

L

ОБЗОР

Исследования фундаментальных свойств материи

А. М. Алешко,¹ А. В. Бережной,¹ Э. Э. Боос,¹ И. Н. Варданян,¹ П. В. Волков,¹ Г. А. Воротников,¹
 Л. К. Гладилин,¹ И. В. Горелов,¹ А. М. Грибушин,¹ Л. В. Дудко,^{1,*} А. А. Ершов,¹ Е. Е. Забродин,¹
 С. И. Кейзеров,¹ В. И. Клохин,¹ О. Л. Кодолова,¹ В. Л. Коротких,¹ В. А. Кузьмин,¹
 Б. Б. Левченко,^{1,†} И. П. Лохтин,¹ О. Ю. Лукина,¹ А. А. Маркина,¹ Д. И. Мелихов,¹
 М. М. Меркин,¹ М. А. Перфилов,¹ С. В. Петрушанко,¹ Э. Р. Рахметов,¹ Д. В. Саврина,¹
 А. М. Снигирев,¹ А. Н. Соломин,¹ Л. А. Хейн,¹ А. С. Чернышов,¹ Л. М. Щеглова,¹ Г. Х. Эйюбова¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 20.12.2025; подписана в печать 22.06.2026)

В настоящем обзоре представлены основные направления исследований и результаты, полученные в области физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики. Работа сочетает участие в крупнейших международных коллаборациях (CMS, ATLAS, LHCb, NA64, ZEUS, D0, BM@N, MPD, SPD) с развитием собственных теоретических и феноменологических подходов; существенная часть представленных результатов получена коллективом Отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ. Значительное внимание уделено изучению свойств топ-кварка: выполнены поиски FCNC-процессов и аномальных вкладов в вершину Wtb , получены ограничения на операторы SMEFT, исследованы сценарии Новой физики и связь топ-физики с тёмной материей. Разработаны и внедрены современные методы машинного обучения — Normalizing Flows, сети Колмогорова–Арнольда и др., — позволяющие восстанавливать импульсы невидимых частиц и анализировать спиновые корреляции. Значимый вклад внесён и в развитие детекторных технологий: создан и усовершенствован калориметр CASTOR, разработаны методы мониторинга радиационных полей и калибровки адронного калориметра CMS, а также программный комплекс контроля электроники mTCA для условий HL-LHC. Теоретические и феноменологические исследования охватывают широкий спектр направлений — от моделирования процессов в тяжёлых ионных столкновениях (PYQUEN, HYDJET, HYDJET++) и подготовки анализа данных эксперимента MPD на коллайдере NICA до изучения межнуклонных взаимодействий на низких энергиях и решений уравнения Клейна–Гордона в геометриях вращающихся и заряженных чёрных дыр. Полученные результаты демонстрируют активное развитие экспериментальных, вычислительных и теоретических методов и вносят существенный вклад в современную физику высоких энергий, формируя основу для последующих исследований в области элементарных частиц, астрофизики и космологии.

PACS: 12.15-у, 14.65.На, 14.80.-j, 14.40.Nd УДК: 539

Ключевые слова: физика высоких энергий, Стандартная модель, топ-кварк, эффективная теория поля (SMEFT), Новая физика, тёмная материя, машинное обучение, адронный калориметр, радиационный мониторинг, калориметр CASTOR, тяжёлые ионы, Монте-Карло моделирование, генераторы событий HYDJET / PYQUEN, коллайдер NICA.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.81.2640202

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики охватывают широкий спектр экспериментальных, теоретических, феноменологических и вычислительных направлений. Существенная часть этих работ выполняется коллективом Отдела экспериментальной физики высоких энергий (ОЭФВЭ) НИИЯФ

МГУ в рамках крупнейших международных экспериментов: CMS, ATLAS и LHCb на Большом адронном коллайдере (LHC, CERN, Швейцария), D0 на коллайдере Tevatron (Fermilab, США), ZEUS на коллайдере HERA (Германия), NA64 (CERN), а также BM@N, MPD и SPD на коллайдере NICA (Дубна, Россия). Наряду с экспериментальной деятельностью, развиваются собственные теоретические, феноменологические и вычислительные подходы, направленные на интерпретацию экспериментальных данных и исследование фундаментальных свойств материи.

* E-mail: dudko@www-hep.sinp.msu.ru

† E-mail: levchenko@www-hep.sinp.msu.ru

За последние годы в ОЭФВЭ получен ряд значимых результатов, охватывающих как исследования фундаментальных взаимодействий и свойств элементарных частиц, так и разработку новых методов анализа данных, моделирования и экспериментальных технологий. Эти результаты включают исследования топ-кварка и поиски эффектов за пределами Стандартной модели, развитие методов машинного обучения для анализа сложных событий с невидимыми частицами, совершенствование детекторных систем и средств мониторинга радиационной обстановки, а также теоретическое и феноменологическое моделирование процессов в столкновениях тяжёлых ионов и других ядерных взаимодействиях. Совокупность этих направлений формирует единый комплекс экспериментальных, вычислительных и теоретических исследований, ориентированных на изучение фундаментальных закономерностей физики высоких энергий.

Особое внимание уделялось исследованию топ-кварка — наиболее тяжёлого из известных фундаментальных фермионов. В экспериментах коллайдера CMS проведены углублённые поиски нейтральных токов меняющих аромат кварков (tqg FCNC), уточнены ограничения на возможные вклады новых взаимодействий в вершину Wtb , а также выполнены поиски гипотетических возможных частиц с необходимостью возникающих в различных расширениях Стандартной модели (SM). В теоретических и феноменологических работах ОЭФВЭ активно развивается подход эффективной теории поля (SMEFT). Получены новые ограничения на коэффициенты Вильсона для операторов размерности шесть в процессах рождения трёх и четырёх топ-кварков; проанализировано влияние квадратичных членов операторов на наблюдаемые величины при больших энергиях; показано, что учёт таких эффектов критически важен для корректного определения параметров Новой физики.

Значительная часть исследований посвящена возможным проявлениям тёмной материи в процессах с участием топ-кварков. Проведено численное моделирование процессов одиночного и множественного рождения топ-кварков в упрощённых моделях со скалярными и псевдоскалярными медиаторами, включая учёт однопетлевых поправок. Показано, что рождение трёх и четырёх топ-кварков обладает высокой чувствительностью к сигналам тёмной материи. Развита методика восстановления импульсов невидимых частиц и выделения сигналов тёмного сектора на основе современных архитектур нейронных сетей, включая Normalizing Flows и сети Колмогорова-Арнольда. Эти методы успешно применяются для реконструкции импульсов невидимых частиц и анализа спиновых корреляций в процессах с топ-кварками и тёмной материей.

Помимо изучения свойств топ-кварка, в ОЭФВЭ проводились активные исследования ряда других физических процессов с рождением лептонов и адронных струй в протон-протонных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте CMS, вклю-

чая как измерение характеристик процессов Стандартной модели, так и поиск новых явлений за ее рамками. Еще одно значимое направление участия группы МГУ в CMS связано с проведением научно-методических работ по развитию методов калибровки и мониторинга работы адронного калориметра установки, анализу данных по радиационным полям на LHC и разработке и усовершенствованию перспективных методов измерения магнитного поля установки с помощью трехмерных датчиков Холла.

Значительный вклад ОЭФВЭ внёс в разработку и создание переднего черенковского кварц-вольфрамового калориметра CASTOR и развитие программного обеспечения для системы контроля и мониторинга детектора. Для функционирования модернизированной калориметрической системы установки CMS в условиях повышенной светимости коллайдера HL-LHC разработан программный комплекс мониторинга электроники стандарта mTCA.

В экспериментах D0, ZEUS, BM@N и NA64 получены новые результаты, расширяющие наши представления о структуре протона, динамике ядерных столкновений, а также о поисках тёмных секторов и лёгких медиаторов. Теоретические исследования охватывают широкий круг вопросов: от квантования полей в окрестностях чёрных дыр и эффектов Казимира в моделях с дополнительными измерениями до построения эффективных низкоэнергетических теорий межнуклонных взаимодействий.

В ОЭФВЭ ведутся исследования в области физики тяжелых ионов, редких распадов B -мезонов, а также азимутальных корреляций и поиска КХД инстантонов в событиях с рождением $c\bar{c}$ и $b\bar{b}$ в глубоко неупругом ep -рассеянии. Изучение свойств субъядерной материи в условиях экстремально высоких плотностей энергии и температуры, достигаемых в релятивистских соударениях тяжелых ионов, является одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной физики высоких энергий. ОЭФВЭ проделал значительный объем работ по разработке и усовершенствованию Монте-Карло моделей ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях (генераторы событий PYQUEN, HYDJET и HYDJET++) и применению этих моделей для феноменологического анализа различных эффектов в соударениях тяжелых ионов при энергиях коллайдеров RHIC и LHC. В настоящее время ведется интенсивная подготовка к анализу данных по соударениям тяжелых ионов в эксперименте MPD на коллайдере NICA, включающая в себя как моделирование различных физических процессов, связанных с корреляциями и флуктуациями заряженных адронов, так и развитие программного обеспечения для анализа соответствующих данных. Также для эксперимента MPD проведена оценка перспектив наблюдения Λ_c -барионов и эксклюзивного рождения ϕ -мезонов.

Проводятся методические работы по созданию детекторов на ускорительном комплексе NICA в г. Дубне. В рамках участия в международной

коллораации по созданию многоцелевого детектора MPD анализируются вопросы юстировки время-проекционной камеры детектора. Для исследований в области спиновой физики с помощью детектора SPD (Spin Physics Detector) проводится моделирование части трекового детектора для определения оптимальной геометрии установки и наибольшей точности восстановления параметров треков. Теоретические усилия направлены на построение эффективных теорий поля как на энергиях LHC, так и на низких масштабах (≈ 1 ГэВ) для описания межнуклонных взаимодействий. Также получены точные решения уравнения Клейна–Гордона для скалярных полей в метриках вращающихся и заряженных чёрных дыр, что может иметь значение для уточнения времени жизни первичных чёрных дыр и их роли как кандидатов на тёмную материю.

Таким образом, деятельность ОЭФВЭ в последние годы характеризуется сочетанием глубокого участия в крупнейших экспериментах современной физики высоких энергий, развитием теоретических и феноменологических моделей и внедрением передовых методов машинного обучения в анализ данных. Полученные результаты вносят заметный вклад в развитие мировой науки и формируют основу для будущих исследований в области физики элементарных частиц, космологии и астрофизики.

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ TEVATRON, SPS, LHC, HERA

1.1. Исследование топ-кварка

Топ-кварк является самым массивным из всех известных фундаментальных фермионов и занимает особое место в современной физике высоких энергий. Его масса, сравнимая с масштабом электрослабого нарушения симметрии, делает топ-кварк уникальной лабораторией для проверки предсказаний Стандартной модели (СМ) и поиска проявлений Новой физики. Короткое время жизни топ-кварка ($\sim 10^{-25}$ с), меньшее, чем характерное время формирования адронов ($\sim 10^{-24}$ с), обеспечивает возможность изучения его взаимодействий без существенного влияния непертурбативных эффектов, что делает топ-кварк идеальным объектом для прецизионных измерений фундаментальных параметров.

В рамках участия в коллораациях D0 (Fermilab, Tevatron) и CMS (LHC, CERN) ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ выполнил серию детальных экспериментальных исследований процессов с участием топ-кварков. Созданные в ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ генераторы событий t -канального рождения топ-кварка с учётом высших радиационных поправок [1] использовались при открытии одиночного рождения топ-кварка и в последующих исследованиях колла-

борааций D0 [2, 3] и CMS [4]. На рис. 1 представлены измеренные сечения процессов одиночного рождения топ-кварка при разных энергиях в эксперименте CMS и скомбинированные измерения экспериментов D0 и CDF.

Созданные методики и генераторы событий применялись также в анализах, направленных на поиск новой физики. Разработаны новые методы моделирования процессов с аномальными вершинами взаимодействия калибровочных бозонов и фермионов. Предложен оригинальный метод вспомогательных векторных бозонов, позволяющий эффективно учитывать вклады операторов высших размерностей. Его эффективность продемонстрирована при анализе взаимодействий топ-кварка с W -бозоном и b -кварком во всех каналах одиночного рождения топ-кварка [5]. Одним из важнейших направлений в последние годы стал поиск нейтральных токов, меняющих аромат кварков (FCNC-переходов), в вершине взаимодействия топ-кварка, глюона и кварков u или s (tqg FCNC). Подобные переходы запрещены на древесном уровне в СМ и могут происходить только через сильно подавленные петлевые диаграммы, поэтому их наблюдение стало бы однозначным признаком Новой физики. На рис. 2 представлены верхние ограничения на FCNC переходы выраженные в форме вероятностей редких распадов топ-кварка.

Проведен поиск аномальных векторных и тензорных операторов в вершине взаимодействия Wtb [4, 6], являющейся основным электрослабым механизмом рождения и распада топ-кварка. На рис. 3 показаны измеренные верхние ограничения на параметры характеризующие вклад левых (f_V^L) и правых (f_V^R) токов во взаимодействие топ-кварка с W -бозоном и b -кварком. СМ предсказывает существование только левых векторных токов.

Исследованы возможные проявления дополнительного заряженного векторного бозона W' [7–9], возникающего в целом ряде теорий за рамками СМ. Анализ данных CMS Run II с интегральной светимостью 138 фб^{-1} в канале $W' \rightarrow tb$ не выявил статистически значимых отклонений от предсказаний СМ, однако позволил существенно ужесточить существующие ограничения: $m_{W'} > 3.9$ ТэВ для лево-взаимодействующих и $m_{W'} > 4.3$ ТэВ для право-взаимодействующих сценариев при статистической достоверности 95% [10]. Эти результаты являются одними из наиболее строгих на сегодняшний день.

Одно из ключевых направлений исследований связано с возможным проявлением тёмной материи (ТМ) в процессах с участием топ-кварков. В рамках упрощённых моделей с тёмной материей рассматриваются процессы рождения одного, двух, трёх и четырёх топ-кварков при ассоциированном рождении тёмной материи (например $t\bar{t} + DM$) или резонансном рождении медиатора тёмной материи, распадающегося в пару топ-анти-топ-кварков. Рассмотрены скалярные, псевдоскалярные и векторные медиаторы, взаимодействующие с топ-кварком, и вы-

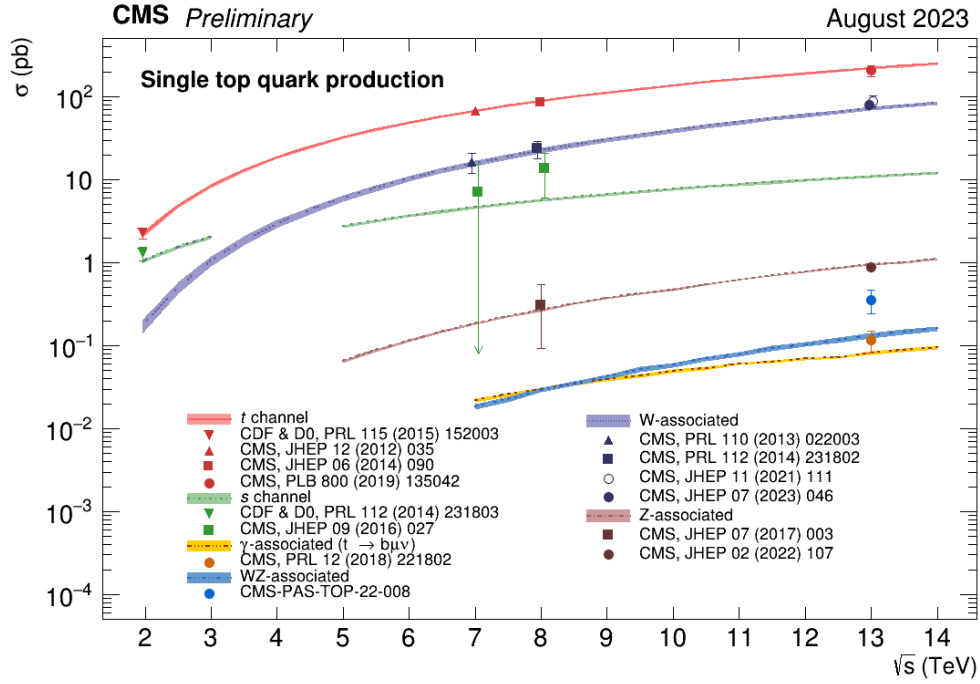


Рис. 1. Измеренные сечения процессов одиночного рождения топ-кварка при разных энергиях в эксперименте CMS и скомбинированные измерения экспериментов D0 и CDF. Ссылки на оригинальные публикации приведены на рисунке

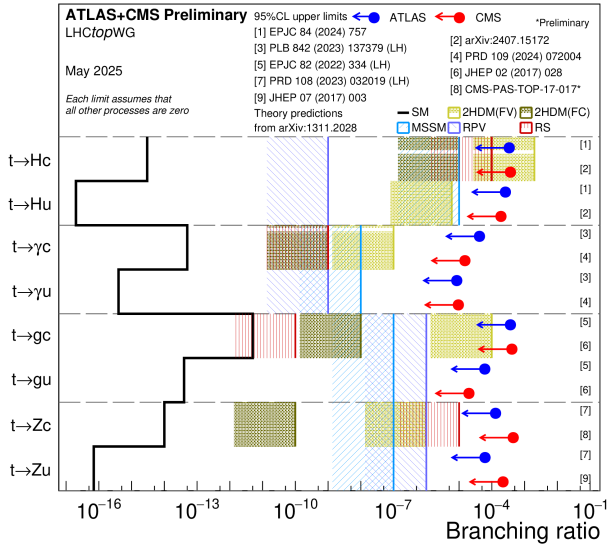


Рис. 2. Измеренные верхние ограничения на FCNC-переходы, выраженные в форме вероятностей редких распадов топ-кварка, теоретические предсказания в SM и некоторых расширениях за рамками SM. Ссылки на оригинальные публикации приведены на рисунке

числены сечения для процессов рождения одного, двух, трёх и четырёх топ-кварков с учётом однопетлевых поправок. Показано, что относительный вклад диаграмм с участием медиатора ТМ в сечение процессов с рождением трех и четырех топ-кварков может достигать $\sim 30\%$ от полного значения в рамках SM, что делает такие процессы высокочувствительными к сигналам тёмного сек-

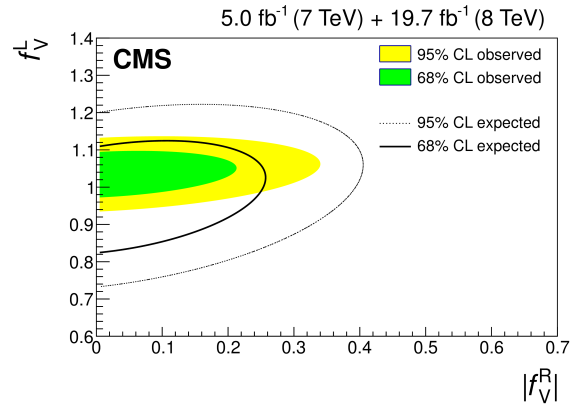


Рис. 3. Измеренные верхние ограничения на параметры характеризующие вклад левых и правых токов во взаимодействие топ-кварка с W-бозоном и b-кварком [4]

тора [11–14]. Анализ дифференциальных сечений выявил значительные отклонения от предсказаний SM в кинематических областях с высокими поперечными импульсами, что подчёркивает перспективность подобных каналов для поиска сигналов ТМ на коллайдерах нового поколения. На рис. 4 представлено дифференциальное сечение процесса с рождением четырех топ-кварков в рамках SM и в упрощенной модели скалярного медиатора темной материи с массой 400 ГэВ. Представлена зависимость сечения от инвариантной массы пары топ-кварков, имеющей минимальное значение в событии, из 6 возможных комбинаций. Распределения

демонстрируют значительный вклад резонансного рождения медиатора ТМ с последующим распадом на топ- и анти-топ-кварк, в измеряемый экспериментально процесс рождения 4-х топ-кварков. Значения констант связи для модели ТМ выбраны в соответствии с рекомендацией международной экспертной группы в ЦЕРН, а значение массы медиатора соответствует текущему экспериментальному ограничению.

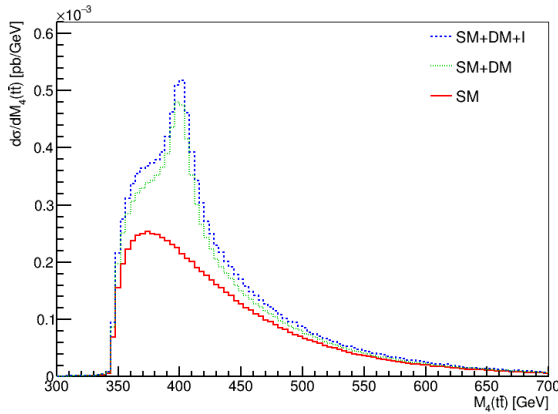


Рис. 4. Вычисленное дифференциальное сечение процесса рождения четырех топ-кварков для СМ (SM) и в упрощенной модели темной материи (DM) с массой медиатора 400 ГэВ [12]. Показан вклад интерференции СМ и ТМ диаграмм (I)

Другой подход к описанию взаимодействий топ-кварков, применяемый в теоретических и феноменологических исследованиях [15, 16], базируется на применении эффективной теории поля Стандартной модели (SMEFT). На рис. 5 представлены ограничения на коэффициенты Вильсона 4-фермионных операторов размерности шесть, полученные на основе моделирования процессов рождения трёх и четырёх топ-кварков. Также показано, что процессы рождения трёх топ-кварков обладают высокой чувствительностью к операторам, включающим левые фермионные токи ($O_{Qq}^{1,8}$, $O_{Qq}^{3,8}$) и бозонные взаимодействия (O_{tW} , O_{tG}). Аналитические выражения для частичных амплитуд процессов $tt \rightarrow tt$ и $t\bar{t} \rightarrow t\bar{t}$, полученные впервые в рамках SMEFT, позволяют определить границы унитарности и провести систематическое сравнение с предсказаниями СМ.

В ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ имеется значительный опыт работы с данными детектора CMS, включая распределённую обработку больших объёмов информации и оценку систематических неопределённостей [4]. Этот опыт успешно используется при анализе открытых данных коллайдера LHC, в проекте OpenData.cern.ch. Проведённые в последние годы исследования топ-кварка в ОЭФВЭ охватывают как экспериментальные, так и теоретические аспекты физики тяжёлых кварков. Они обеспечивают важный вклад в международные программы на LHC и формируют основу для после-

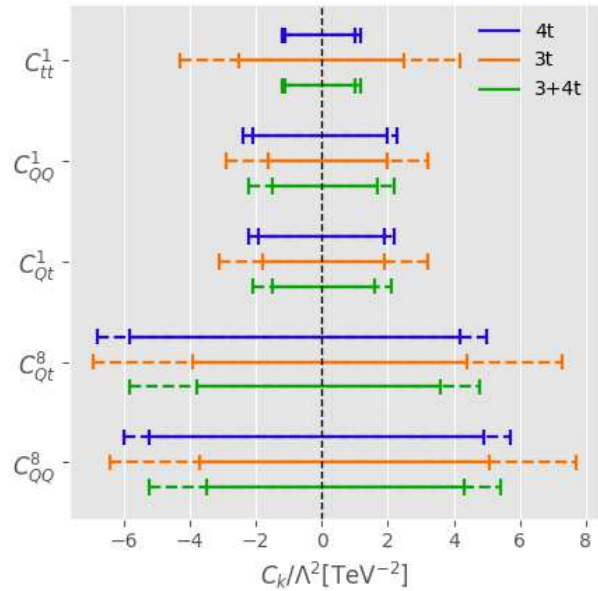


Рис. 5. Ожидаемые ограничения на коэффициенты Вильсона для 4-фермионных операторов SMEFT размерности 6, полученные из сечений процессов $pp \rightarrow 4t$ и $pp \rightarrow 3t + X$ на энергиях 13 ТэВ (пунктир) и 14 ТэВ (сплошная) [15]

дующих поисков Новой физики на коллайдерах нового поколения.

1.2. Развитие методов машинного обучения и нейронных сетей в анализе данных коллайдерных экспериментов

Достижимая чувствительность коллайдерных экспериментов связана с несколькими факторами: доступной статистикой событий, которая определяет статистическую погрешность результата и фиксирована характеристиками коллайдера; характеристиками детектора и моделирования событий, определяющими систематическую погрешность результата и зависящую от параметров готового детектора и современных методов моделирования событий; последним фактором является методика анализа данных, позволяющая повысить чувствительность эксперимента без модернизации коллайдера или детектора, а только за счет более эффективных методов анализа данных эксперимента.

Особое направление исследований коллектива ОЭФВЭ связано с применением нейронных сетей в физике высоких энергий. Современные исследования всё активнее используют методы искусственного интеллекта на разных этапах проведения эксперимента. Впервые в ОЭФВЭ были использованы методы искусственных нейронных сетей ещё в 1995 г. для задачи поиска одиночного рождения топ-кварка в эксперименте D0 [17–19]. В первых работах было показано, что применение нейронных сетей улучшило экспериментальный результат более

чем в два раза [19, 20]. Цикл последующих работ, опубликованных от имени коллаборации D0, был отмечен Шуваловской и Ломоносовской премиями МГУ, а также упомянут в лекции Нобелевского лауреата по физике 2024 г., посвящённой нейронным сетям [21]. Эти работы стали одним из первых примеров успешного внедрения нейронных сетей в физические исследования, предвосхитив современное развитие нейросетевых методов в анализе данных экспериментов ЛHC.

В ОЭФВЭ была разработана комплексная методология применения нейронных сетей и современных алгоритмов машинного обучения в анализе данных коллайдерных экспериментов. Среди наиболее значимых результатов последних лет можно отметить: использование нормализующих потоков (Normalizing Flows) для восстановления спиновых корреляций с учетом нескольких не регистрируемых частиц [22, 23]; внедрение сетей Колмогорова–Арнольда (Kolmogorov–Arnold Networks) в физике высоких энергий [24]; нейросетевые методы разделения аномальных Wtb-связей [25]; нейронные сети поиска аномалий (Novelty Detection) для модельно-независимого поиска новой физики [26]; методологию статистической интерпретации результатов с применением глубоких сетей [27], а также общий рецепт формирования входного пространства признаков для задач глубокого обучения [28, 29]. Эффективность этих подходов была подтверждена при анализе одиночного рождения топ-кварка на ЛHC [30] и поиске бозона Хиггса на Tevatron [31]. Это направление исследований в ОЭФВЭ дает возможность с минимальными затратами двигаться к более высокой чувствительности экспериментов и получать более точные измерения.

1.3. Исследование процессов с рождением лептонов и адронных струй в протон–протонных соударениях при энергиях ЛHC

Проведение экспериментов на ЛHC представляет уникальную возможность как для изучения редких процессов Стандартной модели с рождением тяжелых частиц и адронных струй, так и для поиска новых явлений за рамками Стандартной модели. В ходе первого периода работы ЛHC (Run I, энергии pp соударений 7 и 8 ТэВ) были измерены спектры и форма струй и сечения электрослабого рождения Z-бозона в сопровождении двух струй, исследовано рождение струй в процессах слияния двух векторных бозонов и получены верхние пределы на сечения распада бозона Хиггса на пару лептонов $\mu^+\mu^-$ и e^+e^- . Анализ процессов с рождением лептонов и струй был продолжен и в последующие периоды работы ЛHC, в частности, были измерены угловые распределения в многоструйных событиях [32].

Весьма интригующим результатом является измеренное в эксперименте CMS превышение чис-

ла событий над фоном в инвариантном спектре масс пар мюонов с массой 28.3 ГэВ и шириной 1.8 ГэВ [33]. При энергии pp-соударений 8 ТэВ избыток событий с локальными значимостями 4.2σ и 2.9σ соответственно наблюдался в двух категориях:

1. две b -струи с поперечными импульсами $p_T > 30$ ГэВ/с, одна из них — в центральной области псевдобыстрот $|\eta| \leq 2.4$, другая — в передней области $|\eta| > 2.4$;
2. две струи (из которых как минимум одна b -струя) с $p_T > 30$ ГэВ/с в центральной области $|\eta| \leq 2.4$, отсутствие струй с $p_T > 30$ ГэВ/с, в передней области $|\eta| > 2.4$ и порог на потерянную поперечную энергию меньше 40 ГэВ.

При энергии пучков 13 ТэВ для событий первой категории также наблюдается небольшое превышение данных над фоном (с локальной значимостью 2σ), в то время как для второй категории имеет место дефицит числа событий с локальной значимостью 1.4σ . Из-за отсутствия реалистичной модели сигнала сделать определенный вывод о происхождении избытка событий при энергии 8 ТэВ пока не представляется возможным. Необходимы дальнейшие экспериментальное и теоретическое исследование данного процесса.

1.4. Изучение неупругой дифракции в столкновениях протон–ядро в эксперименте CMS на ЛHC

Впервые проведено изучение дифракции в столкновениях протон–ядро при энергиях ЛHC. В частности, в эксперименте CMS было проведено измерение сечений пустых интервалов в распределении частиц по псевдобыстроте (rapidity gaps) в дифракционных столкновениях протон–свинец при энергии 8.16 ТэВ на нуклон [34]. Получено сечение, существенно превышающее сечения, предсказываемые Монте-Карло моделями. С учётом того, что модели удовлетворительно описывают сечения в протон–протонных столкновениях, это означает, что ядерные эффекты вносят физику, которая плохо учитывается в моделях.

С ростом энергии адронного взаимодействия основным переносчиком взаимодействия становятся нейтральные и бесцветные объекты, называемые померонами (P). Свойства померона наиболее ясно проявляются в процессах неупругой дифракции, в которой взаимодействующие адроны или ядра обмениваются импульсом и одна или обе частицы остаются в исходном состоянии, при этом рождаются новые частицы. Явление дифракции имеет глубокую связь с фундаментальными свойствами КХД, и его природа до сих пор не вполне понята в рамках Стандартной модели физики частиц. Процессы дифракции проявляются в наличии больших свобод-

ных от рождённых частиц интервалов в распределении частиц по псевдобыстроте (rapidity gaps).

Исследование дифракционных процессов при столкновениях адронов многократно выполнялось ранее. В настоящем исследовании впервые на LHC в рамках эксперимента CMS проведено измерение распределения по rapidity gaps в столкновениях протон–свинец (pPb) при энергии 8.16 ТэВ на нуклон. Результаты получены для двух топологий: померон–свинец и померон–протон. Анализ выполнен на большом интервале псевдобыстрот — 10.4 единицы. Проведено сравнение с предсказаниями Монте-Карло моделей HIJING, EPOS-LHC and QGSJETII. На рис. 6 представлены распределения по пустым быстройным интервалам для двух топологий.

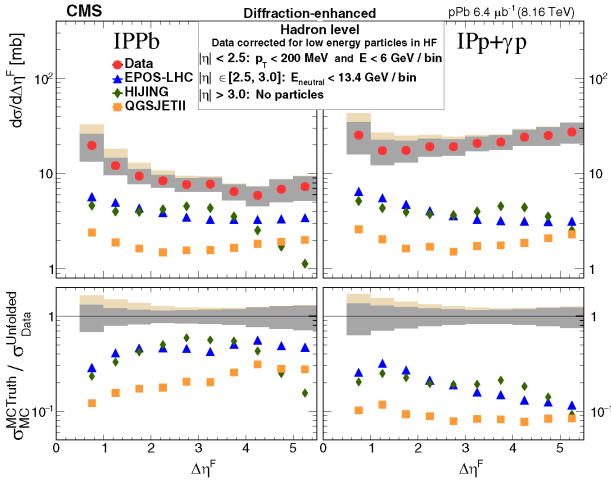


Рис. 6. Дифференциальные сечения образования пустого псевдобыстротного интервала $\Delta\eta^F$. Слева — взаимодействия померон–свинец (диссоциация свинца), справа — померон–протон и гамма–протон (диссоциация протона). Внизу показано отношения сечений предсказываемых Монте-Карло моделями к измеренным сечениям

В случае померон–протон топологии большой дополнительный вклад даёт гамма–протон взаимодействие, поэтому вывод о сечении неупругой дифракции сделать трудно. В случае померон–свинец топологии, где вклад гамма–протон взаимодействия мал, сечение в экспериментальных данных не менее чем в два раза превышает сечения даваемые Монте-Карло моделями. Это значимый результат, так как для дифракционных процессов, измеренных в протон–протонных столкновениях, предсказания моделей достаточно хорошо согласуются с данными. Таким образом, ядерные эффекты вносят существенные физические особенности, которые плохо учитываются в моделях.

1.5. Методические результаты в эксперименте CMS

1.5.1. Моделирование и мониторинг магнитной системы

Важным направлением научно-технических работ в эксперименте CMS является моделирование магнитной системы эксперимента, которая является ключевым элементом установки и определяет работу всех ее подсистем. Для описания распределения магнитного потока в объеме детектора была разработана система примитивных трехмерных объемов [35], содержащих значения плотности магнитного потока, измеренной внутри сверхпроводящей катушки и смоделированной снаружи катушки на специальной сетке опорных узлов [36] (рис. 7).

Эта система (карта магнитного поля) воспроизводит геометрические особенности стальных блоков магнитопровода и позволяет интерполировать плотность магнитного потока между узлами сетки для получения значений магнитного поля в любой пространственной точке внутри цилиндра диаметром 18 м и длиной 48 м, в объеме которого расположены детектирующие системы CMS. При использовании полученных с помощью карты магнитного поля CMS значений плотности магнитного потока, неоднородного в области трековой системы, было показано, что ухудшение разрешения поперечного импульса заряженных частиц при его величине 100 ГэВ/с составляет от -0.05 до $+1.31\%$ по сравнению с разрешением в постоянном однородном магнитном поле [37]. Достигнутая точность карты магнитного поля в объеме установки CMS позволила обеспечить высокое разрешение по импульсам электронов и мюонов в диапазонах, использованных для поиска и анализа распада бозона Хиггса на четыре лептона.

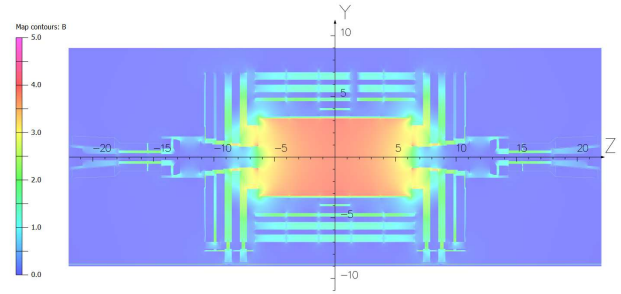


Рис. 7. Распределение полной плотности магнитного потока B (Тл) в продольном сечении карты магнитного поля CMS [35] в области $18 \times 44 \text{ м}^2$, рассчитанное с помощью 3D-модели магнита CMS [36]

1.5.2. Разработка систем калибровки и контроля радиационных условий

Одной из основных детекторных систем установки CMS является адронный калориметр (HCAL), пред-

назначенный для измерения адронной составляющей событий, включая адронные струи. Практически все процессы, рассматриваемые как сигналы новой физики, либо включают струи или потерянную энергию в конечном состоянии, либо используют категоризацию событий, основанную на числе и кинематических характеристиках струй. При этом для успешного выполнения физической программы CMS точность измерения энергии в HCAL должна составлять не хуже 2–3%. Из-за сложной структуры HCAL, его большого покрытия по углам, неоднородности материала перед калориметрами и ограниченного применения тестовых систем для проведения калибровки HCAL необходимо использовать различные методы, по возможности синхронизированные с процессом набора данных для физического анализа. Еще до начала работы LHC был разработан план калибровки HCAL, в частности была развита методика калибровки с помощью событий с минимальными отборами, взятыми без порогов на энергию в ячейке калориметра. В дальнейшем проводилась разработка и поддержка системы калибровки HCAL, включающие как калибровку с радиоактивным источником и лазером [38], так в калибровку с помощью физических событий [39].

Значимой задачей, решенной в ходе методических исследований и эксплуатации установки CMS, стало создание системы контроля радиационных условий (в частности, нейтронных полей) в критических по отношению к радиационной деградации оптического и электронного оборудования областях установки. Система нейтронных мониторов на основе борированных пропорциональных счетчиков позволяет в интерактивном режиме измерять потоки нейтронов с энергиями до 15 МэВ в динамическом диапазоне от единичных частиц до 105 нейтронов/см² и контролировать радиационную обстановку как в удаленных точках экспериментального зала, где потоки составляют 0.01 нейтрона/см²/мкбн⁻¹, так и в предельно жестких условиях внутри защиты калориметров, достигающих 5 нейтронов/см²/мкбн⁻¹. Изначально предназначенная для мониторинга полей в области переднего (HF) калориметра система HF RADMON во втором и третьем периодах работы LHC была развита по актуальным запросам подсистем CMS для измерения потоков нейтронов в различных точках установки в целом, что позволило создать карту нейтронных полей, выполнить различные измерения эффективности радиационной защиты и получить уникальную информацию для критической проверки качества компьютерного моделирования радиационных и пучковых условий.

1.5.3. Форвард-калориметр CASTOR

Базовый передний калориметр CASTOR (Centauro And Strange Object Research) [40] установки CMS спроектирован для изучения процессов, относящихся к области малых значений

Фейнмановской переменной x , таких как дифракционные взаимодействия и поиск новых явлений в области физики высоких энергий и космических лучей. Калориметр позволил проводить измерения в самом широком диапазоне псевдобыстроты, $-6.6 < \eta < -5.2$ и является уникальным для LHC детектором в этой области фазового пространства. Конструктивные особенности калориметра обусловлены задачей проследить продольное развитие электромагнитных и электронно-ядерных ливней, инициированных многочисленными частицами, испущенными под очень малыми углами ($0.16^\circ - 0.64^\circ$) по отношению к направлению пучка, что требует высокого пространственного разрешения и быстрого отклика оптических датчиков в условиях больших нагрузок, значительного радиационного фона и наличия магнитного поля (~ 0.2 Тл), влияющего как на поведение ливней внутри калориметра, так и на параметры ФЭУ. Для использования для физического анализа экспериментальных данных, собранных с помощью калориметра CASTOR, необходима калибровка калориметра, что является нетривиальной задачей ввиду местоположения детектора в передней инфраструктуре установки CMS. Первичная калибровка CASTOR проведена в измерениях на SPS в ЦЕРНе с использованием электронов, заряженных пионов и мюонов с энергиями в диапазоне от 10 до 300 ГэВ [41]. В результате тестов на электронных пучках обнаружены хорошая разрешающая способность и линейность по энергии и измерено соотношение между откликами заряженных пионов и электронов при одинаковой энергии частиц. Последнее является фундаментальным свойством любого калориметра и связано с некомпенсацией потерь энергии в адронных ливнях из-за распада ядра и образования нейтронов, мюонов и т.д.

Условия работы калориметра, интегрированного в структуру CMS, значительно отличаются от условий измерений на тестовом пучке: наличие магнитных полей нетривиальным образом изменяет коэффициент усиления ФЭУ. Более реалистичная процедура выполнена путем интеркалибровки данных калориметра CASTOR и переднего адронного калориметра HF с открытием области псевдобыстроты $3.15 < |\eta| < 4.90$. Измеренная в HF η -зависимость потока энергии экстраполируется на диапазон аксептанса CASTOR. Для этой цели предсказания моделей масштабируются таким образом, чтобы наилучшим образом воспроизвести измеренную в HF η -зависимость (рис. 8).

Оценка модельной зависимости экстраполяции проведена из разброса предсказаний. Шкала абсолютной энергии в CASTOR определяется измеренной в HF энергией, в сочетании с модельно-зависимой экстраполяцией. На величину регистрируемой энергии непосредственно влияет определение местоположения детектора. CASTOR расположен в области, где количество выделяемой энергии сильно зависит от η , и даже небольшие сдвиги могут оказать значительное влияние (рис. 9, слева). Для

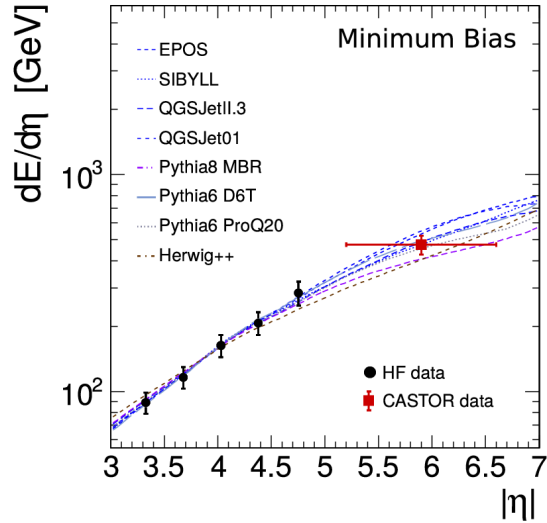


Рис. 8. Зависимость измеренных в калориметрах HF и CASTOR потоков энергии от псевдобыстроты в сравнении с результатами MC-моделирования, экстраполированного на область CASTOR [40]

точного измерения энергии положение калориметра должно быть известно с точностью до нескольких миллиметров. На рис. 9, справа, показано влияние на энергетический отклик погрешности в измерении местоположения детектора. Точное определение местоположения калориметра CASTOR затруднительно, поскольку вся инфраструктура передней части установки CMS при включении магнита перемещается на несколько сантиметров.

Разработанные автоматические процедуры расчета калибровочных констант используются для каждого рабочего сеанса в зависимости от выбранных режимов работы LHC. В сеансах по набору статистики используется персональная поканальная настройка параметров питания каждого ФЭУ; получение данной информации из центральных баз данных $\langle CMS_{Oracle} \rangle$ осуществляется через доступ к архивным установочным данным $\langle Castor_{HV} \rangle$ из массивов баз данных конфигураций и состояний CMS. Данные, полученные при разных режимах работы коллайдера с помощью форвард-калориметра CASTOR в соударениях ионов свинца и протон-протонных столкновениях, общедоступны для физического анализа в рамках инициативы CERN по открытым данным (OpenData.cern.ch).

1.5.4. Программный комплекс мониторингирования электроники стандарта mTCA

Модернизация калориметрической системы установки CMS, обусловленная увеличением светимости LHC, потребовала замены электроники стандарта VME на стандарт mTCA (стандарт модульной архитектуры для систем телекоммуникационных вычислений). Для этого разработан программный комплекс мониторингирования электроники стан-

дарта mTCA [42–46], включающий программное обеспечение (ПО) связи модулей mTCA с пакетом WinCC/OA в среде многооконного центра с открытой архитектурой, принятом за стандарт для системы медленного контроля на LHC, что позволило существенно повысить эффективность работы физической установки за счет полноценного контроля электронных модулей стандарта mTCA, снижения уровня информационных потерь и поднятия уровня безопасности эксплуатации электронного оборудования. С использованием ПО осуществляется прохождение, распознавание, дешифровка и первичная обработка потоков информации при обмене данными с произвольного набора электронных модулей крейтов mTCA и последовательная передача этих данных в произвольно заданный распределенный набор мониторинговых программ высокого уровня, обеспечивающих надежность работы электроники крейтов, а также функции мониторинга и контроля, хранения информации и выработки предупреждающих сообщений. Разработанные программные скрипты позволяют просматривать данные с контролируемых сенсоров электроники mTCA как в цифровом формате, так и в графическом формате (тренды) (рис. 10).

Проверки чтения и соответствия контролируемых сенсоров электроники mTCA осуществляются через cmsonline system. При работе детектора в режиме набора статистики при повышенной светимости разработанное ПО демонстрирует стабильность и отсутствие сбоев в синхронизации работы электроники крейтов mTCA.

1.6. Исследования в эксперименте ATLAS на коллайдере LHC

С начала 1990-х годов ОЭФВЭ участвовал в подготовке эксперимента, впоследствии получившего название ATLAS, и включён в авторский коллектив соответствующего письма о намерениях [47]. За 35 лет участия в эксперименте ОЭФВЭ внес большой вклад в создание трекового детектора переходного излучения и сопровождение его работы, в разработку системы триггерования и сбора данных, в анализ данных. Было подготовлено несколько десятков коллаборационных публикаций.

В течении последних пяти лет ОЭФВЭ активно участвовал в изучении спектроскопии, рождения и распада адронов, содержащих тяжёлые кварки. Измерены характеристики распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [48]. Полученные результаты были объединены с результатами полученными при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ. Измеренные величины CP-нарушающей фазы ϕ_s , ширины распада Γ_s , разности ширин двух собственных массовых состояний $\Delta\Gamma_s$ и других параметров распада находятся в согласии с предсказаниями СМ.

Исследованы характеристики распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ с использованием данных о pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, соответ-

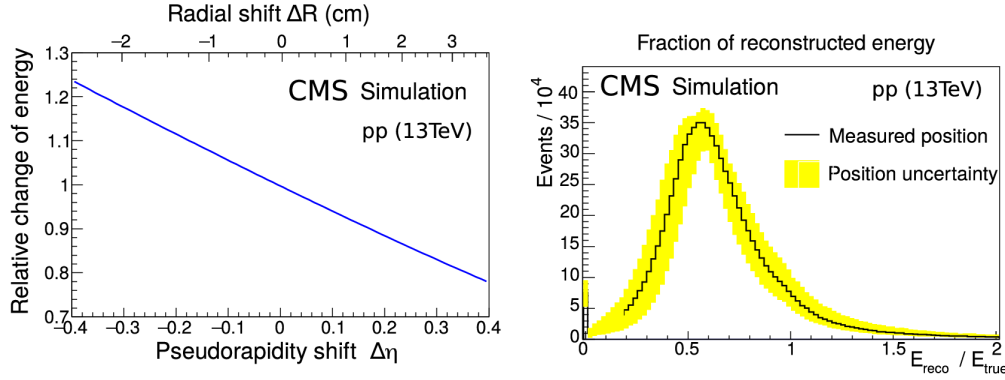


Рис. 9. Результаты MC-моделирования PYTHIA 8 minimum-bias событий в pp -взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Слева: влияние сдвига по псевдобыстроте на относительное изменение энергии. Справа: влияние на энергетический отклик погрешности измерения местоположения детектора [40]

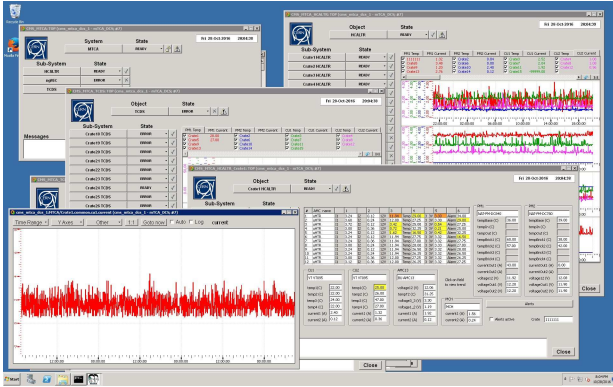


Рис. 10. Контролируемые параметры электроники mTCA на центральной панели системы контроля установки CMS в среде многооконного центра с открытой архитектурой WinCC OA

ствующих 139 fb^{-1} интегральной светимости [49]. Были измерены отношения парциальных ширин этих распадов по отношению к парциальной ширине распада $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$. Проведено сравнение с теоретическими предсказаниями, предыдущими измерениями и измерениями аналогичных отношений для распадов лёгких B -мезонов. Точность полученных результатов превосходит точность всех предыдущих измерений. Относительная доля поперечной поляризации в распаде $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ ($\Gamma_{\pm\pm}/\Gamma$) находится в лучшем согласии с ожиданием наивного спинового счёта (2/3), чем с теоретическими предсказаниями. Сравнение с измерениями аналогичных отношений для распадов лёгких B -мезонов подтверждает предположение о доминирующем вкладе предпочтительной по цвету спекторной диаграммы в амплитуды $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ -распадов.

Проведен поиск $c\bar{s}c\bar{s}$ -тетракварков, распадающихся на пару J/ψ -мезонов или на J/ψ -мезон и $\psi(2S)$ -мезон, в конечном состоянии с четырьмя мюонами [50]. Для анализа были использованы данные о протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, соответствующие интегральной све-

тимости 140 fb^{-1} . В распределении по инвариантной массе четырех мюонов для событий с двумя J/ψ -мезонами наблюден избыток событий над ожидаемым фоном со значимостью более 5 стандартных отклонений (σ). Подтверждено наличие широкой структуры вблизи порога и резонанса около 6.9 ГэВ ($X(6900)$), ранее наблюдаемых коллаборацией LHCb. Для событий с J/ψ -мезоном и $\psi(2S)$ -мезоном впервые наблюден избыток событий на уровне 4.7σ и получено указание на наличие резонанса около 7.2 ГэВ на уровне 3.0σ .

В новой работе по изучению $c\bar{s}c\bar{s}$ -тетракварков были добавлены данные о распадах на J/ψ -мезон и $\psi(2S)$ -мезон с последующим распадом $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ в конечном состоянии с четырьмя мюонами и двумя π -мезонами [51]. Было подтверждено наличие сигнала в распадах на J/ψ -мезон и $\psi(2S)$ -мезон со значимостью 8.9σ . Впервые измеренное отношение парциальных ширин распадов $X(6900) \rightarrow J/\psi \psi(2S)$ и $X(6900) \rightarrow J/\psi J/\psi$ оказалось равным $1.08 \pm 0.20^{+0.40}_{-0.17}$.

Были измерены дифференциальные сечения рождения D^+ - и D_s^+ -мезонов в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [52]. D^+ - и D_s^+ -мезоны реконструировались в их распадах на $\phi \pi^+$ с последующим распадом $\phi \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Было проведено сравнение полученных дифференциальных сечений при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и их отношений к сечениям рождения при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ с предсказаниями пертурбативных КХД расчётов в следующем за лидирующем порядке. Предсказания находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными в пределах больших теоретических неопределённостей.

В ОЭФВЭ продолжают работы над анализом данных коллаборации ATLAS. К ожидаемым результатам относятся дифференциальные сечения рождения B^+ -мезонов в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, поиск возбуждённых B_c^+ -мезонов, изучение тетракварковых и пентакварковых состояний в распадах адронов содержащих b -кварки (B -адронов), и проверка аномальных проявлений в распадах B -адронов.

1.7. Исследования распадов прелестных адронов в эксперименте LHCb на коллайдере LHC

В рамках коллаборации LHCb ОЭФВЭ проводилась работа по изучению многоадронных распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow D^+ p \pi^- \pi^-$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow D^{*+} p \pi^- \pi^-$. В этом исследовании удалось измерить отношение ширины распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow D^+ p \pi^- \pi^-$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow D^{*+} p \pi^- \pi^-$. Оно оказалось равным 1.9 ± 0.2 . Это число поразительным образом совпадает с экспериментальным отношением прямого рождения в электрон-позитронной аннигиляции (1.86 ± 0.16) и оказывается близким к аналогичной величине для адронного рождения (1.5 ± 0.1). Это свойство показывает, что три лёгких адрона в окружении фрагментирующего c -кварка это уже «много» и он адронизуется так же, как в процессе фрагментации [53].

С использованием данных, набранных экспериментом LHCb за первый и второй сеансы работы ускорителя LHC и соответствующих интегральной светимости 9 fb^{-1} , группой ОФВЭ исследован распад $B^+ \rightarrow J/\psi \eta K^+$, $\eta \rightarrow \gamma \gamma$ [54]. В исследовании поставлены верхние пределы на отношение парциальных ширины ($Br(B^+ \rightarrow X K^+) \cdot Br(X \rightarrow J/\psi \eta) / (Br(B^+ \rightarrow \psi(2S) K^+) \cdot Br(\psi(2S) \rightarrow J/\psi \eta))$, где X — гипотетический узкий чармиевый или чармониеподобный резонанс, во всей области по массе $J/\psi \eta$, доступной в данном распаде. Также верхние пределы поставлены и на парциальные ширины распадов в конечное состояние $J/\psi \eta K^+$, происходящих через образование известных широких чармиевых или чармониеподобных резонансов, распадающихся в $J/\psi \eta$.

В данных, набранных экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях в течение первого и второго сеансов работы ускорителя LHC, проводилось исследование распада $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S) \gamma$ и измерение его парциальной ширины относительно парциальной ширины распада $\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi \gamma$ [55]. Как сигнальный, так и нормировочный распады восстанавливались в процессе $B^+ \rightarrow \chi_{c1} K^+$. Было измерено отношение парциальных ширины $Br(\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S) \gamma) / Br(\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi \gamma)$ с использованием данных первого и второго сеансов работы LHC по отдельности, а также получено усредненное значение между двумя измерениями.

Работа крайне важна с точки зрения понимания природы $\chi_{c1}(3872)$, т.к. этот адрон предположительно является экзотическим состоянием, имея в своём составе, помимо пары очарованных кварков, и пару лёгких валентных кварков. При этом теоретические предсказания отношения парциальных ширины распадов $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S) \gamma$ и $\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi \gamma$ значительно разнятся в зависимости от выбранной модели для описания внутренней структуры $\chi_{c1}(3872)$ (от значений больше единицы для компактных объектов, вроде обычного кваркония или компактного тетракварка, до 10^{-3} для моделей, представляющих этот адрон как

молекулу из очарованных мезонов). Полученное значение отношения парциальных ширины распадов и $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S) \gamma$ и $\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi \gamma$ хорошо согласуется с предыдущими результатами экспериментов BaBar и LHCb и не противоречит верхнему пределу, установленному коллаборацией Belle II, однако не согласуется с верхним пределом эксперимента BESIII, который оказывается значительно ниже измеренного в этом анализе отношения. Также полученное значение отношения не согласуется с расчётами, рассматривающими $\chi_{c1}(3872)$ как молекулу, но находится в хорошем согласии с моделями, описывающими эту частицу как обычный чармоний или тетракварк.

В настоящий момент ОЭФВЭ продолжает исследование характеристик очарованных барионных резонансов, которые наблюдаются в конечном состоянии распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$ в данных эксперимента LHCb. По всей видимости, в этом исследовании с наилучшей в мире точностью будет измерены характеристики резонансов $\Lambda_c^+(2625)$ и $\Lambda_c^+(2880)$.

1.8. Оптимизация юстировки оптической системы RICH детекторов в эксперименте LHCb на коллайдере LHC

Эксперимент LHCb посвящен прецизионным измерениям CP-нарушений и поиска редких распадов B -адронов на LHC в ЦЕРНе (Женева) [56].

Важнейшим инструментом идентификации образовавшихся частиц являются два RICH-¹ детектора: RICH1 и RICH2. Системы зеркал этих детекторов, фокусирующие черенковские фотоны в кольца на поверхностях своих фотодетекторов, требуют юстировки. Окончательная юстировка производится с использованием реальных данных о треках частиц и об их черенковских фотонах. Задача сводится к итеративному решению вырожденной системы уравнений для определения компенсирующих поправок к описанию геометрии данной оптической системы. В ОЭФВЭ был создан и внедрён в процесс реконструкции событий на LHCb комплекс программ для выполнения этой задачи (с использованием математических методов регуляризации и методов теории графов) [57]. Продолжена разработка методов юстировки RICH-детекторов и ПО для LHCb в третьем периоде работы LHC (Run 3) в рамках амбициозного проекта RTA (анализ в режиме реального времени). Концептуально вся юстировка с использованием данных должна в этом режиме выполняться с максимальной быстротой в начале очередного наполнения накопительных колец, чтобы начать производить реконструкцию событий. С этой целью был предложен и реализован оригинальный метод «интеллектуального детерминистически рандомизированного прескейлинга»

¹ RICH-детекторы (англ. Ring Image CHerenkov) регистрируют кольца от черенковского излучения.

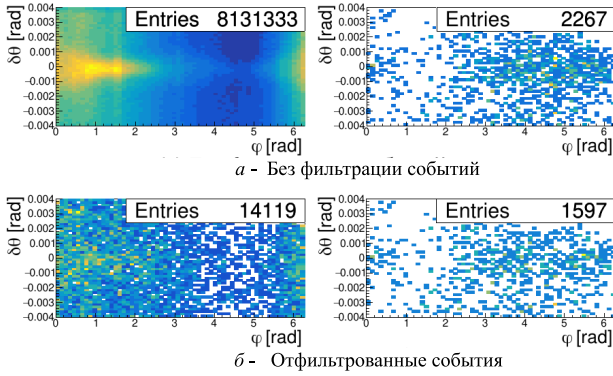


Рис. 11. Результат теста эффективности метода «интеллектуального детерминистически рандомизированного прескейлинга» событий: θ и φ — зенитный и азимутальный углы фотона в системе координат трека, $\delta\theta$ — отклонение от ожидаемого угла. Слева — в наиболее облучаемой комбинации сегментов первичного и вторичного зеркал RICH2, справа — в наименее облучаемой

событий в триггере первого уровня HLT1 (на графических процессорах) для радикального (пятидесятикратного) ускорения данной юстировки оптической системы RICH детекторов [58]. Рис. 11 иллюстрирует эффект применения нового метода. Показаны угловые распределения черенковских фотонов. Фильтр успешно устраняет избыточность реконструируемых фотонов.

1.9. Эксперимент NA64: поиск тёмной материи на SPS

Эксперимент NA64 в ЦЕРН представляет собой многоцелевую установку для поиска частиц тёмного сектора, использующую пучки SPS и метод «активной мишени» в сочетании с измерением недостающей энергии [59]. Группа ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ совместно с коллегами из ОИЯИ и других институтов принимала активное участие в создании трековой системы эксперимента, проведении сеансов по сбору данных, настройке системы триггеров, реконструкции событий и анализе данных.

Исследовательская программа включает четыре основных направления:

NA64- e^- использует электронный пучок ~ 100 ГэВ для поиска легкой темной материи через реакцию $e^- Z \rightarrow e^- Z A'$ с распадом $A' \rightarrow \chi\chi$. В ходе эксперимента были получены ограничения на невидимые распады тёмных фотонов при массах ниже 350 МэВ. Так же исследуются другие частицы, Z' -бозоны ($B - L$, $L_\mu - L_\tau$) и процессы нарушения лептонного аромата [60].

NA64- e^+ использует резонансную аннигиляцию $e^+e^- \rightarrow A' \rightarrow \chi\bar{\chi}$ в позитронных пучках 40–100 ГэВ, обеспечивающую усиление сигнала в виде узкого пика в спектре недостающей энергии [61].

NA64- μ применяет интенсивный мюонный пучок

160 ГэВ для поиска частиц, связанных с мюонным ароматом. Получены первые ограничения на параметры Z' в модели $L_\mu - L_\tau$, объясняющей аномалию $(g - 2)_\mu$ [62].

NA64- h направлен на поиск Новой физики путём изучения адрон-ядерного рассеяния на пучках пионов, каонов и протонов в установке с фиксированной мишенью. Улучшены в 3 раза ограничения на невидимые распады η - и η' -мезонов. Перспективы включают поиск невидимых распадов $K_{S,L}$ и осцилляций $K^0 - K^{0'}$ [63].

За последние пять лет работы эксперимент NA64 значительно расширил номенклатуру пучков для обнаружения сигналов от тёмной материи и тёмного сектора. Начав с поиска лёгкой тёмной материи с использованием электронного пучка, эксперимент успешно расширил свою программу, включив исследования с позитронными, мюонными и адронными пучками.

На рис. 12, показаны совокупные ограничения, полученные с использованием электронных, позитронных и мюонных пучков, которые демонстрируют современное состояние исследований в секторе легкой темной материи [64]. Проектная чувствительность после модернизации в LS3 показывает, что NA64 сможет исследовать ранее недоступные области параметрического пространства.

1.10. Исследования на коллайдере HERA

С 1993 г. НИИЯФ МГУ является официальным членом коллаборации ZEUS (с одноименным многоцелевым детектором) на электрон-протонном коллайдере HERA (Hadron Electron Ring Accelerator) в Национальном ускорительном центре DESY в г. Гамбурге (Германия). ОЭФВЭ участвовал в разработке и создании адрон-электронного сепаратора HES (Hadron Electron Separator) [65], внёс значительный вклад в развитие триггерных систем, в создание спутниковой сети НИИЯФ МГУ–DESY с пропускной способностью 256 Кбит/с (1993 г., телекоммуникационная сеть RUHEP/RADIO-MSU [66, 67], которая на тот момент превосходила по ёмкости существующие российские интернет-каналы), выполняется анализ данных для разнообразных физических задач.

Выдающимся вкладом в развитие квантовой хромодинамики (КХД) стали полученные в экспериментах на ускорителе HERA данные о структуре протона, измерения структурных функций протона, распределений кварков и глюонов [68], «бегущего» параметра КХД α_s (рис. 13 [69]) и «бегущей» массы c -кварка [70].

Был обнаружен резкий рост плотности партонов (кварк-антикварковых пар и глюонов) на расстояниях порядка 10^{-16} см. Прецизионные измерения, впервые выполненные на коллайдере HERA, показали, что внутри протона так называемое «море» короткоживущих кварк-антикварковых пар состоит не только из легких кварков u (up), d (down)

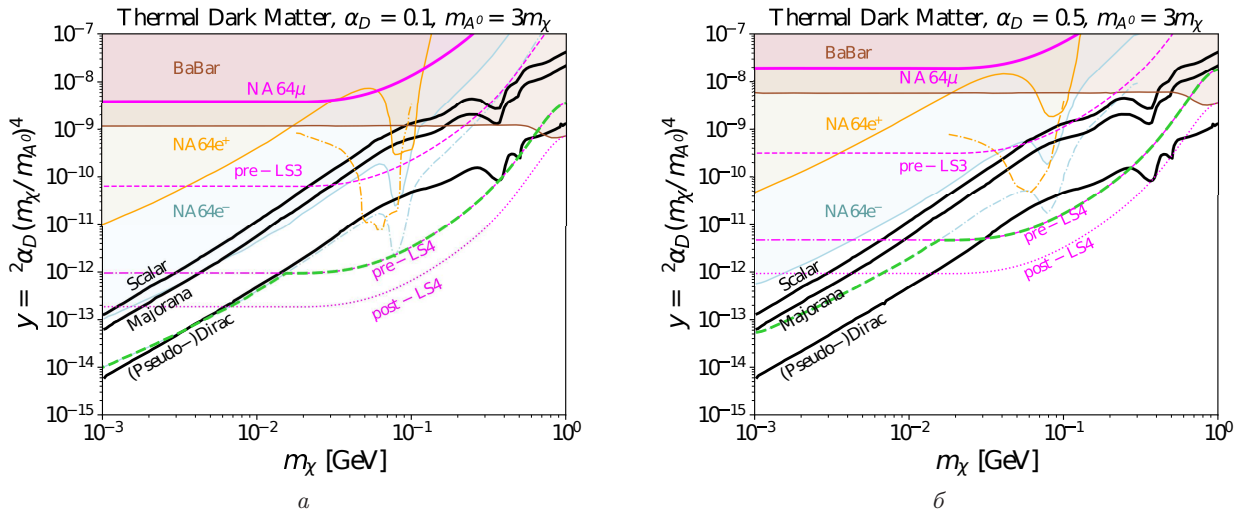


Рис. 12. Совокупные ограничения NA64 на уровне доверия 90% и проектная чувствительность для лёгкой тёмной материи, управляемой (mediated) тёмными фотонами

и s (strange), но и из тяжелых c (charm) и b (bottom) кварков. Точное понимание механизмов рождения тяжелых кварков и знание структурных функций протона оказалось принципиально важным для осуществления физической программы исследований на Большом адронном коллайдере (ЛHC) в ЦЕРНе [71]. С результатами исследования дифракционных процессов и адронных конечных состояний можно познакомиться в обзорах [72] и [73].

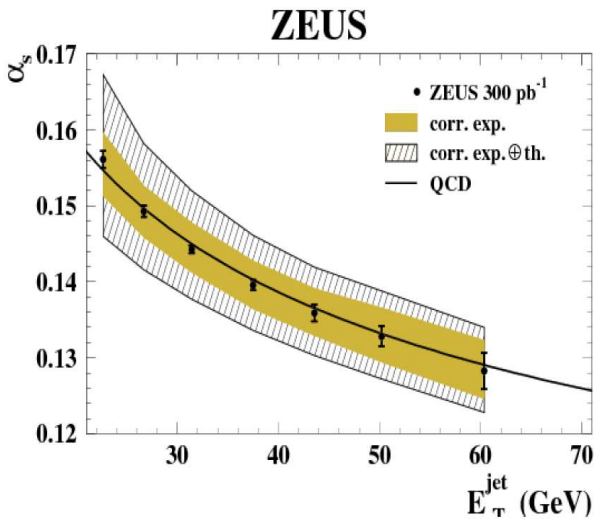


Рис. 13. «Бегущий» параметр сильных взаимодействий α_s [69]

Накопленные на HERA данные столь уникальны и велики по объему, что их анализ выполняется и по сей день, публикуются статьи. В последнее время, наряду с традиционными анализами данных с установки ZEUS, например такими, как комбинированный КХД анализ сечений рождения чармованных и прелестных адронов в про-

цессах глубоко-неупругого рассеяния [74], измерение сечений рождения векторных мезонов $\psi(2S)$ и $J/\psi(1S)$, S -волновых чармониев в процессах эксклюзивного фоторождения [75], изучения партонных распределений в протоне при больших значениях переменной Бьёркена x [76], были выполнены работы, фокус которых сместился на выявление тонких эффектов. Так были получены интересные данные при изучении коллективных явлений в элементарных ep -взаимодействиях [77], при поиске контактных взаимодействий, рождении лепто-кварков [78], нарушений фундаментальных симметрий [79] и др., т.е. проводились исследования, связанные с поиском отклонений от СМ. Из результатов последних лет отметим лишь некоторые.

1.10.1. Измерение отношения сечений $\sigma_{\psi(2S)}/\sigma_{J/\psi(1S)}$ рождения векторных мезонов в эксклюзивных процессах фоторождения [75]

Изучение процессов с рождением тяжелых кварков оставалось одним из основных направлений научной программы исследований в эксперименте ZEUS [74, 80–82]. Мотивация таких всесторонних и детальных измерений процессов рождения частиц с тяжелыми ароматами обусловлена прежде всего тем, что они являются хорошим инструментом для экспериментальной проверки теоретических расчётов в рамках эффективных теорий поля (ЭТП). Поскольку большая масса c - и b -кварков, $m_Q \gg \Lambda_{QCD}$ (где $Q = b, c$), обеспечивает естественным образом жёсткий масштаб, физические процессы на этом масштабе m_Q носят короткодействующий характер, что делает возможным их рассмотрение в рамках теории возмущений. Исследование процессов образования векторных мезонов, чармониев $\psi(2S)$ и $J/\psi(1S)$ позволяет совершенствовать теоретические расчёты в различных подходах в моделях

квантовой хромодинамики (КХД) в рамках ЭТП. В частности, $J/\psi(1S)$ и $\psi(2S)$ имеют одинаковый кварковый состав, но разные радиальные распределения волновых функций. Поэтому результаты по измерению выхода S -волнового чармония в основном $1S$ -состоянии и в радиально возбуждённом $2S$ -состоянии позволяют проверить предсказания КХД по зависимости сечения его образования от волновой функции. Детальный анализ данных по эксклюзивному фоторождению, полученных недавно в эксперименте ZEUS в реакциях $\gamma p \rightarrow J/\psi(1S)p$ и $\gamma p \rightarrow \psi(2S)p$ при энергии 318 ГэВ в системе центра масс ep и максимальной интегральной светимости 373 pb^{-1} , представлен в работе [75]. Отношение сечений рождения $R = \sigma_{\psi(2S)}/\sigma_{J/\psi(1S)}$ было измерено как функция W , где W — энергия центра масс фотон–протон и $|t|$, где t — квадрат переданного четырёхимпульса в протонной вершине. Проведено сравнение полученных результатов с предыдущими данными в области фоторождения и глубоко-неупругого рассеяния и с расчётами по моделям, основанных на различных подходах КХД для эксклюзивного рождения векторных мезонов.

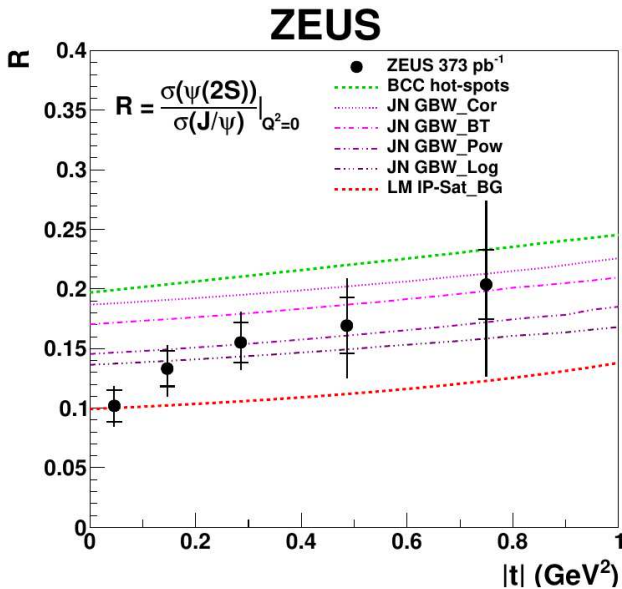


Рис. 14. Отношение сечений $R = \sigma_{\psi(2S)}/\sigma_{J/\psi(1S)}$ как функция квадрата переданного четырёхимпульса $|t|$ в фоторождении (детали см. в [75])

Полученные результаты находятся в разумном согласии с предсказаниями моделей. Следует отметить, что наблюдается медленный рост величины отношения сечений R с возрастанием $|t|$ (рис. 14).

В свете недавно опубликованной работы, где получены результаты, показывающие, что возрастание отношения сечения фоторождения $\psi(2S)$ и $J/\psi(1S)$ с жёсткостью процесса может служить указанием на присутствие нелинейной эволюции Балицкого–Ковчегова [83]; обнаруженный слабый рост R при увеличении значения $|t|$ в измерениях ZEUS (рис. 14) представляет определённый интерес с точки зрения ограничений на использование моде-

лей КХД с разными сценариями эволюции и может служить стимулом для дальнейших прецизионных измерений в области эксклюзивного рождения векторных мезонов.

1.10.2. Поиск эффектов нарушения CPT и лоренцевой симметрий в данных ZEUS [79]

Проверка базовых основ квантовой теории поля, таких как сохранение CPT- и лоренцевой инвариантности в кварковом секторе Стандартной модели (СМ), даёт способ поиска возможных отклонений от СМ. Нарушение данных симметрий должны проявляться как зависимость сечений процессов от времени. Принцип относительности требует, чтобы результаты идентичных измерений, 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 CPT-инвариантности теорий. Благодаря недавним теоретическим разработкам, появилась методика экспериментального поиска нарушения лоренцевой инвариантности в процессах глубоко неупругого рассеяния (ГНР) электронов на протоне. Анализ данных эксперимента ZEUS был направлен на поиск сигналов, нарушающих вращательную инвариантность ГНР в координатном пространстве, и выявление свидетельств наличия колебаний сечений с ходом звездного времени. В итоге полученные экспериментальные результаты не выявили значительной (за пределами 2σ) временной зависимости сечений от звездного времени и согласуются с СМ. Кроме того, были установлены верхние и нижние ограничения на 42 модельных коэффициента, из них на 30 коэффициентов границы установлены впервые.

1.10.3. Ограничения на эффективный радиус кварка из инклюзивного ep -рассеяния на HERA [84]

Процессы и обмены вне рамок СМ могут обусловить конечный эффективный радиус кварков R_q в протоне. Ненулевой R_q при очень больших значениях виртуальности фотона Q^2 должен видоизменять поведение экспериментальных сечений рассеяния электрона на кварках в сравнении с предсказаниями СМ. Используя все доступные HERA-II данные коллаборации ZEUS по процессам с $Q^2 > 10^3 \text{ ГэВ}^2$ и выполняя одновременную подгонку партонных распределений и сечения рассеяния, в рамках форм-факторной модели получено значение эффективного радиуса кварка, равное $0.43 \times 10^{-16} \text{ см}$ [84]. Данное верхнее ограничение на величину R_q в два раза улучшает ограничение, полученное ZEUS ранее на основе данных HERA-I.

Представляется интересным сравнить величину R_q со статическим радиусом нуклона, который следует из модели нуклона как релятивистской вра-

щающейся глюонной струны с кварком и дикварком на концах [85]. В рамках данной версии струнной модели с высокой статистической точностью воспроизводится взаимосвязь между полным угловым моментом J и квадратом массы M^2 наблюдаемых частиц-резонансов. Высокая степень линейности траекторий подтверждена для таких семейств частиц, как N -барионы, Δ -барионы, Λ -барионы, Σ -барионы и мезонной ρ -траектории².

Из подгонки параметров модели к траектории N -барионов найдено, что для $J = 1/2$ $R_N \approx 2.45 \times 10^{-14}$ см и $m_q = 0.114$ ГэВ [85]. Таким образом, действительно $R_N \gg R_q$. Если теперь учесть, что при высоких Q^2 экспериментально наблюдается резкий рост плотности партонов (несколько десятков виртуальных кварк-антикварковых пар и глюонов), то кварк модели — это так называемый составной кварк, валентный кварк, окруженный партонным облаком.

Приведенный выше результат ZEUS для R_q интересен и тем, что побуждает задать вопросы, а какие характеристики виртуальных частиц можно оценить, основываясь на имеющихся данных и какие методы для этого необходимо использовать.

1.10.4. Дополнительные измерения пространства-времени в области глубоко неупругих процессов [86]

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 виртуальных частиц значительно отличаются от свойств этих же частиц в реальном состоянии (на массовой поверхности).

В Стандартной модели 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.

На основе квантово-механических соотношений неопределенностей Гейзенберга и Ландау–Пайерлса были выведены новые неравенства между канонически сопряженными переменными и формула для оценки групповой скорости U^* виртуальных частиц. Глубоко неупругие процессы ep -рассеяния при квадрате переданного импульса $Q^2 < 100$ ГэВ² интерпретируются как обмен вирту-

альным фотоном. Применив метод косвенных измерений и формулу для U^* к экспериментальным данным с ep -коллайдера HERA установили, что виртуальные фотоны имеют скорости, превышающие скорость реального фотона в вакууме $\beta^* = U^*/c > 1$ (рис. 15). Для решения проблемы выполнения условия нормировки $\beta^* = 1$ при $Q^2 = 0$ ГэВ² (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.

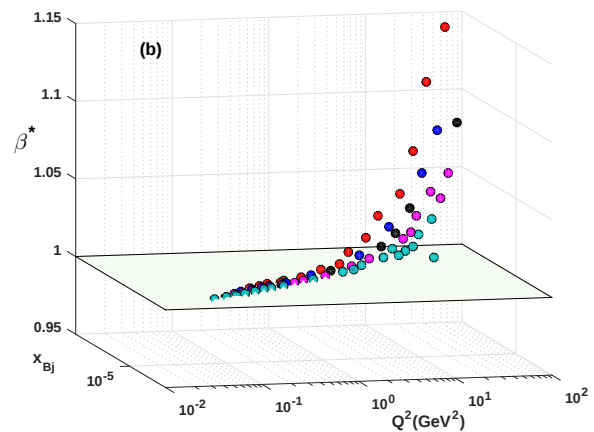


Рис. 15. Нормированная скорость β^* виртуальных фотонов как функция переменных Q^2 , x_{Bj} , y . Различными цветом показаны интервалы неупругостей y : 0.354–0.47 (к); 0.47–0.511 (г); 0.511–0.598 (ч); 0.598–0.676 (п); 0.676–0.951 (з), [86]

2. ПЛАНИРУЕМЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ КОЛЛАЙДЕРЫ

Обсуждаются Большой адронный коллайдер высокой светимости (HL-LHC, CERN), Будущий кольцевой ee -коллайдер (FCC- ee , CERN) и Кольцевой электрон-позитронный коллайдер (CEPC, Китай).

2.1. Влияние собственных полей пучка на динамику пучка в будущих ускорителях [87–90]

В строящемся HL-LHC более 100 коллиматоров и магнитов с параллельными плоскими поверхностями. В данном исследовании анализируется влияние окружающих проводников и магнетиков с плоскими границами на поля, динамику и стабильность пучка под влиянием поверхностных зарядов и токов.

Методом зеркальных зарядов и токов впервые точно вычислены одномерные (1D) и двумерные (2D) распределения электрических (E) и магнитных (B) полей, индуцируемых пучком заряженных частиц между проводящими и ферромагнитными

² Отметим, что математическая зависимость M^2 от J довольно сложна и нелинейна.

параллельными плоскостями. Рассмотрены случаи плоскостей как бесконечной протяженности, так и конечной длины (аналоги коллиматоров и магнитов в ускорителях). Получено улучшенное линейное приближение для полей и новые формулы для когерентных и некогерентных сдвигов бетатронных частот пучка. Оценена величина тока эмиссии электронов в коллиматорах, активируемого электрическим полем протонного пучка, как функция температуры и степени гладкости поверхности материала коллиматора. В кратком обзоре-эссе описана история создания метода изображений Уильямом Томсоном (лорд Кельвин).

2.2. Полевая эмиссия электронов активируемая полем пучка СЕРС [90, 91]

В ближайшем будущем в Китае планируется построить 100-километровый кольцевой электронно-позитронный коллайдер (СЕРС). Технологическая сторона проекта описана в Техническом обзоре (ТО) [92, 93]. Хотя в ТО обсуждаются различные источники вторичных электронов, создающие опасный эффект для ускорителя, в нем не упоминается полевая эмиссия как важный источник вторичных электронов. Как в случае протонного пучка HL-LHC, для позитронного пучка СЕРС точные 2D решения для E и B полей были применены для оценки интенсивности эмиссии электронов, активируемой E полем пучка в коллиматорах будущего коллайдера. Расчет показывает, что интенсивность полевой эмиссии очень чувствительна к шероховатости поверхности коллиматоров, приводящей к локальным усилением внешнего поля на величину β . Кроме того, при относительно небольшом ($\sim 20\%$) и случайном смещении пучка от срединной траектории ток эмиссии увеличивается на много порядков. Наиболее драматичной выглядит ситуация для АРТУЗ коллиматоров СЕРС (рис. 16). Здесь h обозначает величину полуширины зазора между пластинами коллиматора.

При величине зазоров коллиматоров, указанных в технической документации проекта [93], число электронов, испущенных одним коллиматором под действием поля одного позитронного сгустка, может превышать число частиц целого пучка.

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

2.3. Подготовка к исследованиям на будущем кольцевом электрон-позитронном коллайдере

Международное сообщество учёных, работающих в области физики высоких энергий, солидарно во мнении, что следующим ускорительным ком-

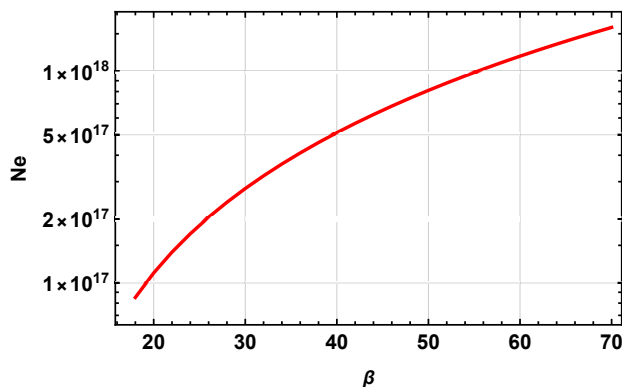


Рис. 16. Число электронов, испущенных одним коллиматором типа АРТУЗ под действием электрического поля одного сгустка позитронного пучка при $h = 0.065$ мм; β — усредненный коэффициент локального усиления поля на поверхности коллиматора

плексом для столкновения частиц при сверхвысоких энергиях должен стать коллайдер электронов и позитронов с энергиями столкновений от ~ 91 ГэВ до ~ 360 ГэВ. К наиболее перспективным проектам такого коллайдера можно отнести проекты FCC-ee [94] (Future Circular Collider) и СЕРС [93]. ОЭФВЭ активно включился в подготовку исследований на будущих коллайдерах и входит в авторские коллективы обоих проектов.

Одним из основных направлений исследований на будущем e^+e^- коллайдере будет физика тяжёлых кварков и лептонов [95]. На рис. 17 представлено распределение по поперечному импульсу начальных (до партонного ливня) b -кварков для событий $e^+e^- \rightarrow \gamma^*/Z^0$ -аннигиляции, смоделированных с помощью генератора событий РУТНIA 8.3. Представлены распределения для энергий 91.2 ГэВ, 160 ГэВ, 240 ГэВ и 360 ГэВ. Около 15% (12%) таких событий приводит к образованию $b\bar{b}$ ($c\bar{c}$) пары кварков. Характерные пики от распадов Z^0 бозонов на пару тяжёлых кварков видны при всех ожидаемых энергиях работы будущего e^+e^- -коллайдера.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

3.1. Исследования свойств сильно взаимодействующей материи в релятивистских соударениях тяжелых ионов

Исследование свойств субъядерной материи в условиях экстремально высоких плотностей энергии и температуры, достигаемых в релятивистских соударениях тяжелых ионов, является относительно молодым и динамично развивающимся научным направлением. Если при максимально достижимых на сегодняшний день в лабораторных условиях энергиях Большого адронного коллайдера (LHC) изучается высокотемпературное состояние кварк-

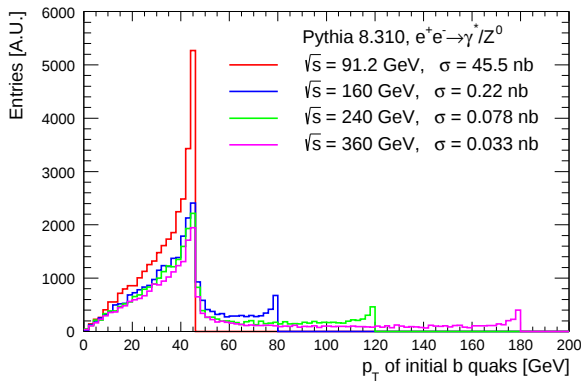


Рис. 17. Распределение по поперечному импульсу начальных (до партонного ливня) b -кварков для смоделированных событий [95] $e^+e^- \rightarrow \gamma^*/Z^0$ -аннигиляции при энергии 91.2 ГэВ (красная гистограмма), 160 ГэВ (синяя гистограмма), 240 ГэВ (зелёная гистограмма) и 360 ГэВ (пурпурная гистограмма)

глюонной среды, близкое по своим свойствам к свойствам «протоматерии», существовавшей в ранней Вселенной, то при промежуточных энергиях ядерных столкновений на коллайдере NICA появляется возможность исследовать динамику кварк-адронных фазовых переходов (включая поиск «критической точки») вблизи их границы. Эти две взаимодополняющие задачи являются одними из актуальнейших в современной ядерной физике высоких энергий.

Подготовка к реализации программы по исследованиям физики тяжелых ионов в эксперименте CMS на LHC велась с самого начала проекта (с 1993 г.), важнейшим элементом которой являлась разработка программного обеспечения и методики анализа данных. В частности, проводилась интеграция Монте-Карло моделей (генераторов событий) в программное обеспечение эксперимента, их поддержка, модернизация и настройка параметров. Был также разработан алгоритм реконструкции адронных струй в соударениях тяжелых ионов, позволяющий разделять струи, инициированные кварками и глюонами [96]. Совокупность полученных в соударениях тяжелых ионов на LHC данных согласуется с формированием горячей материи с гидродинамическими свойствами («кварк-глюонная жидкость»). Дальнейшие исследования соударений тяжелых ионов на LHC включают как углубленный анализ известных эффектов, так и измерение новых физических наблюдаемых, которые становятся доступными по мере увеличения светимости и энергии коллайдера. Обзор основных результатов эксперимента CMS по физике тяжелых ионов можно найти в [97]. В настоящее время ведется интенсивная подготовка к анализу данных эксперимента MPD на коллайдере NICA [98, 99].

Важной частью исследований по релятивистской ядерной физике является компьютерное моделирование физических процессов. Был разработан ряд Монте-Карло моделей: PYQUEN [100],

HYDJET [100], HYDJET++ [101]; в дальнейшем был проделан значительный объем работ по их усовершенствованию. Эти модели были применены для анализа различных эффектов в соударениях тяжелых ионов при энергиях коллайдеров RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ) и LHC ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ), таких как подавление выхода адронных струй, B -, D - и J/ψ -мезонов, модификация формы струй, азимутальная анизотропия спектра частиц и др. При этом модель HYDJET++, изначально разработанная для ультрарелятивистских энергий коллайдеров LHC и RHIC, была адаптирована для диапазона энергий NICA и программы скана энергий RHIC (RHIC BES) [102].

Весьма перспективным направлением исследований в физике тяжелых ионов является экспериментальное и теоретическое изучение зарядовых корреляций и флуктуаций адронов в соударениях тяжелых ионов. Зарядовые корреляции частиц характеризуются «функциями баланса» (ФБ) — плотностью вероятности того, что разноименно заряженные частицы разделены определенными интервалами быстроты и азимутального угла. Ширины ФБ чувствительны ко времени, в течение которого в системе происходит разделение электрического заряда, что дает возможность использования ФБ для получения информации о пространственно-временных характеристиках области испускания частиц. Значительный интерес представляет и изучение флуктуаций суммарного электрического заряда, которые чувствительны к свойствам начального состояния образованной системы. Была разработана и реализована в модели HYDJET++ процедура введения зарядовых корреляций прямых адронов, учитывающая пособытийное сохранение электрического заряда и позволившая воспроизвести как экспериментально наблюдаемые при энергиях LHC зависимости ширин ФБ от центральности соударений Pb+Pb [103] (рис. 18), так и флуктуации суммарного заряда [104]. В дальнейшем [102] было проведено обобщение разработанной процедуры учета зарядовых корреляций прямых адронов в модели HYDJET++ на случай энергий NICA и RHIC BES, что позволило описать данные эксперимента STAR по ширинам ФБ и флуктуациям заряда в соударениях Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ и 11.5 ГэВ.

К настоящему времени разработан, протестирован на модельных данных и включен в программное обеспечение эксперимента MPD алгоритм вычисления функций баланса [99] (рис. 19). Ведутся аналогичные работы по разработке и тестированию алгоритмов для измерения флуктуаций электрического заряда и флуктуаций отношения числа адронов различного типа. В дальнейшем планируется поддержка и усовершенствование разработанных алгоритмов и (после начала работы NICA) их применение для анализа данных MPD.

Помимо двухчастичных корреляций частиц, значительный интерес представляют и многочастичные корреляции. В частности, зависимость факториальных моментов распределения по множественности частиц от размеров области наблю-

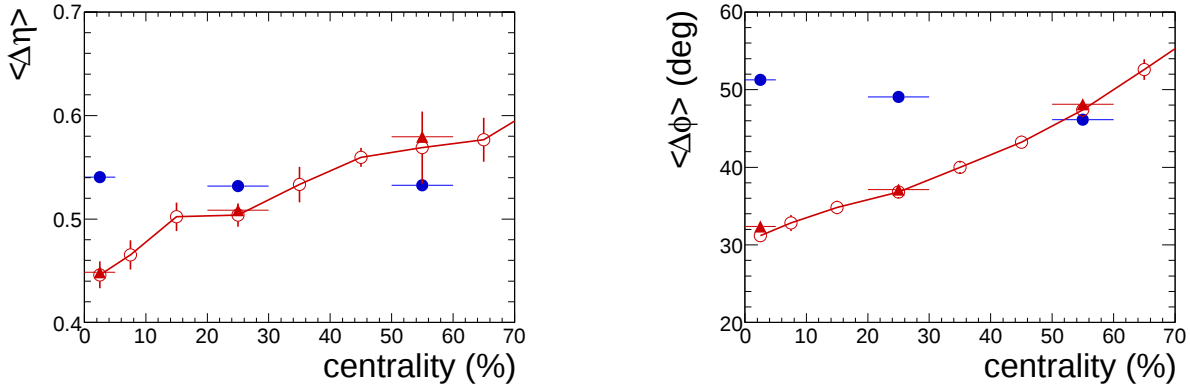


Рис. 18. Зависимость быстротных (слева) и азимутальных (справа) ширин функции баланса от центральности соударений Pb+Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в стандартной (синие круги) и модифицированной (красные треугольники) версиях модели HYDJET++ [103] в сравнении с данными эксперимента ALICE (открытые красные круги, красные кривые — аппроксимация данных)

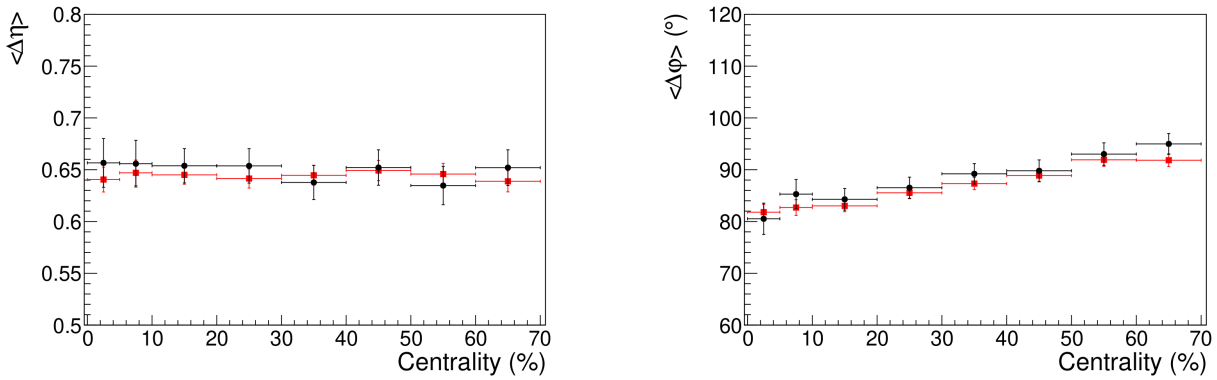


Рис. 19. Зависимость модельных (красные точки) и реконструированных (черные точки) быстротных (слева) и азимутальных (справа) ширин функций баланса заряженных адронов от центральности соударений Bi+Bi при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ ГэВ в модели UrQMD для условий эксперимента MPD [99]

дения несет информацию о пространственно-временной структуре источника. Было проведено модельное исследование [105], показавшее различие зависимостей величины факториальных моментов при их выходе на плато от энергии столкновений тяжелых ионов для фазового перехода первого рода и «кроссовера». Оптимизируется соответствующая методика анализа данных для условий эксперимента MPD.

В рамках транспортной модели UrQMD для соударений Au+Au и диапазона энергий NICA были проведены исследования завихренности (vorticity) [106] и временной эволюции сдвиговой вязкости η и энтропии s [107]. Установлено, что поляризация гиперонов Λ и $\bar{\Lambda}$ усиливается с уменьшением энергии соударений, при этом более сильная поляризация $\bar{\Lambda}$ обусловлена различными пространственно-временными распределениями и условиями «вымораживания» для Λ и $\bar{\Lambda}$ (рис. 20). Полученные результаты хорошо согласуются с дан-

ными RHIC BES. Показано, что отношение η/s достигает минимума ($\min(\eta/s) \approx 0.3$) в момент времени $t \approx 5$ фм/с, а затем растет вплоть до поздних этапов эволюции системы, сопровождаемая снижением температуры и химического потенциала странности и ростом бариохимического потенциала.

Продолжается выявление новых физических наблюдаемых, несущих информацию о механизмах множественного рождения частиц в релятивистских соударениях тяжелых ионов. Так, в работах [108, 109] была предложена такая характеристика коллективных эффектов в начальном и конечном состоянии как двойной фактор ядерной модификации — отношение числа пар частиц данного типа в ядро-ядерных взаимодействиях к числу таких пар в протон-протонных соударениях — и показано, что исследование этой наблюдаемой при различных условиях отбора частиц может быть весьма перспективной задачей.

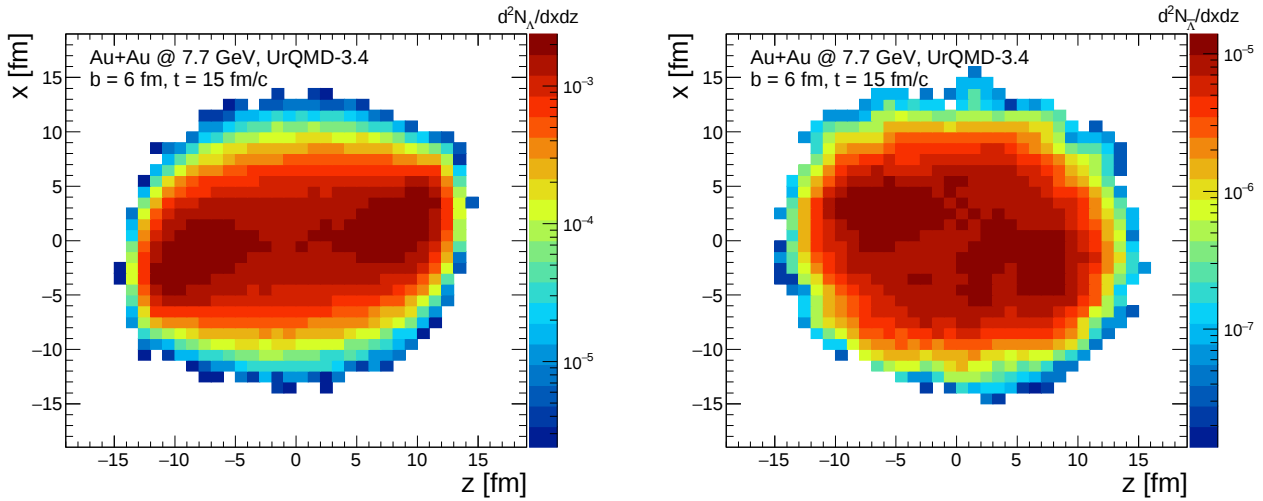


Рис. 20. Распределения плотности Λ (слева) и $\bar{\Lambda}$ (справа) гиперонов в плоскости реакции в момент времени 15 фм/с для соударений Au+Au с параметром удара 6 фм при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ ГэВ [106]

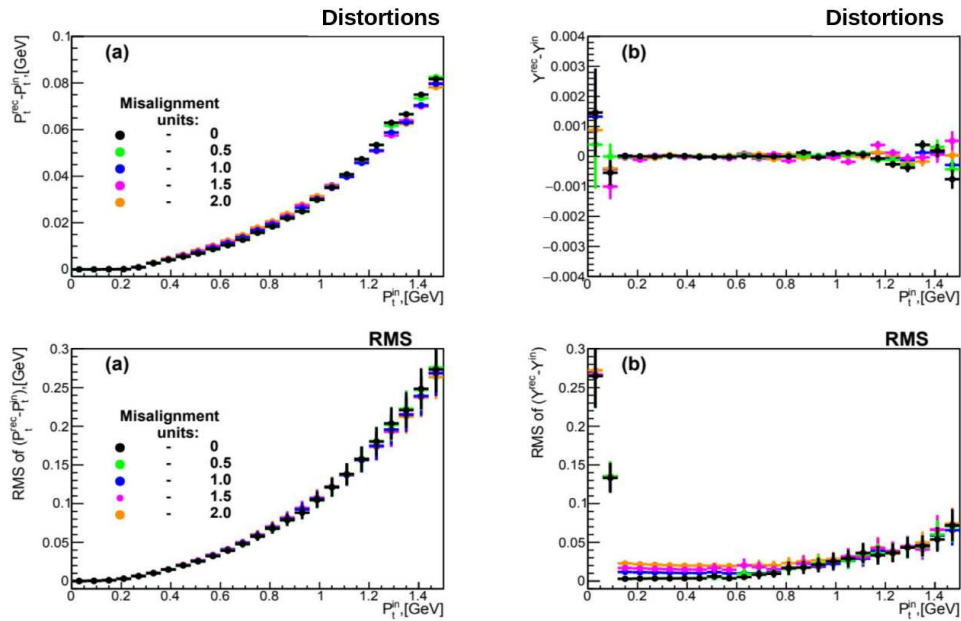


Рис. 21. Ошибки реконструкции треков (поперечный импульс и быстрота) в детекторе MPD

3.2. Исследования в экспериментах на ускорительном комплексе NICA

3.2.1. Юстировка время-проекционной камеры детектора MPD

Для научных публикаций в современной физике высоких энергий становится нормой сравнивать экспериментальные данные с теоретическими моделями, предсказания которых обычно подаются в форме искусственных событий, создаваемых Монте-Карло версией моделей. Искусственные события после обработки программой, моделирующей измерительную установку (детектор), приобретают те же характеристики (вершины, треки и т.п.), как и событие, зарегистрированное в ходе экспе-

римента. Таким образом, точная реконструкция трека частицы необходима для решения широкого спектра физических задач, включая реконструкцию первичных вершин, идентификацию лептонов и кварков и точное измерение инвариантных масс. Трековые детекторы предоставляют основную информацию о заряженных частицах, наблюдаемых в эксперименте, и позволяют определить все кинетические параметры рождающихся при взаимодействии частиц. Точность измеряемых величин зависит от разрешающей способности датчиков устройства и от точного знания их относительного положения в пространстве или от юстировки.

В рамках участия в международной коллаборации по созданию многоцелевого детектора (MPD)

в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) [110, 111] разработана методика юстировки по экспериментальным данным время-проекционной камеры MPD, которая является основным трековым детектором эксперимента, определена точность этой процедуры и показана возможность использования для юстировки лазерной системы детектора, которая спроектирована исключительно для мониторинга свойств газа внутри детектора [112]. Введя меру ошибочной юстировки (misalignment), для ее разных значений была смоделирована работа детектора, что позволило прямо оценить ошибки реконструкции треков, вносимые за счет неправильной юстировки детектора [113]. Результаты представлены на рис. 21. Малое различие между цветными точками указывает на слабую зависимость ошибок реконструированных параметров трека (поперечный импульс и быстрота) от неточной юстировки трекового детектора установки MPD, что упрощает его эксплуатацию. Такие зависимости получены впервые для детекторов подобного масштаба.

3.2.2. Новый метод поиска области фазового перехода в адронной материи в экспериментах MPD и BM@N

В рамках программ этих экспериментов начаты исследования по анализу рождения частиц в релятивистских столкновениях ядер. Базовой программой симуляции в области энергий NICA служит Монте-Карло генератор PYTHIA [114] со встроенной моделью ядерных столкновений ANGANTYR [115]. Поскольку в этой модели не заложена физика коллективных явлений типа кварк-глюонной плазмы, модель представляет существенный интерес для использования в качестве фона для выявления признаков образования нового состояния адронной материи. Конкретно она использована при разработке нового метода поиска сигналов фазовых переходов в ядерной материи.

Идея предложенного метода состоит в следующем [116]:

- поиск отчетливого изменения в зависимости известных (или новых) наблюдаемых величин от энергии и массы сталкивающихся ядер, особенно при центральных столкновениях;
- сканирование по энергии ($\sqrt{s_{NN}}$) и размерам системы сталкивающихся ядер (A_{proj} , A_{targ}) от протонов до $^{197}_{79}\text{Au}$ в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ при фиксированном A_{targ} с использованием генератора PYTHIA/ANGANTYR для оценки соответствующего фона;
- аппроксимация аналогичных данных из PYTHIA/ANGANTYR двумерными зависимостями $f(\sqrt{s_{NN}}, A_{proj})$ и сравнение с экспериментом.

Рис. 22 иллюстрирует результат двумерного фита одной из таких зависимостей, тем самым демонстрируя отсутствие каких-либо изменений режима поведения в PYTHIA/ANGANTYR при энергиях NICA.

Вообще говоря, даже в отсутствие коллективных явлений в таких распределениях могут быть специфические особенности, такие как заметные изменения в поведении, начиная с определенных энергий. Поэтому распределения фитировались функцией, предусматривающей возможность переключения с одного «наклона» на другой, вдоль некоторой параметризованной кривой (в переменных энергия, массовое число). Но второй «наклон» не проявился, в то время как в предыдущей версии PYTHIA/ANGANTYR (без подпроцесса Soft QCD) он присутствовал и исчез только в новой версии, уточненной её авторами при энергиях NICA, по предложению авторов данного исследования, поскольку сравнение с экспериментом при низких энергиях было неудовлетворительным.

Предсказываемая однородность данной и подобных ей зависимостей, которая с предложенной нами функцией получена с хорошим критерием согласия, играет ключевую роль при сравнении с экспериментом. Любое отклонение от однородности в экспериментальных данных, полученное в рамках предложенного метода, по сравнению с PYTHIA/ANGANTYR, может быть сигналом проявления новой физики, а также дает возможность определить границы окрестности начала фазового перехода (если таковой происходит).

3.2.3. Оптимизация геометрии детектора SPD

На ускорителе NICA в Дубне планируется к запуску эксперимент Spin Physics Detector (SPD), который призван разрешить загадку спина нуклонов и вывести исследования в области спиновой физики на новый уровень. В рамках одноименной международной коллаборации ОФВЭ НИИЯФ МГУ принял участие в работе по созданию детектора SPD [117]. В настоящее время проводится моделирование части трекового детектора (End-cap straw detector) с целью определения оптимальной геометрии прибора и наибольшей точности восстановления параметров трека. Для этой цели разработана методика компьютерного эксперимента, позволившая вычислить точности реконструкции продольного и поперечного импульса заряженной частицы для десятков конфигураций детектора и разной сложности реализаций его электроники. Данные исследования помогут выбрать оптимальный вариант проектируемого детектора.

3.2.4. Исследования на установке NICA SPD

ОФВЭ активно участвует в подготовке исследований в эксперименте SPD [118] на коллайдере

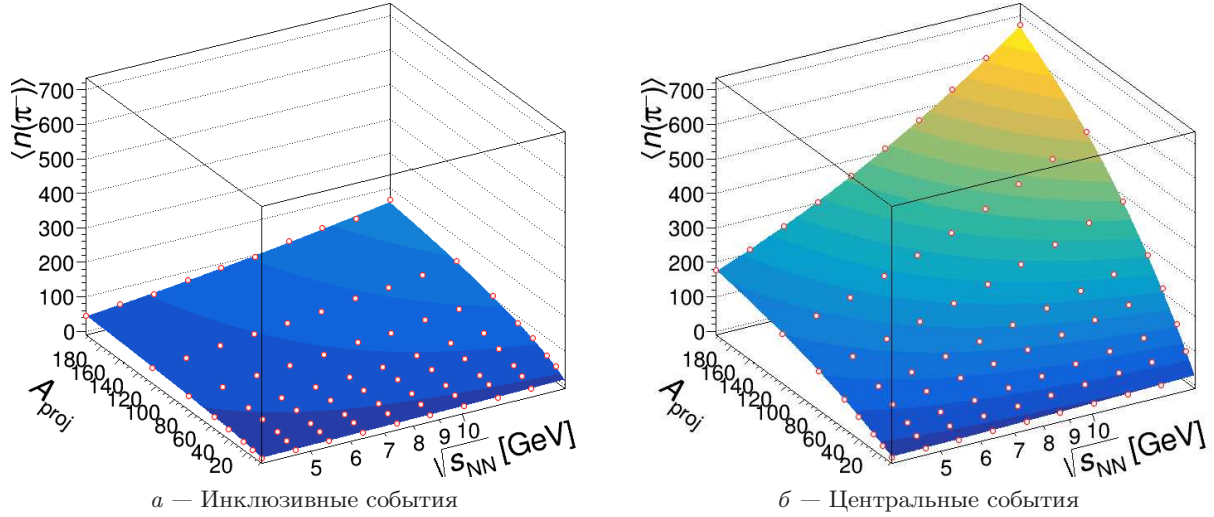


Рис. 22. Пример зависимости средней множественности отрицательно заряженных пионов $\langle n(\pi^-) \rangle$ от энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}}$ и от массового числа A_{proj} одного из ядер (${}^4_2\text{He}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, ${}^{84}_{36}\text{Kr}$, ${}^{124}_{54}\text{Xe}$, ${}^{197}_{79}\text{Au}$), сталкивающихся с ${}^{197}_{79}\text{Au}$, полученной с помощью генератора PYTHIA/ANGANTYR

NICA. Основное внимание уделяется исследованиям на первой фазе работы эксперимента, начало которой ожидается около 2030 г. Во время этой фазы планируется изучение продуктов pp - (и, возможно, pd - и dd -) столкновений при $\sqrt{s}$ от 3.5 до 10 ГэВ.

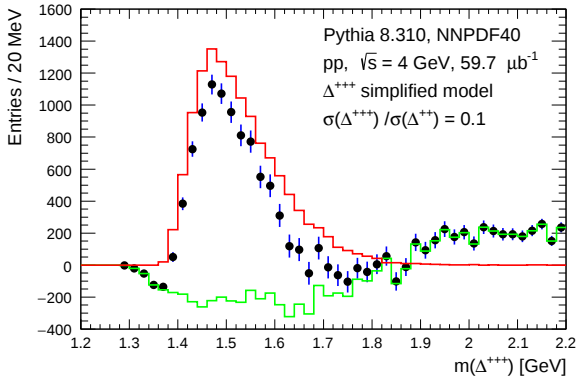


Рис. 23. Распределение по инвариантной массе $m(p\pi^+\pi^+)$ для смоделированных событий [119]. Красной гистограммой представлено распределение для Δ^{+++} пентакварков, зелёной — остаточное распределение комбинаторного фона после вычитания его оценки. Точками представлено реконструированное сигнальное распределение после вычитания оценки комбинаторного фона

В ОЭФВЭ была предложена обширная программа поиска новых и исследования известных пентакварков на коллайдере NICA [119]. В частности, было предложено провести поиск пентакварков с зарядом $+3$, а именно $(uuuud) \equiv \Delta^{+++}$ и $(uuu\bar{u}\bar{s}) \equiv \Delta_s^{+++}$ в их распадах $\Delta^{+++} \rightarrow \Delta^{++}(\rightarrow p\pi^+)\pi^+$ и $\Delta_s^{+++} \rightarrow \Delta^{++}(\rightarrow p\pi^+)K^+$.

Было проведено моделирование рождения и распадов Δ^{+++} и Δ_s^{+++} пентакварков с помощью

подготовленной упрощённой модели, имплементированной в Монте Карло генератор событий Pythia 8.3. На рис. 23 представлено распределение по инвариантной массе трёхчастичных комбинаций $m(p\pi^+\pi^+)$ для смоделированных событий. Только частицы с поперечным импульсом $p_T > 0.15$ ГэВ и псевдобыстротой $|\eta| < 2.5$ использовались в комбинациях для учёта акцептанса детектора SPD. Для оценки формы комбинаторного фона использовались комбинации с частицами из разных событий. На рис. 23 видно, что реконструированное сигнальное распределение, полученное после вычитания оценки комбинаторного фона, удовлетворительно воспроизводит смоделированный сигнал Δ^{+++} .

Также начата работа по настройке методики выделения дифракционных событий в эксперименте SPD. Было проведено моделирование недифракционных и дифракционных событий с помощью генератора событий Pythia 8.3. Анализ смоделированных событий показал, что при энергиях pp -взаимодействий ~ 4 ГэВ большая часть дифракционных событий и значительная часть упругих событий может быть отобрана с помощью регистрации недиссоциировавших протонов в центральном детекторе SPD. С ростом энергии взаимодействия эти доли уменьшаются, но начинает эффективно работать методика регистрации событий с большим зазором в распределении по скорости конечных частиц. Дальнейшая разработка позволит создать универсальную методику для изучения различных дифракционных процессов в эксперименте SPD.

В ОЭФВЭ изучены перспективы наблюдения процесса эксклюзивного рождения ϕ -мезона в условиях эксперимента NICA SPD [118] при энергии протон-протонного взаимодействия 10 ГэВ. В рамках официального программного обеспечения SPDRoot произведено моделирование как сигнальных, так и фоновых событий. Генерация сиг-

нального процесса на настоящем этапе исследования производилась в модели однопионного. Генерация фоновых событий осуществлялась в рамках программного пакета PYTHIA с использованием подпроцесса soft QCD. При анализе исследуемого процесса были применены два основных критерия отбора: требование наличия ровно четырёх треков и требование сохранения суммарного четырёхимпульса. Такие критерии отбора позволяют крайне эффективно подавить фон и гарантировать наблюдение и подробное изучение эксклюзивного рождения ϕ -мезона в условиях первого этапа эксперимента SPD.

Также были разработаны алгоритмы обработки данных с целью выделения сигнала очарованного бариона в распаде $\Lambda_c \rightarrow pK_s$ на первом этапе и в распаде $\Lambda_c \rightarrow pK\pi$ на втором этапе эксперимента SPD. В результате проведённого анализа показано, что значимость сигнала от Λ_c бариона в исследуемом распаде $\Lambda_c \rightarrow pK\pi$ на втором этапе эксперимента достигает величины ~ 13 за год номинальной работы NICA SPD, что предоставляет возможность подробного изучения его свойств. Оценка эффективности регистрации Λ_c в исследуемом распаде $\Lambda_c \rightarrow pK_s$ на первом этапе эксперимента за одну треть года номинальной работы NICA SPD на текущий момент составляет около 2. Возможность регистрации сигнала Λ_c на первом этапе требует дальнейшего изучения. Измерение сечения рождения Λ_c бариона низких и средних энергиях крайне важно для понимания механизмов адронизации.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ В ИСКРИВЛЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ

Рассмотрена серия задач, нацеленных на исследование свойств квантовых полей в сильных гравитационных полях [120], построение и анализ моделей темной материи, а также изучение квантовых эффектов в теориях с дополнительными измерениями [121–124]. Полученные результаты могут быть полезными при рассмотрении различных моделей темной материи и темной энергии.

4.1. Квантование полей в окрестности чёрных дыр

Получены точные физические решения уравнения Клейна–Гордона для массивного скалярного поля в гравитационных полях различных типов сферически симметричных и вращающихся чёрных дыр в общей теории относительности. Рассмотрены метрики Шварцшильда, Рейснера–Нордстрёма (включая случай с черной дырой, имеющей ненулевой магнитный заряд), а также Керра и Керра–Ньюмена. Для всех указанных метрик получены точные выражения для нормировки физических состояний скалярного поля и вы-

числен их энергетический спектр. Показано, что в рассмотренных метриках для скалярного поля возникает удвоение числа состояний инфинитного движения — топологический эффект, аналогичный обнаруженному ранее в некоторых работах для решений в пространстве-времени Шварцшильда. Существенным результатом является аналитическое описание состояний скалярного поля вблизи горизонта событий: оказывается, что в пространстве-времени любых черных дыр ОТО в вакууме радиальная часть физических решений для скалярного поля выражается через конфлюэнтные функции Гойна (НС):

$$R(\rho) = A_1 \text{HC}(a, b, c, d, e; \rho) + A_2 \rho^{1-c} \times \text{HC}(a + (1-c)(e-d), b + (1-c)e, 2-c, d, e; \rho),$$

где соответствующие функциональные параметры и нормировочные константы известным образом зависят от таких характеристик черной дыры, как масса, вращательный момент, электрический и магнитный заряды, а ρ есть соответствующим образом нормированная радиальная переменная.

Полученные результаты важны для построения последовательной схемы квантования физических полей в пространстве-времени черных дыр, и, в частности, для строго описания процесса испарения и оценки времени жизни черной дыры. Это, в свою очередь, имеет прямое значение для современной космологии: первичные черные дыры рассматриваются как перспективные кандидаты на роль темной материи, а также как возможный фактор формирования крупномасштабной структуры Вселенной на ранних стадиях ее эволюции.

4.2. Модели темной материи и исследование их пространства параметров

Построена и проанализирована новая самосогласованная модель темной материи, основанная на расширении калибровочной группы СМ дополнительной абелевой симметрией и включающая новые векторные, скалярные и фермионные поля. Выписаны точные лагранжианы взаимодействия полей СМ с полями темного сектора, подробно исследован сценарий легких медиаторов. Проведён анализ параметров модели, релевантных для перспективных поисков ТМ на электрон-позитронных коллайдерах нового поколения. Получены распределения сечений ассоциативного рождения частиц ТМ в паре с тау-лептонами при характерных энергиях перспективных кольцевых e^+e^- -коллайдеров, а также вычислены дифференциальные сечения для случаев скалярных и векторных медиаторов. Показано существенное различие в угловом поведении соответствующих процессов, что открывает дополнительные экспериментальные возможности для их различения.

4.3. Квантовые эффекты в теориях с дополнительными измерениями

В стабилизированной модели Рэндалл–Сундрума, содержащей дельтаобразные потенциалы, описывающие браны, выполнено вычисление поправок к плотности энергии поля Гольдбергера–Вайза, возникающих вследствие эффекта Казимира. Аналогичные оценки получены и для гравитационных тензорных мод. При реалистичных оценках на параметры модели суммарная квантовая поправка к плотности энергии составляет примерно

$$P_{ren}^0 \sim -1.2 \times 10^{10} \text{ ТэВ}^4. \quad (1)$$

Таким образом, плотность энергии Казимира в модели Рэндалл–Сундрума отрицательна, что приводит к взаимному притяжению бран. Тем не менее оказывается, что квантовые поправки не нарушают устойчивость рассматриваемой модели: изменения параметров модели оказываются пренебрежимо малыми и не модифицируют форму классического фонового решения. Например, относительное уменьшение расстояния между бранами под воздействием силы Казимира оказывается порядка $\Delta L/L \sim 10^{-26}$. Подчеркнем, что, поскольку оценки изменения параметров модели основаны на результатах перенормировки тензора энергии-импульса физических полей, распространяющихся в балке, то они вряд ли могут быть получены из соображений размерности или иными классическими методами. Полученные результаты не зависят от выбранной схемы регуляризации и могут быть использованы для построения различных обобщений модели Рэндалл–Сундрума с неплоскими бранами, что может быть полезно для описания такого явления, как темная энергия. Материалы настоящего исследования легли в основу диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук [125].

5. МОДЕЛИ РОЖДЕНИЯ РЕЗОНАНСОВ И СВОЙСТВА РЕДКИХ РАСПАДОВ B -МЕЗОНОВ

В ОЭФВЭ выполнено детальное теоретическое изучение рождения адронов, включающих два тяжелых кварка (дважды тяжёлые адроны) в различных взаимодействиях. Эти исследования играют важную роль в выработке стратегии экспериментального изучения дважды тяжёлых адронов. Недавно ими впервые оценён выход D волновых состояний B_c мезонов в адронных взаимодействиях. Было показано, что в рамках цветовой синглетной модели выход D волновых состояний составляет около 1% общего выхода B_c -мезонов. Бóльший выход таких состояний будет свидетельствовать в пользу октетного механизма образования D волновых состояний B_c мезонов [126]. Предсказания непосредственным образом могут быть проверены на будущих данных ЛНС.

В рамках теоретических исследований, проводимых в ОЭФВЭ, решена проблема, которая является одной из ключевых при исследовании редких распадов мезонов, а именно оценен вклад петель c -кварков в FCNC B -распады. Для решения этой проблемы получено калибровочно-инвариантное выражение для нелокального оператора, описывающего излучение фотона и глюона из петли чарма. В исследовании показано, что вычисление нефакторизуемой поправки к амплитуде FCNC распада B -мезона не сводится к свертке жесткого ядра и коллинеарной 3-частичной кварк-антикварк-глюонной функции распределения партонов на световом конусе в B -мезоне, так как такая функция распределения не отражает свойств рассматриваемого процесса и должна быть заменена на так называемую двойную коллинеарную 3-частичную кварк-антикварк-глюонную функцию. Сформулированный подход позволяет систематическое вычисление нефакторизуемого вклада чарма в различные классы редких FCNC распадов B -мезонов. В настоящем исследовании в рамках развитого теоретического подхода получены оценки для форм-факторов, определяющих вклад нефакторизуемого чарма в амплитуды редких FCNC распадов B -мезонов в реальный фотон и лептонную пару в конечном состоянии. Показано, что вклады Новой физики (включая сценарии лёгкой материи) могут наблюдаться в исследуемых распадах B -мезонов только если их вклады превышают 11% от вклада Стандартной модели. Результаты исследования опубликованы в работах [127, 128].

В свете интригующих результатов коллаборации Belle II [129], обнаружившей распад $B \rightarrow KM_x$ на уровне, приблизительно в 5 раз превышающем ожидание СМ для распада $B \rightarrow \nu\bar{\nu}$ (единственный распад СМ, дающий вклад в реакцию $B \rightarrow KM_x$), рассмотрено объяснение данного эффекта в рамках сценария лёгкой тёмной материи со скалярным и векторным медиаторами.

В частности, в исследовании показано, что измеренное дифференциальное распределение K -мезонов в распадах B -мезона на K -мезон и потерянную массу может быть описано за счёт взаимодействия топ-кварка обычной материи с фермионами тёмной материи посредством обмена скалярным медиатором. Проведённое фитирование данных Belle II показало, что промежуточная частица в таком сценарии должна иметь массу около 2.5 ГэВ и сравнимую с массой ширины распада. Сами же фермионы тёмной материи при этом оказываются довольно лёгкими, имея массу около 0.4 ГэВ (см. рис. 24).

В рамках того же сценария со скалярным медиатором авторами работы получены предсказания для распада прелестного заряженного мезона на K^* -мезон и недостающую массу. При этом авторами впервые продемонстрировано, что в таком сценарии дифференциальные распределения распадов с K^* -мезоном и K -мезоном в конечном состоянии оказываются примерно равными друг другу как по

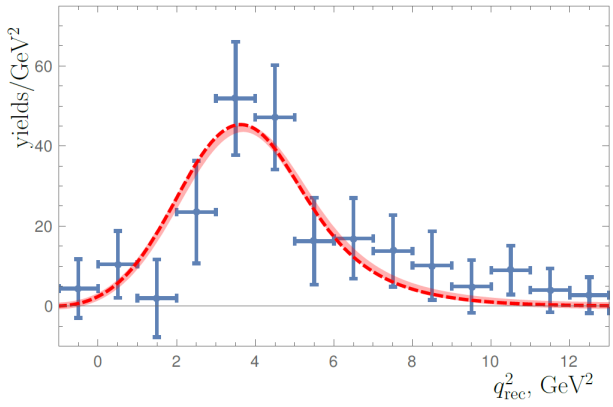


Рис. 24. Данные Belle II по распаду B -мезона на K -мезон и недостающую массу, отфитированные моделью со скалярной промежуточной частицей массой 2.4 ГэВ, шириной 2.8 ГэВ и фермионом тёмной материи массой 0.42 ГэВ, что соответствует минимуму χ^2 (сплошная кривая); $q^2_{\text{rec}} = E_B^2 + m_K^2 - 2E_BE_K$, где E_B и E_K — энергии соответствующих мезонов в системе центра масс e^+e^- -пары. Для сравнения приведено аналогичное распределение для распада B -мезона на векторный K^* -мезон и недостающую массу (штриховая кривая)

форме, так и по абсолютному значению (ср. сплошную и штриховую кривые на рис. 24). Это весьма важный результат, так как такое поведение является однозначной сигнатурой сценария тёмной материи со скалярной промежуточной частицей: другие сценарии предсказывают различные выходы для процессов $B \rightarrow K$ и $B \rightarrow K^*$.

Таким образом, если полученные в будущем экспериментальные данные для процесса будут соответствовать предсказаниям авторов, то сценарий со скалярным медиатором должен будет рассматриваться в качестве основного. Если же выходы для процессов $B \rightarrow K$ и $B \rightarrow K^*$ окажутся различными, то сценарий со скалярным медиатором будет отброшен.

Аналогичное исследование было проведено также для случая векторного медиатора. Результаты опубликованы в работах [130, 131].

Исследования выполнены в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

- [1] Boos E.E., Bunichev V.E., Dudko L.V. et al. // *Phys. Atom. Nucl.* **69**, 1317 (2006)
- [2] Abazov V.M. et al. (*D0 Collaboration*) // *Phys. Rev. Lett.* **103**, 092001 (2009)
- [3] Aaltonen T.A. et al. (*CDF and D0 Collaborations*) // *Phys. Rev. Lett.* **112**, 231803 (2014)
- [4] Khachatryan V. et al. (*CMS Collaboration*) // *JHEP* **02**, 028 (2017)
- [5] Boos E., Bunichev V., Dudko L., Perfilov M. // *Int. J. Mod. Phys. A* **32**, N 02n03, 1750008 (2016)
- [6] Abazov V.M. et al. (*D0 Collaboration*) // *Phys. Lett. B* **708**, 21 (2012)
- [7] Abazov V.M. et al. (*D0 Collaboration*) // *Phys. Lett. B* **699**, 145 (2011)
- [8] Boos E., Bunichev V., Dudko L., Perfilov M. // *Phys. Lett. B* **655**, 245 (2007)
- [9] Sirunyan A.M. et al. (*CMS Collaboration*) // *Phys. Lett. B* **820**, 136535 (2021)
- [10] Hayrapetyan A. et al. (*CMS Collaboration*) // *JHEP* **05**, 046 (2024)
- [11] Abasov E., Boos E., Bunichev V. et al. // *Phys. Part. Nucl.* **56**, N 2, 440 (2025)
- [12] Abasov E., Boos E., Bunichev V. et al. // *arXiv:2510.09428 [hep-ph]*
- [13] Boos E.E., Bunichev V.E., Dudko L.V. // *Phys. Part. Nucl.* **56**, N 2, 429 (2025)
- [14] Abasov E., Boos E., Bunichev V. et al. // *Int. J. Mod. Phys. A* **39**, N 31, 2450126 (2024)
- [15] Aleshko A., Boos E., Bunichev V., Dudko L. // *Int. J. Mod. Phys. A* **39**, N 32, 2450119 (2024)
- [16] Aleshko A.M., Boos E.E., Bunichev V.E., Dudko L.V. // *Phys. Part. Nucl.* **56**, N 2, 374 (2025)
- [17] Dudko L. (for *CDF and D0 Collaborations*) Search for single top quark production at the Tevatron. Contribution to: 35th Rencontres de Moriond: QCD and High Energy Hadronic Interactions, 63-66 (2000)
- [18] Dudko L. (for *D0 Collaboration*) “Use of neural networks in a search for single top quark production at D0”, // *AIP Conf. Proc.* **583**, N 1, 83 (2002), Contribution to: ACAT 2000, 83-85
- [19] Abazov V.M. et al. (*D0 Collaboration*) // *Phys. Lett. B* **517**, 282 (2001)
- [20] Abbott B. et al. (*D0 Collaboration*) // *Phys. Rev. D* **63**, 031101 (2000)
- [21] Hinton G.E. // *Rev. Mod. Phys.* **97**, 030502 (2025)
- [22] Abasov E., Dudko L., Iudin E. et al. // *arXiv:2504.14303 [hep-ph]*
- [23] Abasov E., Dudko L., Iudin E. et al. // *arXiv:2510.11644 [hep-ph]*
- [24] Abasov E.E., Volkov P.V., Vorotnikov G.A. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **79**, N (Suppl 2), S585 (2024)
- [25] Boos E.E., Dudko L.V., Bunichev V.E. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **79**, N (Suppl 1), 179 (2024)
- [26] Zaborenko A.D., Volkov P.V., Dudko L.V., Perfilov M.A. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **78**, N (Suppl 1), S80 (2023)
- [27] Abasov E.E., Belobrova M.I., Volkov P.V. et al. // *Phys. Atom. Nucl.* **85**, N 6, 708 (2022)
- [28] Boos E.E., Bunichev V.E., Dudko L.V., Markina A.A. // *Phys. Atom. Nucl.* **71**, N 2, 388 (2008)
- [29] Dudko L., Vorotnikov G., Volkov P. et al. // *Int. J. Mod. Phys. A* **35**, N 21, 2050119 (2020)
- [30] Boos E.E., Bunichev V.E., Dudko L.V. et al. // *Phys. Atom. Nucl.* **73**, 971 (2010)
- [31] Boos E., Dudko L. // *Nucl. Instrum. Meth. A* **502**, 486 (2003)
- [32] Sirunyan A.M. et al. (*CMS Collaboration*). // *Eur. Phys. J. C* **81**, 852 (2021)
- [33] Sirunyan A.M. et al. (*CMS Collaboration*). // *JHEP* **11**, 161, (2018)

- [34] Tumasyan A. et al. (CMS Collaboration) // *Phys. Rev. D* **108**, N 9, 092004 (2023)
- [35] Amapane N., Klyukhin V. // *Symmetry* **15**, 1030 (2023)
- [36] Klyukhin V. // *Symmetry* **13**, 1052 (2021)
- [37] Klyukhin V. (for the CMS Collaboration) // *SN Appl. Sci.* **4**, 235 (2022)
- [38] Sirunyan A. M. et al. (CMS Collaboration). // *JINST* **15**, P06009 (2020)
- [39] Sirunyan A. M. et al. (CMS Collaboration). // *JINST* **15**, P05002 (2020)
- [40] Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration) // *JINST* **16**, p02010 (2021)
- [41] Andreev V. et al. // *Eur. Phys. J. C* **N 63**, 601 (2010)
- [42] Bogdanova G., Behrens U., Lukina O. et al. "CMS MicroTCA monitoring tool based on the SCADA system SIMATIC WinCC OA", Poster at "The 5th MicroTCA Workshop for Industry and Research", 7-8 December 2016 (DESY, Hamburg).
- [43] Волков В.Ю., Волков П.В. Система управления распределёнными потоками информации с электронных модулей стандарта электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений // Свид. о Госрегистрации ПО для ЭВМ №2017610074 (2017), п/о МГУ им. Ломоносова.
- [44] Богданова Г.А., Волков П.В., Волков В.Ю., Лукина О.Ю. Локальный сервер мониторингирования электронных модулей в стандарте электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений. // Свид. о Госрегистрации ПО для ЭВМ №2017613585, (2017), п/о МГУ им. Ломоносова
- [45] Волков П.В., Лукина О.Ю. Низкоуровневый интерфейс связи с электронным оборудованием для детекторов частиц, // Свид. о Госрегистрации ПО для ЭВМ №2017613844, (2017), п/о МГУ им. Ломоносова
- [46] Богданова Г.А., Волков П.В. Система человеко-машинного интерфейса для контроля и мониторингирования детекторов частиц. // Свид. о Госрегистрации ПО для ЭВМ № 2017614938, (2017), п/о МГУ им. Ломоносова
- [47] Gingrich D. et al. "ATLAS: Letter of intent for a general purpose p p experiment at the large hadron collider at CERN", CERN-LHCC-92-04, CERN-LHCC-I-2, 1 October 1992.
- [48] Aad G. et al. (ATLAS Collaboration). // *Eur. Phys. J. C* **81**, 342 (2021)
- [49] Aad G. et al. (ATLAS Collaboration). // *JHEP* **08**, 087 (2022)
- [50] Aad G. et al. (ATLAS Collaboration). // *Phys. Rev. Lett.* **131**, 151902 (2023)
- [51] Aad G. et al. (ATLAS Collaboration). // *arXiv:2509.13101 [hep-ex]*, submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- [52] Aad G. et al. (ATLAS Collaboration). // *JHEP* **07**, 086 (2025)
- [53] Aaij R. et al. (LHCb Collaboration) // *JHEP* **03**, 153 (2022)
- [54] Aaij R. et al. (LHCb Collaboration) // *JHEP* **04**, 046 (2022)
- [55] Aaij R. et al. (LHCb Collaboration) // *JHEP* **11**, 121 (2024)
- [56] Augusto Al.Jr.A., Andrade F.L.M., Barbosa A. F. et al. (LHCb Collaboration) // *Journal of Instrumentation* **3**, S08005 (2008)
- [57] Calabrese R. et al. // *Journal of Instrumentation* **17**, N 7, P07013 (2022)
- [58] Соломин А.Н. Триггер высокого уровня в эксперименте LHCb: метод интеллигентного прескей линга. // Доклад на конференции «Ломоносовские чтения–2024». Секция ядерной физики (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына), 20 марта 2024 (Москва, Россия).
- [59] Bisio P. (for NA64 Collaboration) // *PoS DISCRETE2022*, 072 (2024)
- [60] Andreev Y. M. et al. (NA64 Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* **131**, N 16, 161801 (2023)
- [61] Andreev Y. M. et al. (NA64 Collaboration) // *Phys. Rev. D* **109**, N 3, L031103 (2024)
- [62] Andreev Y. M. et al. (NA64 Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* **132**, N 21, 211803 (2024)
- [63] Andreev Y. M. et al. (NA64 Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* **133**, N 12, 121803 (2024)
- [64] Andreev Y. M. et al. (NA64 Collaboration) // *arXiv:2505.14291 [hep-ex]*
- [65] Меркин М.М. Доклад на конференции «Научная сессия к 75-летию НИИЯФ» (2021).
- [66] Перфильев М. и др. // Международная научная компьютерная сеть Radio-MSU.
- [67] Бережнев С.Ф. и др. // Препринт НИИЯФ МГУ № 2007-14/835
- [68] Abt I. et al. (H1 and ZEUS Collaborations) // *Eur. Phys. J. C* **82**, N 3, 243 (2022)
- [69] Abt I. et al. (ZEUS Collaboration) // *Eur. Phys. J. C* **83**, N 11, 1082 (2023)
- [70] Gizhko A. et al. (ZEUS Collaboration) // *Phys. Lett. B* **775**, 233 (2017)
- [71] Lipka K. // *EPJ Web of Conf.* **28**, 02008 (2012)
- [72] Proskuryakov A. S. // *Phys. Part. Nuclei* **38**, 129 (2007)
- [73] Newman P. R., Wing M. // *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1037 (2014)
- [74] Abramowicz H. et al. (H1 and ZEUS Collaborations) // *Eur. Phys. J. C* **78**, N 6, 473 (2018)
- [75] Abt I. et al. (ZEUS Collaboration) // *JHEP* **12**, N 12, 164 (2022)
- [76] Abt I. et al. (ZEUS Collaboration) // *Phys. Rev. D* **101**, N 11, 11209 (2020)
- [77] Abt I. et al. (ZEUS Collaboration) // *JHEP* **04**, 070 (2020)
- [78] Abramowicz H. et al. (ZEUS Collaboration) // *Phys. Rev. D* **99**, N 9, 092006 (2019)
- [79] Abt I. et al. (ZEUS Collaboration) // *Phys. Rev. D* **107**, 092008 (2023)
- [80] Chekanov S. et al. (ZEUS Collaboration) // *Eur. Phys. J. C* **65**, 65 (2010)
- [81] Abramowicz H. et al. (H1 and ZEUS Collaborations) // *Eur. Phys. J. C* **73**, N 2, 2311 (2013)
- [82] Abramowicz H. et al. (ZEUS Collaboration) // *JHEP* **09**, 127 (2014)
- [83] Peredo M., Hentschinski M. // *Phys. Rev. D* **109**, N 1, 014032 (2024)
- [84] Abramowicz H. et al. (ZEUS Collaboration) // *Phys. Lett. B* **757**, 468 (2016)
- [85] Chekanov S. V., Levchenko B. B. // *Phys. Rev. D* **75**, 014007 (2007)
- [86] Levchenko B. B. // *Moscow Univ. Phys.* **79**, (Suppl 1), 362 (2024)
- [87] Levchenko B. B. // *PTEP* **2020**, N 1, 013 (2020)
- [88] Левченко Б.Б. // *ТМФ* **203**, N 2. 311 (2020). // *РФРП* **203**, N 2, 311 (2020)
- [89] Levchenko B. B. // *Theor. Math. Phys.* **203**, 700

- (2020)
- [90] *Levchenko B. B.* // *Progress In Electromagnetics Research C*, **103**, 83 (2020)
- [91] *Levchenko B. B.* // Field emission effects in the Circular Electron Positron Collider (CEPC). Talk at The XXV International Workshop-School, High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'270), 05.07.2025 (Moscow, 2025).
- [92] *Gao J.* // The status of the CEPC project. Talk at The XXV International Workshop-School, High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'270), 30.06.2025 (Moscow, 2025).
- [93] *Gao J. et al.* // *Radiat. Detect. Technol. Methods* **8**, 1 (2024)
- [94] *Abada A. et al.* FCC-ee: The Lepton Collider, // *Eur. Phys. J.: Special Topics* **228**, 261 (2019)
- [95] *Gladilin L. K.* Studies of heavy flavors physics at a future e^+e^- collider. Talk at The XXV International Workshop-School, High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'270), 29.06–05.07.2025 (Moscow, 2025).
- [96] *Образцов С.В., Кодолова О.Л.* // *ВМУ. Физика. Астрономия*. **78**, 2350203 (2023).
- [97] *Harapatyán A. et al. (CMS Collaboration).* // *Phys. Rept.* **1115**, 219 (2025)
- [98] *Abgaryan V. et al. (MPD Collaboration).* // *Eur. Phys. J. A* **58**, 140 (2022)
- [99] *Abdulin R. et al. (MPD Collaboration).* // *Rev. Mex. Fis.* **71**, 04102 (2025)
- [100] *Lokhtin I. P., Snigirev A. M.* // *Eur. Phys. J. C* **45**, 211 (2011)
- [101] *Lokhtin I. P., Malinina L. V., Petrushanko S. V. et al.* // *Comput. Phys. Commun.* **180**, 779 (2009)
- [102] *Забродин Е.Е., Коротких В.Л., Лохтин И.П. и др.* // *ЖЭТФ* **166**, 240 (2024).
- [103] *Chernyshov A. S., Eyyubova G. Kh., Korotkikh V. L. et al.* // *Chin. Phys. C* **47**, 084107 (2023)
- [104] *Ambaryan G. O., Chernyshov A. S., Eyyubova G. Kh. et al.* // *Chin. Phys. C* **49**, 014107 (2025)
- [105] *Cheremnova M., Chernyshov A., Khyzhniak Ye. et al.* // *Symmetry* **14**, 1316 (2022)
- [106] *Vitiuk O., Bravina L., Zabrodin E.* // *Phys. Lett. B* **803**, 135298 (2020)
- [107] *Zabrodin E., Bravina L., Teslyk M., Vitiuk O.* // *Nucl. Phys. A* **1005**, 121861 (2021)
- [108] *S. P. Baranov, A. V. Lipatov, M. A. Malyshev, A. M. Snigirev* // *JETP Lett.* **119**, 823 (2024)
- [109] *Chernyshov A. S., Lokhtin I. P., Snigirev A. M.* // *JETP Lett.* **122**, 265 (2025)
- [110] *Abraamyan Kh. U., Afanasiev S. V., Alfeev V. S. et al.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **628**, N1, 99 (2011)
- [111] *Golovatyuk V., Kekelidze V., Kolesnikov V. et al.* // *Eur. Phys. J. A* **52**, N8, 212 (2016)
- [112] *Kuzmin V.* // *Physics* **5**, N2, 508 (2023)
- [113] [113] *Кузьмин В.А.* // *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. **80**, N 3, 2530204 (2025).
- [114] *Bierlich C., Chakraborty S., Desai N. et al.* // *SciPost Phys. Codebases*, 8 (2022)
- [115] *Bierlich C., Gustafson G., Lönnblad L. et al.* // *JHEP* **10**, 134 (2018)
- [116] *Щеглова Л.М., Соломин А.Н.* Angantyr (PYTHIA 8.3.13): соп и про II-сравнение новой версии модели с экспериментом в области энергий NICA ($4 < \sqrt{s_{NN}} < 11$ ГэВ). // Доклад 2350203–25 на конференции «Ломоносовские чтения-2025». Секция ядерной физики (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына), 25 марта 2025 (Москва, Россия). <http://sinp.msu.ru/ru/post/27422>
- [117] *Ladygin V. P.* Proceedings of the 24th International Spin Symposium (SPIN2021) // *Journal of the Physical Society of Japan* **10**(2022)
- [118] *Abazov V. et al. (SPD Collaboration).* // *Natural Science Review* **1**, 1 (2024)
- [119] *Гладилин Л.К.* Пентакварки NICA. Доклад на Научной сессии секции ядерной физики ОФН РАНю 1-5.04.2024 (ОИЯИ, Дубна).
- [120] *Keizerov S. I., Rakhmetov E. R., Smolyakov M. N., Volobuev I. P.* // *Phys. Part. Nucl.* **56**, N2, 162 (2025)
- [121] *Rakhmetov E. R., Volobuev I. P., Keizerov S. I.* // *Phys. Part. Nucl.* **56**, N2, 168 (2025)
- [122] *Boos E. E., Bunichev V. E., Volobuev I. P. et al.* // *Usp. Fiz. Nauk* **195**, N2, 116 (2025)
- [123] *Volobuev I. P., Keizerov S. I., Rakhmetov E. R.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **79**, N2, 156 (2024)
- [124] *Volobuev I. P., Keizerov S. I., Rakhmetov E. R.* // *Teor. Mat. Fiz.* **205**, N1, 84 (2020)
- [125] *Кейзеров С.И.* Самодействие и взаимодействие радиона с полями Стандартной модели. // Дис... канд. физ.-мат. наук, специальность 1.3.15 — физика атомных ядер и элементарных частиц; МГУ имени М.В.Е.Ломоносова, 20.09.2024
- [126] *Berezhnoy A. V., Belov I. N., Likhoded A. K.* // *Phys. Rev. D* **103**, 11400 (2021)
- [127] *Belov I., Berezhnoy A., Melikhov D.* // *Phys. Rev. D* **108**, 094022 (2023)
- [128] *Belov I., Berezhnoy A., Melikhov D.* // *Phys. Rev. D* **109**, 114012 (2024)
- [129] *Adachi I. et al. (Belle II Collaboration)* // *Phys. Rev. D* **109**, 112006 (2024)
- [130] *Berezhnoy A., Lucha W., Melikhov D.* // *EPL* **145**, 14001 (2024)
- [131] *Berezhnoy A., Lucha W., Melikhov D.* // *Phys. Rev. D* **111**, 075035 (2025)

REVIEW

Research on the fundamental properties of matter

A. M. Aleshko, A. V. Berezhnoy, E. E. Boos, A. S. Chernyshov, L. V. Dudko^a, A. A. Ershov, G. Kh. Eyyubova, L. K. Gladilin, I. V. Gorelov, A. M. Gribushin, S. I. Keyzerov, L. A. Khein, V. I. Klyukhin, O. L. Kodolova, V. L. Korotkikh, V. A. Kuzmin, B. B. Levchenko^b, I. P. Lokhtin, O. Yu. Lukina, A. A. Markina, D. I. Melikhov, M. M. Merkin, M. A. Perfilov, S. V. Petrushanko, E. R. Rakhmetov, D. V. Savrina, L. M. Shcheglova, A. M. Snigirev, A. N. Solomin, I. N. Vardanyan, P. V. Volkov, G. A. Vorotnikov, E. E. Zabrodin

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University

Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a dudko@www-hep.sinp.msu.ru, ^b levchenko@www-hep.sinp.msu.ru

The review presents the main areas of research and the results obtained in particle physics and relativistic nuclear physics. The work combines participation in major international collaborations (CMS, ATLAS, LHCb, NA64, ZEUS, D0, BM@N, MPD, SPD) with the development of in-house theoretical and phenomenological approaches; a substantial part of the presented results was obtained by the team of the Department of Experimental High Energy Physics at SINP MSU. Considerable attention is devoted to the study of top-quark properties: searches for FCNC processes and anomalous contributions to the Wtb vertex have been performed, constraints on SMEFT operators have been obtained, New Physics scenarios and the connection between top-quark physics and dark matter have been investigated. Modern machine learning methods — Normalizing Flows, Kolmogorov–Arnold networks, and others, — have been developed and implemented, enabling the reconstruction of invisible-particle momenta and the analysis of spin correlations. A significant contribution has also been made to the development of detector technologies: the CASTOR calorimeter was constructed and improved, methods for radiation-field monitoring and calibration of the CMS hadron calorimeter were developed, as well as an mTCA electronics monitoring software suite for HL-LHC conditions. Theoretical and phenomenological studies cover a broad range of areas — from modelling processes in heavy-ion collisions (PYQUEN, HYDJET, HYDJET++) and preparing the analysis of data from the MPD experiment at the NICA collider to the study of low-energy nucleon–nucleon interactions and solutions of the Klein–Gordon equation in the geometries of rotating and charged black holes. The results obtained demonstrate the active development of experimental, computational, and theoretical methods and make a substantial contribution to modern high-energy physics, providing a basis for further research in particle physics, astrophysics, and cosmology.

PACS: 03.70.+k, 14.65.Ha, 14.80.-j, 14.40.Nd

Keywords: high-energy physics, Standard Model, top quark, Effective Field Theory (SMEFT), New Physics (Beyond-Standard-Model Physics), dark matter, machine learning, hadron calorimeter, radiation monitoring, CASTOR calorimeter, heavy ions, Monte Carlo modelling, HYDJET/PYQUEN event generators, NICA collider .

Received 20 December 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2026. **81**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

- Алешко Алексей Михайлович — ведущий программист; тел.: +7 981 952-09-03, e-mail: aleshkoam@my.msu.ru
- Бережной Александр Викторович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-30-64, e-mail: berezhnoyav@my.msu.ru
- Боос Эдуард Эрнстович — член-корр. РАН, профессор, доктор физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: (495) 939-30-64, e-mail: boos@theory.sinp.msu.ru
- Варданян Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: irina@lav01.sinp.msu.ru
- Волков Петр Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64, e-mail: pvolkov@www-hep.sinp.msu.ru
- Воротников Георгий Александрович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64, e-mail: georgii.vorotnikov@cern.ch
- Гладилин Леонид Константинович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-35-68, e-mail: gladilin@sinp.msu.ru
- Горелов Игорь Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64, e-mail: goreloviv@my.msu.ru
- Грибушин Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: gribushinam@my.msu.ru
- Дудко Лев Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-30-64, e-mail: dudko@www-hep.sinp.msu.ru
- Ершов Александр Альбертович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: e@lav01.sinp.msu.ru
- Забродин Евгений Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: evgeny.zabrodin@fys.uio.no
- Кейзеров Сергей Иванович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: errar@mail.ru
- Клюхин Вячеслав Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: klyukhinvi@my.msu.ru

15. Кодолова Ольга Леонидовна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: olga.kodolova@cern.ch
16. Коротких Владимир Леонидович — доктор физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.:
(495) 939-30-64,
e-mail: qewret1939@gmail.com
17. Кузьмин Валентин Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: kuzmin@sinp.msu.ru
18. Левченко Борис Борисович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: levchenko@www-hep.sinp.msu.ru
19. Лохтин Игорь Петрович — доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: lokhtin@www-hep.sinp.msu.ru
20. Лукина Ольга Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: lukina@www-hep.sinp.msu.ru
21. Маркина Анастасия Алексеевна — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: berezina.a@mail.ru
22. Мелихов Дмитрий Игоревич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: melikhov.dmitri@gmail.com
23. Меркин Михаил Моисеевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-59-48,
e-mail: merkinmm@my.msu.ru
24. Перфилов Максим Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: perfilovma@my.msu.ru
25. Петрушанко Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: petrushankosv@my.msu.ru
26. Рахметов Эдуард Рустямович — ведущий программист; тел.: (495) 939-58-81,
e-mail: rahmetov@theory.sinp.msu.ru
27. Саврина Дарья Викторовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: savrinadv@my.msu.ru
28. Снигирев Александр Михайлович — доктор физ.-мат. наук, ведущий науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: snigirevam@my.msu.ru
29. Соломин Анатолий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: anatoly.solomin@sinp.msu.ru
30. Хейн Лев Абрамович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: lev.kheyne@cern.ch
31. Чернышов Алексей Сергеевич — аспирант; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: a.s.chernyshov@yandex.ru
32. Щеглова Лидия Михайловна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-64,
e-mail: lydia.shcheglova@sinp.msu.ru
33. Эйюбова Гюльнара Ханларовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57,
e-mail: eyyubovagh@my.msu.ru