

## Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ Основные результаты полученные в 2024 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 рамками 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, проходит процедура одобрения коллаборацией CMS полученных результатов поиска нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с глюоном и  $s$ - или  $u$ -кварком ( $tqg$  FCNC). Результаты получены на полном наборе данных Run II в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. Проведены все дополнительные исследования затребованные в рамках процедуры одобрения результатов. Результаты представлены в препринте коллаборации CMS [CMS-AN-16-371] и готовятся к публикации от имени CMS коллаборации.

Опубликованы результаты поиска дополнительного векторного бозона  $W'$  распадающегося в топ-кварк и  $b$ -кварк. Удалось ужесточить верхние ограничения на массу такого возможного бозона на уровне 3.9 ТэВ и 4.3 ТэВ для лево- и право-взаимодействующего  $W'$ , соответственно [JHEP05(2024)046]. Проведен поиск возможного нарушения лоренц-инвариантности при образовании пары топ-кварков. Результаты согласуются с нулевой гипотезой [*Phys.Lett.B* 857 (2024) 138979]. Квантовая запутанность является фундаментальным свойством квантовой механики и, как предполагается, проявляется в частицах, рождающихся в Большом адронном коллайдере. В эксперименте CMS было выполнено измерение степени запутанности топ-кварков и антитоп-кварков, рождающихся при столкновениях протонов с энергией 13 ТэВ, что обеспечило новое исследование квантовой механики при самых высоких энергиях и подтвердило предсказываемый эффект [*Rept.Prog.Phys.* 87 (2024) 11, 117801].

Проведено моделирование и феноменологическое исследование проявления медиатора темной материи в процессах рождения трех и четырех топ-кварков в рамках упрощенных моделей. Исследована эффективность применения нейронных сетей Колмогорова-Арнольда в задачах классификации и регрессии.

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. Готовятся программы моделирования калориметра ZDC установки CMS.

Продолжено экспертное сопровождение системы мониторинга и контроля крейтов электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений (мТСА) субдетектора HSCAL и переднего калориметра HF установки CMS. Цель проводимых работ - обеспечение безопасности работы детекторов и надежность эксплуатируемой электроники стандарта мТСА.

В 2024 году продолжен анализ данных эксперимента ZEUS с целью изучения азимутальных корреляций между лидирующей адронной струей и рассеянным лептоном в глубоко неупругих процессах (ГНП) через нейтральные токи. Измерены инклюзивные распределения по азимутальному углу  $\Delta\phi$  между струей и лептоном для разных областей по поперечному импульсу лидирующей струи, по квадрату переданного импульса  $Q^2$  и для разного числа струй в событии  $N_{jet}$ . Продемонстрировано хорошее согласие измеренных дифференциальных сечений как с численными расчетами по пКХД (с точностью до  $\alpha_s^{(2)}$ ), так и с предсказаниями монте-карло моделей ARIADNE и LEPTO. Однако, с ростом числа струй в конечном состоянии,  $N_{jet} \geq 2$ ,  $N_{jet} \geq 3$  модель ARIADNE, воспроизводя форму распределения как функция  $\Delta\phi$ , предсказывает завышенные числа событий. Установлено, что вклад эффектов до  $\alpha_s^{(2)}(Q^2)$  порядка в аналитических расчетах по пКХД хорошо имитируются партонами ливнями генерируемыми Монте-Карло моделью ARIADNE. Выполнен большой объем работа по анализу и учёту систематических и статистических погрешностей. Результаты представлены в препринте коллаборации ZEUS [DESY-24-070] и готовятся к публикации от имени ZEUS коллаборации.

В эксперименте D0 (Fermilab) проведено измерение структурных функций протона для валентных кварков, на основе ранее полученных данных.

В рамках эксперимента MPD мегасайенс-проекта комплекса «NICA» на базе ОИЯИ, Дубна, продолжены исследования по анализу рождения частиц в релятивистских столкновениях ядер на базе генератора PYTHIA с имплементированным пакетом Angantyr в области энергий коллайдера NICA. Впервые получены данные с новой версией генератора PYTHIA 8.310 (Angantyr) в области нижней границы коллайдера NICA,  $\sqrt{s}=4$  GeV, и нижней кинематической границы генератора, проведено сравнение с экспериментальными данными в этой области в условиях 4π- геометрии.

На основе разработанного метода нахождения юстировки время-проекционной камеры (TPC) детектора MPD вычислены погрешности, вносимые ошибками в юстировке детектора, в реконструированные параметры треков. Полученные результаты, а именно, расчет искажений перпендикулярного импульса и скорости из-за неопределенностей в юстировке не имеют аналогов для детекторов подобного типа. Показано, что влияние неправильной юстировки для TPC MPD незначительно.

В рамках коллаборации [BM@N](#) проводится анализ рождения Λ-гиперонов во взаимодействиях углеродного пучка с мишенями C, Al, Cu, на детекторе BM@N при энергиях Нуклотрона 4,0 и 4,5 А ГэВ с. Были получены результаты по выходу Λ-гиперонов и проведено их сравнение с предсказаниями различных моделей и другими экспериментами. Результаты доложены на пленарном митинге BM@N коллаборации.

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

На основе квантово-механических соотношений неопределенностей Гейзенберга и Ландау-Пайрлса, выведены новые неравенства между канонически сопряженными переменными и формула для оценки групповой скорости  $U^*$  виртуальных частиц. Глубоко неупругие процессы ер-рассеяния при квадрате переданного импульса  $Q^2 < 100$  ГэВ<sup>2</sup> интерпретируются как обмен виртуальным фотоном. Применяв метод косвенных измерений и формулу для  $U^*$  к экспериментальным данным с ер коллайдера HERA установлено, что виртуальный фотон имеет скорость превышающую скорость реального фотона в вакууме,  $U^*/c > 1$ . Для решения проблемы выполнения условия нормировки  $U^*/c = 1$  при  $Q^2 = 0$  (предел реального фотона) приведены аргументы, что сигнатура пространства-

времени в области взаимодействия должна быть  $(1+1',3+1')$ , т.е. включать одно дополнительное временное и одно дополнительное пространственное измерения. Результат доложен на 21-й международной Ломоносовской конференции и опубликован в трудах конференции.

Изучен инфляционный сценарий медленного скатывания в модели Старобинского-Бела-Робинсона. Найдено два новых вида уточненных приближений медленного скатывания в моделях с Гаусс-Бонне слагаемым. В моделях  $f(R)$  гравитации локально реконструирован потенциал приводящий к усилению возмущений кривизны необходимому для возможного формирования первичных черных дыр после инфляции.

Получены физические решения для массивного скалярного поля в метриках, описывающих как сферически симметричные, так и аксиально-симметричные (вращающиеся) черные дыры различных типов, вычислена нормировка таких решений.

Вычислены сечения процессов ассоциативного рождения частиц темной материи с парой тау-лептонов в электрон-позитронных столкновениях при 7 ГэВ в зависимости от следующих параметров модели: масс дополнительных бозонов и параметров связи, а также ширины распадов.

Изучено влияние эффекта Казимира на стабилизированную модель Рэндалл-Сундрума.

## 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 конститuentов — 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.

Проведены дополнительные исследования необходимые для публикации результатов физического анализа по поиску нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка, глюона и  $s$ - или  $c$ -кварка ( $tqg$  FCNC) в данных эксперимента CMS Run II (БАК, CERN, Швейцария), полученных в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. Дополнительные исследования были затребованы руководителями профильных групп коллаборации в рамках процедуры одобрения результатов анализа. Для успешного одобрения результатов поиска  $tqg$  FCNC было проведено значительное количество дополнительных проверок различных этапов анализа, с внесением ряда дополнительных корректировок и проверок, а также несколько серий исправлений, дополнений и расширений представленного в 2023 году препринта описывающего все детали анализа. В частности, были исследованы некоторые отклонения между моделированием и данными, собранными во второй половине 2016 года (2016 post-VFP), в так называемой контрольной области, где доминирует фоновый процесс рождения  $W$ -бозона и адронных струй, и в контрольной области с доминированием фонового процесса парного рождения топ-кварков ( $t\bar{t}$ ), для проверки вклада этих фоновых процессов в сигнальной области, т. е. В области данных где проводятся измерения вклада  $tqg$  FCNC. Было показано, что рассогласование модели и данных вызвано некорректными поправками к эффективности определения адронных струй от  $b$ -кварков ( $b$ -струй), предоставленными коллаборацией CMS. По согласованию с соответствующими экспертами, была произведена их модификация на основе аналогичных поправок для данных первой половины 2016 года (2016 pre-VFP), что позволило ликвидировать имеющиеся рассогласования в данной области данных, уточнив эти поправки в остальных областях. Проведённые в коллаборации CMS исследования показывают небольшое расхождение в моделировании поперечного импульса топ-кварков в высокоэнергетической области важного фонового процесса  $t\bar{t}$  с наблюдаемым в данных, что может оказывать влияние на результаты анализа. Для коррекции этого расхождения, по согласованию с экспертами, было применено специальное перевзвешивание смоделированных  $t\bar{t}$  событий, уменьшившее наблюдаемое небольшое рассогласование модели и данных в высокоэнергетической области. Несмотря на более, чем пятикратный рост объёма данных, по сравнению с Run I (2011-2012 гг.), удалось достигнуть лишь примерно двукратного улучшения верхних ограничений на вероятности исследуемых аномальных распадов, что обусловлено основным ограничением эффективности анализа со стороны систематических неопределённостей, которые остаются примерно на уровне Run I. В связи с этим, а также изменением рекомендаций CMS, единый параметр систематической неопределённости, связанной с коррекциями измеряемой энергии струй в детекторе, был разделён на 11 независимых отдельных вкладов по источникам систематической неопределённости (JES, JER). Такой подход позволил получить менее консервативную оценку общей систематической ошибки анализа, несколько ужесточив получаемые ограничения. Одним из важных вкладов фона являются КХД процессы рождения многоструйных событий (QCD), в которых мюон появляется вследствие ошибок идентификации или реконструкции событий. Хотя вероятность такой неправильной

идентификации крайне мала, очень высокое сечение подобных процессов приводит к их существенному вкладу в сигнальную область анализа, а их моделирование стандартными методами Монте-Карло (МК)— затруднено. Подход, широко используемый в экспериментах, заключается в создании набора шаблонных событий из области данных, независимой от сигнальной (QCD\_Data) и с преобладанием многоструйных КХД событий. Было показано, что в рамках анализа существующее МК моделирование адекватно воспроизводит основные кинематические особенности QCD процессов, давая хорошее согласование модели и данных в большинстве наблюдаемых, в то время как QCD\_Data даёт значительные расхождения по ряду переменных. В ходе исследований выявлено, что это рассогласование может быть связано с особенностями идентификации b-струй в сигнальной области, а также возможной недооценкой вклада других фоновых процессов в области отбора QCD\_Data. Также было продемонстрировано, что применение дополнительного нейросетевого обрезания устраняет расхождения в обоих подходах, и результаты анализа практически не зависят от применённого метода моделирования QCD фона, с несколько лучшим согласованием МК QCD в контрольных областях. Моделирование МК QCD выбрано основным методом в анализе. Все затребованные дополнительные исследования описаны в препринте CMS AN-16-371 и неоднократно представлены в рабочих группах CMS. Все замечания руководителей профильных групп были удовлетворены, тем не менее, одобрения на публикацию результатов еще не получено и продолжается процесс обсуждения анализа. В результате были получены одномерные ограничения на параметры характеризующие возможный вклад нейтральных токов во взаимодействии топ-кварка и глюона с с-кварком (один параметр) или u-кварком (второй параметр), представленные в таблице 1. Представлены ограничения в терминах вероятностей редких распадов топ-кварка, в виде аномальных констант связи и в виде вильсоновских коэффициентов при соответствующем EFT операторе. При одновременной вариации двух параметров получают контуры ограничений представленные на рисунке 1. Полученные ограничения примерно вдвое улучшают результаты полученные нами ранее на данных протон-протонных столкновений при энергии 7 и 8 ТэВ в CMS Run I.

Process	$\mathcal{B}(t \rightarrow qg)$	$ \kappa_{tqg}/\Lambda , \text{TeV}^{-1}$	$ \frac{C_{qG}^{i3}}{\Lambda^2} , \text{TeV}^{-2}$
$t \rightarrow cg$	$(14.1) \times 10^{-5}$	$(9.92) \cdot 10^{-3}$	$(6.96) \times 10^{-2}$
$t \rightarrow ug$	$(1.62) \times 10^{-5}$	$(3.36) \cdot 10^{-3}$	$(2.35) \times 10^{-2}$

Таблица 1. Верхние ограничения уровня статистической достоверности 95% CL на параметры характеризующие возможный вклад нейтральных токов меняющих аромат кварков tqg FCNC, при отдельной (одномерной) вариации каждого параметра.

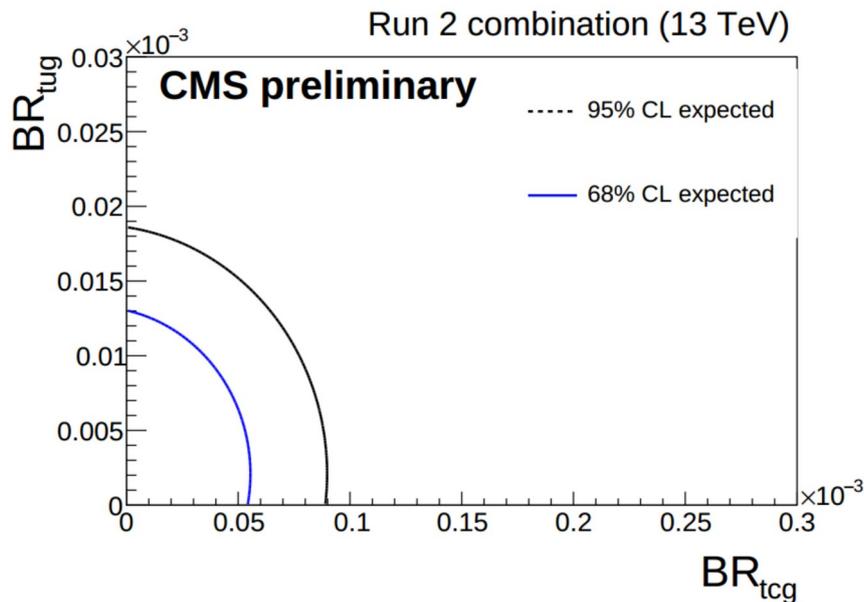


Рисунок 1. Верхние ограничения уровня статистической достоверности 95% и 68% CL на параметры характеризующие возможный вклад нейтральных токов меняющих аромат кварков  $tq$  FCNC, при одновременной вариации двух параметров.

Квантовая запутанность является неотъемлемым свойством квантовой механики и, в рамках теории, будет проявляться в частицах, образующихся на Большом адронном коллайдере. Измерение степени запутанности в процессах рождения топ-кварк–антикварковых пар ( $t\bar{t}$ ), возникающих в результате протон-протонных столкновений при энергии центра масс 13 ТэВ, выполнено с использованием данных, полученных в ходе эксперимента CMS. События выбирались на основе наличия двух лептонов с противоположными зарядами и высоким поперечным импульсом. Наблюдаемая величина  $D$ , чувствительная к запутанности, выводится из зависящих от спина верхних кварков частей матрицы плотности образования  $t\bar{t}$  и измеряется в области порога образования  $t\bar{t}$ . Значения  $D < -1/3$  свидетельствуют о запутанности, а значение  $D$  наблюдается (ожидается) равным  $-0.480 \pm 0.026 - 0.029$  ( $-0.467 \pm 0.026 - 0.029$ ) на партонном уровне. При наблюдаемой значимости в 5,1 стандартных отклонения по отношению к гипотезе об отсутствии запутанности это обеспечивает наблюдение квантово-механической запутанности внутри пар  $t\bar{t}$  в этой области фазового пространства. Это измерение позволяет по-новому взглянуть на квантовую механику при самых высоких энергиях [*Rept.Prog.Phys.* 87 (2024) 11, 117801].

Проведен поиск возможного нарушения лоренц-инвариантности при образовании пар топ-анти топ кварков. Измеренное нормализованное дифференциальное сечение  $t\bar{t}$  как функция звездного времени исследуется на предмет возможных модуляций, вызванных операторами, нарушающими Лоренц-инвариантность, в рамках эффективного расширения Стандартной модели. Сечение измеряется по событиям столкновений, набранным детектором CMS, при энергии 13 ТэВ, и интегральной светимости 77,8 фв<sup>-1</sup>, содержащих один электрон и один мюон. Результаты оказались совместимыми с нулевой гипотезой, что согласуется с SM, и используются для установления верхних ограничений на уровне 68% статистической достоверности для величины константы связи, характеризующей величину нарушения лоренц-инвариантности,  $1-8 \times 10^{-3}$ . Это первая точная проверка изотропии в специальной теории относительности в процессах с рождением топ-кварков на БАК, что ужесточает ограничения на такие взаимодействия примерно на два порядка по сравнению с предыдущими исследованиями, проведенными на Тэватроне [*Phys.Lett.B* 857 (2024) 138979].

Проведен поиск дополнительных заряженных векторных  $W'$ -бозонов, предсказываемых во многих расширениях SM, распадающихся на топ-кварк и  $b$ -кварк с конечным состоянием, включающем электрон или мюон, на данных детектора CMS Run II. Проанализированные данные соответствуют интегральной светимости 138 фв<sup>-1</sup> для столкновений протонов с энергией в центре масс 13 ТэВ. Наблюдается хорошее согласие с ожиданиями стандартной модели, и никаких доказательств существования  $W'$ -бозона не найдено в исследованном диапазоне масс. Наибольшее отклонение от ожиданий стандартной модели наблюдается для гипотетической массы  $W'$ -бозона ( $m_{W'}$ ) 3,8 ТэВ с относительной шириной распада 1%, с локальной (глобальной) значимостью 2,6 (2,0) стандартных отклонений. Установлены верхние ограничения на сечение рождения  $W'$ -бозонов, распадающихся на топ-кварк и  $b$ -кварк. Лево- и право-взаимодействующие  $W'$ -бозоны с массой ниже 3,9 и 4,3 ТэВ, соответственно, исключены на уровне достоверности 95%, при условии, что новая частица имеет узкую ширину распада. Также установлены пределы для относительных шириин распада до 30% [JHEP05(2024)046].

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

Л.А. Хейн

Продолжены исследования по измерению "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.

Продолжено развитие алгоритма “Particle Flow” (PF) в HF калориметре установки CMS, позволяющего измерение спектра частиц, входящих в HF, по энергии и поперечному импульсу. Создается программа моделирования калориметра ZDC включающая в себя полное моделирование отклика ZDC на попадающие в него высокоэнергичные частицы и приготовление, на основе полного моделирования, библиотеки ливней для ускорения моделирования.

## **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 мегaproекта 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.

Используя ранее разработанный метод юстировки время-проекционной камеры (TPC) в детекторе MPD, изучается влияние ошибок юстировки на восстановленные параметры трека заряженной частицы, такие как поперечный импульс и быстрота. Для TPC введено понятие меры неправильной юстировки. Моделируя реакцию TPC на заряженные частицы, рассматриваются искажения, которые вносятся в восстановленные параметры трека в зависимости от величины неправильной юстировки. Результаты для искажений поперечного импульса и быстроты реконструированного трека показаны на рисунках 2 и 3 для разных ширин проекции трека на плоскость камеры.

Влиянием ошибок юстировки на реконструированные параметры трека в MPD TPC можно пренебречь. Существует систематическое изменение измеряемого поперечного импульса в зависимости от ширины проекции трека на плоскость измерительных элементов. Эта ширина определяется состоянием газа и электрическим полем в камере детектора. Инструменты юстировки, разработанные для время-проекционной камеры MPD, позволяют оценить эту ширину из экспериментальных данных, и внести коррективы в восстановленные параметры трека.

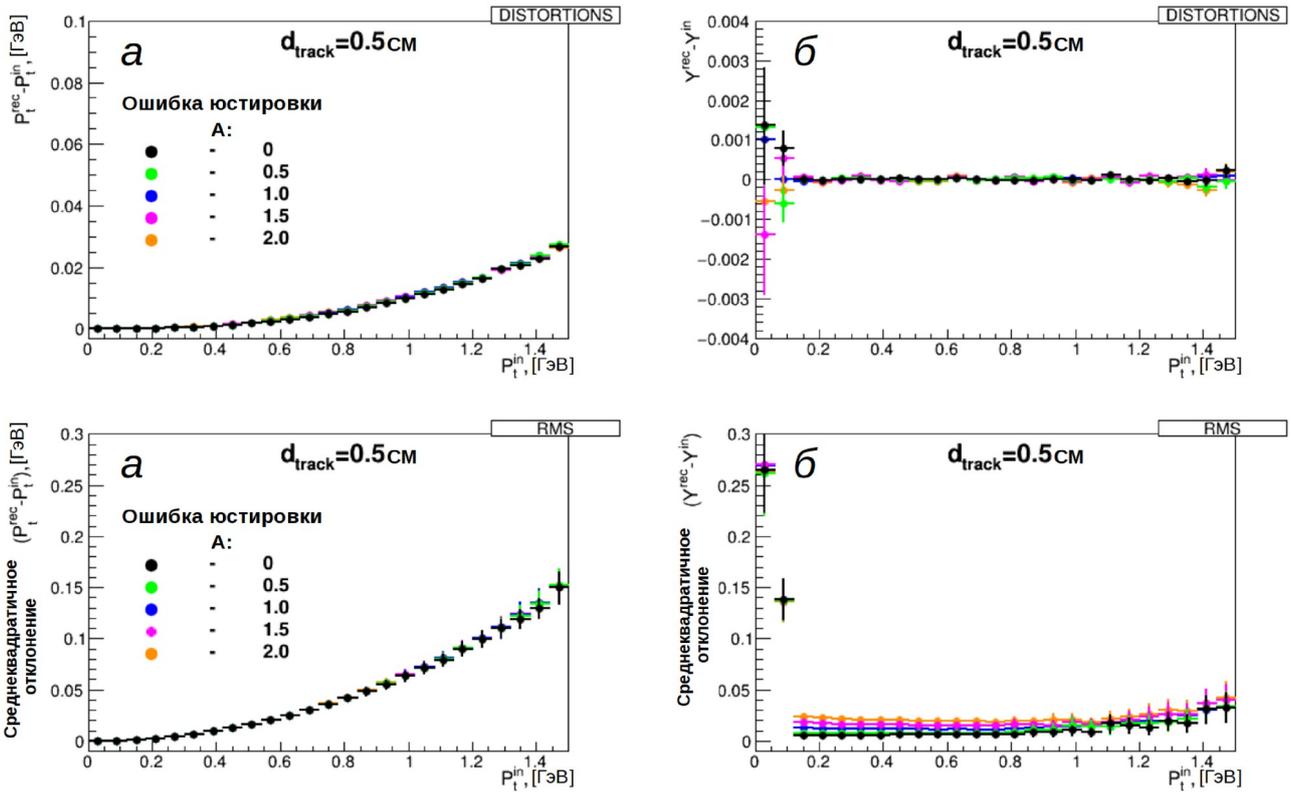


Рис.2.

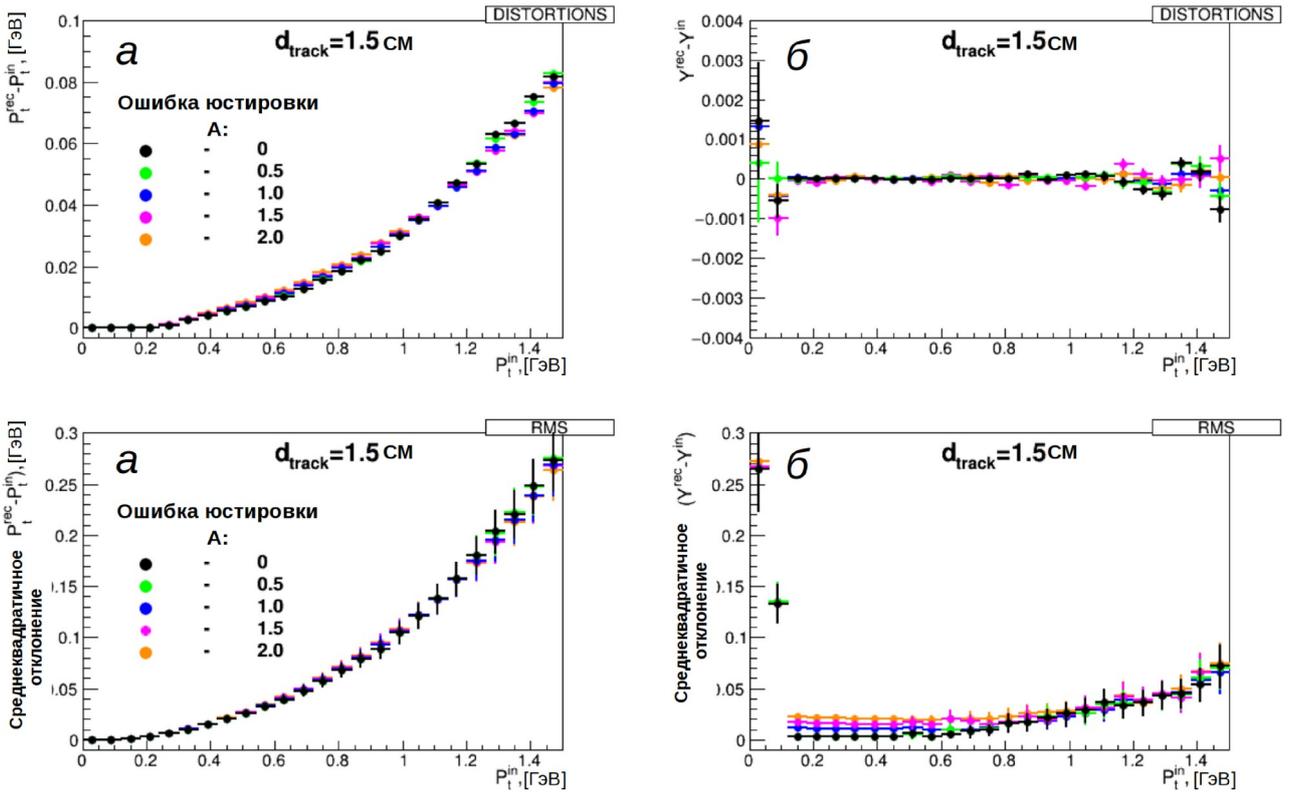


Рис.3

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

В рамках эксперимента MPD продолжены исследования по анализу рождения частиц в релятивистских столкновениях ядер на базе генератора PYTHIA с имплементированным пакетом Angantyr в области нижней границы 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 сгенерированных событий в указанной области энергий проводились на базе последней версии пакета Angantyr (PYTHIA 8.310) для предельно низких для данной модели энергий  $\sqrt{s} = 4$  GeV, что является кинематическим пределом генерации для программного пакета Angantyr. Следует отметить, что согласно расчётам КХД уже при энергиях первой очереди NICA (4-5 GeV в с.ц.м.) плотность нуклонов в зоне столкновения, например, двух ядер золота превышает плотность в обычной адронной материи в 3-4 раза. В таких экстремальных условиях могут проявляться признаки начала фазового перехода, в связи с чем исследования на базе пакета Angantyr в рамках генератора PYTHIA при данных энергиях представляет определённый интерес.

Следует отметить также, что в ходе тестирования предыдущих версий пакета Angantyr в рамках программ PYTHIA 8.240 и PYTHIA 8.306 для событий при энергиях, близких к энергиям нижней границы коллайдера RHIC ( $\sqrt{s} = 6$  GeV), были выявлены проблемы с прерыванием генерации, что было связано с неправильной инициализацией программного пакета для дифракции больших масс (PYTHIA 8.306). В рамках кооперации с разработчиками университета Лунда эти проблемы в Angantyr были зафиксированы в релизе программы PYTHIA 8.307. Существенным недостатком версий PYTHIA 8.240 и PYTHIA 8.306 было также то, что для энергии 4 GeV (область нижней границы коллайдера NICA), генерация не инициализировалась. Генерация при таких энергиях стала возможной в версии PYTHIA 8.310 (Angantyr), где разработчики по инициативе авторов сделали возможной генерацию ниже 6 GeV путём введения специального пакета программ LowEnergyQCD.

Для тестирования моделей важным моментом является корректное сравнение с экспериментальными данными. 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 энергии 4.2 GeV/c, являются уникальными для проводимого анализа, поскольку данные получены без триггерных отборов в условиях 4 $\pi$ - геометрии (Рис. 4).

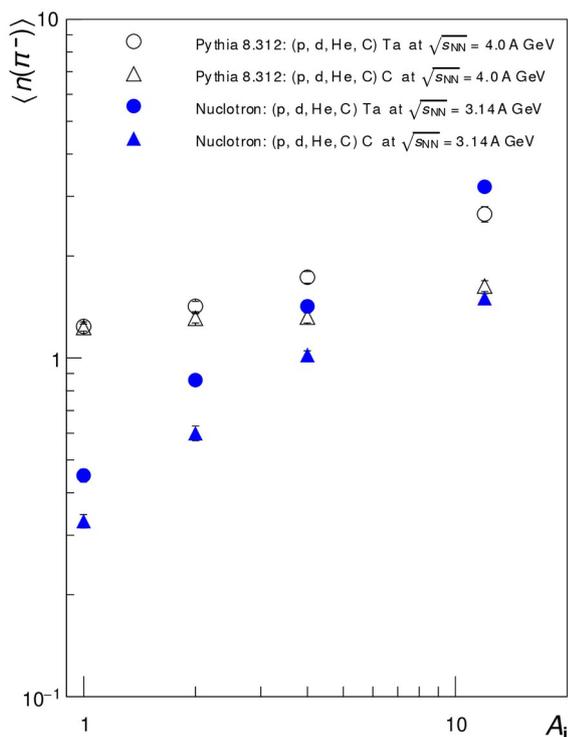


Рис. 4. Зависимость средней множественности отрицательных пионов во взаимодействиях лёгких ядер  $A_i$  с ядрами углерода  $C^{12}$  и тантала  $Ta^{181}$ , полученных в пропановой камере (голубые кружки и треугольники) и в событиях, сгенерированных в пакете Angantyr (PYTHIA 8.310) (чёрные кружки и треугольники)

Как видно из Рис. 4, хотя данные PYTHIA и дают значения средней множественности отрицательных пионов выше соответствующих значений для пропановой камеры, что соответствует разнице энергий, однако сама зависимость, полученная в PYTHIA, не соответствует тенденции крутого роста множественности, полученного в эксперименте.  
DOI: 10.1016/j.nima.2024.169532

Данные по модели PYTHIA (Angantyr) для ядроядерных соударений в области нижней границы коллайдера NICA,  $\sqrt{s} = 4$  GeV, и нижней кинематической границы генератора PYTHIA(Angantyr), получены впервые.

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 $\Lambda$ -гиперонов во взаимодействиях ядер углерода с ядерными мишенями при энергиях пучка 4 и 4.5 A GeV

Проведено детальное исследование рождения  $\Lambda$ -гиперонов во взаимодействиях пучка углерода с ядерными мишенями C, Al, Cu, Pb на детекторе BM@N при энергии Нуклотроно DOI: 10.1016/j.nima.2024.169532 на 4.0 и 4.5 A GeV. Полученные результаты по выходу  $\Lambda$ -гиперонов были сравнены с рядом модельных предсказаний и другими экспериментальными данными. Наиболее близкое согласие с экспериментом для распределений по быстроте  $u$ , поперечному импульсу и выходам  $\Lambda$ -гиперонов, получено с моделью UrQMD (Рис. 5).

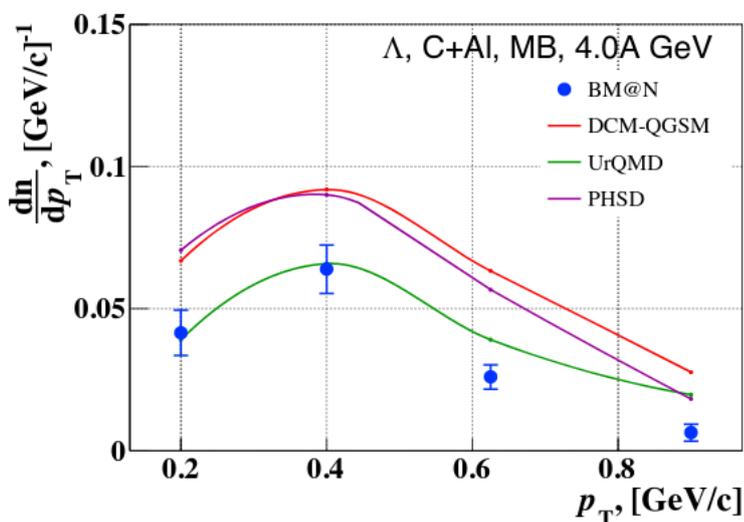


Рис.5 Распределение по поперечному импульсу  $p_T$ , в C+C, C+Al, C+Cu, C+Pb взаимодействиях при энергии 4.0 GeV пучка углерода. Предсказания моделей DCM-QGSM, UrQMD и PHSD обозначены красным, зелёным и маджента соответственно.

Продолжается анализ по оценке эффективности реконструкции  $\Lambda$ -гиперонов, сечений образования и поиску моделей в исследуемой

области, дающих лучшее согласие с полученными данными.

По данному анализу подготовлена BM@N нота:

BM@N Run6 Anaysis Note v.3, Kapishin M. et al., for the BM@N Collaboration, "Production of  $\Lambda$ -hyperons in 4.0 and 4.5 A GeV carbon-nucleus interactions at the Nuclotron", JINR, June 2024

### 3. Исследования в эксперименте ZEUS на коллайдере HERA.

Б.Б. Левченко, Л.М. Щеглова

В основу данного исследования легли результаты анализа данных эксперимента ZEUS на  $e^+p$  коллайдере HERA (г. Гамбург, Германия) набранных в период 2004-2007 гг (HERA II). Объем данных составил  $326 \text{ pb}^{-1}$ , а после специального отбора, анализировалось  $1.2 \times 10^7$  событий содержащих не менее одной адронной струи.

Целью анализа был изучение распределений по азимутальному углу  $\Delta\phi$  лидирующей струи относительно рассеянного лептона в глубоко неупругих процессах (ГНП) через нейтральный ток и сопоставление измеренных дифференциальных сечений с предсказаниями пертурбативной КХД (пКХД). Лидирующей называлась струя с наибольшим поперечным импульсом среди струй в событии. Отбирались события с квадратом переданного импульса  $Q^2$  из интервала [10-350]  $\text{ГэВ}^2$ , струями с  $p_T^{(jet)}$  в интервале [2.5-30]

ГэВ/с и неупругостями  $0.04 < y < 0.7$  (фазовый объем анализа). Струи реконструировались в лабораторной системе отсчёта по алгоритму  $k_T$ -кластеризации в схеме E-рекомбинации.

В рамках пКХД такие процессы интересны тем, что требуют учёта вклада от разных масштабов, т. е. учет как мягких, так и жёстких процессов КХД. В борновском приближении,

$O(\alpha_s^0)$ , струя и лептон должны разлетаться на угол  $\Delta\phi = \pi$ . Однако излучение как мягких, так и жёстких глюонов (процессы порядка  $O(\alpha_s^{k>0})$ ), порождающих дополнительные струи в событии, приводят к значительному уширению распределений по  $\Delta\phi$ .

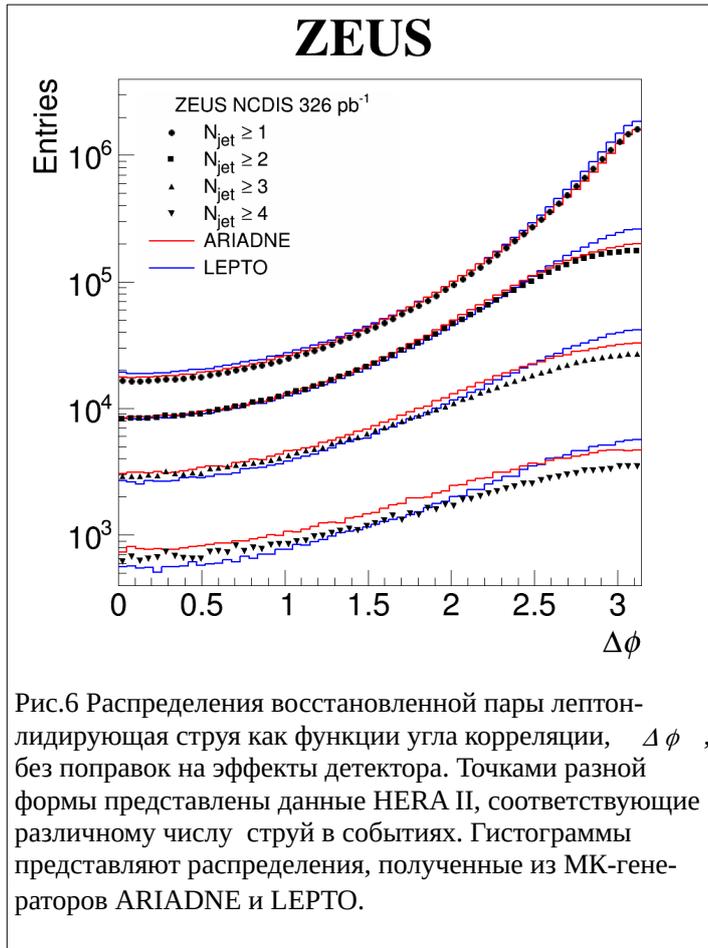


Рис.6 Распределения восстановленной пары лептон-лидирующая струя как функции угла корреляции,  $\Delta\phi$ , без поправок на эффекты детектора. Точками разной формы представлены данные HERA II, соответствующие различному числу струй в событиях. Гистограммы представляют распределения, полученные из МК-генераторов ARIADNE и LEPTO.

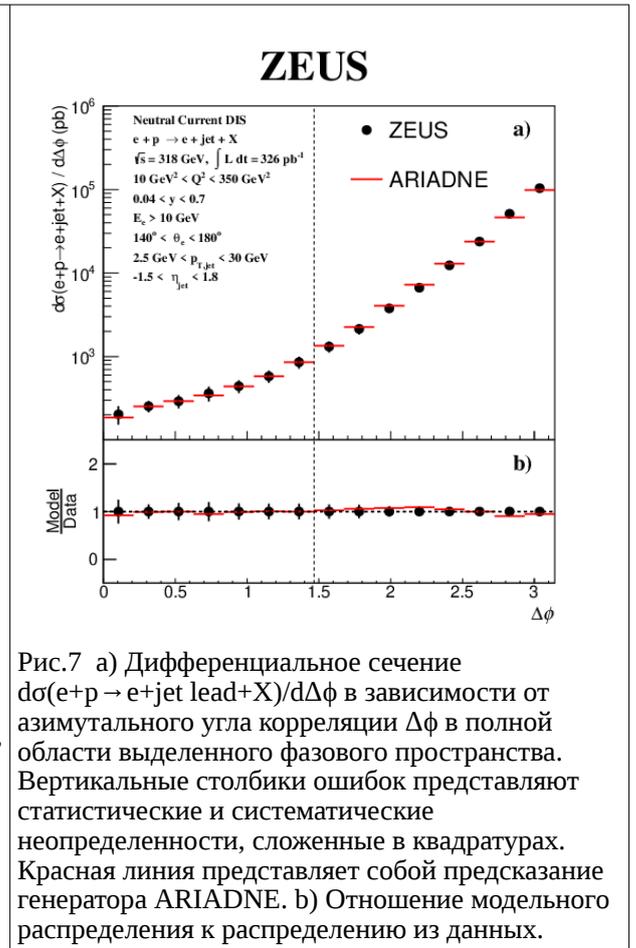
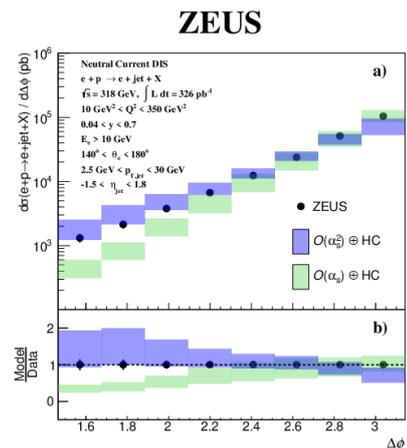


Рис.7 а) Дифференциальное сечение  $d\sigma(e+p \rightarrow e+jet+X)/d\Delta\phi$  в зависимости от азимутального угла корреляции  $\Delta\phi$  в полной области выделенного фазового пространства. Вертикальные столбики ошибок представляют статистические и систематические неопределенности, сложенные в квадратурах. Красная линия представляет собой предсказание генератора ARIADNE. б) Отношение модельного распределения к распределению из данных.

На Рис. 6 приведены инклюзивные распределения по  $\Delta\phi$  в событиях с разным числом  $N_{jet}$  струй. При  $N_{jet} \geq 2$  и т. д., происходит выполаживание распределений в области  $\Delta\phi = \pi$ , что согласуется с ожиданием, что при  $\Delta\phi \rightarrow \pi$  борновский процесс не дает вклада.

Рис.8 а) Дифференциальное сечение  $d\sigma(e+p \rightarrow e+jet(lead)+X)/d\Delta\phi$  как функция азимутального угла корреляции  $\Delta\phi$  в полной области выделенного фазового пространства. Вертикальные полосы ошибок представляют статистические и систематические неопределенности, сложенные в квадратурах. Зеленая и синяя полосы представляют пертурбативные расчеты КХД с точностью  $O(\alpha_s^1)$  и  $O(\alpha_s^2)$ , соответственно, с поправкой на эффекты адронизации (HC). б) Отношение модельного распределения к распределению из данных.



также результаты генерирования событий по моделям ARIADNE и LEPTO. В основу этих Монте-Карло моделей положены КХД матричный элемент лидирующего порядка и ливневая фрагментация партонов. В ARIADNE партоны фрагментируют по алгоритму модели цветowych диполей. Модели ARIADNE и LEPTO хорошо воспроизводят инклюзивное распределение по  $\Delta\phi$ . Однако с ростом числа струй в конечном состоянии,  $N_{jet} \geq 2$ ,  $N_{jet} \geq 3$  модель ARIADNE, воспроизводя форму распределения как функция  $\Delta\phi$ , предсказывает завышенные числа событий. Рис. 7 демонстрирует хорошее согласие измеренных инклюзивных дифференциальных сечений в полной области фазового пространства анализа с расчетами на основе модели ARIADNE.

На Рис. 8 данные по инклюзивному сечению сравниваются с предсказаниями пКХД фиксированного порядка. Видно, что в области  $\Delta\phi < 3\pi/4$  учет процессов только порядка  $O(\alpha_s)$  недостаточно для описания величины инклюзивных сечений. Для количественного описания сечений в этой области  $\Delta\phi$  необходимо учитывать м КХД процессы порядка  $O(\alpha_s^2)$ .

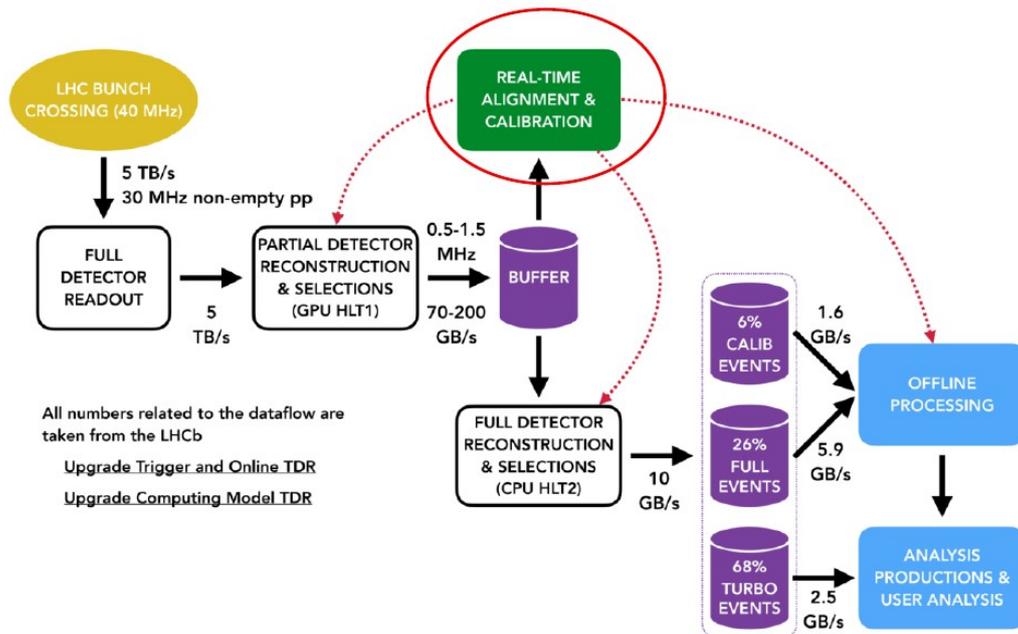
Из сравнения Рис.7 и 8 следует, что во всей области  $\Delta\phi$  алгоритм моделирования партоновых ливней в ARIADNE хорошо имитирует процессы порядка  $O(\alpha_s^2)$  пКХД расчетов.

#### 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  $\sim 100$  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 структуры RTA, Real Time Analysis, в эксперименте LHCb на LHC Run 3 (красный овал на схеме RTA).



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 2023 г.) «словарь»:



В 2024 г. оптимизированы соответствующие триггерные линии 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 2025 г..

В результате достигается 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:

	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 реконструкции на 32-процессорном компьютере	17 мин	20 с (50 раз меньше)
настенно-часовое время для одной итерации элайнмента на 32-процессорном компьютере	2 час 30 мин	3 мин

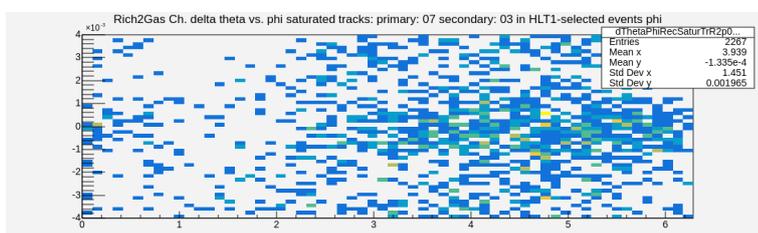
Дополнительно, существенно облегчается возможность бессрочного хранения необходимой информации с целью гарантированной воспроизводимости физических результатов.

Написана новая программа для трансляции первичных банков данных в параллелизуемый формат для бенчмаркинга производительности новых линий на машинах

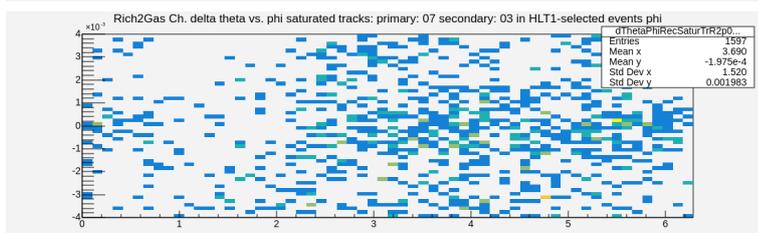
на графических процессорах GPU. Созданы монте-карловские файлы (~7 миллионов событий) в этом формате. Создана программная инфраструктура для сравнительного тестирования производительности старых и новых линий на GPU машинах. С помощью теоретико-графового метода оптимизированы наборы комбинаций зеркал RICH1 и RICH2 для формирования систем уравнений для вычисления их юстировочных поправок.

Доказательством правильности концепции метода служит сравнение угловых распределений черенковских фотонов (в полярных координатах в системе отсчёта трека-эмиттера) на следующих иллюстрациях.

Количество черенковских фотонов в гистограмме распределения по азимутальному углу для той комбинации сегментов зеркал, в которой величина заселённости наименее заселённого интервала линией  $2/3 \pi$  — наименьшая среди всех остальных выбранных комбинаций. Например, в случае RICH2, для комбинации 7-го и 3-го сегментов первичного и вторичного зеркал, соответственно, т.е. в периферийных областях детектора, далёких от пучковой трубы:

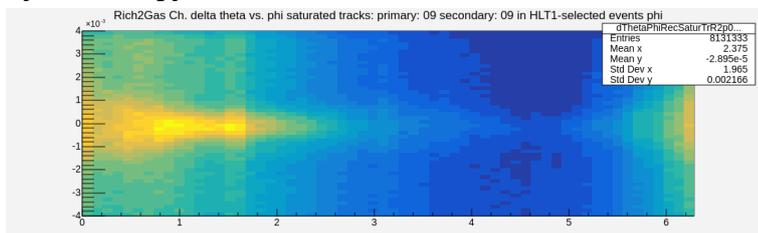


**2267** событий  
без селекции

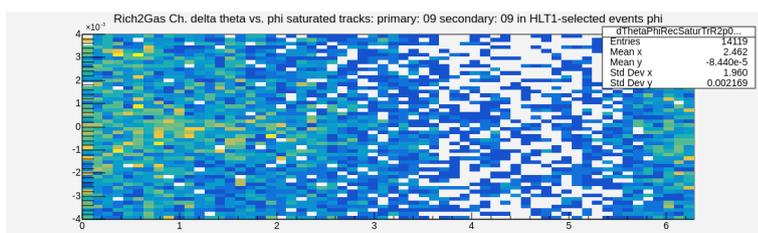


**1577** событий  
«интеллигентно»  
селектированных с  
использованием  
наименее заселённых  
 $2/3 \pi$  интервалов

Количество черенковских фотонов в гистограмме распределения по азимутальному углу для той комбинации сегментов зеркал, в которой величина заселённости наименее заселённого интервала линией  $2/3 \pi$  — наибольшая среди всех остальных выбранных комбинаций. Например, в случае RICH2, для комбинации 9-го и 9-го сегментов первичного и вторичного зеркал, соответственно, т.е. в центральных областях детектора, близких к пучковой трубе:



**8131333** события  
без селекции



**14119** событий  
«интеллигентно»  
селектированных с  
использованием  
наименее заселённых  
 $2/3 \pi$  интервалов

Сравнение степени полной заселённости этих гистограмм показывает, что метод «интеллигентной» селекции оставляет практически все события для наименее экспонируемых периферийных областей детектора, но при этом, радикально уменьшает число событий, избыточно заполняющих области детектора, близкие к пучковой трубе. В

результате кардинально ускоряется вся процедура определения юстировочных поправок, а следовательно — принципиально сокращается время калибровочно-юстировочной стадии перед началом работы эксперимента LHCb в режиме анализа в реальном времени в каждом ускорительно-накопительном цикле.

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. Исследования в эксперименте D0 (Fermilab)

На основе анализа данных эксперимента D0 представлено улучшенное измерение распределений валентных  $u$  и  $d$  кварков на основании асимметрии в передней и задней областях детектора в процессе Дрелла-Яна с использованием 8.6 fb<sup>-1</sup> данных, собранных с помощью детектора D0 в протон-анти-протонных столкновениях при  $\sqrt{s} = 1.96$ . Этот анализ позволяет получить значения новых структурных параметров, которые напрямую связаны с распределением валентных  $u$  и  $d$  кварков в протоне. В других экспериментальных результатах, полученных при измерении содержания кварков в протоне, вклады  $d$  кварков смешиваются с вкладами других разновидностей кварков. В этом измерении вклады  $u$  и  $d$  кварков извлекаются отдельно путем разделения электрослабых и КХД вкладов в асимметрию "вперед-назад" [Phys. Rev. D **110**, L091101].

## 6. Теоретические исследования.

### 6.1 Исследование инфляционных моделей $f(R)$ гравитации.

Е.О. Поздеева

Предложены новые приближения медленного скатывания для инфляционных моделей Эйнштейн-Гаусса-Бонне гравитации. Найдены более точные выражения стандартных параметров медленного скатывания и инфляционных параметров как функций скалярного поля. Для проверки точности рассматриваемых приближений построены сценарии с потенциалом мономиального вида второй и четвертой степени поля, Гаусс-Бонне взаимодействием обратно пропорциональным сумме потенциала и некоторой постоянной. Численным анализом проверено, что предложение сценарии удовлетворяют всем современным ограничениям. Найденные новые приближения согласуются с данными численного счета лучше, чем стандартное приближение медленного скатывания.

Первичные возмущения кривизны могут быть сгенерированы во время инфляции и привести к коллапсу после окончания инфляции, образуя первичные черные дыры. Во время фазы ультра медленного скатывания однородная система инфлатон-гравитация быстро эволюционирует к аттрактору де Ситтера, в котором уравнение Муханова-Сасаки, управляющее эволюцией возмущения кривизны, имеет растущее решение. Рассмотрены общие особенности некоторых инфляционных моделей, которые используют этот механизм для генерации усиления возмущений. Особенности потенциала инфлатона обнаружены в ОТО и в некоторых модифицированных моделях гравитации, включающих неминимальную связь и теории  $f(R)$ . Был применен метод суперпотенциала для реконструкции потенциала инфлатона, генерирующего фазу ультра медленного скатывания.

### 6.2 Квантование полей в окрестности черных дыр.

Э. Рахметов, С. Кейзеров

Получены стационарные физические решения уравнения Клейна-Гордона для массивного скалярного поля в гравитационных полях различных типов сферически симметричных и

вращающихся черных дыр общей теории относительности в вакууме. Для таких состояний скалярного поля вычислена их нормировка и получен спектр. Для метрики Рейснера-Нордстрема с магнитным зарядом, а также для метрик Керра и Керра-Ньюмена выявлено удвоение числа состояний инфинитного движения скалярного поля, аналогичное вырождению, недавно обнаруженному как в наших, так и в других работах для скалярного поля в метриках Шварцшильда и Рейснера-Нордстрема. Также для физических состояний массивного скалярного поля впервые получены явные выражения через известные специальные функции – конфлюэнтные функции Гойна. Полученные результаты могут оказаться важными для более последовательного описания эффекта Хокинга и процесса испарения черных дыр, включая оценку времени их жизни. Точная оценка времени жизни черных дыр (и в особенности первичных черных дыр) оказывается важной для современной космологии и астрофизики, поскольку черные дыры в последние годы снова рассматриваются как перспективные кандидаты, которые могут давать значительный вклад в плотность темной материи. Также первичные черные дыры на ранних этапах развития Вселенной могут быть ответственны за формирование современной крупномасштабной структуры Вселенной.

### **6.3 Построение новых моделей темной материи и исследование пространства параметров этих моделей, согласующихся с современными ускорительными и астрофизическими экспериментами.**

Э. Рахметов, С. Кейзеров

- Выписаны точные выражения для лагранжиана взаимодействия дополнительных векторного и скалярного полей с полями СМ и темного сектора в предложенной самосогласованной модели темной материи, рассмотрен случай легких медиаторов, исследована область пространства параметров модели для перспективных поисков проявления темной материи в электрон-позитронных столкновениях при характерных энергиях электрон-позитронного кольцевого коллайдера, планируемого в рамках создания многофункционального ускорительного комплекса;
- получены распределения сечений ассоциативного образования темной материи с парой тау-лептонов в электрон-позитронных столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 7$  ГэВ для случая медиаторов равных масс;
- получены дифференциальные сечения рассматриваемых процессов, продемонстрировано существенное различие в угловых распределениях сечений образования ТМ, опосредованного скалярными и векторными медиаторами.

### **6.4 Исследование квантовых эффектов, в том числе эффекта Казимира, для скалярных полей в пространствах с дополнительными измерениями**

Э. Рахметов, С. Кейзеров

В стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума, содержащей дельтаобразные потенциалы, описывающие браны, вычислены поправки в плотность энергии скалярного поля Гольдбергера-Вайза, возникающие вследствие эффекта Казимира, аналогичная оценка произведена и для гравитационных тензорных мод; Показано, что модель Рэндалл-Сундрума оказывается устойчивой по отношению к таким квантовым поправкам: то есть влияние этих поправок на фоновое решение RS-модели пренебрежимо мало, поскольку они не меняют саму форму фонового решения, а изменение параметров модели фактически сводится к пренебрежимо малому изменению расстояния между бранами и параметра фонового поля.

На основе материалов настоящего исследования, посвященных стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума, защищена диссертация: С.И. Кейзеров «Самодействие и взаимодействие радиона с полями стандартной модели», кандидатская диссертация по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, 01.00.00 – Физико-математические науки, МГУ имени М.В. Ломоносова, 20.09.2024г.

## 6.5 Теоретическое изучение свойств виртуальных частиц

Б.Б. Левченко

В квантовой теории поля виртуальным частицам отведена роль промежуточных состояний и медиаторов взаимодействий. Класс таких частиц разнообразен и включает как частицы имеющие наблюдаемые состояния (фотон, электрон и т.п.), так и частицы, о существовании которых имеются только косвенные свидетельства (бозоны Z, W, H, кварки, глюоны и т.п.). Пространственно-временные и динамические характеристики таких частиц значительно отличаются от свойств этих же частиц в реальном состоянии (на массовой поверхности).

В Стандартной Модели (СМ) постулируется, что сигнатура пространства-времени в области взаимодействия частиц идентична пространству-времени классической физики. Но так ли это? На этот вопрос ответ может быть получен, в частности, при изучении и измерении динамических характеристик виртуальных частиц. Отметим, что изучение динамических свойств виртуальных частиц возможно только не прямыми методами, методами косвенных измерений. Это, в свою очередь, требует сначала разработать математический аппарат, связывающий внутренние характеристики с внешними измеряемыми переменными.

Для виртуальных частиц естественной основой такого аппарата служат квантово-механические соотношения неопределенности Гейзенберга и Ландау-Пайрлса. Используя эти соотношения, в работе выведены новые неравенства между канонически сопряженными переменными,

$$\|(\Delta \mathbf{P})^{(2)}\| \|(\Delta \mathbf{R})^{(2)}\| \geq \frac{3\hbar^2}{4 \cos \psi} \quad \|U^{(2)}\| \|(\Delta \mathbf{P})^{(2)}\| (\Delta t)^2 \geq 3(\delta_{LP}\hbar)^2 / \cos \psi_H$$

а на их основе, формула для нижней оценки групповой скорости  $U^*$  виртуальных частиц,

$$\|U_{ib}^*\| \sim \sqrt{\sqrt{3}\|U^{(2)}\|} = \sqrt{\sqrt{3}A_t \frac{(\Delta E)^2}{\|(\Delta \mathbf{P})^{(2)}\|}}. \quad (1)$$

Здесь неопределенности энергии и импульса частицы вычисляются через измеренные переменные.

Глубоко неупругие процессы ер-рассеяния при квадрате переданного импульса  $Q^2 < 100 \text{ ГэВ}^2$  интерпретируются как обмен виртуальным фотоном. Таким образом, сочетая метод косвенных измерений и формулу для  $U^*$ , из экспериментальных данных по глубоко неупругому рассеянию с ер коллайдера HERA установлено, что виртуальный фотон имеет скорость превышающую скорость реального фотона в вакууме,  $\beta^* = U^*/c > 1$  (Рис 9 и Рис 10).

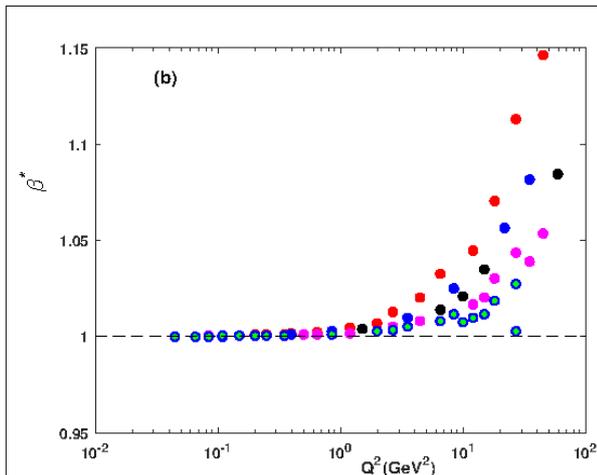


Рис. 9 Нормированная скорость  $\beta^*=U^*/c$  виртуального фотона как функция квадрата переданного импульса  $Q^2$ . Различным цветом показаны интервалы неупругостей  $y=Q^2/xs$ : 0.354–0.47 (к); 0.47–0.511 (г); 0.511–0.598 (ч); 0.598 –0.676 (п); 0.676 –0.951 (з).

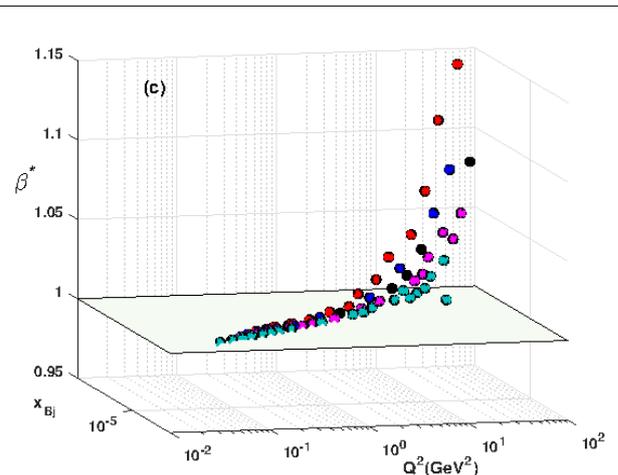


Рис.10 Нормированная скорость  $\beta^*$  как функция  $Q^2$ ,  $x_Bj$ . Различным цветом показаны интервалы неупругостей  $y$ : 0.354–0.47 (к); 0.47–0.511 (г); 0.511–0.598 (ч); 0.598 –0.676 (п); 0.676 –0.951 (з).

Как следует из данных рисунков, при  $Q^2 \rightarrow 0$  выполняется переход к реальному фотону,  $\beta^*=1$ . Это фиксирует в формуле (1) значение нормировочного параметра,  $A_i=1$ . Однако

$A_i \sim 3/\cos\psi$ , поэтому значение  $A_i=1$  в метрике Минковского достигаться не может.

Решения данной проблемы нормировки предложено в рамках теории I. Bars (Two-time physics), через эффективное расширение размерности континуума на одно дополнительное временное и одно дополнительное пространственное измерения. В итоге, сигнатура пространства-времени в области взаимодействия должна быть  $(1+1', 3+1')$ .

## Планы исследований на 2025 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. Процедура одобрения результатов поиска нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействиях топ-кварка еще не завершена и требует дальнейших усилий. Продолжение участия 5 членов коллектива Лаборатории в CMS подтверждено, для завершения одобрения и публикации полученных результатов. Помимо этого, эксперименты CMS и ATLAS открыли значительную часть набранных данных протон-протонных столкновений при энергии 13 ТэВ и наша группа уже начала использовать такую возможность, с учетом большого опыта анализа этих данных внутри коллаборации CMS. Открытые данные позволят провести не только теоретические вычисления, но и прямую проверку моделей на основе экспериментальных данных. Наши исследования показали высокую чувствительность редких процессов с рождением трех и четырех топ-кварков к различным проявлениям «новой физики», эти процессы являются передним фронтом экспериментальных исследований. На предыдущих этапах были исследованы полные сечения и их зависимости от различной «новой физики». В продолжении планируется исследовать спиновые корреляции в процессах с тремя топ-кварками, аналогичных процессам одиночного (электрослабого) рождения топ-кварка с хорошо известными угловыми корреляциями, и другие дифференциальные сечения, позволяющие повысить экспериментальную чувствительность. Большое число частиц в конечном состоянии требует развития соответствующих методов моделирования и анализа. В продолжение текущих исследований методологии применения нейронных сетей планируется перейти от узкоспециальных глубоких нейронных сетей, к формированию базовых моделей на основе

трансформерной архитектуры и натренированных на больших наборах смоделированных событий с различными конечными сигнатурами. Несколько научных групп в мире уже начали работу над такими базовыми моделями, включая нашу группу. Подход является актуальным в исследуемых задачах, так как события с тремя и четырьмя топ-кварками проявляются в нескольких конечных сигнатурах событий, требующих отдельных анализов, но «физика» взаимодействий будет одинакова во всех сигнатурах событий. Развитие методологии таких базовых моделей позволит создать универсальные решения для анализа различных процессов, по аналогии с большими лингвистическими моделями.

Будут продолжены работы по измерению "Nuclear modification" фактора во взаимодействии протон-ядро в передней области эксперимента CMS. Подготовка программы моделирования калориметра ZDC установки CMS.

Планируется продолжение работы по теме «Юстировка детектора MPD мегапроекта NICA (Дубна)». Будет проведена адаптация комплекса программ к последним версиям математического обеспечения эксперимента. Продолжение сопровождения юстировки детектора на эксперименте.

В 2024 году начата работа по теме «Моделирование отклика Staw EndCap трекера детектора SPD мегапроекта NICA (Дубна)». Ближайшая задача — определить геометрический аксептанс детектора для различных вариантов проектируемого детектора с целью выбора его наилучшей компоновки. Разработка комплекса программ реконструкции треков этого детектора.

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.

Продолжить исследования по поиску моделей в исследуемой области, дающих лучшее согласие с полученными данными в  $BM@N$ .

Будет продолжен анализ данных ZEUS. Планируется измерение рождения  $B$ -адронов и полного сечения рождения  $b\bar{b}$  пар в событиях с ди-мюонами в ер взаимодействиях на HERA.

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 2025 г.

Разработка де-линеаризации вычислительной схемы программной юстировки оптической системы детекторов RICH1 и RICH2 LHCb с целью создания без-итерационной процедуры юстировки.

Планируется продолжить исследование модифицированных теорий гравитации. В частности, планируется применение найденных новых приближений медленного скатывания для уточнения имеющихся инфляционных моделей или генерации новых и изучение постинфляционного развития. Планируется развитие метода суперпотенциала в моделях с неминимальным взаимодействием скалярного поля с гравитацией и анализ моделей модифицированной гравитации.

В рамках темы по квантованию полей в окрестности черных дыр планируется построить точные решения для спинорного поля в сферически симметричных метриках и изучить свойства полученных решений. С помощью полученных ранее точных физических решений и спектра для массивных спинорных полей и новых результатов для физических решений и спектра спинорных полей планируется получить явные аналитические выражения для тензора энергии-импульса физических полей в окрестности черной дыры и оценить излучение черной дыры, детектируемое бесконечно удаленным наблюдателем. На основании полученных результатов планируется произвести уточнение современной оценки времени жизни первичных черных дыр.

В рамках темы «Построение новых моделей темной материи и исследование пространства параметров этих моделей, согласующихся с современными ускорительными и астрофизическими экспериментами» планируется продолжить изучение процессов ассоциативного рождения частиц темной материи с в электрон-позитронных столкновениях при 7 ГэВ в зависимости от параметров модели.

Планируется продолжить исследования по изучению свойств виртуальных частиц и теоретическое обоснование существования новых механизмов рождения лептонных пар.

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

## Заклучение

Продолжаются исследования в экспериментах CMS и LHCb коллайдера БАК, ZEUS коллайдера HERA, а также VM@N и MPD комплекса NICA. Проводятся теоретические и феноменологические исследования в рамках Стандартной модели и различных ее расширениях. За 2024 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 36 докладов на международных конференциях и большое количество докладов на рабочих совещаниях. Полученные результаты опубликованы в индивидуальных публикациях и от имени коллабораций CMS, ZEUS, MPD, LHCb, D0.

## Доклады на конференциях в 2024 г.:

- 1) Приглашенный доклад. 23-25 July 2024, Protvino, Russia XXXVI International Workshop on High Energy Physics "Strong Interactions: Experiment, Theory, Phenomenology" Eduard Boos "Current status of the Standard Model Effective Field Theory (SMEFT)" <https://indico.ihep.su/event/798/overview>
- 2) Приглашенный доклад. Efim Fradkin Centennial Conference September, 02 - 06, 2024, Lebedev Physics Institute in Moscow, Russia. E.Boos (Skobeltsyn Inst., Moscow) "Current status of the Standard Model Effective Field Theory (SMEFT)" <https://esf.lpi.ru/>
- 3) Приглашенный доклад. Prof. Eduard Boos STANDARD MODEL EFFECTIVE FIELD THEORY (SMEFT) The V International Scientific Forum "Nuclear Science and Technologies" Oct 7 – 11, 2024 Almaty, Kazakhstan <https://indico.inp.kz/event/3/>
- 4) Приглашенный доклад. Prof. Eduard Boos Effective field theories and search of New Physics beyond the standard model The 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics 22-25 October 2024 Moscow, Russia <https://indico.particle.mephi.ru/event/436/>
- 5) Status of tqg FCNC Searches in Run II — устный 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., мл.науч.сотр. Маркиной А.А., Мандрика П.С., ст.науч.сотр. Перфилова М.А. CMS Top EFT Working Group meeting, 11.04.2024
- 6) Status of tqg FCNC Searches in Run II — устный 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., мл.науч.сотр. Маркиной А.А., Мандрика П.С., ст.науч.сотр. Перфилова М.А. CMS Top EFT Working Group meeting, 25.07.2024
- 7) Status of tqg FCNC Searches in Run II — устный 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., мл.науч.сотр. Маркиной А.А., Мандрика П.С., ст.науч.сотр. Перфилова М.А. CMS Top EFT Working Group meeting, 10.10.2024
- 8) Theoretical constraints on Wilson coefficients following from the three top quark production process under partial unitarity requirements (Приглашенный доклад) Авторы: А.М. Алешко, Э.Э. Боос с ,В.Е. Буничев, Л.В. Дудко LHC EFT WG Open Meeting, CERN, Швейцария, 19.02.2024
- 9) Получение ограничений на коэффициенты Вильсона операторов SMEFT с участием четырех топ кварков с учетом требований парциальной унитарности (Устный) Авторы: А.М. Алешко, Э.Э. Боос ,В.Е. Буничев, Л.В. Дудко Ломоносовские чтения 2024, НИИЯФ МГУ, Россия, 22.03.24
- 10) Получение пределов на коэффициенты Вильсона в процессах рождения трех и четырех топ кварков с учетом требований парциальной унитарности (Устный) Авторы: А.М. Алешко,

Э.Э. Боос, В.Е. Буничев, Л.В. Дудко Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, ОИЯИ, Дубна, 01.04.24

11) The effect of partial unitarity requirements on accuracy of extraction of Wilson coefficients in processes of three and four top quark production (Устный) Авторы: А.М. Алешко, Э.Э. Боос, В.Е. Буничев, Л.В. Дудко Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», МГУ, Россия, 16.04.24

12) Constraints on four-fermion SMEFT operators following from the three top quark production process (Устный) Авторы: А.М. Алешко, Э.Э. Боос, В.Е. Буничев, Л.В. Дудко The XXII International Seminar on High-Energy Physics “Quarks 2024”, Переславль-Залесский, Россия, 20.05.24

13) Application of Kolmogorov-Arnold Networks in high energy physics Abasov E., Boos E., Bunichev V., Volkov P., Vorotnikov G., Dudko L., Zaborenko A., Iudin E., Markina A., Perfilov M. (устный) 8-я международная конференция "Deep Learning in Computational Physics", 19-21 июня 2024, НИИЯФ МГУ, Москва

14) Separation of different top quark production processes in a phase space using Neural Networks (Устный) Боос Э., Буничев В., Дудко Л., Перфилов М., Воротников Г. XXII международный семинар по физике высоких энергий “QUARKS-2024”, г. Переславль-Залесский, Россия, 19-25 мая 2024

15) Разделение процессов парного и одиночного рождения топ-кварков в присутствии аномальных  $Wtb$  операторов с помощью нейронных сетей (Устный) Боос Э.Э., Буничев В.Е., Дудко Л.В., Перфилов М.А., Волков П.В., Воротников Г.А. Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН 1–5 апр. 2024 г. г. Дубна, ОИЯИ, Дубна, Россия, 1-5 апреля 2024

16) "Линейные и квадратичные вклады EFT операторов в процессах одиночного рождения топ кварка (Приглашенный)" Авторы: Буничев В.Е., Боос Э.Э. Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН 1–5 апр. 2024 г. г. Дубна, ОИЯИ, Дубна, Russia, 1-5 апреля 2024

17) В.А.Кузьмин. «Исследование точности метода нахождения юстировочных параметров времяпроекционной камеры детектора MPD мегапроекта NICA (Дубна).» Ломоносовские чтения -2024.

18) V.Kuzmin «Misalignment influence on the track reconstruction in MPD TPC» XIII Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility. <https://indico.jinr.ru/event/4429/timetable/#20240424.detailed>

19) V.Kuzmin «Misalignment influence on the track reconstruction in MPD TPC» LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications <https://indico.jinr.ru/event/4304/contributions/27028/>

20) V.Kuzmin «Misalignment influence on the track reconstruction in MPD TPC» The 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2024) will be held in Moscow, <https://indico.particle.mephi.ru/event/436/timetable/#20241025.detailed>

21) «Pythia 8.3.10 Angantyr: соп и рго в сравнении с экспериментом в области энергий NICA», Щеглова Л.М., Соломин А.Н., Ломоносовские чтения 2024. Секция Ядерная физика, НИИЯФ МГУ, Москва, 21 марта - 1 апреля 2024

22) «Slow-roll in the Einstein-Gauss-Bonnet gravity», Приглашенный, Pozdeeva E.O., 18th Russian Gravitational Conference – International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (RUSGRAV-18), Казань, Russia, 25-29 ноября 2024

23) «F(R) gravity connected to the Starobinsky model», Устный, Pozdeeva E.O., II International Scientific Conference Space. Time. Civilization. STC-2024, Moscow, Russia, 2-7 ноября 2024

24) «Possible extensions of Starobinsky model», Приглашенный, Pozdeeva E.O., Evolving Universe: Theory and Observations Starobinsky Memorial Conference, Yerevan State University, 1 Alec Manookian str., Yerevan, Armenia., Armenia, 7-12 октября 2024

25) «Superpotential method in modified gravity», Приглашенный, Pozdeeva E.O., The international workshop Supersymmetries and Quantum Symmetries – SQS'24, ОИЯИ, г. Дубна, Russia, 29 июля - 3 августа 2024

26) «Уточнение приближения медленного скатывания в гравитации Эйнштейна-Гаусс-Бонне», Устный, Поздеева Е.О., Вернов С.Ю., Ломоносовские чтения - 2024. Секция ядерной физики, Москва, Россия, Russia, 21 марта - 1 апреля 2024

27) Ломоносовские чтения-2024, НИИЯФ МГУ, Москва, Россия, 20 марта – 3 апреля 2024, «Перспективы поиска ассоциативного образования темной материи с парой тау-лептонов в

электрон-позитронных столкновениях с энергией 7 ГэВ», Трыков С.С., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Кейзеров С.И.

28) Ломоносов-2024, МГУ, Москва, 12-26 апреля 2024, «Перспективы поиска сигналов ассоциативного образования темной материи с парой тау-лептонов в электрон-позитронных столкновениях», Трыков С.С., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Кейзеров С.И.

29) Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, ОИЯИ, Дубна, Россия, 1-5 апреля 2024. «Поиски сигналов образования темной материи в электрон-позитронных столкновениях в модели с дополнительной U(1)-симметрией и дополнительным скалярным полем», Э.Э. Боос, В.Е. Буничев, С.И. Кейзеров, С.С. Трыков.

30) Ломоносовские чтения-2024. Секция ядерной физики, НИИЯФ МГУ, Москва, Россия, 20 марта – 3 апреля 2024, «Точные решения для скалярного поля в метрике Рейснера-Нордстрема», И.П. Волобуев, С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов, М.Н. Смоляков.

31) Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, ОИЯИ, Дубна, Россия, 1-5 апреля 2024, «Точные решения для скалярного поля в гравитационном поле сферически симметричных черных дыр», И.П. Волобуев, С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов, М.Н. Смоляков.

32) Международная конференция «Математика в созвездии наук», Дубна, Россия, 1-2 апреля 2024, Конфлюэнтные функции Гойна в теории черных дыр», И.П. Волобуев, С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов.

33) Конференция НИИЯФ МГУ по результатам 2023 года, 26 февраля 2024, МГУ, Москва, Россия, «Квантовая теория поля в пространстве-времени Шварцшильда», И.П. Волобуев, В.О. Егоров, С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов, М.Н. Смоляков.

34) Ломоносовские чтения-2024. Секция ядерной физики, НИИЯФ МГУ, Москва, Россия, 20 марта – 3 апреля 2024, «Эффект Казимира в стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума», И.П. Волобуев, С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов.

35) Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, ОИЯИ, Дубна, Россия, 1-5 апреля 2024, «Устойчивость стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума по отношению к эффекту Казимира», И.П. Волобуев, С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов.

36) «О частичном подавлении эффекта Швингера», (Устный), Левченко Б.Б.

Конференция :Ломоносовские чтения-2024, Секция ядерной физики, подсекция «Физика высоких энергий» (МГУ, Москва, Россия, 21 марта — 1 апреля 2024 г.);

## Основные публикации за 2024 год по бюджетной теме 3.2:

[1] «[Search for W' bosons decaying to a top and a bottom quark in leptonic final states in proton-proton collisions at s = 13 TeV](#)», CMS Collaboration, JHEP 05 (2024) 046

[2] «Searches for violation of Lorentz invariance in top quark pair production using dilepton events in 13 TeV proton-proton collisions», CMS Collaboration, Phys.Lett.B 857 (2024) 138979

[3] «[Observation of quantum entanglement in top quark pair production in proton-proton collisions at s=13 TeV](#)», CMS Collaboration Rept.Prog.Phys. 87 (2024) 11, 11780

[4] «The BM@N spectrometer at the NICA accelerator complex», S. Afanasiev et al. Nucl.Instrum.Meth.A 1065 (2024) 169532

DOI: 10.1016/j.nima.2024.169532

[5] «Search for Time-Dependent CP Violation in  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  Decays»

Berezhnoy A.V., Gorelov I.V., Danilina A.V., Kozachuk A.D., Leflat A.K., Nikitin N.V., Savrina D.V., Solomin A.N., Zhukov V.Yu., Korolev M.G., LHCb Collaboration

в журнале Physical Review Letters, издательство American Physical Society (United States), том 133, № 10

[6] Transverse polarization measurement of  $\Lambda$  hyperons in pNe collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 68.4$  GeV with the LHCb detector

Berezhnoy A.V., Gorelov I.V., Danilina A.V., Kozachuk A.D., Leflat A.K., Nikitin N.V., Savrina D.V., Solomin A.N., Zhukov V.Yu., Korolev M.G. LHCb Collaboration

в журнале Journal of High Energy Physics, издательство IOP Publishing ([Bristol, UK], England), том 2024, № 9

[7] Search for the lepton-flavor violating decay  $B^s_0 \rightarrow \phi \mu^\pm \tau^\mp$

Berezhnoy A.V., Gorelov I.V., Danilina A.V., Kozachuk A.D., Leflat A.K., Nikitin N.V., Savrina D.V., Solomin A.N., Zhukov V.Yu., Korolev M.G., LHCb Collaboration  
в журнале Physical Review D, издательство American Physical Society (United States), том 110, № 7

[8] ZEUS collaborations: Dementiev R.K., Korzhavina I.A., Levchenko B.B., Shcheglova L.M. et al. The azimuthal correlation between the leading jet and the scattered lepton in deep inelastic scattering at HERA. Preprint DESY-24-070, arXiv:2406.01430v3 (2024). [*Submitted to EPJ C*].

[9] [Up and Down Quark Structure of the Proton](#), D0 Collaboration, Phys.Rev.D 110 (2024) 9, L091101

[10] A.Yu. Kamenshchik, E.O. Pozdeeva, A. Tribolet, A. Tronconi, G. Venturi and S.Yu. Vernov, Superpotential method and the amplification of inflationary perturbations, Phys. Rev. D 110 (2024), no.10, 104011

doi:10.1103/PhysRevD.110.104011

[11] E.O. Pozdeeva, M.A. Skugoreva, A.V. Toporensky and S.Yu. Vernov, New slow-roll approximations for inflation in Einstein-Gauss-Bonnet gravity, JCAP 09 (2024), 050

doi:10.1088/1475-7516/2024/09/050

[12] Волобуев И.П., Кейзеров С.И., Рахметов Э.Р., Устойчивость стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума относительно квантовых поправок, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, издательство Моск. ун-та (М.), том 79, № 2, (2024).

[13] Волобуев И.П., Кейзеров С.И., Рахметов Э.Р., Точные решения для массивного скалярного поля в гравитационном поле черной дыры Шварцшильда, в журнале Физмат, издательство АНО «Национальный центр физики и математики» (Москва), том 1, № 2, с. 75-87

[14] На основе материалов проведенных исследований, посвященных стабилизированной модели Рэндалл-Сундрума, защищена диссертация: С.И. Кейзеров «Самодействие и взаимодействие радиона с полями стандартной модели», кандидатская диссертация по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, 01.00.00 – Физико-математические науки, МГУ имени М.В. Ломоносова, 20.09.2024г.

[15] [Levchenko B.B.](#), «[Additional Dimensions of Space and Time in the Region of Deep Inelastic Processes](#)», в журнале [Moscow University Physics Bulletin](#), издательство [Allerton Press](#) (New York, N.Y., United States), том 79, № Suppl. 1, с. S357-S361;

[16] Левченко Б.Б., Ответы на вопросы корреспондента Е. Арсюхина из интернет-издания «Комсомольская правда»: [«Земля расширяется, магнитное поле скоро исчезнет»](#). Самые известные страшилки из интернета глазами физика из МГУ.

<https://www.kp.ru/daily/27581/4906438/>, (Доступно и на

<https://www.5-tv.ru/news/473709/celovecestvo-pogibnet-fizik-razvencal-samye-popularnye-mify-ozemle/>

и <https://istina.msu.ru/smi/event/640245929/show/> , [https://t.me/ars\\_nauka/493](https://t.me/ars_nauka/493) ).