. Такой эффект чрезвычайно сильно проявляется в процессах с тремя и четырьмя топ-кварками, где, в отличие от рождения пары топ-кварков, медиатор излучается из линии топ-кварка, что приводит к высокой вероятности таких процессов, в силу предполагаемой большой константы связи медиатора темной материи с топ-кварком. Проведенные вычисления количественно показали большой возможный вклад DM в полное сечение. Например, для ведущего процесса $g, g \rightarrow t, t, W, b$ сечение в рамках Стандартной модели (SM) составляет 15.5 фб, но если реализуется сценарий темной материи с характерными параметрами, то в модели со скалярным медиатором сечение составит 23.0 фб, т. е. увеличится на 48%, в сценарии с псевдоскалярным медиатором сечение составит 40.6 фб, т. е. увеличится на 160%. Для векторного медиатора отличия будут еще сильнее. Помимо вычислений полных сечений, были исследованы дифференциальные сечения и найдена очень чувствительная наблюдаемая, которую можно измерить в

эксперименте, в которой хорошо проявляется пик от медиатора темной материи. Необходимо отметить, что в процессах резонансного рождения медиатора, все конечные частицы являются частицами SM и регистрируются в детекторе (кроме нейтрино), что сильно облегчает анализ данных и снижает экспериментальные ошибки. На рисунке показано распределение смоделированных событий для сценариев Стандартной модели (SM) и сценария с скалярным медиатором темной материи (DM) (показан только вклад диаграмм с DM) для минимальной инвариантной массы пары топ-кварков. Так как в рассматриваемых событиях можно выделить 4 топ-кварка, то из всех возможных комбинаций выбирается с минимальным значением в каждом событии



[2510.09428 принято к публикации в «Вестник МГУ»]. Результаты проведенных феноменологических исследований используются в экспериментальном поиске на данных детектора CMS (БАК, ЦЕРН) [CMS-PAS-TOP-24-008].

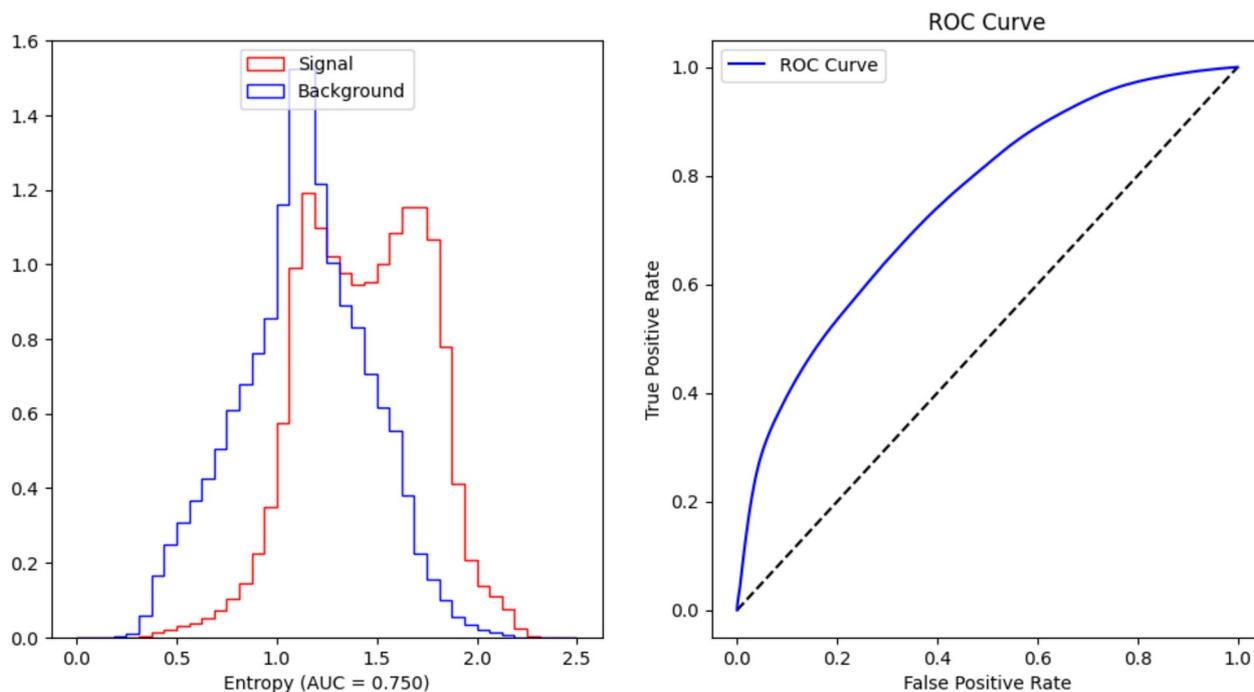
Проведено исследование влияния возможных операторов SMEFT, параметризующих «новую физику», на процессы с рождением трех и четырех топ-кварков. На основе проведенных вычислений и статистического анализа получены ожидаемые ограничения для всех операторов проявляющихся в этих процессах [*Phys.Part.Nucl.* 56 (2025) 2, 374-380].

1.3 Развитие методов анализа сложных процессов

(Г.А. Воротников, П.В. Волков, Л.В. Дудко, А.Д. Заборенко, Э.Э. Абасов, А.А. Маркина, М.А. Перфилов, Е.С. Иудин, Н.А. Савкова, К.В. Харитонов, О.С. Василевский, Д.Э. Горин, Ф. Григорьев, В. Лычагин, А. Шабанов)

Необходимость анализа всё более сложных процессов множественного рождения топ-кварков, обладающих высокой чувствительностью к эффектам за пределами SM требует развития новых методов анализа. Современные методы обработки данных коллайдерных экспериментов сталкиваются с существенными ограничениями при рассмотрении сложных процессов с большим количеством конечных частиц, часть из которых не регистрируется, и при попытке обобщения на одновременный учет нескольких конечных сигнатур событий. Например, недавно открытое рождение 4-х топ-кварков приводит к 12 партонам в конечном состоянии, часть из которых может быть не регистрируемыми нейтрино, в зависимости от выбранной конечной сигнатуры событий. Развитие универсальных фундаментальных моделей нейронных сетей, учитывающих физические симметрии и инварианты задачи, позволит значительно повысить эффективность анализа и моделирования таких процессов. Планируется создание многоуровневой архитектуры нейросетей. На первом уровне будут разработаны методы реконструкции событий партонного уровня и восстановления промежуточных резонансов в процессах с множественным рождением топ-кварков. На втором уровне предполагается реализация нейросетей для задач классификации и регрессии, включая определение принадлежности событий различным физическим процессам и измерение параметров теоретических моделей, в том числе в рамках эффективной теории поля SMEFT. Отдельное направление будет посвящено созданию модулей для реконструкции не регистрируемых частиц (нейтрино, кандидатов на темную материю) и разработке новых подходов к модельно-независимому поиску аномалий в данных экспериментов. Создана первая версия фундаментальной базовой нейронной сети трансформерной архитектуры, с целью проверки и демонстрации концепции, и формирования следующих шагов для реализации. Модель показала хорошую эффективность и универсальность в плане чувствительности к «новой физике», которую модель не видела в процессе тренировки, т. е. нейронная сеть тренировалась только на событиях в рамках Стандартной модели. Первые результаты представлены в работе [2511.09335 принято к публикации в «Ядерная физика»]. На рисунке показано распределение энтропии классификации для сравнения Стандартной модели (Background) и модели «новой физики» которая не участвовала в процессе тренировки сети, в данном случае взята модель темной материи со скалярным медиатором (Signal).

Entropy of Transformer Probability Predictions



2. Исследования в экспериментах MPD, SPD и **BM@N** на коллайдере NICA.

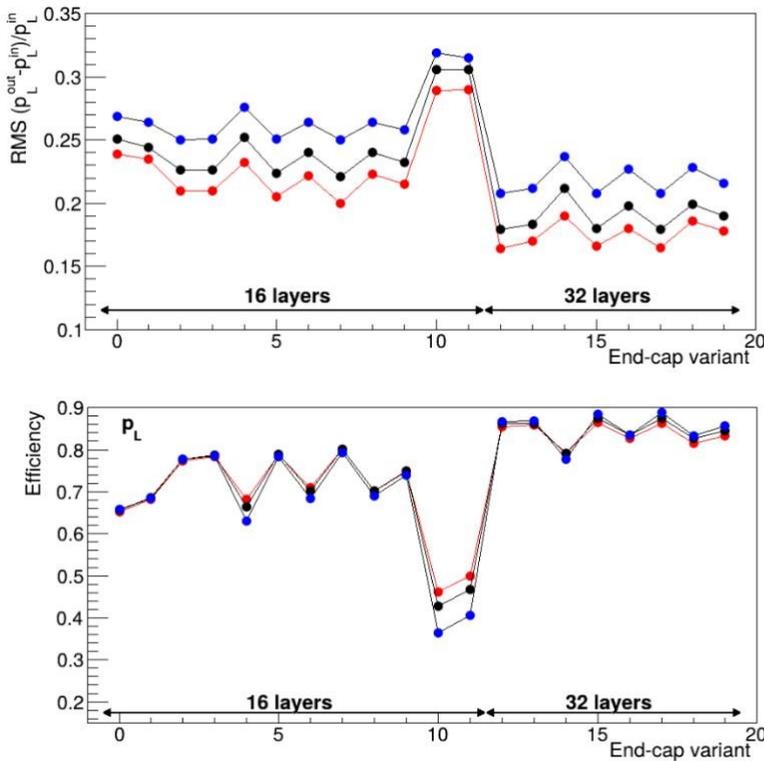
MPD (А.Н. Соломин, В.А. Кузьмин, Л.М. Щеглова), BM@N (А.Н. Соломин), SPD (В.А. Кузьмин)

2.1 Юстировка

(В.А. Кузьмин)

Ведутся работы по адаптации ранее разработанного математического обеспечения процесса юстировки времяпроекционной камеры детектора MPD для новых версий операционной системы mpdroot. В процессе сборки детектора обнаружилась проблема нахождения положения лучей лазерной системы. Начаты работы по определению их параметров методами юстировки для секторов времяпроекционной камеры.

Разработан метод компьютерного моделирования StrawEndCap трекера детектора SPD. Была показана неспособность предложенной схемы детектора с двойными координатными плоскостями однозначно определять хиты треков. В этой связи был предложен метод нахождения параметров трека по «плавающим» хитам в однослойной координатной плоскости. Полученные результаты для различных компоновок детектора и точностей его электроники докладывались на митингах как физической так и хардверной групп. Оценены точности восстановления параметров треков для нескольких десятков вариантов детектора. На рис.2.1.1 в качестве примера показаны зависимость величины относительной ошибки реконструкции перпендикулярного импульса, а также эффективность детектора в зависимости от геометрии детектора и точности его электроники.



Accuracy:

- 400µm
- 200µm
- 100µm

Cuts:

$$\chi^2 = \frac{\min \sum_{hits} \left(\frac{H_i - T_i}{\sigma_i} \right)^2}{hits} < 10$$

$$\frac{|P_L^{rec} - P_L^{in}|}{P_L^{in}} < 0.5$$

Рис.2.1.1 . EndCap трекер детектора SPD. Относительная ошибка реконструкции перпендикулярного импульса частицы с энергией 330 МэВ и эффективность регистрации для разных компоновок детектора и точности его электроники.

2.2 Анализ рождения частиц в столкновениях релятивистских ядер на основе генератора Angantyr (PYTHIA 8.313)

(А.Н. Соломин, Л.М. Щеглова)

В 2025 году были продолжены исследования в рамках эксперимента MPD мегасайенс-проекта комплекса «NICA» (ОИЯИ, Дубна). На базе генератора PYTHIA с встроенным пакетом Angantyr проводился анализ рождения частиц в релятивистских столкновениях ядер в области энергий NICA, соответствующей первой очереди пуска коллайдера. Поскольку в этой модели не заложена физика образования коллективных явлений типа кварк-глюонной плазмы, эта модель представляет существенный интерес для использования в качестве фона для выявления признаков образования нового состояния адронной материи.

Анализ и тестирование генерированных событий в области нижней границы энергий NICA $\sqrt{s_{NN}} \simeq 4 - 5 \text{ GeV}$ и нижней кинематической границы генератора PYTHIA проводились на базе одной из последних версий PYTHIA/Angantyr 8.313 с использованием пакета SoftQCD. В данном релизе был устранен ряд ошибок в основном коде PYTHIA 8.3 предыдущей версии, в частности, в имплементации модели QCD Colour-Reconnection model, которая связана с описанием процессов рождения частиц с малыми p_T , а также в пакете Angantyr параметр `Angantyr:CollisionModel`, который связан с различными подходами для описания флуктуаций поперечного сечения, был изменён с целью более детального учета фактора непрозрачности сталкивающихся ядер из соображений стабильности вычисления сечений при переходе к очень малым энергиям.

Для тестирования моделей важным моментом является корректное сравнение с экспериментом. Однако, в большинстве экспериментальных данных в области обсуждаемых энергий, полученных в экспериментах на ускорителях AGS, RHIC и NA49, отбор событий делался на аппаратном уровне. В связи с этим экспериментальные данные, полученные на 2-х метровой пропановой камере в пучках лёгких ядер при импульсе 4.2 GeV/c, являются уникальными для проводимого анализа, поскольку данные получены без триггерных отборов в условиях 4π- геометрии.

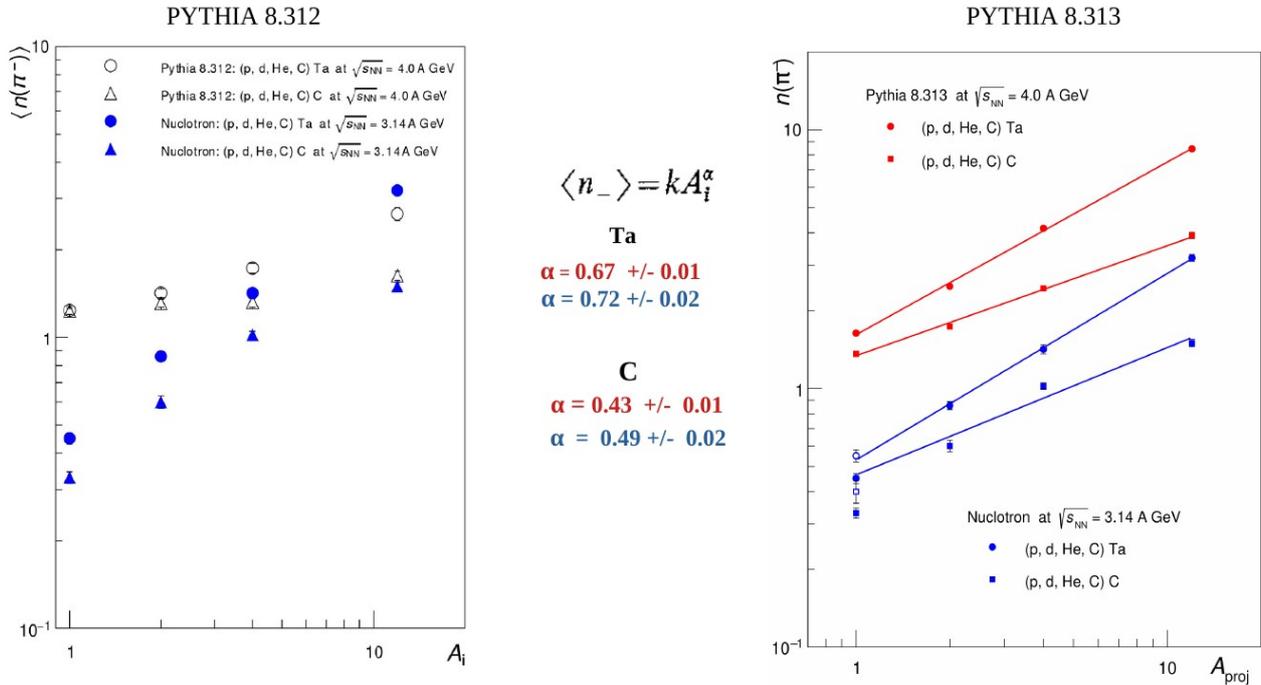
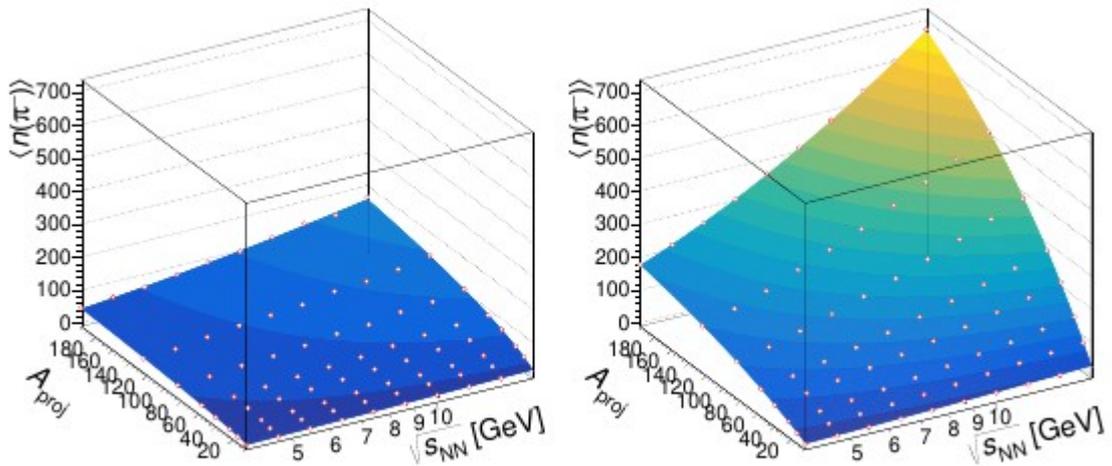


Рис. 2.2.1: Сравнение средней множественности отрицательных пионов во взаимодействиях лёгких ядер p, d, He, C с ядрами углерода ¹²C и тантала ¹⁸¹Ta в событиях, полученных в пропановой камере, с событиями сгенерированными по модели Angantyr (PYTHIA 8.312), без пакета SoftQCD (левый график; голубые кружки и треугольники — эксперимент, открытые чёрные кружки и треугольники — PYTHIA) и с событиями, сгенерированными по модели Angantyr (PYTHIA 8.313) с пакетом SoftQCD, (правый график; голубые кружки и квадраты — эксперимент, красные кружки и квадраты — PYTHIA).

На Рис. 2.2.1 представлены результаты по зависимости средней множественности отрицательных пионов во взаимодействиях лёгких ядер A_i с ядрами углерода ¹²C и тантала ¹⁸¹Ta, полученных в пропановой камере и в событиях, сгенерированных в разных версиях модели Angantyr/PYTHIA. Здесь следует обратить внимание, что экспериментальные данные в пропановой камере получены при энергии несколько ниже ($\sqrt{s_{NN}} = 3.14 A$ GeV), чем данные PYTHIA, которые получены при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 4 A$ GeV, что является нижним кинематическим пределом генерации модели. Поэтому здесь проводится сравнение наклонов указанных зависимостей, которые в случае сравнения с результатами, полученными в модели Angantyr (PYTHIA 8.313) с пакетом SoftQCD, показывают хорошее согласие с экспериментом (углы наклона α практически совпадают в пределах ошибок) по сравнению предыдущими исследованиями (PYTHIA/Angantyr 8.312, без пакета SoftQCD).

В рамках предложенного ранее метода поиска сигнатур фазового перехода в ядерной материи на базе генератора PYTHIA с встроенной моделью Angantyr[1], были получены новые данные с (PYTHIA/Angantyr 8.313 с включённым пакетом SoftQCD по аппроксимации данных генерации двумерными зависимостями

$f(\sqrt{s_{NN}}, A_{proj})$, Рис. 2.2.1.



(а) Инклюзивные события. (б) Центральные события.

Рис. 2.2.2 Пример зависимости средней множественности отрицательно заряженных пионов от энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}}$ и массового числа налетающего ядра A_{proj} для целого ряда ядер от ${}^4_2\text{He}$ до ${}^{197}_{79}\text{Au}$, сталкивающихся с ядрами золота ${}^{197}_{79}\text{Au}$.

Результаты, приведённые на Рис. 2.2.1, 2.2.2 с данными, полученными в рамках одной из последних версий PYTHIA 8.313 с пакетом SoftQCD, показывают существенно лучшее согласие с экспериментом (Рис. 2.2.1), а также указывают на однородность искомой поверхности с хорошим значением критерия согласия (Рис. 2.2.2), в отличие от данных, полученных ранее без пакета SoftQCD, что делает генератор PYTHIA/Angantyr инструментом, представляющим значительный интерес в качестве фона для выделения возможных проявлений коллективных эффектов, таких как кварк-глюонная плазма, в исследованиях по столкновению тяжёлых ионов.

Планируется дальнейший анализ, интенсивное тестирование и сравнение данных генератора PYTHIA /Angantyr с экспериментальными данными в области энергий, представляющих интерес для физики на коллайдере NICA. Для последующего уточнения предсказаний PYTHIA для экспериментов в области малых энергий диапазона NICA планируется обсудить полученные результаты с авторами пакета Angantyr лундовской группы.

2.3 Эксперимент **BM@N**: Исследование образования протонов, дейтронов и тритонов в аргон-ядерных взаимодействиях при энергии 3,2 А ГэВ

(А.Н. Соломин)

В рамках BM@N коллаборации проведено детальное исследование образования протонов, дейтронов и тритонов во взаимодействиях ядер аргона с кинетической энергией 3,2 А ГэВ с фиксированными мишенями из С, Al, Cu, Sn и Pb на комплексе Nuclotron/NICA. Измерены спектры поперечных масс, распределения по быстротам и множественности протонов, дейтронов и тритонов. Результаты интерпретируются, в частности, в рамках модели коалесценции и сравниваются с предсказаниями других теоретических моделей и другими измерениями.

Наиболее важным результатом является энергетическая зависимость энтропии на нуклон. Общая энтропия (на нуклон) S/A , как сумма энтропий нуклонов и пионов, определяется с использованием соотношения выходов дейтронов и протонов и соотношения выходов пионов и нуклонов, соответственно.

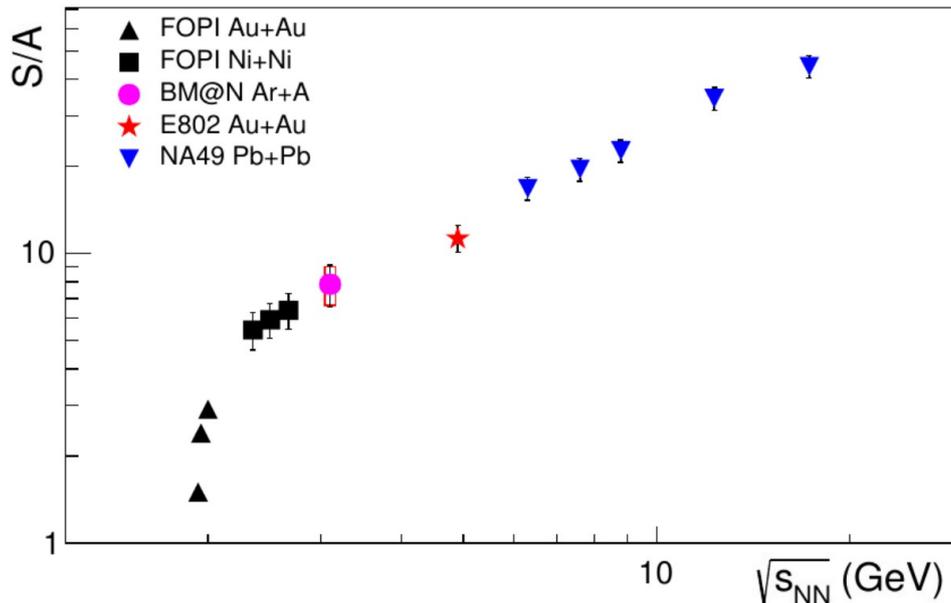


Рис. 2.3.1: Энергетическая зависимость энтропии на нуклон, S/A , из экспериментов SIS/FOPI, AGS/E802, SPS/NA49 и NICA/BM@N (это исследование).

Результаты BM@N (Ar + C, Al, Cu, Sn, Pb) находятся в прекрасном согласии с другими экспериментами, ложатся на общую энергетическую зависимость и заполняют ранее пустовавший интервал энергий (Рис. 2.3.1).

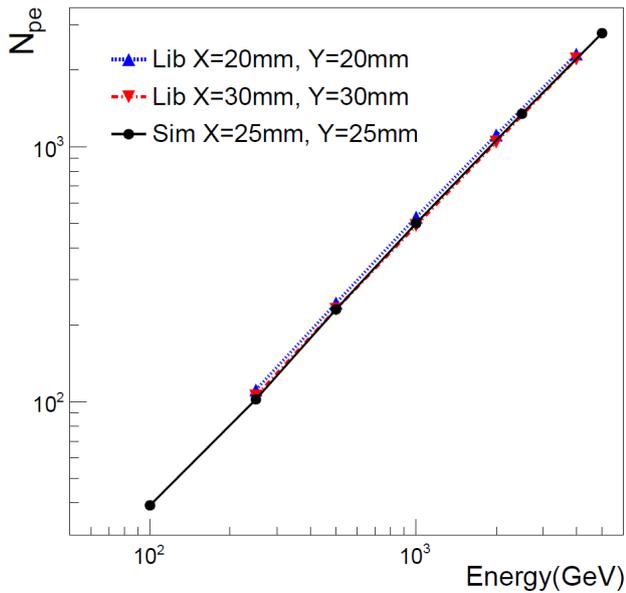
3. Создание моделирования калориметра ZDC установки CMS

(Л.А. Хейн)

Нуль-градусные калориметры (Zero-Degree Calorimeters, ZDC) сыграли ключевую роль в успехе программ по физике тяжёлых ионов (HI) экспериментов ATLAS и CMS во время первого и второго сеансов LHC. ZDC регистрируют нейтральные частицы, произведённые в столкновениях A+A и p+A, которые в основном являются наблюдателями (spectators) этих взаимодействий, что позволяет отличать различные классы физических процессов, анализируя топологии прямых нейтронов. Центральные и средне-центральные столкновения A+A характеризуются регистрацией нескольких нейтронов-наблюдателей в обоих плечах ZDC (топология XnXn). В периферических и ультрапериферических (UPC) столкновениях A+A и столкновениях p+A отсутствие нейтронов в одном (Xn0n или 0nXn) или обоих ZDC (0n0n) обычно указывает на то, что соответствующее ядро, вероятно, не взаимодействовало адронно, а вместо этого испустило когерентный фотон или когерентный померон. Измерение одно-нейтронного пика является основным инструментом, используемым для калибровки энергетической шкалы калориметра (с двух- и трёх-нейтронными пиками, дополняющими калибровку).

Использование моделирования калориметра в анализе столкновения тяжёлых ядер в эксперименте является необходимым. Это моделирование было сделано в два этапа. Сначала в рамках системы CMSSW было подготовлено полное моделирование. Затем основе полного моделирования была создана библиотека ливней.

Сравнение энергетической зависимости сигнала, получаемого при полном моделировании (Sim) и при использовании библиотеки ливней (Lib) для разных X-Y координатах входа исходного нейтрона в ZDC показано на рисунке. Согласие полное.



4. Исследования, проводимые в эксперименте LHCb

(А.Н. Соломин)

Одной из наиболее сильных сторон эксперимента LHCb является наличие в конструкции его установки RICH детекторов: RICH1 и RICH2 способных идентифицировать частицы в диапазоне импульсов до ~ 100 ГэВ/с. Оптические системы RICH детекторов требуют постоянного мониторинга их прецизионной юстировки. Для этого используется методика, основанная на анализе данных о реальных событиях. Разработаны новые методы и основные функциональные элементы системы программной юстировки оптической системы детекторов RICH1 и RICH2 с использованием реальных данных в режиме реального времени для новых конфигураций самой установки LHCb и соответствующего ПО.

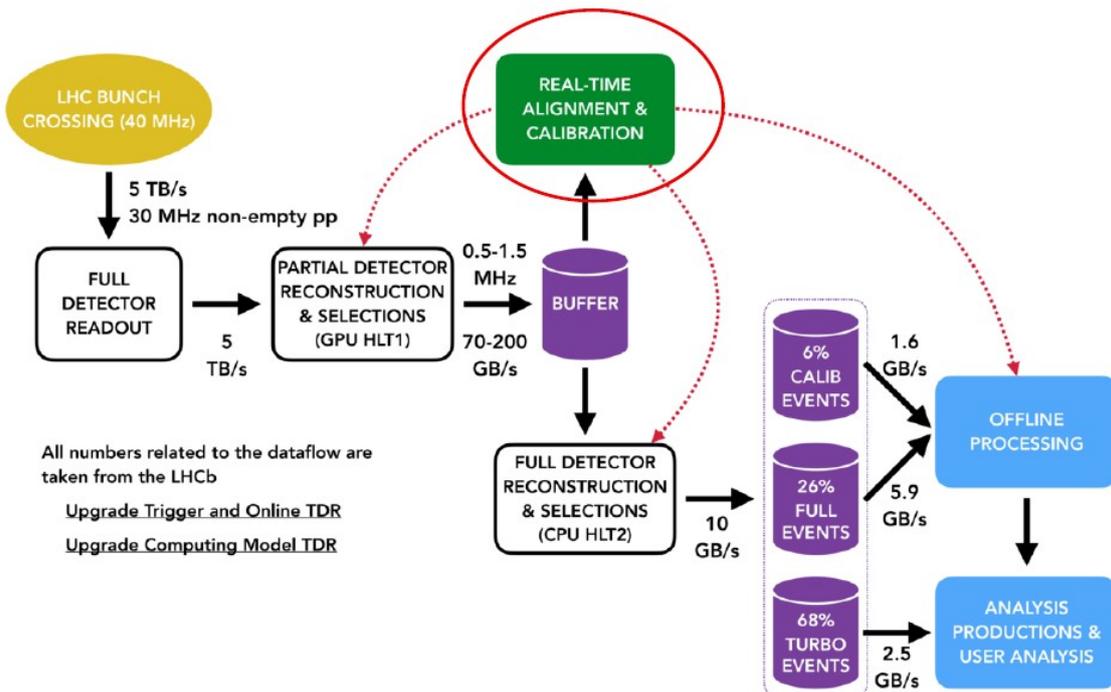


Рис. 4.1: Функциональная схема RTA

Система юстировки входит в состав структуры RTA, Real Time Analysis, в эксперименте LHCb на LHC Run 3 (красный овал на схеме RTA, Рис. 4.1).

Выдвинут и разработан новый метод «интеллектуального детерминистически рандомизированного прескейлинга» для предварительного отбора событий в первом триггере высокого уровня HLT1 для кардинального увеличения — до двух порядков по сравнению с Run 2 — производительности процедуры юстировки с полной реконструкцией событий во втором триггере высокого уровня HLT2.

Отбор событий в HLT1 иллюстрируются диаграммой рабочего процесса, Рис. 4.2, где на входе — предварительно создаваемый (в результате сложной процедуры калибровки, разработанной в 2025 году) «список»:

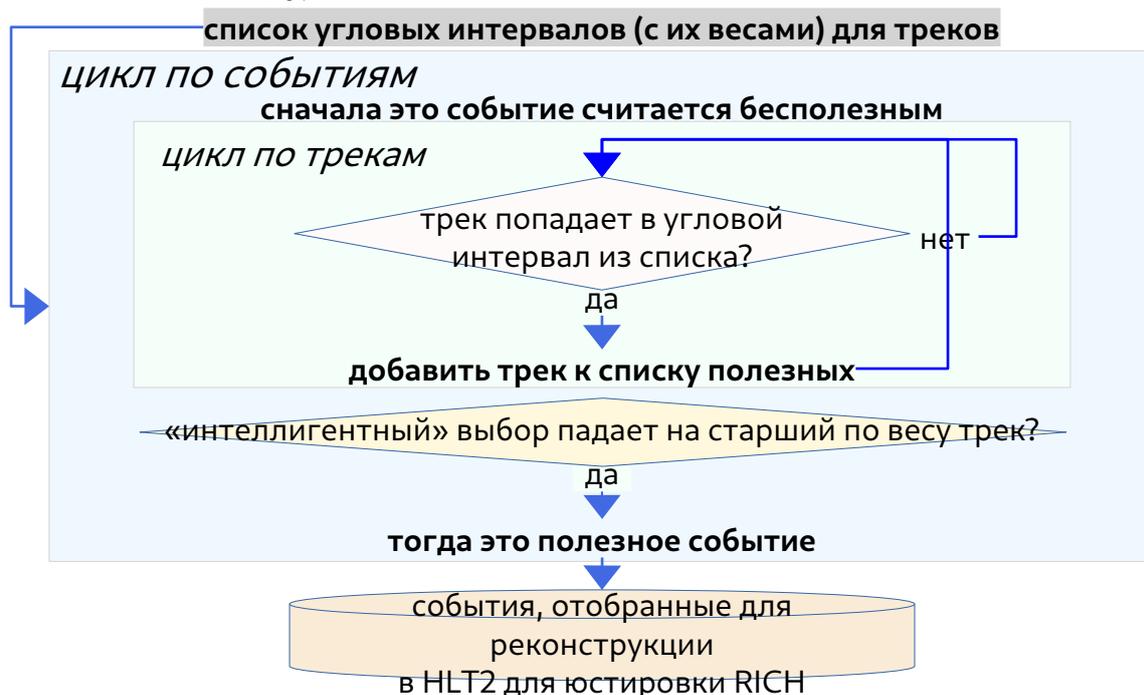


Рис. 4.2: Диаграмма рабочего процесса «интеллектуального детерминистически рандомизированного прескейлинга»

Результатом калибровки процедуры фильтрации является список угловых интервалов (с их весами) для треков. Этот список используется для выбора событий в HLT1, при этом весом определяется частота случайного выбора в каждом интервале. Результирующий список будет содержать существенно меньше комбинаций сегментов первичных и вторичных зеркал, чем в полном оптимизированном списке, потому что многие комбинации будут заполнены как побочный результат заполнения комбинаций из сокращённого списка.

В 2025 году начата разработка новой процедуры оптимизации соответствующих триггерных линий для RICH1 и RICH2 для графических процессоров HLT1 на языке CUDA C++ в рамках программного проекта LHCb «Allen». Внесён вклад в общую часть ПО данного проекта. Планируется их окончательная настройка и развёртывание в 2026 году.

В результате ожидается радикальное убыстрение определения юстировочных поправок, критичных для реконструкции и анализа событий в режиме реального времени.

Сравнение предполагаемой производительности старой и новой HLT1 линий на примере RICH 2 (при условии одинакового количества фотонов на самой бедно заполненной гистограмме):

	старая	новая
--	--------	-------

количество фотонов на самой бедно заполненной гистограмме	25 к	25 к
количество выбранных необработанных событий	1.5 М	30 к
настенно-часовое время для одной итерации элайнмента на 32-процессорном компьютере	2 часа 30 мин	3 мин

Принципиально сокращается время калибровочно-юстировочной стадии перед началом работы эксперимента LHCb в режиме анализа в реальном времени в каждом ускорительно-накопительном цикле.

Дополнительно существенно облегчается возможность бессрочного хранения необходимой информации с целью гарантированной воспроизводимости физических результатов.

В связи с разработкой в LHCb проекта «Реально-временной анализ» (RTA) и принятием к использованию совершенно новой программной инфраструктуры, произведена коренная переработка и усовершенствование ПО юстировки детекторов RICH для работы в новой инфраструктуре. Группа LHCb МГУ является автором развития методики и ПО юстировки детекторов RICH1 и RICH2 и единственной российской группой, которая вносит вклад в разработку ПО юстировки детекторов RICH LHCb для Run 3 LHC. Разработчиком является А.Н. Соломин.

5. Исследование инфляционных моделей модифицированной гравитации.

(Е.О. Поздеева)

Учет поправок к приближению медленного скатывания в терминах чисел e -фолдингов произведен двумя способами. Модель с экспоненциальной зависимостью квадрата параметра Хаббла от чисел e -фолдингов в степени (-1) соответствует наиболее популярной инфляционной модели А.А. Старобинского. В гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне с таким параметром Хаббла возможен точный анализ параметров инфляционной модели, квадрата производной от поля по числам e -фолдингов и эффективного потенциала в аналитическом виде. Проведено сравнение двух улучшенных приближений медленного скатывания, классического медленного скатывания и точных аналитических выражений. Замечено, что классическое и улучшенные приближения медленного скатывания дают хорошо совпадающие с точными вычислениями инфляционные параметры и эффективный потенциал в начале медленного скатывания. Одно из предложенных улучшений медленного скатывания позволяет воспроизвести аналитическую зависимость квадрата производной поля по числам e -фолдингов, а другое точно воспроизводит выход из инфляции.

Предложены новые улучшенные приближения медленного скатывания в скалярно-тензорной теории в системе Йордана. Проведены сравнения улучшенных приближений медленного скатывания с точными вычислениями в модели, где потенциал похож на потенциал Хиггса и зависит от скалярного поля, неминимально взаимодействующего с гравитацией. Найдено, что улучшенные приближения медленного скатывания дают более точную оценку выхода из инфляции и более точные значения амплитуды скалярных пертурбаций и отношения тензорных и скалярных амплитуд в начале инфляции.

Рассмотрена динамика гравитации Эйнштейна-Гаусса-Бонне в плоском пространстве Фридмана. Рассматриваемая модифицированная гравитация представлена функцией от

суммы скаляров Риччи и Гаусса-Бонне умноженного на постоянную. Такие модели эквиваленты моделям общей теории относительности без скалярного поля с поправками зависящими от суммы скаляров Риччи и Гаусса-Бонне умноженного на постоянную. Были найдены решения де Ситтера, проанализирована их стабильность и построена фазовая диаграмма на основе уравнений эволюции модели с функцией степенного вида. Показано, что рассматриваемая модель предполагает две инфляционные стадии, которые могут рассматриваться как ранние и поздние ускоренные расширения Вселенной.

6. Квантование полей в окрестности черных дыр

(С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов)

Получены стационарные физические решения уравнений Дирака и Максвелла для массивных фермионных и векторных полей соответственно в пространстве-времени черной дыры Шварцшильда. Для таких состояний скалярного поля вычислена их нормировка и получен их энергетический спектр. Для спинорного и векторного полей выявлено удвоение числа состояний инфинитного движения, аналогичное вырождению, недавно обнаруженному как в наших, так и в других работах для скалярного поля в метриках Шварцшильда, Рейснера-Нордстрема и Керра-Ньюмена. Для физических состояний безмассового фермионного поля впервые получены явные выражения через известные специальные функции – конфлюэнтные функции Гойна. Для векторного поля подобрана физически адекватная калибровка, в которой состояния поля также выражаются через конфлюэнтные функции Гойна. Полученные результаты могут быть полезны для последовательного описания процесса испарения черных дыр, включая оценку времени их жизни, которая оказывается важной для современной космологии и астрофизики, поскольку в последнее время появились указания, что черные дыры могут давать значительный вклад в плотность ТМ.

7. Построение новых моделей ТМ и исследование пространства параметров этих моделей, согласующихся с современными ускорительными и астрофизическими экспериментами

(С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов)

Разработанная самосогласованная модель ТМ с двумя порталами, (векторным и скалярным) демонстрирует внутреннюю теоретическую непротиворечивость и обладает широким потенциалом феноменологических приложений. Совместное присутствие векторного портала (через кинетическое смешивание) и скалярного портала (портал Хиггса) обеспечивает эффективную и минимальную возможность для описания взаимодействий между темным и видимым секторами в широком диапазоне масс. В рамках модели выписан полный лагранжиан, получены точные выражения для членов взаимодействия и выведены внутренне согласованные соотношения параметров, непосредственно вытекающие из калибровочной инвариантности. Основное внимание уделено режиму легких медиаторов, где феноменологические возможности на будущих электрон-позитронных коллайдерах наиболее богаты. Получены доверительные области значений параметров модели, доступных для поиска ТМ на электрон-позитронном кольцевом коллайдере, с учетом ограничений, полученных из экспериментальных данных прямого детектирования, коллайдерных и ускорительных экспериментов, в том числе LHC и ожидаемых на HL-LHC. Численные расчеты сечений ассоциативного образования легкой ТМ с парой тау-лептонов в

электрон-позитронных столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 7 \text{ GeV}$, опосредованных как скалярным, так и векторным порталами, показывают, что даже при малых значениях угла

скалярного смешивания $\sin \theta \sim 10^{-4}$ вклад скалярного канала остается феноменологически значимым в рамках самосогласованной постановки. Совместный анализ двух порталов повышает предсказательную силу модели и расширяет область чувствительности в

параметрическом пространстве. Согласованные связи между скалярными и векторными взаимодействиями уменьшают число независимых параметров, что делает проверку модели более строгой и поддающейся перекрестной валидации.

Модель представляет самостоятельный интерес для изучения невидимых редких распадов K - и B -мезонов, способных накладывать дополнительные ограничения на параметры смешивания и массы медиаторов. Такие ограничения комплементарны коллайдерным данным и данным экспериментов на фиксированных мишенях и усиливают общие ограничения при определении допустимой области параметров. В проведенном анализе учтена существенная часть релевантных экспериментальных ограничений прежде всего из коллайдерных экспериментов и экспериментов на фиксированных мишенях; дополнительно добавлены ограничения из условия пертурбативной унитарности в скалярном секторе. Используемая вычислительная схема учитывает излучение начального состояния и реализует единые предположения по реконструкции тау-каналов, что повышает устойчивость вывода к типичным систематическим эффектам.

Основные результаты, полученные в рамках настоящего исследования:

- изучены возможности поисков ассоциативного образования частиц темной материи с парой тау-лептонов в электрон-позитронных столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 7 \text{ GeV}$, принимая во внимание параметры пучка сталкивающихся частиц будущего коллайдера, эффекты ISR и учитывая эффективность реконструкции тау-лептонов конечного состояния;
- получены доверительные области чувствительности коллайдера к процессам образования частиц легкой ТМ, опосредованного скалярными и векторными медиаторами, в зависимости от параметров модели (масс новых частиц и значений констант связей) с учетом существующих экспериментальных ограничений.

8. Эффекты полевой эмиссии в Кольцевом Электрон-Позитронном Коллайдере

(Б.Б. Левченко)

Ожидается, что в ближайшем будущем в Китае будет построен 100-километровый кольцевой электронно-позитронный коллайдер (CEPC). Технологическая сторона проекта описана в Техническом Обзоре (TDR). Хотя в ТО обсуждаются различные источники вторичных электронов, создающие опасный эффект для ускорителя, в нем не упоминается полевая эмиссия как важный источник вторичных электронов. Как в случае протонного пучка на БАК повышенной светимости (HL-LHC), для позитронного пучка CEPC точные 2D решения для E и B полей были применены для оценки интенсивности эмиссии электронов, активируемой электрическим E полем пучка в коллиматорах будущего коллайдера. Расчет показывает, что интенсивность полевой эмиссии очень чувствительна к величине полузазора h коллиматора и к степени шероховатости β поверхности коллиматоров. Кроме того, при относительно небольшом ($\sim 20\%$) и случайном смещении пучка от срединной траектории, ток эмиссии увеличивается на много порядков. Наиболее драматичной выглядит ситуация для коллиматоров CEPC, Рис. 8.1.

При номинальной величине зазоров коллиматоров указанных в технической документации проекта, число электронов испущенных *одним* коллиматором под действием поля *одного* позитронного сгустка, может превышать число частиц целого пучка ($N \sim 10^{15}$) и приводить к разрушению коллиматора.

В заключении отметим, что если проект CEPC будет одобрен правительством КНР, то предстоит большой объем исследований по минимизации ущерба от эффекта электронных облаков (ЭЭО) и следует воплотить аналог программы подавления ЭЭО, что была успешно реализована на Большом Адронном Коллайдере.

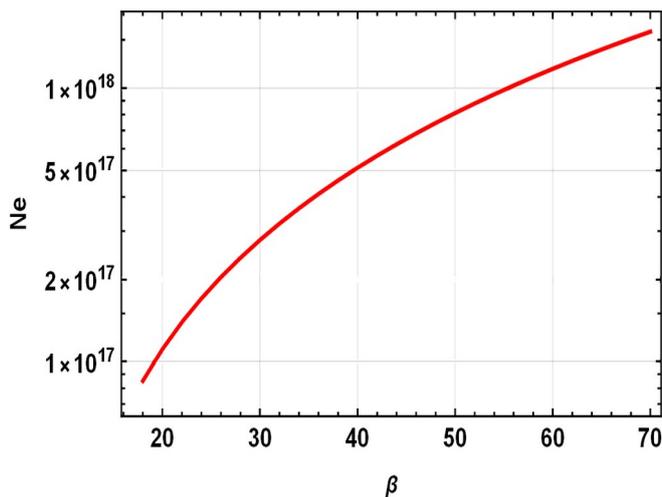


Рис.8.1 Число электронов N_e (β), испущенных **одним** коллиматором типа АРТУЗ под действием электрического поля **одного** сгустка позитронного пучка при $h=0.065$ мм. Параметры коллиматоров взяты из технической документации проекта СЕРС.

Планы исследований на 2026 год.

Официальное сотрудничество организаций РФ и ЦЕРН закончено, но сотрудники, чьи аспиранты участвуют в анализе данных ЦЕРН, по решению коллаборации оставлены в листе авторов и продолжают совместные исследования с коллегами из топ-группы коллаборации CMS. В 2026 году планируется завершить текущие анализы в рамках эксперимента CMS и опубликовать полученные результаты. Дальнейшие исследования по поиску «новой физики» в различных теоретических моделях планируется проводить на Открытых данных БАК, доступных в рамках проекта Open Data CERN. В рамках открытых данных доступно порядка 15% данных полученных экспериментами на БАК. Недостаток доступной экспериментальной статистики планируется компенсировать развитием методов анализа и более глубоким теоретическим исследованием возможных отклонений от предсказаний СМ. Основными направлениями исследований останутся процессы с топ-кварком и проявление различных расширений СМ в таких процессах. Помимо доступных данных экспериментов на БАК, начаты исследования потенциала планируемого лептонного коллайдера СЕРС (Китай). Ведутся вычисления различных интересных процессов для такого коллайдера для промежуточной моды его запуска на 240 ГэВ. Процессы с рождением топ-кварка в этой моде еще плохо исследованы и вычисления помогут понять возможности подпорогового или около-порогового рождения процессов с двумя и одним топ-кварком, и чувствительность этих процессов к «новой физики».

Увеличивающийся интерес к обобщенному исследованию разных, все более сложных, процессов на коллайдерах диктует необходимость развития современных методов эффективного и общего подхода к анализу различных процессов, с точки зрения поиска проявлений «новой физики». Значительная часть наших исследований направлена на создание и развитие обобщенных фундаментальных моделей нейронных сетей трансформерной архитектуры позволяющих проводить одновременный анализ всех процессов с рождением топ-кварка с целью выявления общего, для всех процессов, проявления отклонений от Стандартной модели (СМ). В архитектуру таких обобщенных моделей планируется включить учет существующих симметрий и инвариантов задачи. На основе созданных моделей, планируется развитие методики модельно-независимого поиска проявления «новой физики» в подходе поиска аномалий, т.е. когда теоретическое описание

“новой физики” неизвестно и не закладывается в структуру анализа данных и моделирования. Параллельно, планируется применить созданные нейронные сети для развития методики моделирования сложных процессов на коллайдерах, требующих значительных вычислительных ресурсов. Далее, созданные методики анализа планируется применить к открытым данным коллайдера БАК и провести статистические исследования возможных отклонений от предсказаний СМ. После проверки на открытых доступных данных текущих экспериментов, планируется применить созданные методы для оценки потенциала экспериментов на будущих лептонных и адронных коллайдерах. Предлагаемые исследования основаны на объединении передовых подходов в применении нейронных сетей и анализа редких процессов множественного рождения топ-кварков, чрезвычайно чувствительных к возможным проявлениям “новой физики”.

Планируется продолжить исследования в экспериментах на коллайдере NICA (Дубна). В эксперименте MPD — продолжить исследования по анализу и тестированию ядро-ядерных взаимодействий с генератором PYTHIA/Angantyr в области нижней границы коллайдера NICA. Для последующего уточнения предсказаний PYTHIA в экспериментах в области малых энергий диапазона NICA планируется обсудить полученные результаты с авторами пакета Angantyr лундовской группы. В эксперименте [BM@N](#) — продолжить исследования по поиску моделей в исследуемой области, дающих лучшее согласие с полученными данными. Запланирована публикация результатов по моделированию StrawEndCap трека детектора SPD. Продолжение работ по EndCap трекеру (идентификация, реконструкция треков). Сопровождение первых данных с детектора MPD.

В продолжении исследований в эксперименте LHCb (CERN), на основе принципиально нового подхода, планируется завершение разработки, развёртывания и настройки целостной системы программной юстировки оптической системы детекторов RICH1 и RICH2 с использованием реальных данных для новых конфигураций установки LHCb и её ПО для Run 3 LHC в 2026 году. Запланирована разработка делинеаризации вычислительной схемы программной юстировки оптической системы детекторов RICH1 и RICH2 LHCb с целью создания безитерационной процедуры юстировки.

Использование моделирования калориметра ZDC в анализе столкновения тяжёлых ядер в эксперименте CMS.

Планируется продолжить исследование эволюции с учетом возможных модификаций гравитационного взаимодействия, поиск возможных физических эффектов, сравнение с имеющимися наблюдаемыми данными.

В рамках темы по квантованию полей в окрестности черных дыр планируется обобщить полученные результаты для спинорного поля и векторного полей на аксиально-симметричные метрики (семейство решений типа Керра-Ньюмена, включая черные дыры с магнитным зарядом) и изучить свойства полученных решений. С помощью полученных ранее точных физических решений и спектра для безмассовых спинорных полей и новых результатов для физических решений и спектра спинорных полей и векторных полей планируется оценить излучение черной дыры, детектируемое бесконечно удаленным наблюдателем.

Будут продолжены исследования по полевой эмиссии в коллайдерах и теоретическое обоснование существования новых механизмов рождения лептонных пар, включая работы по проектам ZEUS и CEPС.

Заключение

Продолжаются исследования в экспериментах CMS и LHCb коллайдера БАК, [BM@N](#) и MPD комплекса NICA. Проводятся теоретические и феноменологические исследования в рамках Стандартной модели и различных ее расширений. За 2025 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 28 докладов на международных конференциях и большое

количество докладов на рабочих совещаниях. Полученные результаты опубликованы в индивидуальных публикациях и от имени коллабораций CMS, MPD, LHCb.

Доклады на конференциях в 2025 г.:

- 1) [Manifestations of Dark Matter in processes with three and four Top-Quark](#) (Устный)
Авторы: [Абасов Э.Э.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Волков П.В.](#), [Воротников Г.А.](#), [Дудко Л.В.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Иудин Е.С.](#), [Маркина А.А.](#), [Перфилов М.А.](#), [Савкова Н.А.](#)
[QFTHEP'270 The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory 2025](#), МГУ, Москва, Россия, 30 июня - 5 июля 2025
- 2) [Reconstructing Top-Quark Spin Correlations with Normalizing Flows](#) (Устный)
Авторы: [Abasov E.](#), [Dudko L.](#), [Iudin E.](#), [Markina A.](#), [Volkov P.](#), [Vorotnikov G.](#), [Perfilov M.](#), [Zaborenko A.](#)
[QFTHEP'270 The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory 2025](#), МГУ, Москва, Россия, 30 июня - 5 июля 2025
- 3) [New functionality of the CompHEP package](#) (Приглашенный)
Авторы: [Bunichev V.](#), [Boos E.](#), [Dubinin M.](#), [Dudko L.](#), [Kryukov A.](#), [Edneral V.](#), [Savrin V.](#)
[QFTHEP-270](#), Россия, 30 июня - 5 июля 2025
- 4) [Проявление темной материи в процессах с рождением трех и четырех топ-кварков](#) (Устный)
Авторы: [Абасов Э.Э.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Волков П.В.](#), [Воротников Г.А.](#), [Дудко Л.В.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Иудин Е.С.](#), [Маркина А.А.](#), [Перфилов М.А.](#), [Савкова Н.А.](#)
[29 Всероссийская научная конференция-школа студентов физиков и молодых учёных](#), Москва, Россия, 14-20 апреля 2025
- 5) [Проявление темной материи в процессах с рождением трех и четырех топ-кварков](#) (Устный)
Авторы: [Абасов Э.Э.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Волков П.В.](#), [Воротников Г.А.](#), [Дудко Л.В.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Иудин Е.С.](#), [Маркина А.А.](#), [Перфилов М.А.](#), [Савкова Н.А.](#)
[Научная конференция "ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ-2025" \(секция ядерной физики\)](#), Москва, Россия, 24 марта - 3 апреля 2025
- 6) [Физика топ-кварка](#) (Пленарный)
Автор: [Дудко Л.В.](#)
[Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова](#), Москва, Россия, 17-21 февраля 2025
- 7) [Поиск медиаторов тёмной материи с помощью спиновых корреляций в процессах одиночного рождения топ кварка](#) (Приглашенный)
Авторы: [Буничев В.Е.](#), [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#)
[Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова](#), Москва, Россия, 17-21 февраля 2025
- 8) [Восстановление угловых корреляций в процессе ассоциированного рождения топ-кварка и медиатора темной материи](#) (Устный)
Авторы: [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.](#)
[Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова](#), Москва, Россия, 17-21 февраля 2025
- 9) [Методология создания базовых универсальных моделей трансформерных архитектур нейронных сетей для анализа процессов на коллайдерах](#) (Устный)
Авторы: [Абасов Э.Э.](#), [Волков П.В.](#), [Дудко Л.В.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Иудин Е.С.](#), [Маркина А.А.](#), [Перфилов М.А.](#)
[Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова](#), Москва, Россия, 17-21 февраля 2025

- 10) Соломин А.Н., Щеглова Л.М., Angantyr (Pythia 8.313) con и pro II - сравнение новой версии модели с экспериментом в области энергий NICA ($4 < \sqrt{s_{NN}} < 11$ GeV), «Ломоносовские чтения», Секция ядерной физики, подсекция «Физика высоких энергий», Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова, НИИЯФ, Россия, 24 марта – 3 апреля 2025
- 11) Mean depth of shower and interaction characteristics (Устный)
[Kheyn Lev IS CRA-2025](#), Москва, Россия, 24-26 июня 2025
- 12) Pozdeeva Ekaterina, Primordial black hole formation in chiral cosmological models(Устный) Frontiers of Holographic Duality-6, Москва, Россия, 17-21 ноября 2025 (Саров)
- 13) Pozdeeva Ekaterina, [The cosmological dynamics of F\(R+ \$\mu\$ G\) models](#)(Устный), [The XIII International Symposium on Quantum Theory and Symmetries \(QTS-13\)](#), Ереван, Армения, 28 июля - 1 августа 2025
- 14) Ekaterina Pozdeeva, Cosmological dynamic of f(R+ μ G) models in the FLRW background (Устный), [QFTHEP'270 The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory 2025](#), МГУ, Москва, Россия, 30 июня - 5 июля 2025
- 15) Pozdeeva Ekaterina, Primordial Black Holes in Induced Gravity(Устный), [NONLINEARITY, NONLOCALITY AND ULTRAMETRICITY International Conference on the Occasion of Branko Dragovich 80th Birthday 26–30.05.2025, Belgrade, Serbia](#), Belgrade, Сербия, 26-30 мая 2025 (Саров)
- 16) Поздеева Екатерина, Космологическая динамика f(R+ μ G) моделей(Устный), «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию Московского Университета)», МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 23-27 июня 2025
- 17) Вернов С.Ю., Поздеева Е.О., Рождение первичных чёрных дыр в моделях индуцированной гравитации(Устный), [Ломоносовские чтения - 2025](#), Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Россия, 24 марта - 3 апреля 2025 (Саров)
- 18) Поздеева Е.О., Применение новых приближений медленного скатывания при реконструкции инфляционного сценария в гравитации Эйнштейна-Гаусс-Бонне (Устный), Ломоносовские чтения - 2025, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Россия, 24 марта - 3 апреля 2025
- 19) Pozdeeva Ekaterina, Slow-roll approximations in Einstein–Gauss–Bonnet gravity formulated in terms of e-folding numbers(Устный), Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова, Москва, Россия, 17-21 февраля 2025
- 20) Pozdeeva Ekaterina, Reconstruction of inflationary scenarios in EGB gravity(Приглашенный), [International Workshop “Problems of Modern Mathematical Physics \(PMMP’25\)”](#), г. Дубна, Россия, 10-14 февраля 2025
- 21) Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В. А. Рубакова, Москва, Россия, 17-21 февраля 2025, «Точные решения радиального уравнения для скалярного поля в метрике Керра», И. П. Волобуев, С. И. Кейзеров, Э. Р. Рахметов.
- 22) Ломоносовские чтения-2025, Секция ядерной физики, МГУ, Москва, 24 марта - 3 апреля 2025, «Точные решения радиального уравнения для скалярного поля в метрике Керра-Ньюмена», И. П. Волобуев, С. И. Кейзеров, Э. Р. Рахметов.
- 23) Международная научная конференция The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP-270), Москва, Россия, 30 июня - 5 июля 2025, «Exact solutions for spinor field in the Schwarzschild metric», S. I. Keyzerov, E. R. Rakhmetov, I. P. Volobuev.
- 24) Международная научная конференция The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP-270), Москва, Россия, 30 июня - 5 июля 2025, «Exact solutions for electromagnetic field in the Schwarzschild metric», S. I. Keyzerov, E. R. Rakhmetov, I. P. Volobuev.
- 25) Международная научная конференция The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP-270), Москва, Россия, 30 июня - 5 июля

2025, «Two Portals to Darkness: A Dark Matter Model with Scalar and Vector Mediators»,

Э. Э. Боос, В. Е. Буничев, С. И. Кейзеров, С. С. Трыков (докладчик).

26) Workshop «Physics at future high-energy electron-positron colliders», Дубна, Россия, 5 июня

2025, «Калибровочная модель фермионной темной материи с двойным порталом – векторным и скалярным. Ассоциативное образование легкой темной материи с парой тау-

лептонов в e^+e^- -столкновениях», Э. Э. Боос, В. Е. Буничев, С. И. Кейзеров, С. С. Трыков (докладчик)

27) “Азимутальные корреляции между струей и рассеянным лептоном в ер рассеянии в эксперименте ZEUS”, Доклад на конференции :Ломоносовские чтения-2025, Секция ядерной физики, подсекция «Физика высоких энергий» (МГУ, Москва, Россия, 24 марта — 3 апреля 2025 г.), Авторы: Б.Б. Левченко. И.А. Коржавина, Л. М. Щеглова.

28) “ Field emission effects in the Circular Electron Positron Collider (CEPC)”,

Доклад на “The XXV International Workshop-School, High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'270)”, 05.07.2025 (МГУ, Москва, 2025), Авторы: Б.Б. Левченко.

Основные публикации за 2025 год:

[1] A Methodology for Developing Foundational Transformer Models in Collider Physics Analysis
E. Abasov(SINP, Moscow), L. Dudko(SINP, Moscow), E. Iudin(SINP, Moscow), A. Markina(SINP, Moscow), P. Volkov(SINP, Moscow) et al. (Nov 12, 2025)

e-Print: 2511.09335 [hep-ph] Принято к публикации в "Ядерная физика"

[2] Applying Normalizing Flows for spin correlations reconstruction in associated top-quark pair and dark matter production

E. Abasov(SINP, Moscow), L. Dudko(SINP, Moscow), E. Iudin(SINP, Moscow), A. Markina(SINP, Moscow), P. Volkov(SINP, Moscow) et al. (Oct 13, 2025)

e-Print: 2510.11644 [hep-ph] Принято к публикации в "Вестник МГУ"

[3] Manifestations of Dark Matter in processes with three and four Top-Quarks

E. Abasov, E. Boos, V. Bunichev, P. Volkov, G. Vorotnikov et al. (Oct 10, 2025)

e-Print: 2510.09428 [hep-ph] Принято к публикации в "Вестник МГУ"

[4] CEPC Technical Design Report - Reference Detector

CEPC Study Group•Souvik Priyam Adhya(Prague, Inst. Phys.) et al. (Oct 6, 2025)

e-Print: 2510.05260 [hep-ex]

[5] Search for dark-matter axions beyond the quantum limit: The cosmological axion Sarov haloscope proposal

Andrey L. Pankratov(Unlisted, RU and Nizhnii Novgorod, Inst. Microstructure Phys.), Pavel A. Belov(Tomsk State U.), Eduard E. Boos(SINP, Moscow), Alexander S. Chepurnov(SINP, Moscow), Alexander V. Chiginev(Unlisted, RU and Nizhnii Novgorod, Inst. Microstructure Phys.) et al. (Jun 23, 2025)

Published in: Phys.Rev.D 112 (2025) 3, 035003 • e-Print: 2506.18595 [hep-ph]

[6] Sensitivity of the Three Top Quark Production Process to the Contribution of Top-Related SMEFT Operators

A.M. Aleshko(SINP, Moscow), E.E. Boos(SINP, Moscow), V.E. Bunichev(SINP, Moscow), L.V. Dudko(SINP, Moscow) (May 20, 2025)

Published in: Phys.Part.Nucl. 56 (2025) 2, 374-380

[7] Dark Matter Mediators in Processes of Single Top Quark Production

E.E. Boos(SINP, Moscow), V.E. Bunichev(SINP, Moscow), L.V. Dudko(SINP, Moscow) (May 20, 2025)

Published in: Phys.Part.Nucl. 56 (2025) 2, 429-433

[8] Reconstruction of angular correlations in the associated top quark and the dark matter mediator production

E. Abasov(SINP, Moscow), L. Dudko(SINP, Moscow), E. Iudin(SINP, Moscow), A. Markina(SINP, Moscow), P. Volkov(SINP, Moscow) et al. (Apr 19, 2025)

e-Print: 2504.14303 [hep-ph] Принято к публикации в "Ядерная физика"

[9] Separation of Left-Handed and Anomalous Right-Handed Vector Operators Contributions into the Wtb Vertex for Single and Double Resonant Top Quark Production Processes Using a Neural Network

E.E. Abasov(SINP, Moscow), E.E. Boos(SINP, Moscow), V.E. Bunichev(SINP, Moscow), L.V. Dudko(SINP, Moscow), D.E. Gorin(SINP, Moscow) et al. (Dec 3, 2024)

Published in: Phys.Part.Nucl. 56 (2025) 2, 447-452 • e-Print: 2412.02468 [hep-ph]

[10] Search for Dark Matter Mediator in the Production of Three and Four Top Quarks

E. Abasov(SINP, Moscow), E. Boos(SINP, Moscow), V. Bunichev(SINP, Moscow), P. Volkov(SINP, Moscow), G. Vorotnikov(SINP, Moscow) et al. (Jul 11, 2024)

Published in: Phys.Part.Nucl. 56 (2025) 2, 440-446 • e-Print: 2407.08308 [hep-ph]

[11] R. Abdulin et al., MPD Collaboration, *Rev.Mex.Fis.* 71 (2025) 4, 041201

[12] «Production of protons, deuterons and tritons in argon-nucleus interactions at 3.2 A GeV», S. Afanasiev et al., BM@N Collaboration, *JHEP* 08 (2025) 095.

[13] Observation of a New Charmed Baryon Decaying to $\Xi_c^+ \pi^- \pi^+$. Бережной А.В., Горелов И.В., Козачук А.Д., Лефлат А.К., Никитин Н.В., Саврина Д.В., Соломин А.Н., Жуков В.Ю., Королев М.Г., LHCb Collaboration в журнале *Physical Review Letters*, издательство American Physical Society (United States), том 135, № 16

[14] Observation of the doubly-charmed-baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^0 \pi^+ \pi^+$. Бережной А.В., Горелов И.В., Данилина А.В., Козачук А.Д., Лефлат А.К., Никитин Н.В., Саврина Д.В., Соломин А.Н., Жуков В.Ю., Королев М.Г., LHCb Collaboration в журнале *Journal of High Energy Physics*, издательство IOP Publishing ([Bristol, UK], England), том 2025, № 10

[15] Observation of the Very Rare $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$ Decay. Бережной А.В., Горелов И.В., Козачук А.Д., Лефлат А.К., Никитин Н.В., Саврина Д.В., Соломин А.Н., Жуков В.Ю., Королев М.Г., LHCb Collaboration в журнале *Physical Review Letters*, издательство American Physical Society (United States), том 135, № 5

[16] Влияние неправильной юстировки на реконструкцию треков в время-проекционной камере детектора MPD

[Kuzmin V.A.](#) в журнале [Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия](#), издательство [Изд-во Моск. ун-та](#) (М.), том 80, № №3, 2025, с. 2530204-2530204,

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2530204

[17] MPD physics performance studies in Bi+Bi collisions at $\sqrt{s[NN]} = 9.2$ GeV

Baranova N.V., Bogdanova G.A., Boos E.E., Chernyshov A.S., Eyyubova G.H., Karmanov D.E., Kharlamov P.I., Kodolova O.L., Korolev M.G., Korotkikh V.L., Kryukov A.P., Kuzmin V.A., Lanskoj D.E., Lokhtin I.P., Melikov D.I., Merkin M.M., Platonova M.N., Shcheglova L.M., Snigirev A.M., Solomin A.N., Tretyakova T.Yu, Zabrodin E.E., MPD Collaboration в журнале *Revista Mexicana de Fisica*, издательство Sociedad Mexicana de Fisica (Mexico), том 71, № 4, с. 041201, [DOI:10.1556/APH.15.2002.1-2.1](https://doi.org/10.1556/APH.15.2002.1-2.1)

- [18] N. Dimakis, A. Giacomini, G. Leon, A. Paliathanasis, E. Pozdeeva and S. Vernov, $f(R,G)$ -cosmological dynamics in the FLRW background, *General Relativity and Gravitation* 57, 153 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10714-025-03489-9>
- [19] Pozdeeva Ekaterina O., Skugoreva Maria A., Toporensky Alexey V., Vernov Sergey Yu, More accurate slow-roll approximations for inflation in scalar-tensor theories, *JCAP05(2025)081* DOI [10.1088/1475-7516/2025/05/081](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/05/081)
- [20] Pozdeeva, E.O. Slow-roll approximations in Einstein–Gauss–Bonnet gravity formulated in terms of e-folding numbers. *Eur. Phys. J. C* 85, 217 (2025). DOI: [10.1140/epjc/s10052-025-13895-7](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-025-13895-7)
- [21] Волобуев И.П., Кейзеров С.И., Рахметов Э.Р., «Устойчивость стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума по отношению к эффекту Казимира», *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, издательство ОИЯИ (Дубна), том 56, № 2, с. 260-269
- [22] Rakhmetov E.R., Volobuev I.P., Keizerov S.I., «Steadiness of Stabilized Randall–Sundrum Model with Respect to Casimir Effect», *Physics of Particles and Nuclei*, издательство Pleiades Publishing, Inc. (New York, USA), том 56, № 2, с. 168-172
- [23] Keizerov S.I., Rakhmetov E.R., Smolyakov M.N., Volobuev I.P., «Exact solutions for the scalar field in the gravitational field of spherically symmetric black holes», *Physics of Particles and Nuclei*, издательство Pleiades Publishing, Inc. (New York, USA), том 56, № 2, с. 162-167.
- [24] Волобуев И.П., Кейзеров С.И., Рахметов Э.Р., Смоляков М.Н., «Точные решения для скалярного поля в гравитационном поле сферически-симметричных черных дыр». *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, издательство ОИЯИ (Дубна), том 56, № 2, с. 250-259
- [25] Boos E.E., Bunichev V.E., Volobuev I.P., Egorov V.O., Keizerov S.I., Rakhmetov E.R., Smolyakov M.N. «Physics and phenomenology of large extra dimensions», *Physics Uspekhi*, издательство Russian Academy of Sciences (Russian Federation), том 68, № 2, с. 111-145.
- [26] Боос Э.Э., Буничев В.Е., Волобуев И.П., Егоров В.О., Кейзеров С.И., Рахметов Э.Р., Смоляков М.Н., «Физика и феноменология больших дополнительных измерений», *Успехи физических наук*, издательство ФГБУ "Издательство «Наука» (Москва), том 195, № 02, с. 116-153.
- [27] E. Boos Eduard, V. Bunichev, S. Keizerov, S. Trykov, «Self-consistent model with vector and scalar mediators and prospects for light dark matter searches in $e+e--$ collisions», *International Journal of Modern Physics A*, издательство World Scientific Publishing, <https://doi.org/10.1142/S0217751X25400093>.
- [28] Boos E.E., Bunichev V.E., Keizerov S.I., Trykov S.S., «Search for Dark Matter Production in Electron–Positron Collisions in a Model with an Additional U(1) Gauge Symmetry and an Extra Scalar Field», *Physics of Particles and Nuclei*, издательство Pleiades Publishing, Inc. (New York, USA), том 56, № 3, с. 750-755
- [29] Rakhmetov E.R., Volobuev I.P., Keizerov S.I., «Exact solutions for spinor field in the Schwarzschild metric», принята в печать в «Moscow University Physics Bulletin», будет опубликована в 2025 году.

[30] Keizerov S.I., Rakhmetov E.R., Volobuev I.P., «Exact solutions for electromagnetic field in the Schwarzschild metric», принята в печать в «Moscow University Physics Bulletin», будет опубликована в 2025 году.

[31] Keizerov S.I., Rakhmetov E.R., Volobuev I.P., «Exact Solutions of the Radial Equation for Scalar Field in the Kerr Metric», принята в печать в «Physics of Atomic Nuclei», будет опубликована в 2025 году.

[32] Levchenko B.B., «Field Emission Effects in the Circular Electron Positron Collider», в журнале *Moscow University Physics Bulletin*, “Special Issue: The XXV International Workshop-School, High Energy Physics and Quantum Field Theory” (2025), принята в печать.