

Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ Основные результаты полученные в 2021 году.

Исследования проводятся в рамках НИР:
бюджетная тема 3.2

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

ЦИТИС: 115041510056

ПН: 08; ТП: 01; ПНР:3

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

Реферат

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

В рамках участия в эксперименте CMS коллайдера LHC, в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ открыто ассоциативное рождение одиночного топ кварка с W бозоном, впервые измеренное в канале распадов на одиночный лептон с адронными струями. Измеренное со статистической значимостью более пяти стандартных отклонений сечение 89 ± 4 (stat) ± 12 (syst) пб согласуется с предсказаниями СМ [JHEP 11 (2021) 111].

В протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ проведен поиск проявления дополнительного векторного заряженного бозона W' распадающегося на топ кварк и b -кварк, в канале распада на адронные струи. Поиск проведен с применением методов глубоких нейронных сетей. Статистически достоверного проявления W' не обнаружено и установлено верхнее ограничение на массу W' [Phys.Lett.B 820 (2021) 136535].

Продолжено исследование возможного проявления нейтральных токов, меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с u - или s -кварком и глюоном (FCNC tqg). Проводится анализ данных протон-протонных взаимодействий при энергии 13 ТэВ с учетом вклада всех возможных систематических неопределенностей. Готовится анализ возможных отклонений от предсказаний СМ во взаимодействии топ-кварка с W бозоном и b -кварком проявляющихся во взаимодействиях при энергии 13 ТэВ. Анализ проводится на полном наборе данных полученных детектором CMS в течении 2016, 2017 и 2018 годов.

Проведены феноменологические исследования редких процессов рождения трех топ кварков в рамках СМ. Показаны интересные эффекты сокращения различных вкладов и необходимость учета электрослабых диаграмм, КХД диаграмм и их интерференции. Показан возможность экспериментального исследования таких редких процессов после модернизации коллайдера LHC и детектора CMS [e-Print: 2107.07629].

Продолжено изучение процессов дифракционного рождения псевдобыстротных щелей (Rapidity gaps) в столкновениях протон-свинец при энергии 8.16 ТэВ на нуклон в эксперименте CMS. Получено, что отношение сечений rapidity gaps в взаимодействиях протон-свинец и протон-протон удовлетворяют зависимости от номера атомного ядра $A^{1/3}$.

Проведена модернизация комплекса моделирования HF калориметра установки CMS. Создана новая библиотека ливней в HF калориметре для RUN3. Модернизировано

программное обеспечение использования библиотеки в процессе полного моделирования установки CMS. Новое моделирование HF калориметра включено в официальный комплекс моделирования установки CMS.

Выполнен анализ конструктивных особенностей и опыта работы форвард-калориметра CASTOR установки CMS на БАК. Результаты опубликованы в статье «The very forward CASTOR calorimeter of the CMS experiment» (JINST 16 2021 P02010).

Продолжена разработка ПО для эксперимента LHCb в предстоящем третьем периоде работы LHC. В рамках RTA (Real Time Analysis: программная инфраструктура) разработаны основные функциональные элементы системы программной юстировки оптической системы детекторов RICH1 и RICH2 с использованием реальных данных в режиме реального времени для новых конфигураций установки LHCb и соответствующего ПО.

В 2021 г. коллаборация ZEUS продолжила анализ данных, полученных в экспериментах H1 и ZEUS на электрон-протонном коллайдере HERA (Гамбург, Германия). Проводились исследования процессов рождения струй и векторных мезонов, а также инстантонов. Продолжено изучение полученных указаний на нарушение скейлинга фрагментационных функций в глубоко-неупругих взаимодействиях (DIS) в области мишени в Брейт системе и проведение детального сравнения с КХД моделями процессов фрагментации.

С помощью детектора ZEUS изучены коллективное поведение адронов в конечном состоянии и многопартонные взаимодействия в электрон-протонных столкновениях для процессов фоторождения и глубоко-неупругого рассеяния при энергии в системе центра инерции 318 ГэВ на коллайдере HERA. Результаты опубликованы в препринте [ArXiv:2106.12377 v1., Submitted to JHEP]. Статья направлена в журнал JHEP. Получены параметризации структурных функций HERAPDF2.0Jets NNLO, используя два фиксированных значения константы $\alpha_s(M_Z^2)$, $\alpha_s(M_Z^2) = 0.1155$ и 0.118 , основанные на данных HERA по изучению образования струй. Результаты опубликованы в препринте «Impact of jet-production data on the next-to-next-to-leading-order determination of HERAPDF2.0 parton distributions» [ArXiv:2112.01120].

Юстировка время проекционной камеры (TPC) многофункционального детектора MPD мегапроекта NICA (г. Дубна). Происходила апробация ранее предложенного метода нахождения юстировки трекового детектора по экспериментальным данным. Изучены точностные характеристики метода для событий от космических мюонов. Показана возможность использования лазерной системы TPC для юстировки детектора, показано, что точность процедуры в этом случае такая же как и при использовании космических мюонов.

Исследование моделей модифицированной гравитации. Предложено обобщение метода эффективного потенциала на модели в которых к стандартному лагранжиану общей теории относительности добавляется функция от линейной комбинации скаляра Риччи и члена Гаусс-Бонне. Метод эффективного потенциала применен для генерации новых моделей инфляционных сценариев и оценки нарушения режима медленного скатывания на инфляционной стадии развития.

При вычислении спектра излучения «вечной» черной дыры был предложен метод точного вычисления коэффициентов Боголюбова в тех случаях, когда неизвестны точные решения уравнений движения поля в метрике черной дыры. Применение метода было

проиллюстрировано на простейших моделях в двумерном пространстве-времени черных дыр Шварцшильда и Рейснера-Нордстрёма для скалярных полей. В дальнейшем метод был применен для полей спина ноль, одна вторая и один в четырехмерном-пространстве времени для черных дыр Шварцшильда и Рейснера-Нордстрёма, с его помощью получен спектр излучения таких черных дыр. Результаты представлены в виде отчета и публикационных материалов, готовится публикация.

Введение

а) Физика топ кварка.

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

Существует несколько механизмов одиночного рождения топ-кварка. Ведущий t-канальный процесс уже неплохо исследован и именно в нем проводятся основные текущие измерения параметров одиночного рождения топ-кварка. Достигнутые на коллайдере БАК энергия и светимость позволяют проводить исследования все более и более редких процессов. В частности, процессов ассоциативного рождения одиночного топ-кварка с W, Z или Хиггс бозоном. Такие процессы ассоциативного рождения одиночного топ-кварка с калибровочным бозоном позволяют проводить новые измерения и поиск различных возможных отклонений от предсказаний СМ. В эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся комплексные исследования физики топ-кварка в событиях протон-протонных столкновений при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ.

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

б) Физика дифракционных процессов и партонная структура частиц.

Рождение частиц в адронных столкновениях на больших псевдобыстроотах ($\eta > 5$) чувствительно к вкладу от мультипартонных взаимодействий (MPI), к механизму

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

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

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

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

в) Физика взаимодействий с ядрами.

Изучение характеристик множественного рождения в столкновениях ядер даёт информацию о начальной стадии взаимодействия (initial state), определяющей возможное дальнейшее развитие фазы кварк-глюонной плазмы.

Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях — одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики. Эксперименты по столкновению тяжёлых ионов, в которых создаются условия сверхвысоких температур и плотностей, интенсивно ведутся или планируются на ускорителях в различных научных центрах Европы и США (RHIC, LHC, NICA, FAIR).

Интерес к таким исследованиям обусловлен тем, что эти эксперименты дают возможность изучить параметры уравнения состояния сильно взаимодействующей материи при высоких температурах и плотностях, при которых проявляется кварк-глюонная структура нуклонов и создаются условия для фазового перехода — образования кварк-глюонной плазмы, нового состояния ядерной материи, когда адроны как составные объекты теряют свою идентичность и растворяются в некую субстанцию из своих конститuentов — кварков и глюонов. Обнаружение и измерение окрестности критической точки такого фазового перехода имеет принципиальное значение. Имеющаяся к настоящему времени совокупность экспериментальных данных и теоретических моделей, дают основание предполагать, что эта точка находится в диапазоне энергий сооружаемого комплекса NICA.

Результаты

1.а Исследования топ-кварка в эксперименте CMS.

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

В эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся комплексные исследования физики топ-кварка в событиях протон-протонных столкновений при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ. Готовятся исследования при более высоких энергиях и в режимах высокой светимости ускорителя.

В 2021 году впервые проведено экспериментальное обнаружение ассоциативного рождения топ кварка и W бозона в канале распадов на один лептон и адронные струи. Статистическая значимость измерения впервые превысила пять стандартных отклонений. Измеренное сечение 89 ± 4 (stat) ± 12 (syst) пб согласуется с предсказанным в CM NNNLO сечением $79.5 +1.9/-1.8$ (scale) $+2.0/-1.4$ (PDF) пб, в пределах ошибки измерения.

Проведен поиск проявления дополнительного векторного заряженного бозона W' распадающегося на топ кварк и W бозон. Исследован канал распадов на адронные струи. Для оптимизации экспериментального поиска были применены глубокие нейронные сети позволившие эффективнее идентифицировать рождающиеся объекты, включая топ струю появляющуюся от тяжелых объектов и характеризующуюся высоким импульсом не позволяющим выделить отдельные струи от продуктов распада топ кварка. Проведен поиск для право-взаимодействующего и лево-взаимодействующего W'. В последнем случае был проведен учет интерференции с диаграммами рождения W бозона в CM. Статистически значимого экспериментального сигнала проявления W' не обнаружено и были установлены верхние ограничения на сечения процессов рождения W' в зависимости от массы W'. Полученные ограничения представлены на Рис.1 для право- и лево-взаимодействующих W'.

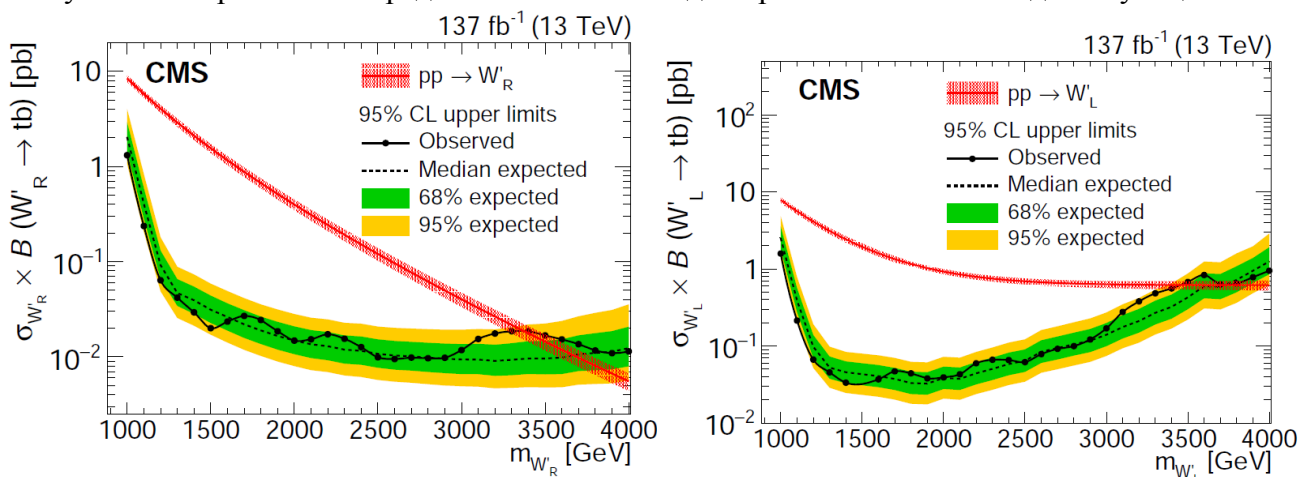


Рисунок 1.а.1 Показаны измеренные верхние ограничения на сечения возможных процессов с рождением право-взаимодействующего (левый рисунок) и лево-взаимодействующего (правый рисунок) W' в зависимости от массы W'.

Продолжено исследование возможного проявления нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с u- или c-кварком и глюоном (FCNC tqg). Проводится анализ данных протон-протонных взаимодействий при энергии 13 ТэВ с учетом вклада всех возможных систематических неопределенностей с целью регистрации сигнала или установления ограничения на параметры характеризующие возможное существование FCNC tqg. Результаты готовятся к одобрению коллаборацией CMS. Готовится анализ возможных отклонений от предсказаний CM во взаимодействии топ-кварка с W бозоном и b-кварком проявляющихся во взаимодействиях при энергии 13 ТэВ. Анализ проводится на полном наборе данных полученных детектором CMS в течении 2016, 2017 и 2018 годов.

Проведены феноменологические исследования редких процессов с рождением трех топ кварков в рамках СМ. Выделены процессы ассоциативного рождения трех топ кварков с W бозоном, кварком легкого аромата и b -кварком. Посчитаны вклады электрослабых диаграмм, КХД диаграмм и их интерференции. Величина вклада электрослабых диаграмм оказалась примерно равной вкладу КХД диаграмм и отрицательной интерференции. Получен необычный эффект сокращения электрослабого вклада за счет отрицательной интерференции. Показана важность сохранения полного калибровочно-инвариантного поднабора диаграмм, так как наивное исключение диаграмм с фотоном, хиггсовским или Z бозоном приводит к возрастанию вычисляемого сечения на порядок, за счет нарушения калибровочной инвариантности. Показана возможность экспериментального исследования таких редких процессов после модернизации коллайдера LHC и детектора CMS.

1.6 Форвард-калориметр CASTOR установки CMS

Богданова Г.А., Волков В.Ю., Волков П.В., Лукина О.Ю.

Обобщен и систематизирован накопленный опыт эксплуатации форвард-калориметра CASTOR установки CMS. Форвард-калориметр участвовал в сеансах по набору статистики в Run1 и Run2 на БАК. Собранный материал включает протон-протонные и pPb -взаимодействия, а также столкновения тяжелых ионов. Значительные трудности при монтаже и эксплуатации форвард-калориметра обусловлены расположением в чрезвычайно сложной среде. Рассмотрена общая конструкция детектора с акцентом на особенности работы в условиях значительного радиационного воздействия, необходимости быстрого оптического отклика, высокой загруженности, влияния магнитных полей и жестких пространственных ограничений. Детектор расположен непосредственно на расстоянии ~ 1 см от пучка сталкивающихся частиц и на расстоянии ~ 14.4 м от точки взаимодействия (IP). Магнитное поле вблизи детектора имеет величину около $B = 0,2$ Тл и влияет на развитие ливня как внутри калориметра, а также на коэффициент усиления фотоумножителей (ФЭУ). Описаны автоматические процедуры расчета калибровочных констант и определения параметров радиационной деградации. Серьезной проблемой является калибровка детектора поскольку является источником существенных систематических погрешностей для многих физических измерений. Абсолютная шкала энергии определена с общей точностью около 17%. Несмотря на трудности с точным определением шкалы абсолютной энергии калориметра, использование космических мюонов оказалось приемлемым для интер-калибровки всех каналов, контроля стабильности детектора и определения уровней шума. Калибровка каналов калориметра CASTOR космическими лучами в период долговременной остановки работы коллайдера проводилась на специализированном стенде. Разработанная система медленного контроля DCS обеспечивала бесперебойное функционирование форвард-калориметра при разных режимах работы коллайдера. Юстировка калориметра CASTOR (alignment), что существенно влияет на шкалу энергии, согласованность данных с результатами Монте Карло моделирования и величину acceptance, проведена с перекрестными измерениями, выполненными одновременно с трекером T2 установки TOTEM. Достигнута точность совмещения порядка 1 мм. Сравнения экспериментальных данных с результатами Монте Карло моделирования подтверждают, что реконструированные объекты могут использоваться для дальнейших физических измерений, вплоть до сложных наблюдаемых (струи, спектры одиночных частиц и т. д.). Обеспечен удобный и простой доступ к архивным установочным данным для дальнейшего открытого использования. Экспериментальные данные, собранные с помощью форвард-калориметра CASTOR в столкновениях pp , pPb и $PbPb$, общедоступны для физического анализа в рамках инициативы CERN по открытым данным.

1.в Изучение дифракционного рождения в столкновениях протон-свинец при энергии 8.16 ТэВ на нуклон.

Л.А. Хейн

С ростом энергии адронного взаимодействия основным переносчиком взаимодействия становятся нейтральные и бесцветные объекты – помероны. Свойства померона наиболее ясно проявляются в процессах неупругой дифракции, в которой взаимодействующие адроны или ядра обмениваются импульсом, один или оба взаимодействующих объекта остаются в исходном состоянии и при этом рождаются новые частицы. Дифракционные процессы приводят к возникновению больших пустых интервалов в распределении частиц по псевдобыстроте (rapidity gaps, RG, $\Delta\eta$).

В 2021 году было продолжено изучение распределения по RG в столкновениях протон-свинец при энергии 8.16 ТэВ на нуклон. Было произведено сравнение сечений RG в взаимодействиях протон-свинец с сечениями в взаимодействиях протон-протон.

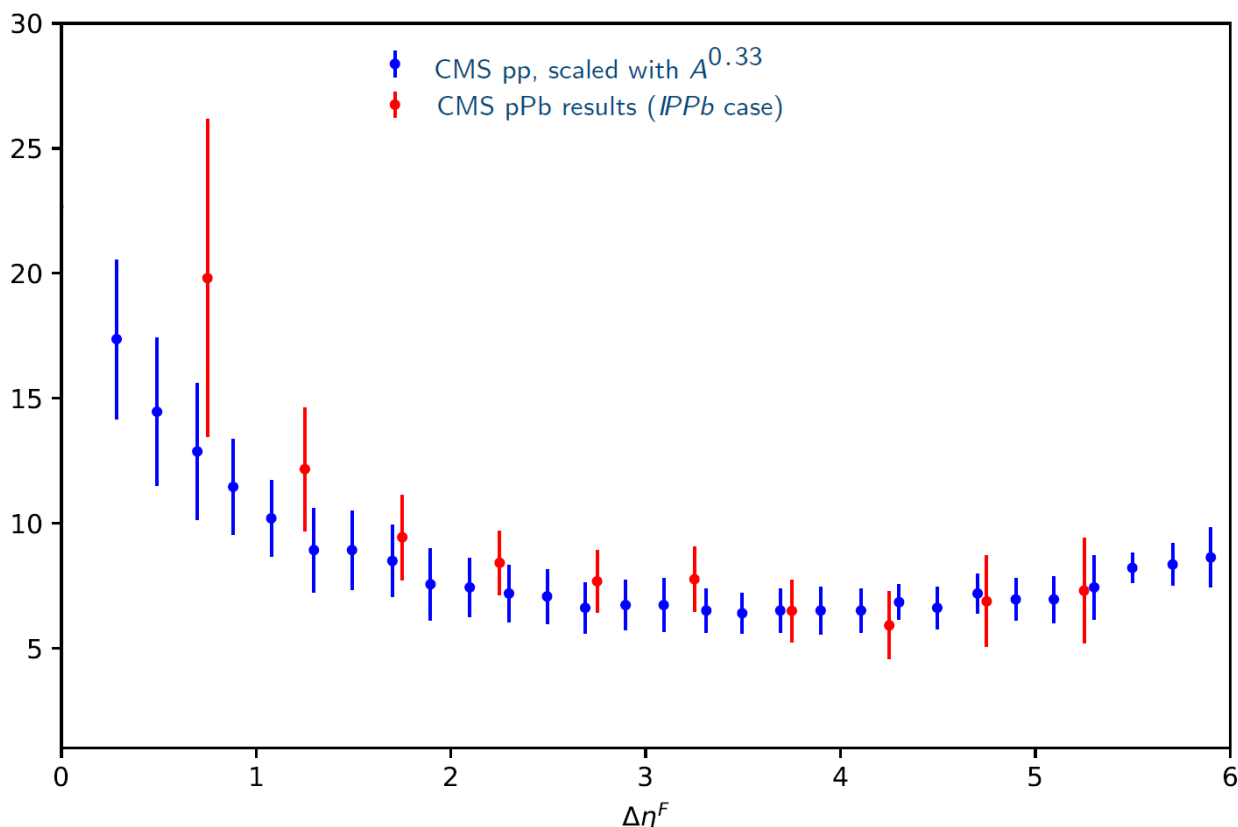


Рисунок 8.1. Распределения по RG. Сравниваются сечения в столкновениях протон-свинец и сечения в столкновениях протон-протон умноженные на $A^{1/3}$.

На рисунке 8.1 сравниваются измеренные в настоящей работе сечения RG в столкновениях протон-свинец с измеренными ранее в эксперименте CMS сечениями в столкновениях протон- протон, умноженными на $A^{1/3}$, где A - атомный номер ядра свинца. Видно, что при достаточно больших $\Delta\eta$, где пренебрежим вклад недифракционных событий, рост сечений RG на ядре в сравнении с протон-протоновыми сечениями удовлетворяет зависимости от номера атомного ядра $A^{1/3}$. Это свидетельствует о том, что дифракционная диссоциация на ядре происходит на периферии ядра и может объясняться независимой диссоциацией отдельных нуклонов.

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

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

Разработана теоретическая база для нахождения по экспериментальным данным юстировки трекового детектора типа время прецизионной камеры, состоящей из секторов с чувствительными элементами. Написана система уравнений для определения каждого из 6 параметров, задающих положение каждого сектора в глобальной системе координат детектора (3 сдвига относительно теоретической системы координат начала локальной системы координат сектора и 3 угла Эйлера: α, β, γ).

Моделирование отклика ТРС на лучи лазерной системы показало, что эта система, изначально спроектированная только для определения свойств газа внутри ТРС, может быть использована для постоянного мониторинга положения секторов с чувствительными элементами.

Результаты моделирования определения положения секторов по регистрируемым трекам приведены на рисунках ниже для случаев космических мюонов и лучей лазерной системы. Распределения даны для ошибок параметров, определяющих положение сектора. Синие гистограммы учитывают предложенный метод коррекции.

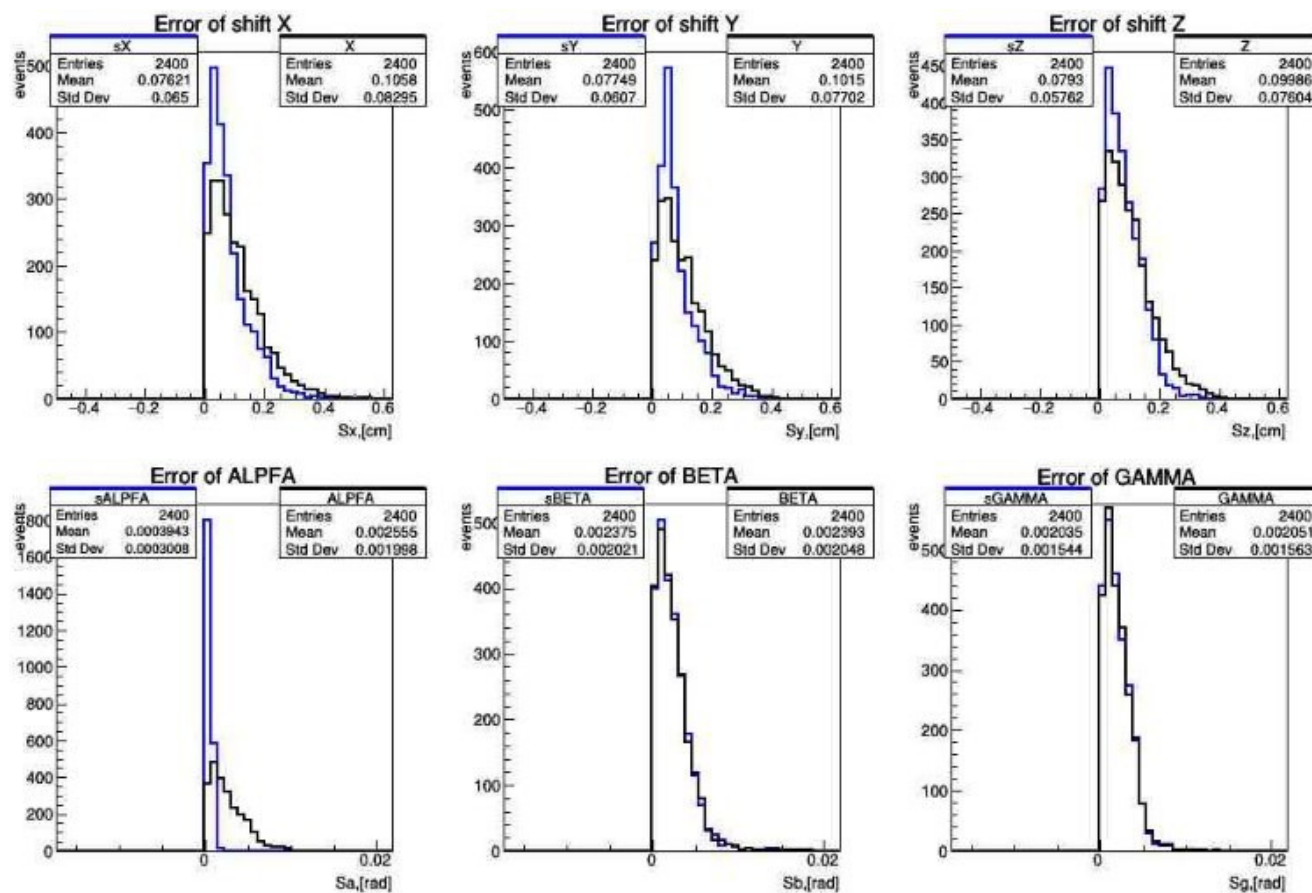


Рис.1. Космические мюоны, абсолютная ошибка.

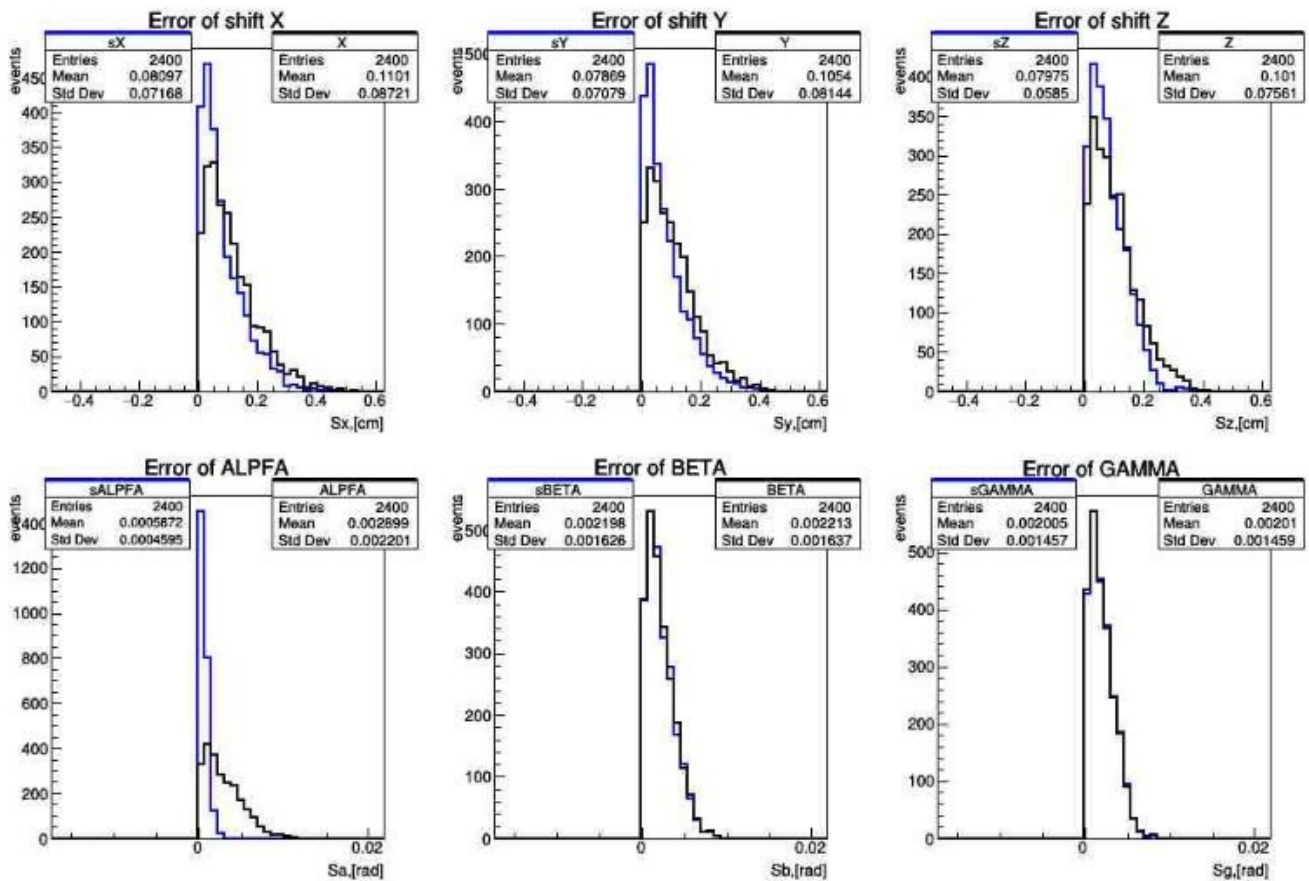


Рис.2. Лазерная система, абсолютная ошибка.

Точности нахождения параметров юстировки по космическим мюонам и лазерным лучам примерно одинаковые. Для значения сдвига начала координат сектора это величина порядка 700 микрон, а для соответствующих углов Эйлера точность 0.002 радиана или 7 угловых минут.

Разработанный метод юстировки «один в один» может быть применен для других трековых детекторов при условии, что детектор состоит из отдельных недеформируемых частей с жестко закрепленными на них чувствительными элементами, например, для вершинных кремниевых детекторов. (В. Кузьмин).

3. Исследования в экспериментах ZEUS и H1 коллайдера HERA.

Ю.А. Голубков, Б.Б. Левченко, О.Ю. Лукина, Л.М. Щеглова

3а. Азимутальные корреляции в фоторождении и глубоко-неупругом ер рассеянии на коллайдере HERA

В работе представлены результаты изучения процессов коллективного поведения и многопартонных взаимодействий (МПВ) в ер-рассеянии при больших множественностях заряженных частиц, $N_{ch} \geq 20$. Измерения в области фоторождения выполнены для множественности заряженных частиц, псевдобыстрот и поперечного импульса так же как и для 2х- 4х-частичных суммарных корреляций. Двухчастичные корреляции изучены как функция Q^2 , чтобы проиллюстрировать их эволюцию при переходе от фоторождения (Рис.2) к глубоко-неупругому рассеянию (Рис.1). Возможность процессов с МПВ в фоторождении была исследована с помощью сравнения измеренных распределений и корреляционных функций с предсказаниями МК генератора PYTHIA 8.

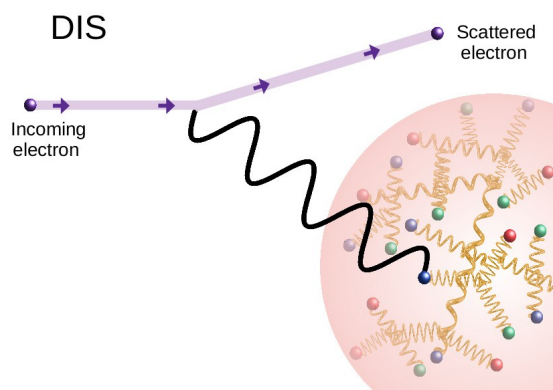


Рис. 1

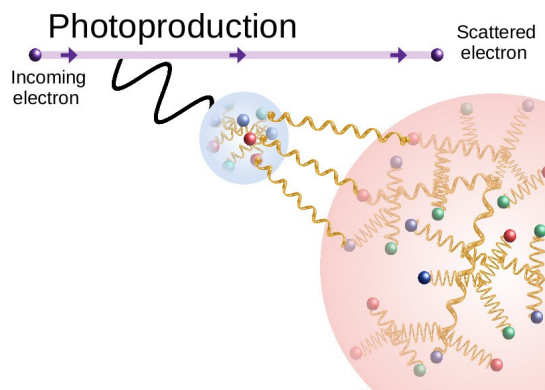


Рис. 2

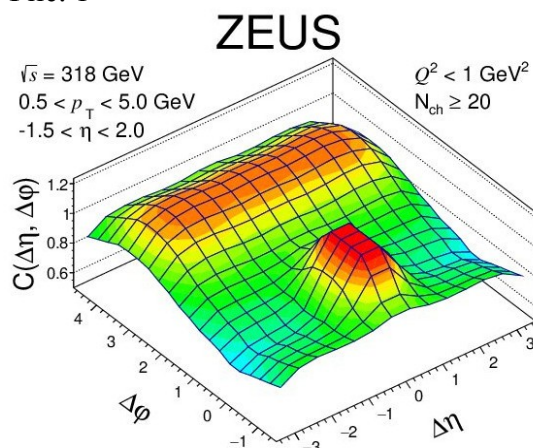


Рис. 3

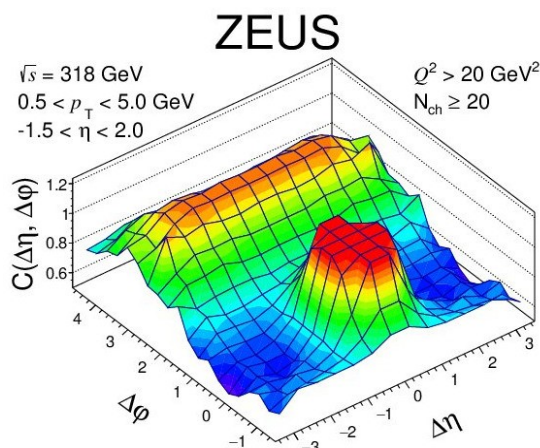
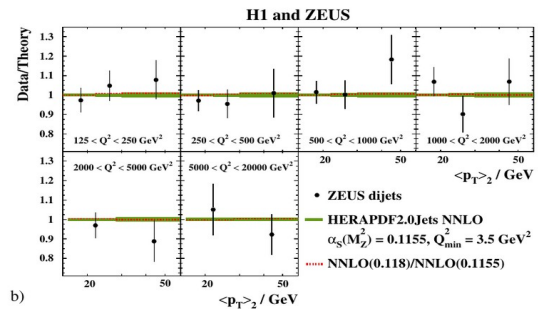
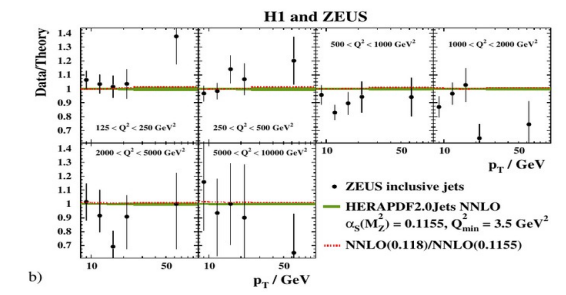


Рис. 4

Зависимость двух-частичных корреляций от виртуальности фотона показывает явный переход от процесса фоторождения (Рис.3) к глубоко-неупругому рождению через обмен нейтральным током (Рис.4). В то же время ни в процессах фоторождения, ни в в глубоко-неупругом рассеянии, не получено указания на коллективное поведение адронов типа наблюдаемого в адронных взаимодействиях с высокой множественностью на ускорителях RHIC и LHC. Также получены сильные указания на наличие многопартонных взаимодействий, обусловленных наличием адронных флуктуаций виртуального фотона.

3б. Влияние данных по образованию струй на определение партонных распределений HERAPDF2.0 в next-to-next-to-leading порядке.

В работе проведена реконструкция двух параметризаций структурных функций с использованием и без использования данных по рождению струй с учетом высших порядков теории возмущений (next-to-next-to-leading order). Реконструкция проведена для нескольких диапазонов переданных импульсов. Сравнение двух типов параметризаций показывает согласованность обоих подходов - как для инклюзивных данных (DIS), так и данных с учетом рождением струй адронов.



На рисунках представлены отношения экспериментальных данных к параметризации структурных функций для процесса DIS (левый рисунок) и процессов с рождением струй (правый рисунок).

4. Исследования проводимые в эксперименте LHCb

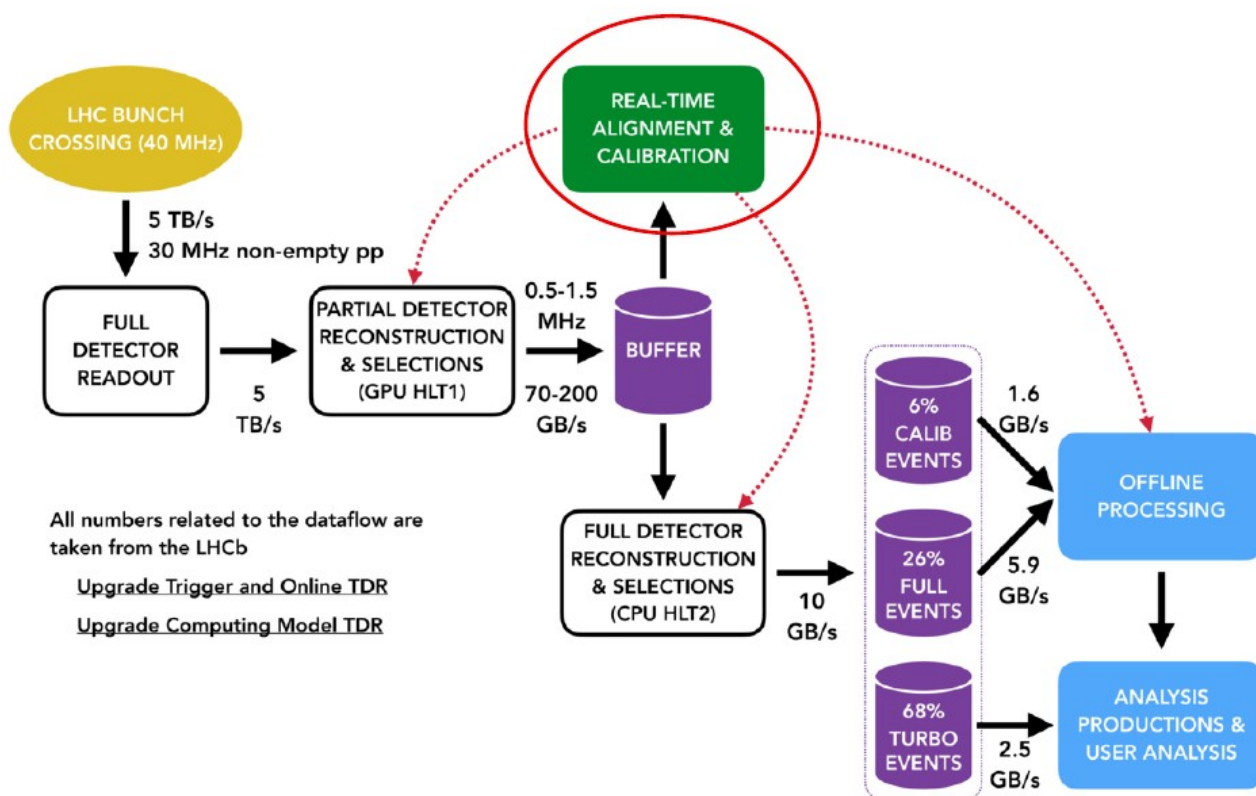
А.Н. Соломин,

Одной из наиболее сильных сторон эксперимента LHCb является наличие в конструкции его установки RICH детекторов: RICH1 и RICH2 способных идентифицировать частицы в диапазоне импульсов до ~ 100 ГэВ/с. Оптические системы этих детекторов требуют постоянного мониторингирования состояния их прецизионной юстировки. Для этого используется специальная методика, основанная на анализе данных о реальных событиях.

По линии подготовки к началу третьего периода работы LHC, Run 3, в рамках программы апгрейда установки LHCb, в частности, детекторов RICH1 и RICH2, разработан и внедрён новый подход к оптимизации отбора комбинаций зеркал.

Система уравнений для определения разъюстированности системы зеркал является вырожденной, на одно уравнение меньше, чем число неизвестных (векторов) и решается с применением регуляризации по Тихонову. При этом необходимо подобрать такой набор комбинаций чтобы гистограммы, анализ которых позволяет получить поправки, заполнялись максимально быстро черенковскими фотонами. Для определения такого набора впервые использован метод теории графов. Система зеркал может быть описана как двудольный граф, у которого вершины – это первичные и вторичные зеркала, рёбра – их комбинации а веса рёбер равны количеству черенковских фотонов, отразившихся от обоих зеркал комбинации. Тогда задача нахождения оптимальной системы уравнений сводится к нахождению максимального покрывающего дерева такого графа. Число рёбер такого дерева как раз на одно меньше числа вершин.

Вся система юстировки входит в состав RTA (выделена красным овалом на схеме RTA:



Продолжена работа по усовершенствованию алгоритмов преселекции событий в триггере высокого уровня 1 (HLT1) с целью прецизионной юстировки оптических систем RICH1 и RICH2 в режиме реального времени. Получаемые поправки должны применяться при полной реконструкции событий в триггере высокого уровня 2 (HLT2). Это усовершенствование позволит существенно сократить вычислительные ресурсы для определения поправок в режиме реального времени, и кроме того, обеспечить возможность бессрочного хранения необходимой информации с целью гарантированной воспроизводимости физических результатов.

С этой же целью продолжена работа по усовершенствованию методов хранения версий параметров и настроек алгоритмов.

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

5. Теоретические исследования.

5а. Исследование моделей модифицированной гравитации.

Е.О. Поздеева

Решение де Ситтера играет важную роль при изучении инфляционных процессов развития Вселенной и процессов расширения на поздних этапах развития Вселенной. Стабильные решения де Ситтера с положительным параметром Хаббла соответствуют позднему расширению Вселенной, а нестабильные - инфляционному расширению ранней Вселенной. С точки зрения изучения стабильности решений де Ситтера в моделях модифицированной

гравитации интересно введение эффективного потенциала являющегося аналогом потенциала в Эйнштейновской гравитации. Модели с Гаусс-Бонне взаимодействием не имеют конформного преобразования в модели Эйнштейновской гравитации. Поэтому разработка и применение метода эффективного потенциала является актуальной проблемой в моделях с Гаусс-Бонне взаимодействием. Метод эффективного потенциала позволяет хорошо описать условие стабильности решений де Ситтера. А в окрестности нестабильных решений де Ситтера хорошо описывает инфляционные параметры в приближении медленного скатывания.

Нами рассмотрено обобщение эффективного потенциала на модели с действием, включающим функцию произвольного вида от линейной комбинации скаляра Риччи и Гаусс-Бонне члена. Обобщенный эффективный потенциал применен для поиска решений де Ситтера и анализа их стабильности в моделях с функцией от линейной комбинации Гаусс-Бонне члена и скаляра Риччи. Подробно рассмотрены случаи функции степенного вида, квадратичного полинома и произвольной функции зависящей только от скаляра Риччи или только от Гаусс-Бонне члена.

Рассмотрено применение метода эффективного потенциала для обобщения инфляционных параметров моделей альфа-аттрактора на модели с Гаусс-Бонне взаимодействием и скалярным полем неминимально взаимодействующим со скаляром Риччи. Рассмотрены модели с неминимальным взаимодействием скалярного поля с Риччи скаляром, включающим экспоненциальную функцию поля. Обнаружено, что из космологических аттракторов только альфа-аттракторы (с отношением амплитуд тензорных пертурбаций к скалярным обратно пропорциональным квадрату полного числа e -фолдингов) позволяют сохранить режим медленного скатывания до конца инфляционных процессов. В моделях космологических аттракторов, в которых отношение амплитуд тензорных пертурбаций к скалярным обратно пропорциональным полному числу e -фолдингов, получение нужного спектрального индекса возможно, но режим медленного скатывания будет нарушен до конца инфляции.

56. Развитие квантовой механики стационарных состояний частиц различных спинов в искривленном пространстве-времени классических черных дыр.

Э. Рахметов, С. Кейзеров

Как известно, для вычисления спектра хокинговского излучения черной дыры необходимо вычислить соответствующие коэффициенты преобразования Боголюбова между разложениями полевых операторов по двум различным полным наборам собственных функций. Например, в случае черной дыры Шварцшильда в качестве таких наборов обычно выбирают моды Шварцшильда и моды Крускала, соответствующие двум различным способам разбиения полевых операторов на положительно- и отрицательно-частотную части. Основной трудностью при таком методе расчета является тот факт, что за исключением самых простых модельных случаев такие моды невозможно выразить через известные специальные функции. В современной литературе предлагается два пути решения данной проблемы. Во-первых, как это сделал Хокинг в своей пионерской работе, можно использовать для данных функций какие-нибудь приближения. Во-вторых, как это предложил Унру, в качестве второго набора мод можно использовать такие линейные комбинации мод первого набора, чтобы данные линейные комбинации имели на горизонте такое же аналитическое поведение, какое наблюдается у мод из второго набора. Например, вместо мод Шварцшильда использовать линейную комбинацию мод Крускала с подходящим аналитическим поведением на горизонте. Или же наоборот, вместо мод Крускала использовать линейную комбинацию мод Шварцшильда, имеющую аналитическое поведение на горизонте как у мод Крускала. Этот удобный прием вошел во все современные учебники по данной тематике, поскольку позволяет легко вычислять скалярные произведения мод,

пользуясь только соотношениями их ортонормированности. Однако он обладает тем недостатком, что фактически однозначно задает поверхность Коши, по которой производится интегрирование. А именно, в качестве таковой приходится выбирать горизонты событий вечной черной дыры. Между тем, это далеко не всегда удобно, поскольку, например, моды Шварцшильда неаналитичны на горизонте. По этой причине, при использовании данного приема всегда интегрируют по модам Крускала. Мы показываем, что можно интегрировать и по модам Шварцшильда, если выбрать для интегрирования другую гиперповерхность Коши. В силу четырехмерной теоремы Гаусса скалярное произведение мод, через которое выражаются коэффициенты Боголюбова, не зависит от выбранной поверхности интегрирования. Однако, такая гиперповерхность должна быть выбрана корректно, так чтобы являться полной гиперповерхностью Коши. В таком случае, мы можем выбирать гиперповерхность так, как нам удобно. Мы приводим примеры нестандартного выбора гиперповерхностей для черных дыр Шварцшильда и Рейснера-Нордстрёма и вычисляем соответствующие коэффициенты Боголюбова. Вторым важным аспектом, на который мы обращаем внимание, является то, что при этом нам не нужно знать аналитические выражения для соответствующих мод, достаточно выяснить, каково их поведение на выбранной гиперповерхности. Также мы уделяем отдельное внимание вопросу о вычислении нормировки мод, который слабо освещен в оригинальной литературе.

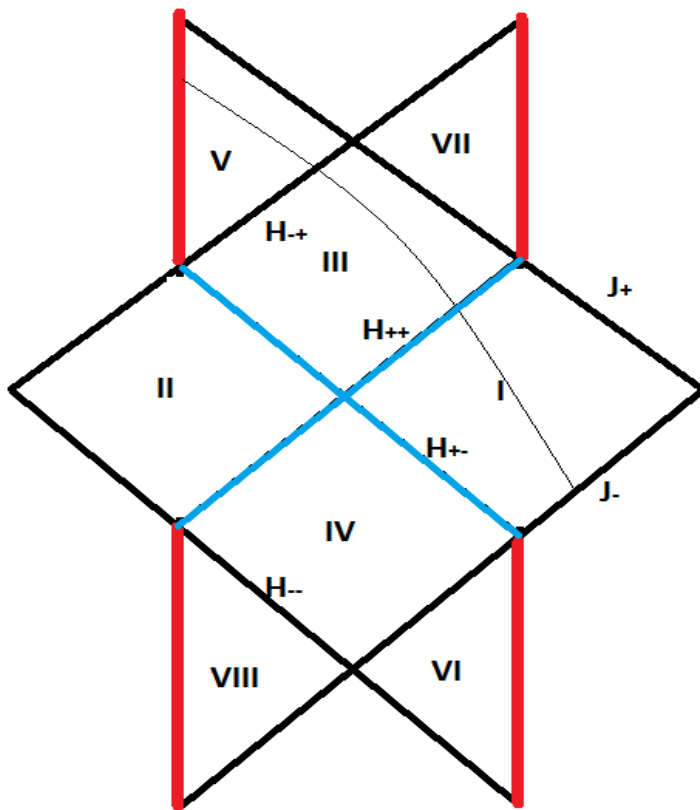


Рисунок 4 – Диаграмма Пенроуза максимально расширенного многообразия Рейснера-Нордстрёма. Область I – наша вселенная над внешним горизонтом черной дыры. Область II – зеркальная вселенная. Область III – пространство между горизонтами r_+ и r_- , в которые может попасть наблюдатель из нашей вселенной, падающий в черную дыру. Область IV – аналогичное пространство, в которое может попасть наблюдатель, падающий в черную дыру в зеркальной вселенной. Область V – пространство между горизонтом r_- и сингулярностью (выделена красным цветом), в которую может попасть наблюдатель из нашей вселенной, падающий в черную дыру. Тонкая линия – наблюдатель, падающий из нашей вселенной в черную дыру. Синим цветом обозначены горизонты черной дыры, образующие полную поверхность Коши, по которой производится интегрирование. Альтернативным выбором

будет поверхность Коши при некотором постоянном t_{Σ} в пространстве над горизонтом H_{++} (в области I), некотором постоянном t_{Σ} в пространстве между горизонтами (в области III), и некотором постоянном t_{Σ} в пространстве под горизонтом H_{--} (в области V).

Планы исследований на 2022 год.

Исследования в эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся в нескольких направлениях. В основе исследований, лежит анализ данных полученных при энергии протон-протонных столкновений 13 ТэВ. Данные при такой энергии накапливались в эксперименте в течении 2016, 2017 и 2018 годов (Run II). В настоящий момент завершена обработка и понимание данных Run II. Обработка данных эксперимента по столкновению протонов при энергии 13 ТэВ позволяет провести поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ кварка с u- или c-кварком и глюоном. В случае отсутствия проявления таких токов, предсказываемых рядом новых теорий, будут установлены новые ограничения на параметры характеризующие такие взаимодействия и соответствующие вероятности редких распадов топ кварка. На полученных данных готовится экспериментальное исследование структуры взаимодействия топ кварка с W бозоном и b-кварком и поиск отклонений от предсказанной в Стандартной модели (СМ) структуры этих взаимодействий. В случае отсутствия экспериментального проявления таких отклонений будут получены верхние ограничения на параметры характеризующие такие взаимодействия.

Будет продолжен анализ данных, полученных на коллайдере HERA, в частности, исследование процессов рождения струй и векторных мезонов.

Продолжатся исследования по выявлению взаимосвязи скорости виртуальных фотонов с размерностью пространства-времени в области взаимодействия частиц. Анализ зависимости полученного указания на нарушение скейлинга в поведении импульсных скейлинговых переменных x_T в области мишени в Брейт системе, от переданного импульса Q^2 и переменной Бьёркена x_{Bj} .

Завершение разработки целостной системы программной юстировки оптической системы детекторов RICH1 и RICH2 с использованием реальных данных для новых конфигураций установки LHCb и соответствующего ПО для Run 3 LHC.

Продолжится разработка системы программной юстировки TPC MPD NICA на основе использования реальных треков. Моделирование точности юстировки TPC по экспериментальным данным для заряженных частиц в магнитном поле детектора. Оценка искажений регистрируемых физических величин в зависимости от точности юстировки детектора. Планируется исследование возможности реконструкции близких треков в задаче фемтоскопии.

Предполагается рассмотреть расширение моделей R^2 модифицированной гравитации приводящие к инфляционным сценариям, согласующимся с современными наблюдаемыми данными. Предполагается изучение свойств моделей модифицированной гравитации и возможных физических процессов в них.

Будут изучаться такие эффекты квантовой теории поля в искривленном пространстве времени, которые могли бы объяснить некоторые наблюдаемые явления, например, нарушение СР-инвариантности. Также будут продолжены исследование квантованных полей в окрестностях черных дыр.

Запланировано продолжение исследований и разработка методов применения нейронных сетей глубокого обучения в экспериментальных анализах проводимых на современных и будущих коллайдерах. В частности, разрабатываются и планируется внедрить в эксперименте CMS коллайдера БАК систему байесовских нейронных сетей глубокого обучения для оптимизации исследований рождения топ кварка.

Заключение

Продолжаются исследования в экспериментах CMS и LHCb коллайдера БАК, ZEUS коллайдера HERA, а также BM@N и MPD комплекса NICA. Проводятся теоретические и феноменологические исследования в рамках Стандартной модели и различных ее расширений. За 2021 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 27 докладов на международных конференциях и большое количество докладов на рабочих совещаниях. Полученные результаты опубликованы в индивидуальных публикациях и от имени коллабораций CMS, ZEUS.

Доклады на конференциях в 2021 г.:

1) [Triple top quark production in Standard Model \[arXiv:2107.07629\]](#) (Приглашенный) Авторы: [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#)

[LHC TOP WG meeting](#), ЦЕРН, Женева, Швейцария, Швейцария, 1-3 декабря 2021

2) [Методология применения нейронных сетей в анализе данных коллайдерных экспериментов](#) (Устный)

Авторы: [Дудко Л.В.](#), [Волков П.В.](#), [Воротников Г.А.](#), [Заборенко А.Д.](#)

[Круглый стол МГУ «Машинное обучение: эффективный инструмент для познания физической картины мира», проводимого в рамках Года науки и технологий в РФ по теме «Искусственный интеллект»](#), МГУ, Россия, 18 ноября 2021

3) [Методы оптимизации архитектуры и метапараметров глубоких нейронных сетей в анализе данных коллайдерных экспериментов](#) (Устный)

Авторы: [Дудко Л.В.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Волков П.В.](#), [Воротников Г.А.](#)

[Круглый стол МГУ «Машинное обучение: эффективный инструмент для познания физической картины мира», проводимого в рамках Года науки и технологий в РФ по теме «Искусственный интеллект»](#), МГУ, Россия, 18 ноября 2021

4) [t \$\bar{c}g\$ FCNC in t-channel](#) (Приглашенный)

Авторы: [Boos E.](#), [Belobrova M.](#), [Bunichev V.](#), [Dudko L.](#), [Perfilov M.](#), [Sivakova E.](#), [Volkov P.V.](#), [Vorotnikov G.](#), [Zaborenko A.](#)

[t+X round table meeting](#), CERN, Швейцария, 2 ноября 2021

5) [FCNC tqg search in Run II](#) (Приглашенный)

Авторы: [Boos E.](#), [Belobrova M.](#), [Bunichev V.](#), [Dudko L.](#), [Perfilov M.](#), [Sivakova E.](#), [Volkov P.V.](#), [Vorotnikov G.](#), [Zaborenko A.](#)

[Top EFT WG round table meeting](#), CERN, Швейцария, 21 октября 2021

6) [Usage of UL RunII dataset in tqg FCNC searches](#) (Приглашенный)

Авторы: [Boos E.](#), [Belobrova M.](#), [Bunichev V.](#), [Dudko L.](#), [Iliushin M.](#), [Mandrik P.](#), [Perfilov M.](#), [Popov A.](#), [Skovpen K.](#), [Sivakova E.](#), [Slabospitskii S.](#), [Volkov P.](#), [Vorotnikov G.](#), [Zaborenko A.](#)

[TOP PAG CMS working meeting](#), ЦЕРН, Швейцария, 7 сентября 2021

7) [Application of deep learning technique to an analysis of hard scattering processes at colliders](#) (Устный)

Авторы: [Заборенко Андрей](#), [Дудко Лев](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Воротников Георгий](#)
[5th International Workshop on Deep Learning in Computational Physics DLCP-21](#), Москва, Россия, 28-30 июня 2021

8) [Status of tqg FCNC searches at 13 TeV](#) (Устный)

Авторы: [Boos E.](#), [Belobrova M.](#), [Bunichev V.](#), [Dudko L.](#), [Iliushin M.](#), [Mandrik P.](#), [Perfilov M.](#), [Popov A.](#), [Skovpen K.](#), [Sivakova E.](#), [Slabospitskii S.](#), [Volkov P.](#), [Vorotnikov G.](#), [Zaborenko A.](#)

[tX CMS group working meeting](#), ЦЕРН, Швейцария, 5 мая 2021

9) [Поиск нейтральных токов во взаимодействиях топ кварка, проявляющихся в эксперименте CMS](#) (Устный)

Авторы: [Белоброва М.И.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Воротников Г.А.](#), [Волков П.В.](#), [Дудко Л.В.](#), [Заборенко А.Д.](#), [Перфилов М.А.](#), [Сивакова Е.С.](#)

[Ломоноовские чтения - 2021. Секция физики](#), МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 21-28 апреля 2021

10) [Процессы рождения трех топ кварков на адронных коллайдерах](#) (Устный)

Авторы: [Боос Э.Э.](#), [Дудко Л.В.](#)

[Ломоноовские чтения - 2021. Секция физики](#), МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 21-28 апреля 2021

11) [Разделение процессов парного и одиночного рождения топ-кварков с идентичным конечным состоянием tWb в фазовом пространстве с помощью нейронных сетей](#) (Устный)

Авторы: [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Воротников Г.А.](#), [Волков П.В.](#), [Дудко Л.В.](#), [Перфилов М.А.](#)

[Ломоносовские чтения 2021](#), Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, 20-29 апреля 2021

12) [General recipe to form input space for deep learning analysis of HEP scattering processes](#) (Приглашенный)

Авторы: [Дудко Л.В.](#), [Воротников Г.А.](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Перфилов М.А.](#)

[IML Machine Learning Working Group Workshop](#), CERN, ЦЕРН, Швейцария, 16 февраля 2021

13) [Исследования физики топ-кварка](#) (Приглашенный)

Автор: [Дудко Л.В.](#)

[Научная сессия к 75-летию НИИЯФ МГУ](#), г. Москва, РФ, Россия, 15-17 февраля 2021

14) Status of tqg FCNC searches at 13 TeV (Устный)

Авторы: [Boos E.](#), [Belobrova M.](#), [Bunichev V.](#), [Dudko L.](#), [Iliushin M.](#), [Mandrik P.](#), [Perfilov M.](#), [Popov A.](#), [Skovpen K.](#), [Sivakova E.](#), [Slabospitskii S.](#), [Volkov P.](#), [Vorotnikov G.](#), [Zaborenko A.](#)
[tX CMS group working meeting](#), ЦЕРН, Швейцария, 27 января 2021

15) General recipe to form input space for deep learning analysis of HEP scattering processes.

(Устный)

Авторы: [Дудко Л.В.](#), [Воротников Г.А.](#), [Волков Петр Владимирович](#), [Перфилов М.А.](#)
[4th Inter-experiment Machine Learning Workshop](#), ЦЕРН, Швейцария, 19-23 октября 2020

16) Форвард-калориметр CASTOR установки CMS

Авторы: Богданова Г.А., Волков П.В., Волков В.Ю., Лукина О.Ю., Катков И.И., Хейн Л.В.
"ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ - 2021" Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ им Ломоносова, Россия, 20-29 апреля 2021

17) Inelastic diffraction at CMS , Хейн Л.В.

[ISCRA-2021: International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics](#), Moscow, Россия, 8-10 июня 2021

18) Б.Б. Левченко, Скрытые параметры в соотношениях неопределенностей Гейзенберга и Ландау-Пайрлса. Формула для скорости виртуальных частиц. Научная конференции «Ломоносовские чтения», Подсекция «Физика высоких энергий», 20 апреля, 2021 г.

19) Б.Б. Левченко, О сверхсветовой скорости виртуальных фотонов в глубоко неупругом рассеянии. Научная конференции «Ломоносовские чтения», Подсекция «Физика высоких энергий», 20 апреля, 2021 г.

20) L.M. Shcheglova, N. Brook, C. Catterall «Scaled momentum spectra in target region in DIS – progress report», ZEUS Collaboration Meeting, Feb. 17, 2021, DESY, Hamburg, Germany

20) Кузьмин В.А. «Исследование точности метода нахождения юстировочных параметров время проекционной камеры детектора MPD мегапроекта NICA (Дубна)», Ломоносовские чтения 2021.

21) Kuzmin V. «TPC alignment)», 7-th Collaboration meeting of the MPD Experiment at NICA Facility, October 2021.

22) «Generalization of Einstein-Gauss-Bonnet cosmological attractor to the model with non-minimally coupling to the Ricci scalar», Pozdeeva Ekaterina, Recent Advances in Theoretical Cosmology and Astrophysics, Греция, 16-19 декабря 2021

23) «Einstein-Gauss-Bonnet models leading to cosmological attractors inflationary parameters», Pozdeeva Ekaterina, Geometric Foundations of Gravity 2021, Tartu, Эстония, 28 июня - 2 июля 2021

24) «Воспроизведение инфляционных параметров космологических аттракторов в моделях с Гаусс-Бонне взаимодействием», Поздеева Е.О., Вернов С.Ю., Ломоносовские чтения - 2021. Секция Физики, Москва, Россия, 20-30 апреля 2021

25) «Построение инфляционных моделей с членом Гаусса-Бонне с помощью эффективного потенциала», Вернов С.Ю., Поздеева Е.О., Ломоносовские чтения - 2021. Секция Физики, Москва, Россия, 20-30 апреля 2021

26) «De Sitter Solutions In Models With The Gauss-Bonnet Term», Vernov Sergey, Pozdeeva Ekaterina, 1st Electronic Conference on Universe, Швейцария, 22-28 февраля 2021

27) «Models of Gauss-Bonnet gravity leading to cosmological attractors predictions», Pozdeeva Ekaterina, 1st Electronic Conference on Universe, Швейцария, 22-28 февраля 2021

Публикации за 2021 год:

[1] *CMS Collaboration*: “Observation of $t\bar{t}$ production in the single-lepton channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV” *JHEP* 11 (2021) 111

[2] *CMS Collaboration*: “Search for W' bosons decaying to a top and a bottom quark at $s=13$ TeV in the hadronic final state” *Phys.Lett.B* 820 (2021) 136535

[3] E. Boos, L. Dudko “Triple top quark production in Standard Model” e-Print: [2107.07629](https://arxiv.org/abs/2107.07629)

[4] The very forward CASTOR calorimeter of the CMS experiment
Bogdanova G., Katkov I., Kheyn L., Lukina O., Volkov P., Volkov V., et al.... (CMS Collaboration)
JINST **16** 2021 P02010

[5] ZEUS Collaboration; I. Abt, ..., Golubkov Yu.A., Levchenko B.B., Lukina O.Yu., Shceglava L.M. et al.
Azimuthal correlations in photoproduction and deep inelastic ep scattering at HERA
Preprint DESY 21-099, 2021, [ArXiv:2106.12377](https://arxiv.org/abs/2106.12377) v1., Submitted to JHEP

[6] ZEUS Collaboration; I. Abt, ..., Golubkov Yu.A., Levchenko B.B., Lukina O.Yu., Shceglava L.M. et al
Impact of jet-production data on the next-to-next-to-leading-order determination of HERAPDF2.0 parton distributions.
[arXiv:2112/01120](https://arxiv.org/abs/2112.01120)

[7] Pozdeeva E.O., Vernov S.Y., Construction of inflationary scenarios with the Gauss–Bonnet term and nonminimal coupling. *Eur. Phys. J. C* 81,633 (2021). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09435-8>

[8] Vernov S., Pozdeeva E., De Sitter Solutions in Einstein–Gauss–Bonnet Gravity. *Universe* 2021, 7, 149. <https://doi.org/10.3390/universe7050149>

[9] Pozdeeva, E.O. Deviation from Slow-Roll Regime in the EGB Inflationary Models with $r \sim N e^{-1}$. *Universe* 2021, 7, 181. <https://doi.org/10.3390/universe7060181>

[10] Pozdeeva E., Accuracy of an EGB Exponential Inflationary Scenario. *Phys. Sci. Forum* 2021, 2, 20. <https://doi.org/10.3390/ECU2021-09294>

[11] Vernov, S.; Pozdeeva, E. De Sitter Solutions in Models with the Gauss-Bonnet Term. *Phys. Sci. Forum* 2021, 2, 53. <https://doi.org/10.3390/ECU2021-09305>

[12] Levchenko B.B., Hidden Parameters in Heisenberg's and Landau-Peierls Uncertainty Relations, Speed of Virtual Particles and Space-Time Metric Types, e-Print: <https://arxiv.org/abs/2103.09433>