

Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ Основные результаты полученные в 2023 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

Топ-кварк является наиболее тяжелым из всех известных бесструктурных (точечных) фундаментальных объектов. Время жизни топ-кварка существенно меньше характерного времени образования адронных состояний и он успевает распасться практически по единственному каналу распада в W бозон и b -кварк. Отсутствие промежуточных адронных состояний с топ-кварком, в отличие от всех других кварков, дает уникальную возможность исследовать фундаментальные свойства взаимодействий топ-кварка без характерных ошибок и неопределенностей, связанных с промежуточными адронными состояниями. Физика за пределами Стандартной модели (СМ) в секторе топ-кварка может проявляться либо в рождении новых частиц в процессах с топ-кварком, либо в модификации предсказываемых СМ значений параметров взаимодействия топ-кварка с другими частицами.

В рамках участия в эксперименте CMS коллайдера LHC, успешно проходит процедура одобрения коллаборацией CMS полученных результатов поиска нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с глюоном и s - или u -кварком (tq FCNC). Результаты получены на полном наборе данных Run II в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. Завершены затребованные дополнительные исследования в контрольных областях. Проведены дополнительные оптимизации архитектуры применения глубоких нейронных сетей позволившие получить результаты на «данных Азимова» в разы лучше, чем уже опубликованные результаты эксперимента ATLAS полученных на аналогичном объеме данных. Результаты представлены в препринте коллаборации CMS [CMS-AN-16-371] и готовятся к публикации от имени CMS коллаборации.

Опубликованы результаты по открытию процессов рождения четырех топ-кварков в данных Run II эксперимента CMS полученных в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. Впервые статистическая значимость достигла 5.6 стандартных отклонения, что позволило заявить об открытии таких редких событий. Измеренное сечение данного процесса составило $17.7 +3.7/-3.5$ (stat.) $+2.3/-1.9$ (syst.) фбн что находится в согласии с предсказанием Стандартной модели [[Phys. Lett. B 847 \(2023\) 138290](#)].

Проведено моделирование и феноменологическое исследование процессов рождения трех и четырех топ-кварков с учетом вклада всех основных четырех-фермионных аномальных операторов, которые могут проявляться в таких процессах. Исследовано влияние ограничения унитарности на применимость такого подхода. Получены ожидаемые оценки чувствительности к таким операторам в различных сценариях статистического анализа. Впервые показана важность одновременного учета влияния таких операторов в процессах с тремя и четырьмя топ-кварками [e-Print:[2309.12514](#) [hep-ph]].

В эксперименте CMS проводится анализ по измерению фактора ядерной модификации ("Nuclear modification" фактор), т.е отношения спектров частиц по поперечному импульсу во взаимодействии протон-ядро к спектрам во взаимодействии протон-протон, в передней области эксперимента CMS. Продолжается развитие алгоритма "Particle Flow" (PF) в HF калориметре установки CMS, позволяющего измерение спектра частиц, входящих в HF, по энергии и поперечному импульсу. Проведена модернизация библиотеки ливней для

моделирования переднего калориметра HF с существенным повышением производительности.

Продолжено экспертное сопровождение системы мониторинга и контроля крейтов электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений (mTCA) субдетектора HSCAL и переднего калориметра HF установки CMS. Контролировалась работа виртуальных машин, отслеживались запускающие программные скрипты и настройки загрузки сессии mtcaserver при изменении активного и резервного серверов. Контроль актуальных данных позволяет выработать алгоритм формирования системы предупреждающих аварийных сообщений всех уровней в случае выхода контролируемых параметров за пределы допустимых значений для каждого контролируемого сенсора. Цель проводимых работ - обеспечение безопасности работы детекторов и надежность эксплуатируемой электроники стандарта mTCA.

В 2023 году на основе анализа данных эксперимента ZEUS выполнена проверка базовых основ квантовой теории поля: сохранение CPT- и лоренцевой симметрий в кварковом секторе Стандартной модели (SM). Нарушение данных симметрий должны проявляться как зависимость сечений процессов от времени. Выполненный анализ не выявил свидетельств наличия колебаний сечений с ходом звездного времени. Наложены ограничения на 42 коэффициента, параметризующих главные CPT-четные размерности-четыре и CPT-нечетные размерности-пять спин-независимые модификации пропагаторов и параметров взаимодействия легких кварков.

Выполнено новое измерение в системе Брейта сечений рождения адронных струй в глубоко неупругих процессах с нейтральными токами используя данные детектор ZEUS на ускорителе HERA. Новые данные по сечениям сопоставлены с предыдущими результатами и с предсказаниями КХД. Продемонстрирован «бегущий» характер параметра сильных взаимодействий и с точностью NNLO приближения КХД этот параметр определен на масштабе массы Z-бозона, $\alpha_s (M_Z^2) = 0.1142 \pm 0.0017$. Результат данного анализа является наиболее точным среди измерений на коллайдерах. При активном участии физиков НИИЯФ МГУ на основе анализа данных в 2023 г. подготовлены и опубликованы в высоко рейтинговых научных журналах две статьи [Phys. Rev. D (2023) **107**, 092008] и [Eur.Phys.J.C **83** (2023) 11, 1082].

В рамках эксперимента MPD мегасайенс-проекта комплекса «NICA» на базе ОИЯИ, Дубна, продолжена работа по анализу рождения частиц в диапазоне энергий коллайдера NICA на базе генератора PУТНИА с имплементированным пакетом Angantyr для моделирования столкновений релятивистских ядер. Разработан метод корректного сравнения экспериментальных данных в центральных событиях, полученных на ускорителях AGS, RHIC (фиксированная мишень), NA49 с данными генератора PУТНИА.

Впервые разработана и опубликована методика расчета точности положения времяпроекционной камеры в детекторах для коллайдеров. Данная методика может быть использована и для кремниевых вершинных детекторов. Проведено тестирование комплекса программ юстировки трекового детектора эксперимента MPD, который после этого был включен в вычислительную среду *mpdroot* эксперимента. Разработана методика расчета искажений, вносимых в физические параметры треков из-за ошибок в юстировке времяпроекционной камеры. Предварительные результаты этих расчетов были показаны на коллаборационном митинге в Белграде в октябре.

В рамках участия в эксперименте [BM@N](#) при участии физиков НИИЯФ МГУ опубликована статья по образованию π^+ и K^+ мезонов при взаимодействии пучка ядер аргона с энергией 3,2 AGeV с фиксированными мишенями [\[Production of \$\pi^+\$ and \$K^+\$ mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 A GeV, JHEP 2023 v.7\]](#)

Продолжена разработка методов юстировки детектора и ПО для эксперимента LHCb в третьем периоде работы LHCb (Run 3) в рамках проекта RTA (Real Time Analysis). Разработаны триггерные линии в первом триггере высокого уровня (HLT1) для кардинального ускорения процедуры юстировки.

Изучен инфляционный сценарий медленного скатывания в модели Старобинского-Бела-Робинсона. В рамках поправок высших порядков кривизны к инфляционным параметрам оценено максимальное значение коэффициента перед квадратом тензора Бела-Робинсона. Предложено расширение модели $R+R^2$ поправкой вида $(R+R_0)^{3/2}$, где R_0 постоянная. Введением дополнительного поля рассматриваемая модель сведена к модели гравитации неминимально взаимодействующей со скалярным полем. Предложенная модель проанализирована в системе Эйнштейна, получен инфляционный сценарий согласующейся с современными наблюдаемыми.

Получены точные физические решения для массивного скалярного поля в окрестности черной дыры Шварцшильда, вычислена их нормировка

Подробно изучены новые самосогласованные модели с дополнительной $U(1)$ симметрией и дополнительным скалярным полем. Рассмотрены сценарии предельных значений параметров модели.

Получены новые соотношения неопределенностей, позволившие вывести формулу для оценки групповой скорости виртуальной частицы. Новая формула применена к данным по виртуальным фотонам в глубоко неупругих процессах на коллайдере HERA. Получаемые значения скоростей находят естественную интерпретацию в известной теории «физика с двумя временами» (Two-time physics), развитой И. Барсом (I. Bars). Результат доложен на 21-й международной Ломоносовской конференции.

Введение

а) Физика топ кварка.

Существующие экспериментальные данные не позволяют предпочесть какой-то выделенный сценарий за рамками Стандартной модели (СМ), 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».

Существует несколько механизмов одиночного рождения топ-кварка. Ведущий t -канальный процесс уже неплохо исследован и именно в нем проводятся основные текущие измерения параметров одиночного рождения топ-кварка. Достигнутые на коллайдере БАК энергия и светимость позволяют проводить исследования все более и более редких процессов. В частности, процессов ассоциативного рождения одиночного топ-кварка с W , Z или Хиггс бозоном. Такие процессы ассоциативного рождения одиночного топ-кварка с

калибровочным бозоном позволяют проводить новые измерения и поиск различных возможных отклонений от предсказаний СМ. В эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся комплексные исследования физики топ-кварка в событиях протон-протонных столкновений при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ.

Новые физические явления за пределами Стандартной модели (СМ) в секторе топ-кварка могут проявляться либо в рождении новых частиц в процессах с топ-кварком, либо в модификации предсказываемых СМ значений параметров взаимодействия топ-кварка с другими частицами.

б) Физика дифракционных процессов и партонная структура частиц.

Рождение частиц в адронных столкновениях на больших псевдобыстроотах ($\eta > 5$) чувствительно к вкладу от мультипартонных взаимодействий (MPI), к механизму фрагментации исходного адрона и к процессам дифракции. Понимание этих механизмов важно для успешного описания конечных состояний в протон-протонных взаимодействиях на коллайдерах, а также для точного моделирования широких атмосферных ливней (ШАЛ), индуцированных в атмосфере Земли космическими лучами сверхвысоких энергий. В частности, рождение заряженных адронов в передней области взаимодействия оказывает непосредственное влияние на общее количество мюонов. Это важно, так как наиболее значимой проблемой моделирования ШАЛ с использованием существующих моделей взаимодействия является дефицит числа мюонов относительно результатов измерений.

Дифракционные процессы — это класс адронных взаимодействий, в которых рассеяние сталкивающихся частиц обусловлено обменом объектом, 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 разрешенным (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. 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 растворяются в некую субстанцию из своих конstituентов — 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 точка находится в диапазоне энергий сооружаемого комплекса NICA.

Результаты

1.1 Исследования топ-кварка в эксперименте CMS.

Э.Э. Боос, Г.А. Воротников, П.В. Волков, Л.В. Дудко, М.А. Перфилов, А. Заборенко, Э.Абасов, А.Маркина.

В эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся комплексные исследования физики топ-кварка в событиях протон-протонных столкновений при энергии 13 ТэВ. Готовятся исследования при более высоких энергиях и в режимах высокой светимости ускорителя.

Результаты поиска нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с u - или s -кварком и глюоном (tqg FCNC) полученные на данных Run II в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ успешно проходят процедуру одобрения коллаборацией CMS. Успешно завершены дополнительные затребованные исследования по согласованию моделирования и данных в контрольных областях фазового пространства, т. е. областях которые не участвуют в измерениях tqg FCNC, но используемых для проверки оценки основных фоновых процессов. Исследования были успешно завершены, что позволило продвинуться в на дальнейшие этапы процедуры одобрения результатов в CMS, необходимой для публикации этих результатов. Проведены дополнительные оптимизации применяемой архитектуры глубоких нейронных сетей, что позволило получить ожидаемые результаты на «данных Азимова» в разы лучше, чем уже опубликованные результаты эксперимента ATLAS, полученных на таком же объеме данных. Ожидаемые результаты поиска приведены на Рис.1 для одновременной вариации двух возможных аномальных вкладов, представленные в виде вероятностей (бренчингов) редких распадов топ-кварка на $t \rightarrow g, u$ или $t \rightarrow g, c$.

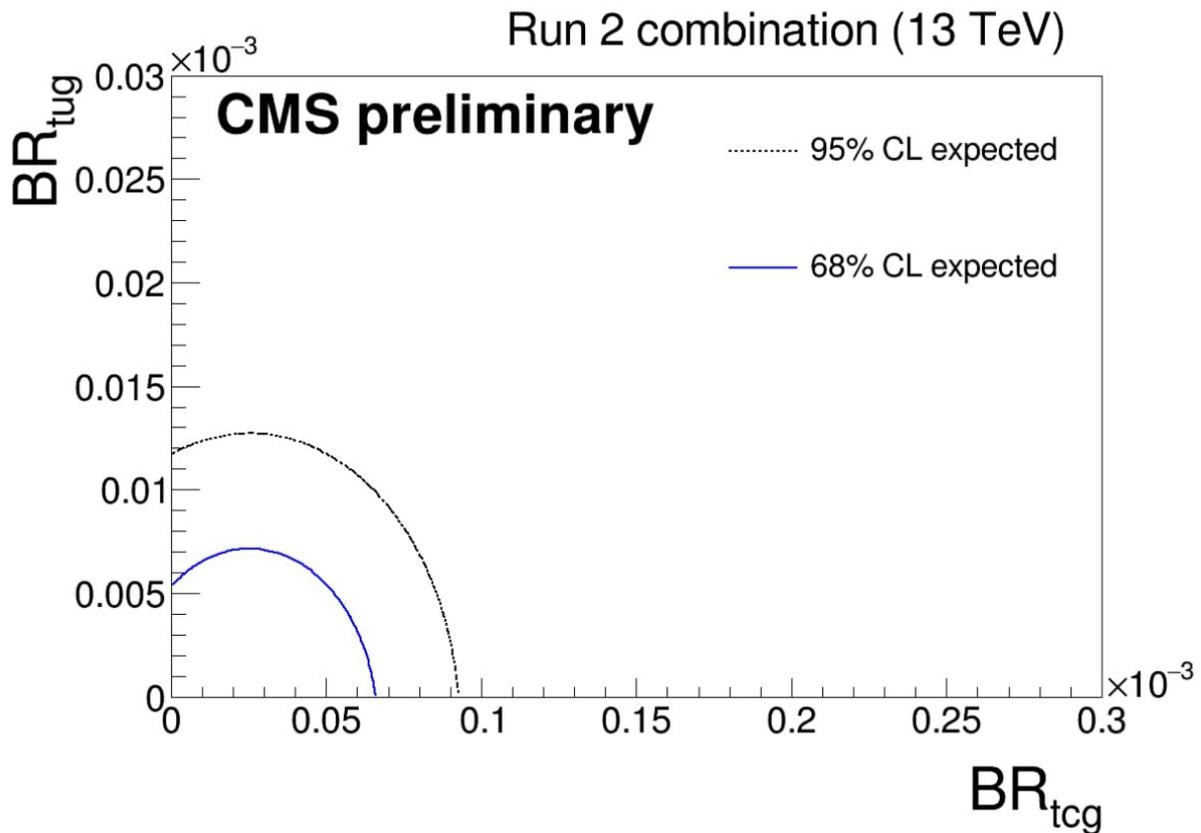


Рисунок 1. Верхние ограничения на вероятности (бренчинги) редких распадов топ-кварка по каналам $t \rightarrow g, u$ или $t \rightarrow g, c$ за счет отклонений от предсказаний Стандартной модели в нейтральных токах меняющих аромат кварков (tqg FCNC). Приведены полученные контуры ограничений на «данных Азимова».

Опубликованы результаты поиска редких процессов рождения четырех топ-кварков. Проведен поиск в трех разных каналах, с рождением 4-х лептонов, 3-х лептонов и двух лептонов одного знака, что позволило повысить одновременно доступную статистику. Достигнута статистическая значимость измерений в 5.6 стандартных отклонений, что позволило впервые заявить об экспериментальном открытии таких редких процессов. На рисунке 2 представлены распределения данных и моделирования для сигнальных и фоновых событий по бинам многомерного дискриминатора (левый рисунок) и измеренные сечения в каждом канале (правый рисунок). Измеренное сечение составило $17.7 +3.7/-3.5$ (stat.) $+2.3/-1.9$ (syst.) фбн что находится в согласии с предсказанием Стандартной модели [[Phys. Lett. B 847 \(2023\) 138290](#)].

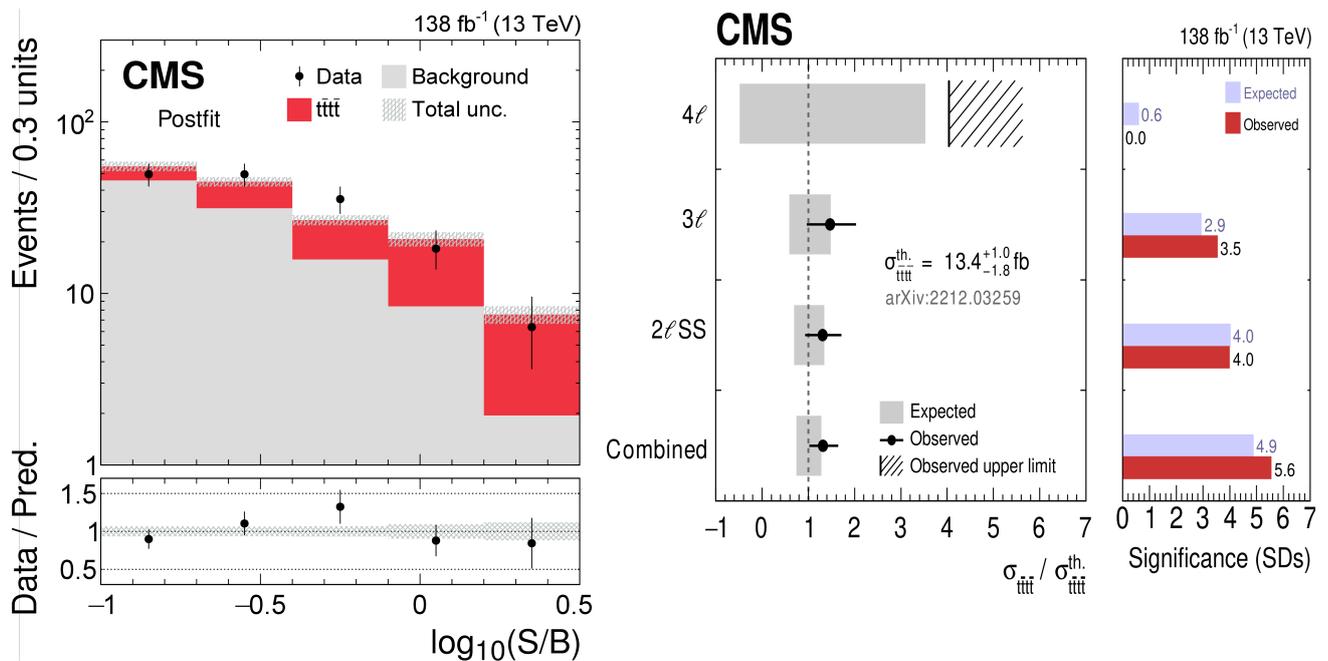


Рисунок 2. Приведены распределения данных и моделирования для процессов рождения четырех топ-кварков и фоновых событий (левый рисунок) и измеренные значения сечения процессов рождения четырех топ-кварков для каждого канала поиска, в единицах сечений СМ.

Впервые проведен одновременный феноменологический анализ всех основных четырех-фермионных операторов SMEFT размерности шесть в процессах рождения трех и четырех топ-кварков. Исследовано влияние ограничений унитарности на применение EFT подхода и получаемые ограничения на соответствующие аномальные операторы. Исследованы различные статистические модели постановки верхних ограничений на рассмотренные аномальные операторы. Впервые получены ожидаемые ограничения на рассмотренные операторы при одновременном учете процессов трех и четырех топ-кварков. Показана важность одновременного учета таких процессов [e-Print:[2309.12514](https://arxiv.org/abs/2309.12514) [hep-ph]].

1.2 Измерение "Nuclear modification" фактора во взаимодействии протон-ядро в передней области эксперимента CMS.

Л.А. Хейн

Измерение " Nuclear modification " фактора, т.е. отношения спектров частиц по поперечному импульсу во взаимодействии протон-ядро к спектрам во взаимодействии протон-протон, в передней области эксперимента CMS.

Развитие алгоритма "Particle Flow" (PF) в HF калориметре установки CMS, позволяющего измерение спектра частиц, входящих в HF, по энергии и поперечному импульсу.

Модернизация библиотеки ливней для моделирования переднего калориметра HF установки CMS.

Произведено переформатирование библиотеки ливней для моделирования переднего калориметра HF с целью использования в моделировании в RUN3.

	RUN2	RUN3 default	RUN3 mod	
TreeCache	0 MBytes	0 MBytes	0 MBytes	TTree cache size in MBytes
N leaves	2	2	2	Number of leaves in the TTree
ReadTotal	32.2077 MBytes	1044.81 MBytes	21.805 MBytes	Total number of zipped bytes read
ReadUnZip	64.6264 MBytes	1544.09 MBytes	24.8493 MBytes	Total number of unzipped bytes read
ReadCalls	133026	129920	133026	Total number of disk reads
ReadSize	0.242 KBytes/read	8.042 KBytes/read	0.164 KBytes/read	Average read size in KBytes
Readahead	256 KBytes	256 KBytes	256 KBytes	Readahead size in KBytes
Readextra	0.00 per cent	0.00 per cent	0.00 per cent	Readahead overhead in percent
Real Time	26.356 seconds	78.026 seconds	60.986 seconds	Real Time in seconds
CPU Time	11.780 seconds	10.860 seconds	0.970 seconds	CPU Time in seconds
Disk Time	15.128 seconds	1.828 seconds	7.589 seconds	Real Time spent in pure raw disk IO
Disk IO	2.129 MBytes/s	571.521 MBytes/s	2.873 MBytes/s	Raw disk IO speed in MBytes/second
ReadUZRT	2.452 MBytes/s	19.789 MBytes/s	0.407 MBytes/s	Unzipped MBytes per RT second
ReadUZCP	5.486 MBytes/s	143.181 MBytes/s	5.61 MBytes/s	Unzipped MBytes per CP second
ReadRT	1.222 MBytes/s	13.390 MBytes/s	0.357 MBytes/s	Zipped MBytes per RT second
ReadCP	2.734 MBytes/s	96.207 MBytes/s	22.476 MBytes/s	Zipped MBytes per CP second

Таблица 1. Сравнение производительности библиотеки ливней для RUN3 с предыдущими версиями по разным характеристикам, произведённое программой PerfStat.

Производительность процессора при моделировании с использованием новой библиотеки увеличена десятикратно.

2. Исследования в экспериментах MPD и BM@N коллайдера NICA.

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

2.1 Юстировка многофункционального детектора MPD мегапроекта NICA.

Метод компьютерного моделирования был использован для оценки искажений, вносимых неточным знанием положения секторов времяпроекционной (TPC) камеры в восстановленные параметры треков элементарных частиц. Псевдоэксперимент состоит из моделирования треков для юстировки TPC с отклонениями ее от теоретических значений, а при реконструкции треков используется теоретическая юстировка детектора. Введен параметр искажения юстировки (misalignment). «1» означает среднее смещение позиции сектора TPC и его угла Эйлера соответственно на 1 см и 1 градус. Реальная ширина следа трека на плоскости сектора неизвестна на данный момент, ожидается, что она порядка 1 см. На рисунках 1 и 2 представлены искажения поперечного импульса и быстроты частицы в зависимости от восстановленного значения поперечного импульса для двух ширин проекции 0.5 и 1.5 см. также показана динамика этих искажений в зависимости от точности юстировки TPC в диапазоне значений misalignment [0,3]. Скачок ошибки по скорости η в районе $P_{\perp} \sim 140$ Мэв скачкообразным уменьшением числа хитов трека из-за его выхода из TPC. Полученные результаты позволяют вводить поправки в реконструированные параметры трека.

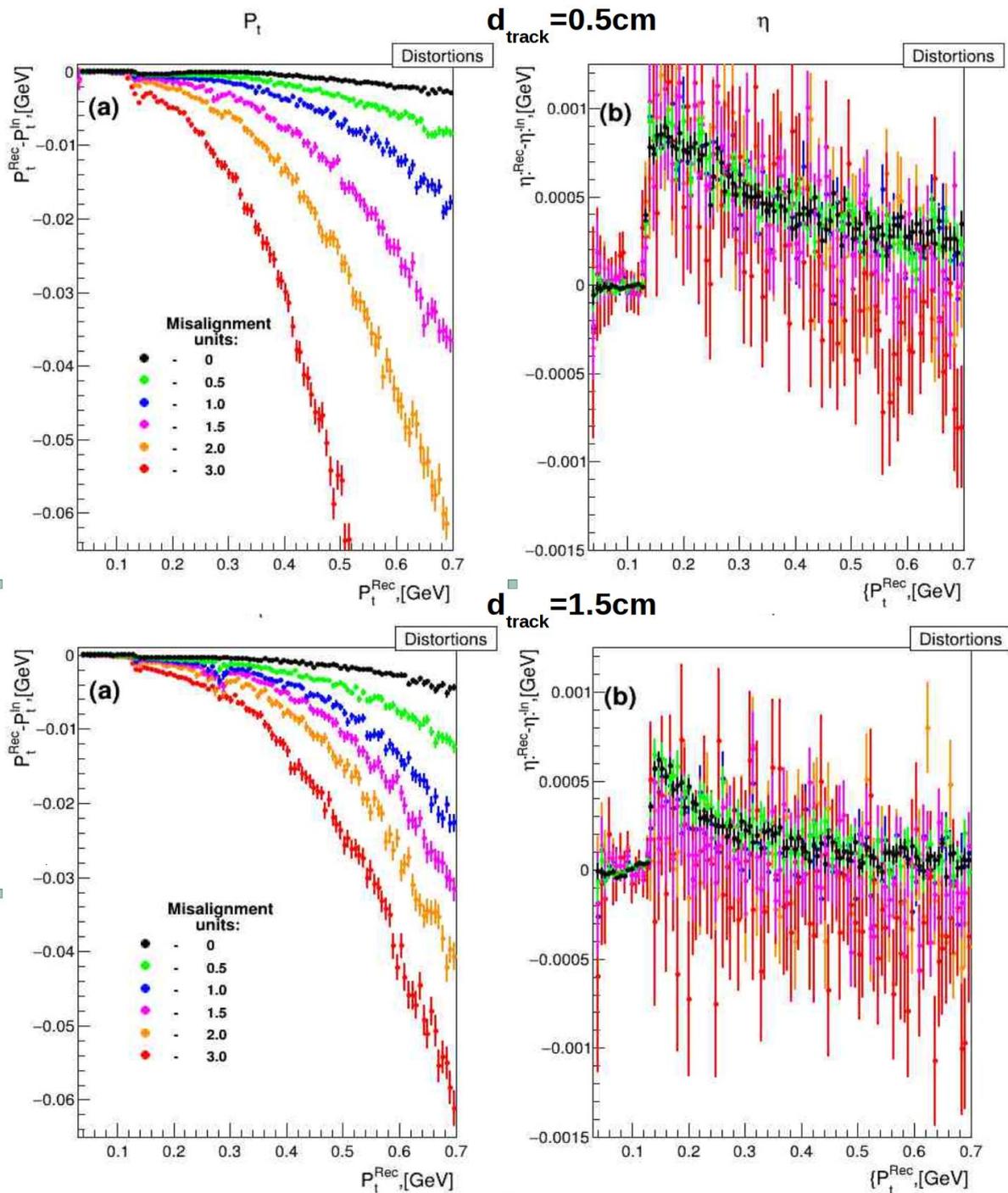


Рис.3 Искажения параметров трека времяпроекционной камерой детектора MPD вносимые неправильной юстировкой детектора.

2.2 Эксперимент MPD: Тестирование PYTHIA (модель «Angantyr») для NICA

В рамках эксперимента MPD продолжена работа по анализу рождения частиц в диапазоне энергий коллайдера NICA на базе генератора PYTHIA с имплементированным пакетом Angantyr для моделирования столкновений релятивистских ядер. Поскольку в этой модели не заложена физика образования кварк-глюонной плазмы, эта модель корректна для использования в качестве «фона» для выявления признаков образования нового состояния адронной материи.

Разработан метод корректного сравнения экспериментальных данных в 5% наиболее центральных событий, полученных на ускорителях AGS, RHIC (фиксированная мишень) и

NA49 с данными генератора PYTHIA 8.310. Для этого был подобран диапазон прицельных параметров столкновения ядер ($0 \leq b \leq 3.2$ fm), при которых отбирается только 5% событий из числа наиболее центральных. Таким образом, приблизительно выполняются условия эксперимента, где выборка делалась на хардверном уровне. На Рис. 4 селекция иллюстрируется распределениями по множественности π^- мезонов, полученных в РУТНИА 8.310 для вышеуказанных событий (интеграл распределения центральных событий составляет 5% от инклюзивного).

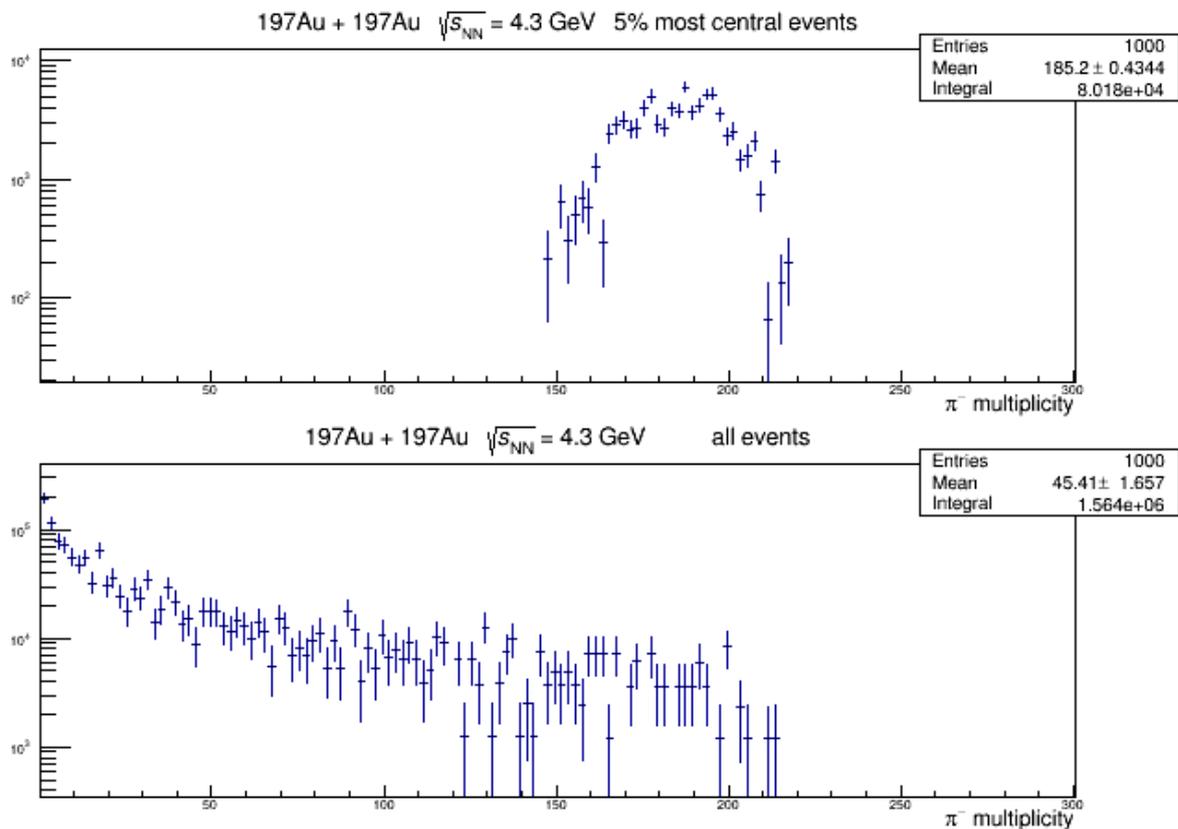


Рис. 4. Распределения по множественности π^- мезонов, полученных в РУТНИА 8.310 для всех событий (верхний график) и для 5% наиболее центральных столкновений (нижний график).

Предсказание РУТНИА 8.310 оказалось в 1,4 раза выше (красная точка) экспериментального значения, как видно на Рис. 5:

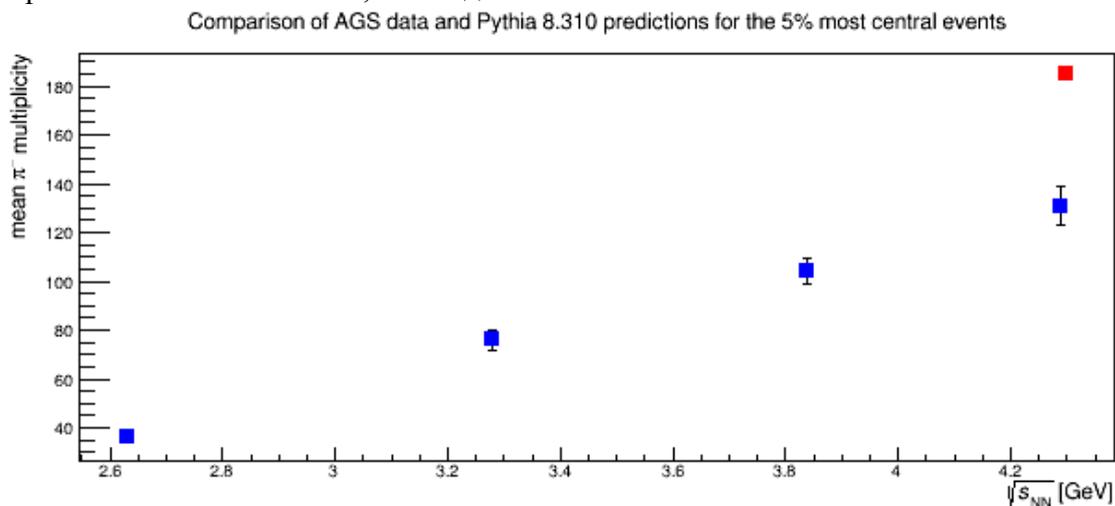


Рис. 5. Сравнение средней множественности отрицательных пионов от энергии: синие точки – эксперимент, красная точка – РУТНИА 8.310.

Для дальнейшего уточнения предсказаний RYTHIA для экспериментов в области малых энергий диапазона NICA планируется обсудить полученные результаты с авторами пакета Angantyr лундовской группы.

2.3 Эксперимент BM@N: Рождение π^+ и K^+ мезонов в аргон-ядерных столкновениях при энергии 3.2AGeV

Опубликованы первые физические результаты по рождению π^+ и K^+ мезонов при взаимодействии пучка ядер аргона с энергией 3,2AGeV с набором фиксированных мишеней (C,Al, Cu, Sn, Pb) пи энергии Нуклотрона. В частности, для этого набора мишеней проведён детальный физический анализ распределений по быстротам для π^+ и K^+ мезонов и проведено сравнение с целым рядом теоретической моделей.

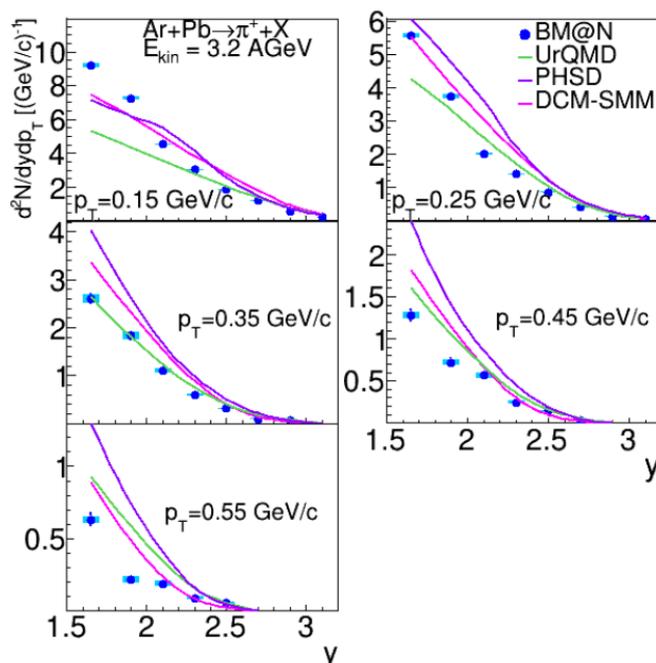


Рис. 6. Распределения по быстройте, y , π^+ мезонов, образованных в Ag+Pb взаимодействиях при кинетической энергии 3.2AGeV. Результаты представлены для разных интервалов p_T . Предсказания моделей показаны различным цветом.

Были также детально измерены спектры по по поперечному импульсу и множественности π^+ и K^+ мезонов для полного набора мишеней. Проведено сравнение результатов с с предсказаниями теоретических моделей и с измерениями, полученными в экспериментах с тяжёлыми ионами при других энергиях (рис. 7). Поведение нормированных на число партисипантов множественностей π^+ и K^+ в зависимости от энергии согласуется с мировыми данными по рождению этих частиц для различных сталкивающихся ядер и энергий пучка.

Первые данные с Нуклотрона в эксперименте BM@N являются существенным вкладом в исследовании ядро-ядерных взаимодействий в интервале энергий, представляющих интерес для исследований по программе проекта NICA.

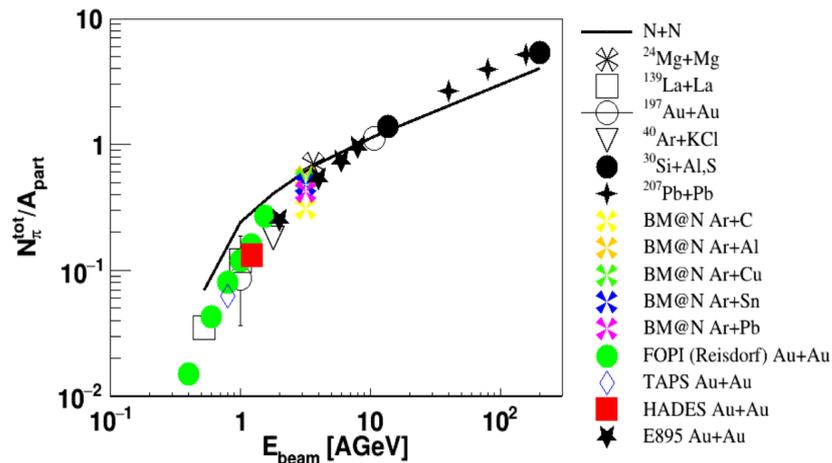


Рис. 7. Сравнение результатов данного эксперимента по отношению полной множественности пионов к числу партисипантов A_{part} в зависимости от энергии пучка с данными других экспериментов.

3. Исследования в экспериментах ZEUS и H1 коллайдера HERA.

Б.Б. Левченко, Л.М. Щеглова

В 2023 г. в рамках НИР “Экспериментальные исследования по физике тяжёлых кварков, электрослабых и нестандартных взаимодействий при высоких энергиях” (номер ЦИТИС: 115041510056) опубликованы две большие статьи в высоко рейтинговых научных журналах.

Среди наиболее значимых следует отметить следующие физические результаты, полученные при активном участии физиков НИИЯФ МГУ в 2023 году.

3.1 Поиск эффектов нарушения СРТ и лоренцевой симметрий в данных ZEUS

В основу статьи легли результаты анализа данных эксперимента ZEUS на электрон-протонном коллайдере HERA (г. Гамбург, Германия) набранных в период 2003-2007 гг. Объем данных составил 372 пб^{-1} , а после специального отбора, анализировалось 4.5×10^7 событий.

Целью анализа была проверка базовых основ квантовой теории поля: сохранение СРТ- и лоренцевой инвариантности в кварковом секторе Стандартной модели (СМ) и поиск возможных отклонений от СМ. Принцип относительности (ПО) требует, чтобы результаты идентичных измерения, выполненных с разной ориентацией в пространстве и в разные периоды времени, после соответствующих преобразований, выявляли совпадающие законы движения. Во многих теоретических схемах, нарушение лоренцевой инвариантности обуславливает нарушение СРТ инвариантности теорий. Благодаря недавним теоретическим разработкам, появилась методика экспериментального поиска нарушения лоренцевой инвариантности (НЛИ) в процессах глубоко неупругого рассеяния (ГНР) электронов на протоне.

В опубликованной статье описывается методика анализа данных эксперимента ZEUS и результаты поиска сигналов нарушающих вращательную инвариантность ГНР в координатном пространстве. Идея анализа состоит в следующем. Предполагая наличие в природе механизмов нарушения вращательной инвариантности, СМ модифицируется в секторе квантовой электродинамики (КЭД) и квантовой хромодинамики (КХД), чтобы включить операторы размерности четыре (КЭД), и $a^{[5]}$ коэффициенты размерности пять

(КХД). Это приводит к модификациям вершин взаимодействия, пропагаторов легких кварков u, d, s и внутренних кинематических переменных (x, Q^2) . В результате, дифференциальные сечения в секторе КЭД зависят от коэффициентов $c_f^{\alpha\beta}$, а в секторе КХД от коэффициентов типа $a_f^{[5]\alpha\beta\gamma}$. Зависимость сечений от времени, и, следовательно, нарушение вращательной инвариантности происходит следующим образом.

В лабораторной системе отсчета (СО) связанной с Землей (СОЗ), коэффициенты $c_f^{\alpha\beta}$ и $a_f^{[5]\alpha\beta\gamma}$ полагаются постоянными величинами. Но СОЗ является неинерциальной СО из-за вращения Земли. По соглашению, результаты должны представляться в инерциальной СО связанной с Солнцем (СОС) (см схему на рис 8). После лоренцевских преобразований операторов $c_f^{\alpha\beta}$ и $a_f^{[5]\alpha\beta\gamma}$ и лабораторных координат и пучка в СОС, появляется

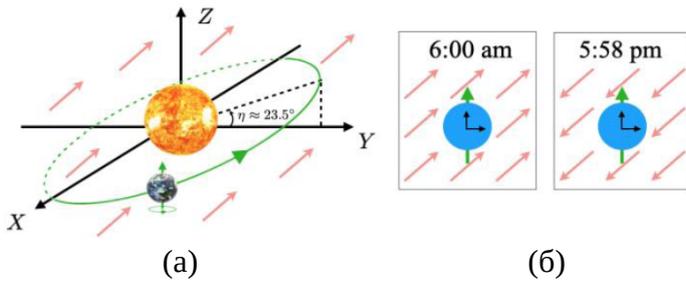


Рис.8 (а) Система отсчета с центром на Солнце (СОС). Орбита Земли показана зеленой линией. Эффект нарушения лоренцевой инвариантности символически показан фоновыми красными стрелками. В земной лаборатории изучается частица (синий круг с зеленой стрелкой) с координатами указанными черными стрелками и наблюдается фоновое распределение в зависимости от периода в звездном времени T_{sid} . (б) Иллюстрация зависимости от времени.

зависимость от локального звездного времени T_* и частоты вращения Земли $\omega_* = 2\pi/T_{sid}$. Это потребовало выбора начала отсчета локального (лабораторного) времени, T_* , и синхронизации времени и координатных осей лаборатории (DESY, Гамбург), направление пучка в ускорителе со временем и координатными осями СОС. Таким моментом, $T=0$, был выбран день весеннего равноденствия 2000 года, 20 марта, 7:35 по всемирному координатному времени (ВКВ/UTC). Для $T_*=0$, был выбран момент 2000 г., 20 марта, 11:20 ВКВ.

В качестве наблюдаемой, для выявления возможной зависимости сечений от хода звездного времени, было взято отношение $r_c(P S_1, P S_2)$ интегралов по областям $P S_1(x_{Bj}, Q^2)$ и $P S_2(x_{Bj}, Q^2)$ от нормированных трижды дифференциальных сечений от x_{Bj}, Q^2 и временной фазе ϕ_T . В результате, многие (но не все) систематические эффекты сократились и зависимость $r_c(P S_1, P S_2)$ от коэффициентов $c_f^{\alpha\beta}$ и $a_f^{[5]\alpha\beta\gamma}$ и их зависимость в СОС от T_{sid} , была использована для поиска эффектов НЛИ. Был выполнен обширный анализ и учет систематических временных эффектов при наборе данных, таких как: - периодическое уменьшение светимости пучка после ввода пучка в ускоритель; - систематически больший набор данных в вечернее время, чем в утреннее и др. Изучено влияние размера бинов и временных периодов (солнечные сутки, звездные сутки) на систематические эффекты. Критерий Колмогорова-Смирнова позволил выявить ранее не учтенный систематический эффект неизвестного происхождения, но небольшой по величине.

На Рис. 9 представлен главный результат анализа, временная зависимость, ассоциированная с коэффициентами $c_u^{TY}, c_u^{XX} - c_u^{YY}$ и $a_{Su}^{[5]XXY}$. Эти коэффициенты дают пример временной зависимости с угловыми частотами $\omega_*, 2\omega_*$ и $3\omega_*$. Сплошная и пунктирная кривые отмечают нижние и верхние границы значений коэффициентов, точечная кривая отвечает значениям коэффициентов большим на порядок величины. Временная шкала в звездных сутках разбита на 100 интервалов. Граница кинематических областей $P S_1$ и $P S_2$ установлена при $x_c = 10^{-3}$.

Учитывая, что в целом, полученные результаты не выявили значительной (за пределами 2σ) временной зависимости $r(x_c)$ от звездного времени T_{sid} и согласуются с СМ, то были установлены верхние и нижние ограничения на коэффициенты с-типа и $a^{[5]}$ -типа. Всего таких коэффициентов 42, из них на 30 коэффициентов границы установлены впервые.

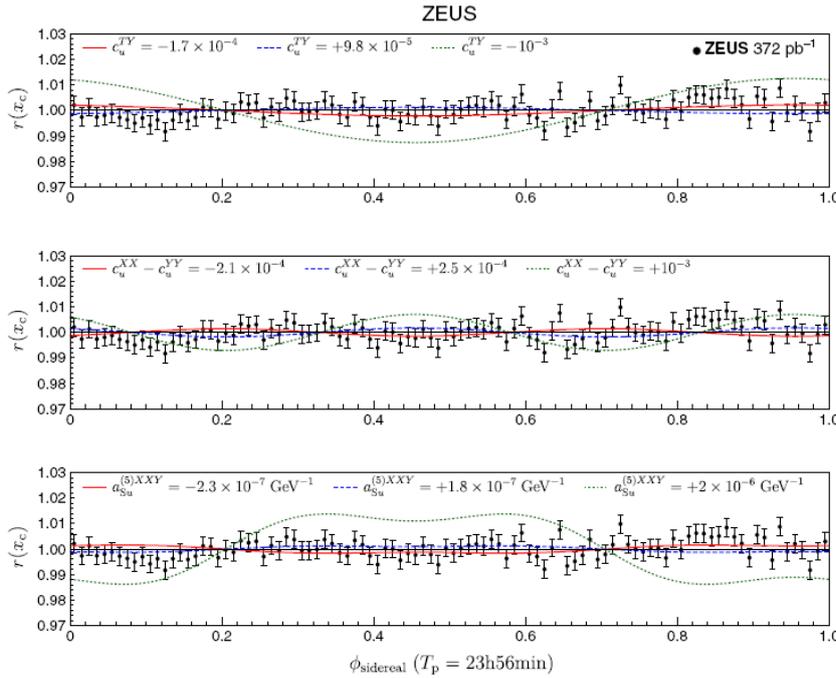


Рис. 9

Следует отметить, что исследования фундаментальных симметрий в партонной физике и экспериментальный анализ, связанный с поиском нетрадиционных явлений, зависящих от времени, находятся в начальном состоянии. Статистически значимое указание на нарушение Лоренц-инвариантности или связанной с ней фундаментальной симметрии в ЕТП, не будет однозначно указывать на наличие явлений, выходящих за рамки описания квантовой теории поля и метрических теорий гравитации. Тем не менее, такое открытие было бы указанием на присутствие новой физики, что является сильной мотивацией для дальнейших исследований в этой области.

3.2 Измерения сечений рождения струй в глубоко неупругом рассеянии и определение параметра сильных взаимодействий в NNLO приближении на установке ZEUS

Квантовая хромодинамика (КХД) предсказывает, что в результате нарушения скейлинга в партонной модели, «константа» сильных взаимодействий α_s эволюционирует, становится «бегущим» параметром, зависящим от энергетического масштаба, $\alpha_s(\mu^2)$. Поскольку α_s является внутренним параметром КХД, то определение его величины (измерение) возможно только через «внешние» объекты, такие как струи адронов, благодаря их связи с «внутренними» объектами (кварки, глюоны, калибровочные бозоны).

Целью нового анализа данных ZEUS являлось измерение инклюзивных сечений рождения адронных струй в глубоко неупругих процессах (ГНР) с нейтральными токами, извлечение из данных, методом сравнения с предсказаниями КХД моделей, параметра сильных взаимодействий на стандартном масштабе соответствующим массе Z бозона, $\alpha_s(M_Z^2)$, и выполнение дополнительного анализа данных для извлечения информации о зависимости α_s от изменяемого масштаба, $\alpha_s(\mu^2)$.

Струи реконструировались как безмассовые, по $k_{t-\delta}$ алгоритму в системе Брейта. В отличие от эксклюзивного измерения струй (двухструйные события), инклюзивные измерения обладают меньшими статистическими ошибками и меньшими теоретическими неопределенностями. Сечение рождения струй измерялось как функция двух переменных, Q^2 , отрицательного квадрата переданного импульса от электрона в адронную систему, и поперечного импульса струи, $p_{t, Breit}$, в системе Брейта. Для данного анализа отбирались события с $150 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 1.5 \times 10^4 \text{ ГэВ}^2$ и $7 \text{ ГэВ} < p_{t, Breit} < 50 \text{ ГэВ}$. Для сравнения с результатами полученными группой H1, размер бинов выбирался как у H1. Распределения числа струй по поперечному импульсу показаны на Рис.10.

В статье с высокой детализацией описаны все этапы отбора событий, процедуры поиска и реконструкции струй, методология анализа данных, моделирования искусственных событий.

Из всех данных ZEUS набранных в период 2004-2007 гг первоначально формировалось несколько наборов событий, со своими критериями отбора. Так называемый инклюзивный ГНР набор, содержал события удовлетворивших определенным, но довольно мягким, критериям отбора (наличие рассеянного электрона, удаление событий с фоторождением, или с космическими лучами и т. п., всего восемь критериев.). Этот набор применялся для изучения зависимости $\alpha_s(\mu^2)$. Другой, инклюзивный набор событий со струями и более жесткими критериями отбора, применялся для извлечения величины $\alpha_s(M_Z^2)$.

Существенное отличие от предыдущего подобного анализа в том, что Монте-карло события иначе применялись для корректировки данных на адронном уровне. Использовалась техника извлечения при помощи двумерной матрицы, описывающей распределение числа струй по бинам $(Q^2, p_{t,Breit})$ и дальнейшего проектирования на одномерные распределения как на детекторном уровне, та и на адронном уровне. Числа струй в каждом бине не следуют пуассоновскому распределению. Особое внимание уделялось учёту миграции событий между близлежащими бинами. Очень подробно перечислены систематические неопределенности, их источники, описаны способы их оценки.

После выполнения описанных процедур, полученные сечения на адронном уровне поправлялись на радиационные КЭД эффекты. Новые данные по сечения сопоставлены на Рис.11 с предыдущими результатами и с предсказаниями КХД. На этом же этапе, измеренные сечения использовались как входные данные при пКХД расчетах и подгонки теоретических предсказаний с учетом высших лидирующих поправок (NNLO). Выполнялись одновременно подгонка глюонных распределений к данным по сечениям рождения струй и подгонка полюсного значения параметра сильных взаимодействий, $\alpha_s(M_Z^2)$. Это позволило существенно уменьшить неопределенности в глюонных распределениях и с высокой точностью извлечь из данных полюсное значение параметра сильных взаимодействий,

$$\alpha_s(M_Z^2) = 0.1143 \pm 0.0017(\text{эксн}) \pm 0.0006(\text{мод})$$

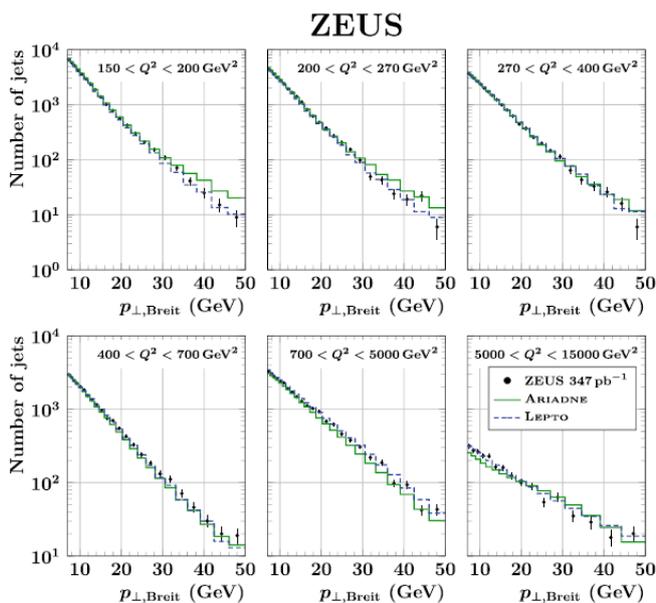


Рис.10 Распределение числа струй по поперечному импульсу $p_{t,Breit}$ с системе Брейта, в разных интервалах по Q^2 . Показано сравнение с двумя МК моделями Ariadne и Lepto.

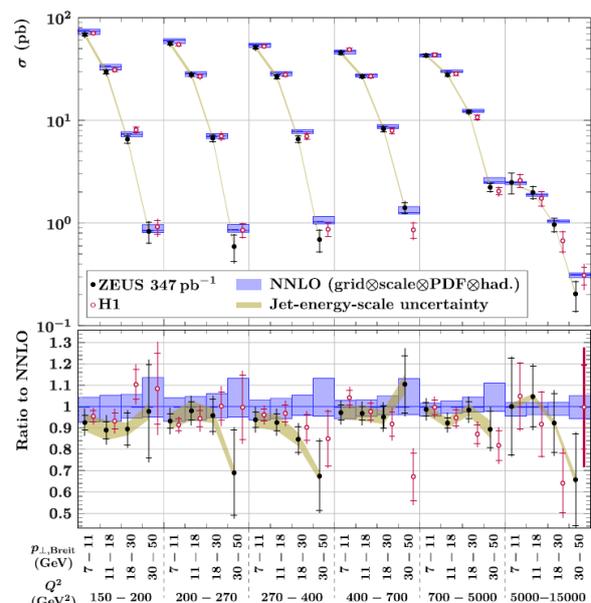


Рис.11. Дважды дифференциальное сечение рождения струй. Результат ZEUS показан черными точками. Для сравнения, показаны сечения полученные H1 (открытые точки) и NNLO КХД расчеты (голубые блоки). На нижней панели показаны отношения сечений.

Рис.12 с итогом χ^2 сканирования при фиксированном $\alpha_s(M_Z^2)$ подтверждает представленное выше значение, полученное с $\alpha_s(M_Z^2)$ как со свободным параметром. Результат данного анализа является наиболее точным среди измерений на коллайдерах.

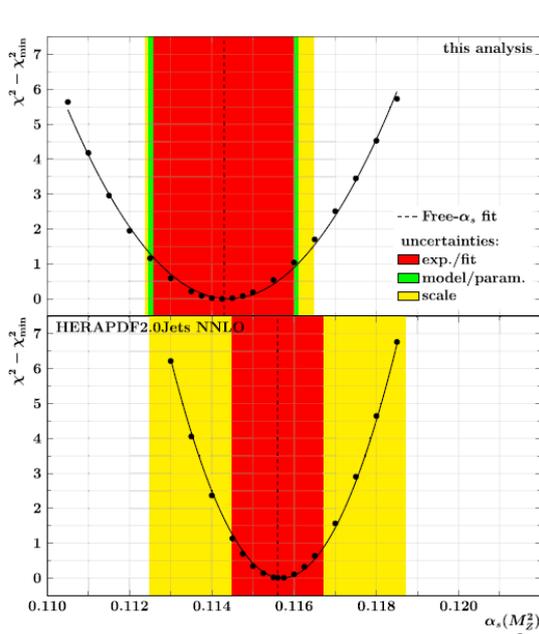


Рис.12. На верхней панели разница между χ^2 и χ_{min}^2 как функция $\alpha_s(M_Z^2)$ для подгонки с учётом высших NNLO поправок с фиксированным $\alpha_s(M_Z^2)$. Цветом показаны разные источники неопределенностей. На нижней панели для сравнения показан результат предыдущего анализа.

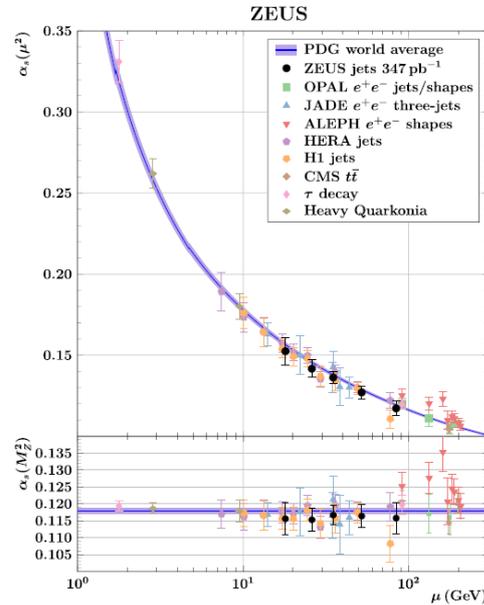


Рис. 13 Значения параметра сильной связи $\alpha_s(\mu^2)$ как функция энергетического масштаба μ . Все указанные результаты были получены в приближениях не хуже NNLO.

На Рис.13 представлены пять итоговых точек данного анализа, с высокой точностью подтверждающих «бегущий» характер параметра сильной связи в КХД. Рисунок также демонстрирует хорошее согласие с полученными ранее результатами.

4. Исследования проводимые в эксперименте LHCb

А.Н. Соломин

Одной из наиболее сильных сторон эксперимента LHCb является наличие в его конструкции 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.

Система юстировки входит в состав RTA (красный овал на схеме RTA), Рисунок 14:

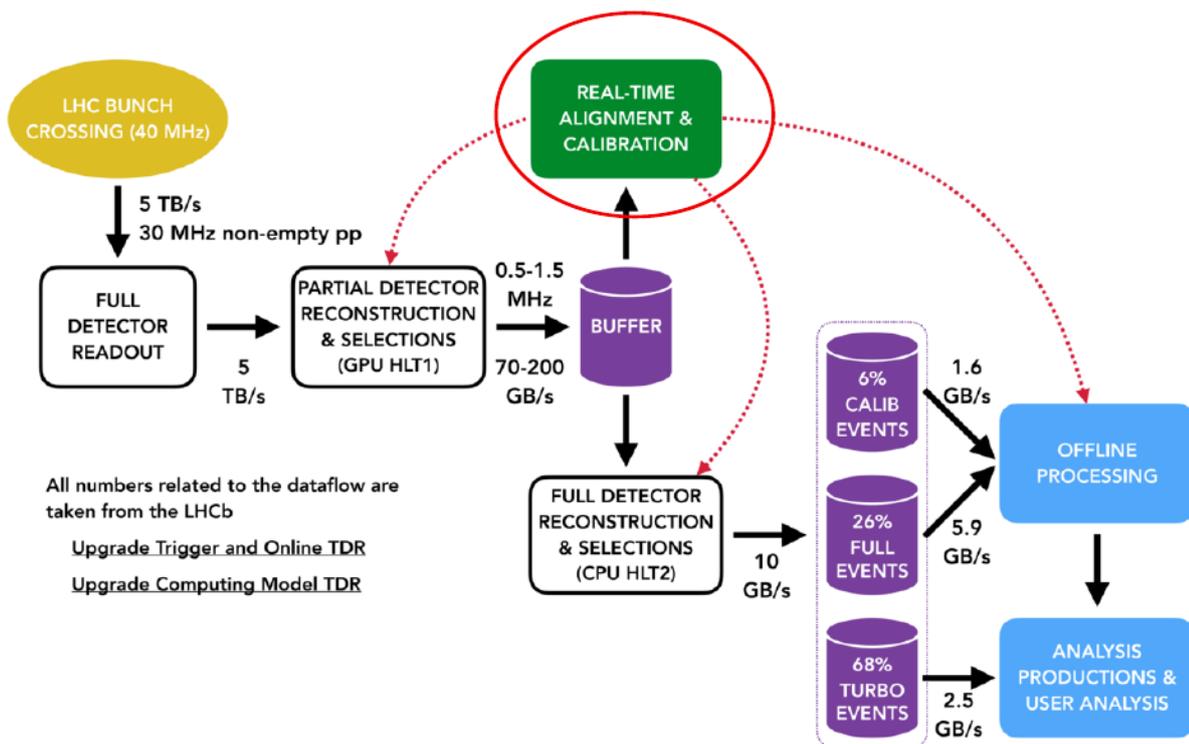


Рисунок 14.

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 иллюстрируется следующей диаграммой рабочего процесса, где **array** — это предварительно создаваемый (в результате сложной процедуры, разработанной в 2022 г.) «словарь», Рисунок 15:



Рисунок 15.

В 2023 г. реализованы соответствующие триггерные линии для RICH1 и RICH2 для графических процессоров HLT1 на языке CUDA в рамках программного проекта LHCb

«Allen». Внесён вклад в общую часть этого проекта. Линии будут окончательно настроены и развёрнуты в 2024 г.

В результате достигается радикальное убыстрение определения юстировочных поправок, критичных для реконструкции и анализа событий в режиме реального времени. Дополнительно, существенно облегчается возможность бессрочного хранения необходимой информации с целью гарантированной воспроизводимости физических результатов.

В связи с разработкой в ЛНЦб проекта «реально-временной анализ» (RTA) и принятием к использованию совершенно новой программной инфраструктуры, произведена коренная переработка и усовершенствование методики и ПО юстировки детекторов RICH для работы в новой инфраструктуре. Группа ЛНЦб 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 ЛНЦб для Run 3 LHC. Разработчиком является А.Н. Соломин.

5. Теоретические исследования.

5.1 Исследование инфляционных моделей $f(R)$ гравитации.

Е.О. Поздеева

Расширения $R+R^2$ космологической модели поправками вида $(R)^{3/2}$ интересны с точки зрения воспроизведения непротиворечивых инфляционных сценариев и были хорошо исследованы с точки зрения интегрируемости и симметрии. Нами предложена инфляционная модель с поправкой вида $(R+R_0)^{3/2}$ и двумя новыми дополнительными параметрами. Отметим, что поправка введена таким образом, чтобы предложенная модель воспроизводила общую теорию относительности при малых значениях скаляра Риччи относительно массы инфлатона. По этой причине введена космологическая постоянная и изменено линейное по скаляру Риччи слагаемое в модифицирующей функции. Предложенная модель и ее первая, вторая производные хорошо определены при положительных и малых отрицательных значениях скаляра Риччи, что позволяет сохранить осцилляцию скаляра Риччи около нуля в постинфляционный период. Введением дополнительного поля рассматриваемая модель сведена к модели неминимально взаимодействующей гравитации со скалярным полем. Преобразованием Вейля модель сведена к модели общей теории относительности с потенциалом. Аналитический анализ предложенной модели громоздкий. Однако, если связать два дополнительных параметра линейным выражением, то аналитический анализ упрощается и появляется возможность выразить потенциал с помощью полинома от экспоненциальной функции скалярного поля. В полученной модели получены инфляционные сценарии согласующиеся с современными наблюдаемыми при разных значениях параметров модели.

Изучен инфляционный сценарий медленного скатывания в модели Старобинского-Бела-Робинсона. Подробно представлен метод применения поправок высших порядков кривизны для получения формул инфляционных параметров. С точки зрения непротиворечивости построенной инфляционной модели оценено максимальное значение коэффициента перед квадратом тензора Бела-Робинсона.

Проанализирован вид потенциала в системе Эйнштейна соответствующий R^2 гравитации с добавочной постоянной.

5.2 Квантование полей в окрестности черных дыр. Построение новых моделей темной материи и исследование пространства параметров этих моделей, согласующихся с современными ускорительными и астрофизическими экспериментами.

Э. Рахметов, С. Кейзеров

5.2.1 Квантование полей в окрестности черных дыр

Найдены стационарные физические решения уравнений движения для скалярного поля в сильных гравитационных полях черных дыр различных типов. В случае черной дыры Шварцшильда подтверждено недавно обнаруженное удвоение числа состояний инфинитного движения. Аналогичные результаты получены для черной дыры Рейснера-Нордстрёма. Также в этом случае для скалярного поля впервые получены точные выражения для физических решений через конфлюэнтные функции Гойна и точно вычислены их условия нормировки. Эти результаты важны для более строго описания эффекта Хокинга и уточнения времени испарения первичных черных дыр. Кроме того, они могут представлять интерес для поисков темной материи, поскольку как частицы, описываемые локализованными вблизи черной дыры решениями, так и сами первичные черные дыры могут давать вклад в плотность энергии темной материи.

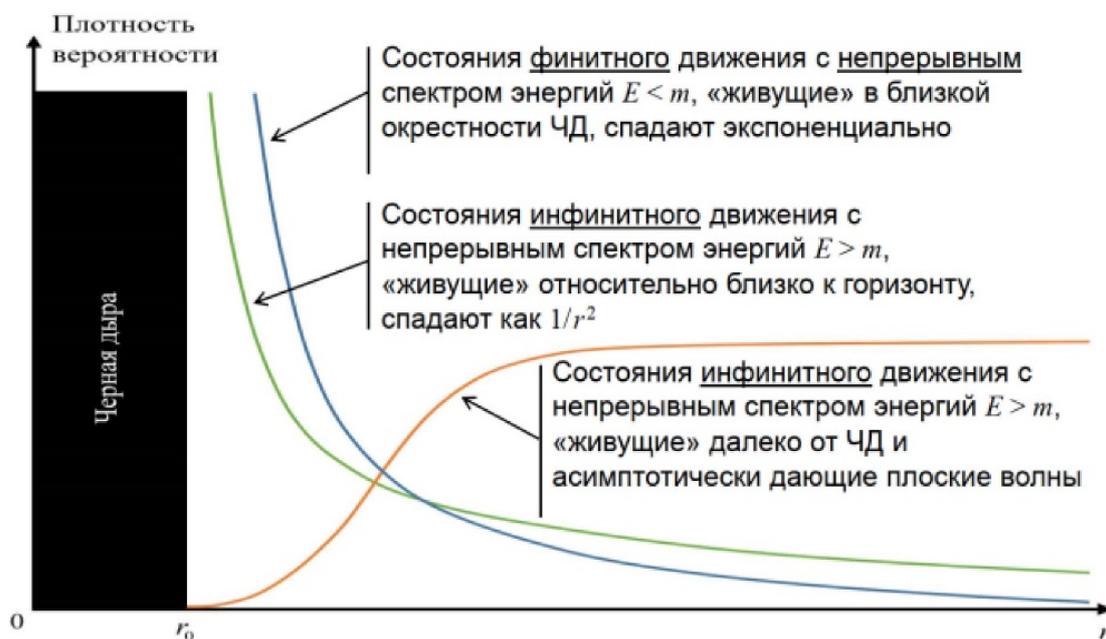


Рисунок 16 – Поведение квадрата модуля волновых функций различных состояний скалярных частиц в гравитационном поле черной дыры Шварцшильда

5.2.2 Построение новых моделей темной материи и исследование пространства параметров этих моделей, согласующихся с современными ускорительными и астрофизическими экспериментами

Рассмотрены модели темной материи, инвариантные относительно $U(1)$ калибровочных преобразований с дополнительным скалярным полем (также преобразующимся относительно этих преобразований), а также с векторным калибровочным полем, обеспечивающим эту инвариантность. Лагранжианы таких моделей содержат члены смешивания с полями Стандартной модели как в скалярном, так и в векторном секторах. Таким образом, скалярное и векторное поля являются медиаторами взаимодействий полей СМ с темным сектором.

Получены точные выражения для спектра масс как скалярных полей (бозона Хиггса и темного скаляра), так и векторных (W , Z -бозонов) показано, что фотон остается безмассовым.

Выписаны все возможные члены взаимодействий в скалярном и векторном секторах.

Выписаны члены взаимодействия фермионов SM с дополнительным скалярным и векторным полем.

Выписаны поправки во взаимодействия фермионов SM с бозонными (векторным и скалярными) полями SM.

Изучены различные пределы параметров смешивания. Показано, что при малых параметрах смешивания (за исключением некоторых особенных соотношений между параметрами модели), все поправки в массы и взаимодействия между полями SM имеют порядок параметров смешивания. Взаимодействия полей SM с темной материей имеет такой же порядок.

Результаты опубликованы.

5.3 Теоретическое изучение свойств виртуальных частиц

Б.Б. Левченко

Опираясь на первичную квадратичную форму определений неопределенностей компонент векторов координаты и импульса частицы, найдено редуцированное соотношение неопределенностей для квадратов векторов координаты и импульса. Новое соотношение неопределенностей позволило вывести формулу для оценки групповой скорости виртуальной частицы. Формула была применена к данным по виртуальным фотонам в глубоко неупругих процессах на коллайдере HERA. Из данных следует, что групповая скорость виртуального фотона изменяется в широких пределах, даже превышает скорость реального фотона в вакууме, но в пределе нулевой виртуальности обе величины совпадают. Подобное поведение скорости виртуальной частицы находит естественную интерпретацию в теории И. Барса. В этой теории, развиваемой более 20 лет, сигнатура пространства-времени должна быть $(1+1', D+1')$, т.е. включать одно дополнительное временное и одно дополнительное пространственное измерение. Результат доложен на 21-й международной Ломоносовской конференции.

Планы исследований на 2023 год.

Исследования в эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся в нескольких направлениях. В основе исследований, лежит анализ данных полученных при энергии протон-протонных столкновений 13 ТэВ. Данные при такой энергии накапливались в эксперименте в течении 2016, 2017 и 2018 годов (Run II). В настоящий момент завершена обработка и понимание данных Run II. Обработка данных эксперимента по столкновению протонов при энергии 13 ТэВ позволила провести поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ кварка с u- или c-кварком и глюоном. Полученные результаты должны пройти многоступенчатую проверку и одобрение коллаборации CMS для возможности опубликования. На полученных данных готовится экспериментальное исследование структуры взаимодействия топ кварка с W бозоном и b-кварком и поиск отклонений от предсказанной в Стандартной модели (SM) структуры этих взаимодействий. В случае отсутствия экспериментального проявления таких отклонений будут получены верхние ограничения на параметры характеризующие такие взаимодействия. Будут продолжены работы по измерению "Nuclear modification" фактора во взаимодействии протон-ядро в передней области эксперимента CMS.

Планируется завершение работы и публикация результатов по нахождению искажений восстановленных параметров трека в детекторе MPD. Юстировка времяпролетного детектора

ТОФ эксперимента MPD. Глобальная юстировка детектора MPD. Будет продолжена работа в группе математического обеспечения эксперимента MPD. Дальнейшее исследование критериев центральности на базе генератора PYTHIA в диапазоне энергий NICA и сравнение с имеющимися мировыми данными (MPD). В эксперименте [BM@N](#) планируется исследование рождения отрицательных пионов и каонов во взаимодействии ядер аргона с фиксированными мишенями при энергии 3.2A GeV.

Будет продолжен анализ данных ZEUS для изучения азимутальных де-корреляций в полуинклюзивных струях в глубоко неупругих процессах.

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 2024 г.

Планируется продолжить исследование модифицированных теорий гравитации. В частности, планируется уточнить приближение медленного скатывания в моделях с Гаусс-Бонне слагаемым. Планируется провести детальный анализ моделей модифицированной гравитации с успешными инфляционными сценариями в постинфляционный период развития.

В рамках темы по квантованию полей в окрестности черных дыр планируется построить точные решения для массивного скалярного поля в метриках, описывающих как сферически симметричные, так и вращающиеся черные дыры различных типов.

В рамках темы по изучению влияния квантовых поправок на известные классические решения ОТО, планируется изучить влияние эффекта Казимира на стабилизированную RS-модель. Также планируется построить «toy-model», демонстрирующую возможность решения проблемы иерархии за счет эффекта Казимира для системы из фермионных и бозонных полей.

В рамках темы «Построение новых моделей темной материи и исследование пространства параметров этих моделей, согласующихся с современными ускорительными и астрофизическими экспериментами» планируется вычислить сечения процессов ассоциативного рождения частиц темной материи с парой тау-лептонов в электрон-позитронных столкновениях при 7 ГэВ в зависимости от параметров модели — масс дополнительных бозонов и параметров связи, и ширины распадов.

Планируется продолжить исследование свойств виртуальных частиц и процессов с рождением пар частиц в сильных полях.

Запланировано продолжение исследований и разработка методов применения нейронных сетей глубокого обучения в экспериментальных анализах проводимых на современных и будущих коллайдерах.

Заключение

Продолжаются исследования в экспериментах CMS и LHCb коллайдера БАК, ZEUS коллайдера HERA, а также BM@N и MPD комплекса NICA. Проводятся теоретические и феноменологические исследования в рамках Стандартной модели и различных ее расширений. За 2023 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 21 доклад на международных конференциях и большое количество докладов на рабочих совещаниях. Полученные результаты опубликованы в индивидуальных публикациях и от имени коллабораций CMS, ZEUS, MPD, LHCb.

Доклады на конференциях в 2023 г.:

- 1) [Status of tqg FCNC search in Run II](#) (Приглашенный)
Авторы: [Воротников Г.А.](#), [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#), [Перфилов М.А.](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Абасов Э.Э.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Маркина А.](#)
[Top EFT WG meeting](#), CERN, Швейцария, 23 ноября 2023
- 2) [tqg FCNC search in Run II](#) (Приглашенный)
Авторы: [Воротников Г.А.](#), [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#), [Перфилов М.А.](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Абасов Э.Э.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Маркина А.](#)
[Top EFT round table WG meeting](#), CERN, Швейцария, 2 ноября 2023
- 3) [Status of tqg FCNC search in Run II](#) (Приглашенный)
Авторы: [Воротников Г.А.](#), [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#), [Перфилов М.А.](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Абасов Э.Э.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Маркина А.](#)
[t+X round table WG meeting](#), CERN, Швейцария, 19 октября 2023
- 4) [Status of tqg FCNC search in Run II](#) (Приглашенный)
Авторы: [Воротников Г.А.](#), [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#), [Перфилов М.А.](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Абасов Э.Э.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Маркина А.](#)
[Top EFT WG meeting](#), CERN, Швейцария, 16 марта 2023
- 5) [Separation between top pair and Single Top contributions with tWb final state using Neural Networks](#) (Приглашенный)
[Boos E.](#), [Bunichev V.](#), [Dudko L.](#), [Perfilov M.](#), [Волков П.](#), [Vorotnikov G.](#)
[Conference on High Energy Physics](#), Ереван, Armenia, 11-14 сентября 2023
- 6) [Neural Network techniques for a separation of pair and single top quark contributions to tWb final state](#) (Приглашенный)
[Волков П.В.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Воротников Г.А.](#), [Дудко Л.В.](#), [Перфилов М.А.](#)
[TWENTY-FIRST LOMONOSOV CONFERENCE ON ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS](#),
Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Russia, 24-30 августа 2023
- 7) [Методология поиска сигнала темной материи в процессах с топ кварком](#) (Устный)
[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.](#)
[XXIV харитоновские чтения "Проблемы ускорительной физики и физики высоких энергий"](#),
ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл., Russia, 24-28 июля 2023
- 8) [Methodology for the use of neural networks in the data analysis of the collider experiments](#) (Приглашенный)
[Дудко Л.В.](#)
[The 7th International Conference on Deep Learning in Computational Physics DLCP23](#), Санкт-Петербург, Russia, 21-23 июня 2023
- 9) [Novelty Detection Neural Networks for Model-Independent New Physics Search](#)
[Заборенко А.Д.](#), [Дудко Л.В.](#), [Волков П.В.](#), [Перфилов М.А.](#)
[The 7th International Conference on Deep Learning in Computational Physics DLCP23](#), Санкт-Петербург, Russia, 21-23 июня 2023
- 10) [Исследование четыре-фермионных операторов SMEFT в процессах рождения трех и четырех топ кварков](#). (Приглашенный)
[Алешко А.М.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Дудко Л.В.](#)
[XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023»](#), г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, Russia, 10-21 апреля 2023
- 11) Поиск нейтральных глюонных токов во взаимодействиях топ кварка, в данных Run II эксперимента CMS при энергии 13 ТэВ.
Доклад мл.науч.сотр. Воротникова Г.А., студ. Абасова Э.Э., директора Бооса Э.Э., ст.науч.сотр. Буничева В.Е., мл.науч.сотр. Волкова П.В., зав. лаб. Дудко Л.В., студ. Заборенко А.Д., студ. Иудина Е.Д., ст.науч.сотр. Перфилова М.А.
[Ломоносовские чтения 2023 секция "Физика высоких энергий"](#), НИИЯФ МГУ, Россия, 4-14 апрель 2023

- 12) Спиновые корреляции в процессах ассоциативного рождения темной материи и одиночного топ-кварка на БАК.
 Доклад ст.науч.сотр. Перфилова М.А., студ. Абасова Э.Э., директора Бооса Э.Э., ст.науч.сотр. Буничева В.Е., мл.науч.сотр. Волков П.В., зав.лаб. Дудко Л.В., студ. Иудиной Е., науч.сотр. Маркиной А.Е., студ. Гришиной Е.
[Ломоносовские чтения 2023 секция "Физика высоких энергий"](#), НИИЯФ МГУ, Россия, 4-14 апрель 2023
- 13) Метод применения нейронных сетей для детектирования аномалий, на примере поиска темной материи на коллайдерах.
 Доклад студ. Заборенко А.Д., зав.лаб. Дудко Л.В., ст.науч.сотр. Перфилова М.А.
[Ломоносовские чтения 2023 секция "Физика высоких энергий"](#), НИИЯФ МГУ, Россия, 4-14 апрель 2023
- 14) [CMS Measurements and UHECR](#) (Устный)
 L. Khein
[ISCRA-2023: The 4th International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics](#), Москва, Russia, 27-29 июня 2023
- 15) Поздеева Е.О., Вернов С.Ю. «Инфляционный сценарий в модели Старобинского-Бел-Робинсона», Ломоносовские чтения 2023, Russia, 4-14 апреля 2023.
- 16) Поздеева Е.О., Вернов С.Ю. «Новые однопараметрические расширения инфляционной модели Старобинского», Ломоносовские чтения 2023, Russia, 4-14 апреля 2023.
- 17) «Дополнительные измерения пространства и времени в области глубоко неупругих процессов», Доклад ст.науч.сотр. Левченко Б.Б. Международная Конференция Ломоносовские чтения-2023, Секция ядерной физики, подсекция «Физика высоких энергий» (МГУ, Москва, Россия, 4-14 апреля 2023);
- 18) «Extra dimensions of space and time in the region of deeply inelastic processes», (приглашенный), Levchenko V.V., Международная Конференция Twenty-first Lomonosov conference on elementary particle physics, (МГУ, Москва, Россия, 24-30 августа 2023)
- 19) Ломоносовские чтения 2023, «Феноменологические особенности новой самосогласованной модели темной материи и их проявления на будущей Супер с-тау фабрике», Трыков С.С., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Кейзеров С.И.;
- 20) Ломоносов 2023, «Поиск темной материи на будущей Супер с-тау фабрике в модели с дополнительной U(1)-симметрией и дополнительным скалярным полем», Трыков С.С., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Кейзеров С.И.;
- 21) «Ломоносовские чтения 2023» в докладе «Точные решения для скалярного поля в метрике сферически-симметричной черной дыры», Кейзеров С.И., Волобуев И.П., Рахметов Э.Р.

Публикации за 2023 год:

[1] CMS Collaboration «Observation of four top quark production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV» [Phys. Lett. B 847 \(2023\) 138290](#)

[2] CMS Collaboration «Azimuthal anisotropy of dijet events in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV» Belyaev Andrey, Boos E.E., Demiyarov A., Ershov A.A., Khein L., Kodolova O.L., Korotkikh V.L., Obraztsov S.V., Petrushanko S.V., Savrin V.I., Snigirev A.M., Vardanyan I., в журнале *Journal of High Energy Physics*, издательство IOP Publishing ([Bristol, UK], England), том 7 [DOI](#)

[3] CMS Collaboration «First measurement of the forward rapidity gap distribution in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, Belyaev Andrey, Boos E.E., Ershov A.A., Gribushin A., Khein L., Kodolova O.L., Korotkikh V.L., Lukina O., Obraztsov S.V., Petrushanko S.V., Savrin

- V.I., Snigirev A.M., Vardanyan I., CMS Collaboration, в журнале *Physical Review D*, издательство *American Physical Society (United States)*, том 108 [DOI](#)
- [4] CMS Collaboration «Measurements of the azimuthal anisotropy of prompt and nonprompt charmonia in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», Belyaev Andrey, Boos E.E., Demiyarov A., Ershov A.A., Khein L., Kodolova O.L., Korotkikh V.L., Obraztsov S.V., Petrushanko S.V., Savrin V.I., Snigirev A.M., Vardanyan I., в журнале *Journal of High Energy Physics*, издательство *IOP Publishing ([Bristol, UK], England)*, том 10 [DOI](#)
- [5] CMS Collaboration «Observation of τ lepton pair production in ultraperipheral lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», Belyaev Andrey, Boos E.E., Bunichev V., Ershov A.A., Khein L., Kodolova O.L., Korotkikh V.L., Obraztsov S.V., Petrushanko S.V., Savrin V.I., Snigirev A.M., Vardanyan I., в журнале *Physical Review Letters*, издательство *American Physical Society (United States)*, том 131 [DOI](#)
- [6] CMS Collaboration «Search for medium effects using jets from bottom quarks in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», Belyaev Andrey, Boos E.E., Ershov A.A., Gribushin A., Kaminsky A., Khein L., Kodolova O.L., Korotkikh V.L., Obraztsov S.V., Petrushanko S.V., Savrin V.I., Snigirev A.M., Vardanyan I., в журнале *Physics Letters B*, издательство *Elsevier BV (Netherlands)*, том 844 [DOI](#)
- [7] CMS Collaboration «Two-particle azimuthal correlations in γp interactions using pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV», Belyaev Andrey, Boos E.E., Ershov A.A., Khein L., Kodolova O.L., Korotkikh V.L., Lukina O., Obraztsov S.V., Petrushanko S.V., Savrin V.I., Snigirev A.M., Vardanyan I., в журнале *Physics Letters B*, издательство *Elsevier BV (Netherlands)*, том 844 [DOI](#)
- [8] ZEUS collaboration : Dementiev R.K., Korzhavina I.A., Levchenko B.B., Shcheglova L.M. et al. Search for effective Lorentz and CPT violation using ZEUS data . в журнале *Phys. Rev. D* (2023) **107**, 092008
- [9] ZEUS collaborations: Dementiev R.K., Korzhavina I.A., Levchenko B.B., Shcheglova L.M. et al. Measurement of jet production in deep inelastic scattering and NNLO determination of the strong coupling at ZEUS . в журнале *Eur.Phys.J.C* **83** (2023) 11, 1082
- [10] LHCb Collaboration «Associated production of prompt J/ψ and Y mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV.», A. Berezhnoy, I.V. Gorelov, A. Danilina, A. Kozachuk, A. Leflat, N. Nikitin, D. Savrina, A. Solomin, V. Zhukov, в журнале *JHEP*, издательство *IOP Publishing ([Bristol, UK], England)*, том 8, с. 093 [DOI](#)
- [11] LHCb Collaboration «Amplitude analysis of $B^0 \rightarrow D^- 0 D_s + \pi^-$ and $B^+ \rightarrow D^- D_s + \pi^+$ decays», A. Berezhnoy, I.V. Gorelov, A. Danilina, A. Kozachuk, A. Leflat, N. Nikitin, D. Savrina, A. Solomin, V. Zhukov, *Physical Review D*, т. 108, № 1, с. 012017 [DOI](#)
- [12] LHCb Collaboration «Charmonium production in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV», A. Berezhnoy, I.V. Gorelov, A. Danilina, A. Kozachuk, A. Leflat, N. Nikitin, D. Savrina, A. Solomin, V. Zhukov, в журнале *European Physical Journal C*, издательство *Springer Verlag (Germany)* т. 83, № 7, p. 625 [DOI](#)
- [13] MPD TPC alignment.
V.Kuzmin в журнале *Physics*, издательство [MDPI \(Basel, Switzerland\)](#), том 5, № 2 с. 508-516 (<https://doi.org/10.3390/physics5020036>).
- [14] The [BM@N](#) Collaboration, S. Afanasiev et al.
Production of π^+ and K^+ mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 A GeV,
Journal of High Energy Physics, издательство [IOP Publishing \(\[Bristol, UK\], England\)](#), том 2023, № 7
- [15] Pozdeeva Ekaterina O., Vernov Sergey Yu. «New one-parametric extension of the Starobinsky inflationary model» *Physica Scripta*, Volume 98, Number 5 p.055001, DOI: [10.1088/1402-4896/acc6a5](#)
- [16] Ivanov Vsevolod, Ketov Sergei, Pozdeeva Ekaterina, Vernov Sergey, «On Extensions of the Starobinsky Model of Inflation», *Phys. Sci. Forum* 2023, 7(1), 6; DOI: [10.3390/ecu2023-14044](#)
- [17] Pozdeeva Ekaterina, Ketov Sergei, Vernov Sergey, String-Inspired Correction to R^2 Inflation, *Phys. Sci. Forum* 2023, 7(1), 6; DOI: [10.3390/ECU2023-14036](#)

[18] Э. Э. Боос, В.Е. Буничев, С.И. Кейзеров, С.С. Трыков, Поиск темной материи на будущей Супер с-тау фабрике в моделях с дополнительной $U(1)$ симметрией и дополнительным скалярным полем, Ученые записки физического факультета Московского университета, №4, 2341501 (2023);

[19] Волобуев И.П., Кейзеров С.И., Рахметов Э.Р., Точные решения для массивного скалярного поля в гравитационном поле сферически симметричной черной дыры, принято в печать: Журнал НЦФМ. По утверждению редакции выйдет в номере за 2023 год, точные выходные данные до сих пор неизвестны.