

**Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ**  
**Основные результаты полученные в 2020 году.**

Исследования проводятся в рамках НИР:

бюджетная тема 3.2

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

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 ЛHC, проведено измерение дифференциального сечения  $t$ -канального рождения одиночного топ кварка в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. Измерены зависимости сечения от поперечного импульса, псевдорapidити и угла поляризации топ кварка. Измерена асимметрия связанная со спиновыми состояниями топ кварка. [*Eur. Phys. J. C 80 (2020) 370*] Все измерения находятся в согласии с предсказаниями СМ. Проведено модельно-независимое измерение элементов Кабибо-Кобаяши-Маскава матрицы в секторе топ кварка. Измерения проведены в  $t$ -канальном процессе одиночного рождения. Соблюдая требование унитарности матрицы был установлено нижнее ограничение  $|V_{tb}| > 0.970$  на уровне достоверности 95%. В отсутствие требования унитарности матрицы проведены полностью модельно-независимые измерения:  $|V_{tb}| = 0.988 \pm 0.024$ , и  $|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 = 0.06 \pm 0.06$  [*Phys. Lett. B 808 (2020) 135609*]. Продолжено исследование возможного проявления нейтральных токов, меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком, проходящем через обмен 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. Завершено моделирование процесса ассоциативного рождения топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком точно учитывающем однорезонансные, двухрезонансные вклады и интерференцию между ними, и включающее основные возможные аномальные операторы за рамками СМ, во взаимодействии топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком. Моделирование проведено ранее разработанным методом включения дополнительных полей. Созданы необходимые для экспериментального поиска Монте-Карло генераторы. Созданные генераторы и смоделированные события внедрены в экспериментальном поиске исследуемых отклонений в эксперименте CMS, и проходят необходимое официальное моделирование отклика детектора. [*Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 926–930*]

Проведено исследование границ применимости подхода эффективной теории поля (EFT) при нахождении экспериментальных ограничений на вклад аномальных операторов исходя из условия унитарности. Были рассмотрены операторы описывающие нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействиях топ кварка. Вычислены аналитические зависимости амплитуды таких процессов. Проведены численные вычисления зависимостей поведения сечений при различных энергиях. Продемонстрировано стабильное поведение сечений при возрастании энергии. Аналитические выражения для амплитуды процессов позволили показать, что получаемые экспериментальные ограничения не выходят за границы унитарности и используемый подход исследований может быть применен не только для современных коллайдеров, но и планируемого коллайдера FCC при энергии 100 ТэВ. Опубликованная работа позволила количественно подтвердить применимость используемого подхода для современных и планируемых коллайдеров. [Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 921–925.]

Продолжена разработка программных средств для дальнейшего открытого использования массива экспериментальных данных, полученных с помощью форвард-калориметра CASTOR установки CMS. Результаты работы переднего калориметра CASTOR (Centauro и SStrange Object Research) установки CMS в период эксплуатации в сеансах по набору статистики в Run 1 и Run 2 на LHC обобщены и представлены в статье «The very forward CASTOR calorimeter of the CMS experiment» (arXiv:2011.01185 [physics.ins-det]), направленной для публикации в JINST.

Впервые проведено изучение дифракции в столкновениях протон-ядро при энергиях LHC. В CMS проведено измерение распределения по быстротным щелям (rapidity gaps) в дифракционных столкновениях протон-свинец при энергии 8.16 Тев на нуклон. Получено сечение, существенно превышающие сечения, предсказываемыми Монте-Карло моделированием. С учётом того, что Монте-Карло удовлетворительно описывают сечения в протон-протонных столкновениях, это означает, что ядерные эффекты вносят физические особенности, которые плохо учитываются в моделях.

Продолжено участие в экспериментах BM@N и MPD мегасайенс-проекта комплекс «NICA» на базе ОИЯИ, Дубна. В составе коллаборации MPD продолжен поиск и исследование наблюдаемых, чувствительных к новым фундаментальным явлениям в плотной адронной и кварк-глюонной материи, и разрабатываются методы их анализа на экспериментальных установках комплекса NICA. Продолжена разработка методики и программной системы юстировки время-проекционного трекового детектора (TPC) установки MPD на основе использования реальных треков. Продолжено участие в физическом анализе на экспериментальной установке BM@N комплекса «NICA».

В 2020 г. коллаборация ZEUS продолжила анализ данных, набранных в экспериментах H1 и ZEUS на электрон-протонном коллайдере HERA (г. Гамбург, Германия).

Были измерены 2-х частичные азимутальные корреляции в нейтральных токах при глубоко-неупругом рассеянии с виртуальностью  $Q^2 > 5 \text{ ГэВ}^2$  при энергии в СЦИ 318 ГэВ в событиях с большой множественностью. Измеренные корреляции не подтверждают свойств коллективного поведения материи, недавно наблюдаемых на ускорителях RHIC и LHC.

При больших значениях переменной  $x$  функции распределения партонов плохо определены и сильно варьируются в зависимости от вида функций глобального фитирования. Для преодоления этой проблемы в работе была разработана методика сравнения предсказаний различных параметризаций. Эта методика была использована для сравнения предсказаний общеупотребительных PDF наборов с данными ZEUS в указанной области значений переменной  $x$ . Опубликовано две статьи в высоко рейтинговых научных журналах.

На LHC (БАК) и в строящемся HL-LHC (БАК-ВС), более 100 коллиматоров и магнитов с параллельными плоскими поверхностями. Проводится исследование влияние окружающих

проводников и магнетиков с плоскими границами на поля, динамику и стабильность пучка под влиянием поверхностных зарядов и токов.

Продолжены работы по развитию системы тестирования и подключения к центральной системе управления и контроля (DCS) установки CMS новой модификации электронных карт регистрации крейтов электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений (mTCA). Новая модификация электронных карт входит в систему синхронизации и триггерную систему установки CMS.

В эксперименте LHCb, коллайдера LHC проводится разработка новой системы программной юстировки оптической системы RICH детекторов LHCb для третьего периода работы LHC (Run 3) на основе использования реальных данных, в рамках нового фреймворка «реально-временной анализ» (RTA).

Получены члены самодействия поля радиона до четвертого порядка включительно, а также члены взаимодействия радиона с полями SM до второго порядка (того же порядка по константе связи, что и члены самодействия). Продолжено исследование эффекта подобия полей радиона и Хиггса. На древесном уровне показано, что при произвольном количестве участвующих в процессе векторных и скалярных бозонов SM и произвольном количестве радионов результат аналогичен процессу с заменой радионов на бозоны Хиггса и заменой масс и констант самодействия радиона. Выписаны точные выражения в различных вариантах соотношений параметров модели для масс и констант взаимодействий физических мод.

Продолжены исследования нелинейных взаимодействий Радиона, сравнение с бозоном Хиггса. Исследовалось возникновение иерархии энергетических масштабов в теориях с планковскими дополнительными измерениями за счет эффекта Казимира.

Найдены инфляционные сценарии в Эйнштейн-Гаусс-Бонне гравитации с потенциалом пропорциональным четвертой степени поля. Реконструирована модель приводящая к аналитической зависимости инфляционных параметров от числа e-фолдингов вида космологического аттрактора в Эйнштейн-Гаусс-Бонне гравитации. Применена процедура реконструкции для поиска решения де Ситтера модели нелокальной Эйнштейн-Гаусс-Бонне гравитации функционального вида. Метод суперпотенциала применен для построения моделей  $f(R)$  гравитации с точными решениями.

В рамках теоретического исследования распадов  $B^{\pm} \rightarrow l^{\pm} l^{\pm} \nu_l$ , изучено влияние непертурбативной фазы между  $\rho(770)$  и  $\omega(782)$  — резонансами на амплитуды данных распадов. Учен вклад масс лептонов в конечном состоянии.

С помощью программного пакета EvtGen разработаны новые инструменты для получения парциальных ширин многочастичных распадов нейтральных B-мезонов, создана модель распада  $B_s$ -мезона на четыре заряженных лептона в приближении, когда формфакторы по каждому дилептоному каналу факторизуются. Получена предварительная оценка парциальной ширины  $Br(B_s \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-) \sim 7 \cdot 10^{-10}$ , а также некоторые дифференциальные характеристики данного распада.

## Введение

Существующие экспериментальные данные не позволяют предпочесть какой-то выделенный сценарий за рамками Стандартной модели (SM), и существенные усилия концентрируются на модельно-независимом поиске возможных отклонений от предсказаний SM. В основе модельно-независимого поиска выбран подход эффективной теории поля, включающей эффективные операторы высших размерностей, сохраняющих симметрии SM. Такие операторы способны описать все возможные новые взаимодействия частиц SM 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.

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 быстрой 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.

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 сильновзаимодействующей 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 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.

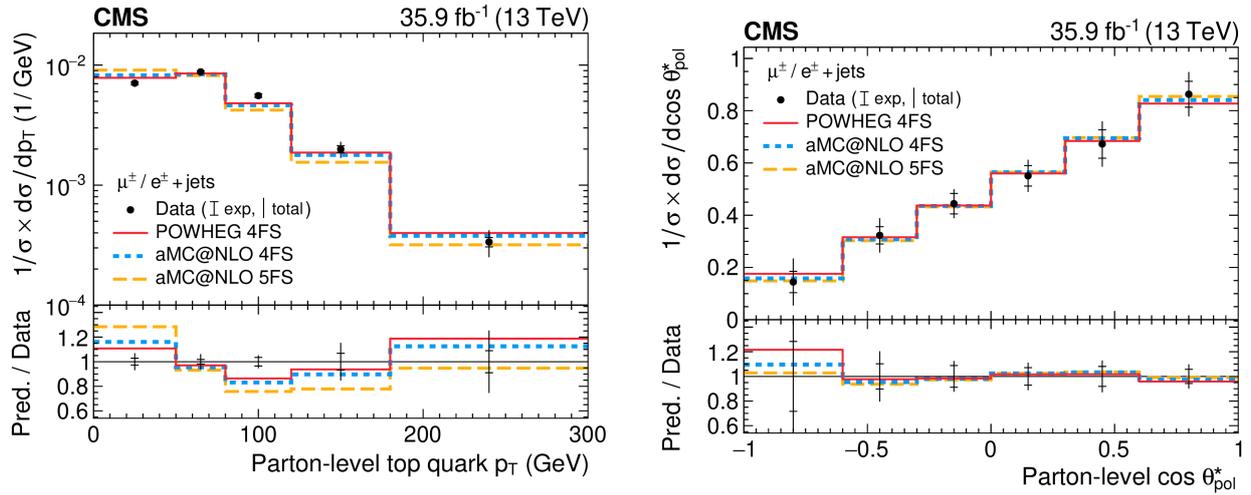
## Результаты

### 1. Исследования топ-кварка в эксперименте CMS.

Э.Э. Боос, А.В. Баскаков, 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 2020 году завершено и опубликовано измерение дифференциальных сечений одиночного  $t$ -канального рождения топ кварка. Измерены распределения поперечного импульса, псевдорapidити топ кварка,  $W$  бозона от распада топ кварка и заряженного лептона от распада  $W$  бозона. Измерен поляризационный угол и асимметрия спиновых состояний топ кварка. Измерено отношение дифференциальных сечений рождения топ и анти-топ кварков. Все измерения находятся в согласии с предсказаниями СМ. На левой картинке рисунка 1.1 показано дифференциальное сечение партонного уровня в зависимости от поперечного импульса топ кварка. На правой картинке рисунка 1.1 показано дифференциальное сечение партонного уровня в зависимости от косинуса поляризационного угла топ кварка, определяемого как косинус угла между направлением импульса заряженного лептона и спектаторного кварка легкого аромата в системе покоя топ кварка. Эта переменная наиболее четко отражает корреляцию спиновых состояний в рождении и распаде топ кварка и подтверждает (V-A) структуру заряженных токов во взаимодействии топ кварка, определенную в СМ. [*Eur. Phys. J. C* 80 (2020) 370]



**Рисунок 1.1.** Показано измеренное дифференциальное сечение партонного уровня t-канального рождения одиночного топ кварка в зависимости от поперечного импульса топ кварка (левый рисунок) и угла поляризации (правый рисунок).

Проведено первое прямое, модельно-независимое измерение элементов Кабиббо-Кобаяши-Маскава матрицы в секторе топ кварка. Для случая сохранения требования унитарности матрицы, в рамках СМ, были получены следующие ограничения  $|V_{tb}| > 0.970$  и  $|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 < 0.057$  на уровне статистической достоверности 95%. Без ограничений по унитарности и ограничения на ширину топ кварка, измеренные значения составили  $|V_{tb}| = 0.988 \pm 0.024$ ,  $|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 = 0.06 \pm 0.06$  и  $\Gamma_{\text{obs}}^{\text{top}}/\Gamma_t = 0.99 \pm 0.42$ . [*Phys. Lett. B 808 (2020) 135609*].

Проведено исследование границ применимости подхода эффективной теории поля (EFT) при нахождении экспериментальных ограничений на вклад аномальных операторов, исходя из условия унитарности. Были рассмотрены операторы описывающие нейтральные токи меняющие аромат кварков (FCNC) во взаимодействиях топ кварка. Вычислены аналитические зависимости амплитуды процессов проходящих через FCNC в рождении топ кварка. Проведены численные вычисления зависимостей поведения сечений процессов при различных энергиях. Продемонстрировано стабильное поведение сечений при возрастании энергии. Современный модельно-независимый подход к поиску возможных отклонений от предсказаний СМ основан на методах эффективной теории поля и заключается во введении в лагранжиан возможных калибровочно-инвариантных операторов, определенной размерности, расширяющих взаимодействия описываемые в рамках СМ. Такой подход предполагает стройную и последовательную теорию на более высоких масштабах энергии проявляющуюся в доступном диапазоне энергий в виде небольших отклонений описываемых в рамках EFT подхода. Для экспериментального поиска возможных отклонений критически важно оценить допустимую область применения EFT подхода в конкретном экспериментальном анализе. Вычисленные аналитические выражения для амплитуды процессов позволили показать, что получаемые экспериментальные ограничения не выходят за границы унитарности и используемый подход исследований может быть применен не только для современных коллайдеров, но и планируемого коллайдера FCC при энергии 100 ТэВ. [*Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 921–925.*]

Завершено моделирование процесса ассоциативного рождения топ кварка и W бозона с правильным учетом интерференции с парным рождением топ кварков, и введенными аномальными операторами описывающими возможные отклонения от предсказаний Стандартной модели (СМ) в этих процессах. Для вычислений был использован метод дополнительных полей, ранее разработанный авторским коллективом гранта. Созданы Монте-Карло генераторы позволяющие создавать наборы событий для точного

моделирования проявления возможных отклонений от предсказаний СМ в таких процессах с точностью следующего за ведущим, древесном порядке теории возмущений. Такие генераторы необходимы для реального использования проведенных вычислений в экспериментальном анализе. Созданные генераторы событий уже использованы в эксперименте CMS коллайдера LHC (БАК) для моделирования процесса рождения топ кварка в ассоциации с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком ( $tWb$ ), включающем диаграммы одиночного (электрослабого) и парного (в сильных взаимодействиях) рождения топ кварка с правильным учетом интерференции между ними. Моделирование позволило добавить вклад возможных операторов векторного и магнитного типов, лево- и право-взаимодействующих заряженных токов описывающих основные возможные отклонения от предсказаний СМ в этих процессах. Созданные события проходят официальное моделирование отклика детектора и готовятся для экспериментального анализа в рамках официального плана исследований коллаборации CMS. [Physics of Atomic Nuclei, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 926–930]

В процессе подготовки нейронных сетей для анализа рождения топ-кварков, проведено исследование по оптимизации и формулировке универсального, общего рецепта выбора низкоуровневых наблюдаемых для исследования процессов рассеяния методами глубоких нейронных сетей. Данный метод, в отличие от обычных нейронных сетей, показывает способность анализировать неподготовленную, низкоуровневую информацию и демонстрирует существенно более высокую эффективность в ряде примеров. Предложенный метод был описан в публикации и представлен на международном рабочем совещании в ЦЕРНе, посвященном методам машинного обучения [Int.J.Mod.Phys.A 35 (2020) 21, 2050119].

Продолжено исследование возможного проявления нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком проходящем через обмен 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 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.

## **1а. Форвард-калориметр CASTOR установки CMS**

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

Продолжена разработка программных средств для дальнейшего открытого использования массива экспериментальных данных, полученных с помощью форвард-калориметра CASTOR установки CMS. Обработка данных рабочих сеансов с участием детектора CASTOR предусматривает проведение калибровки для каждого рабочего сеанса в зависимости от выбранных режимов работы. Поскольку при эксплуатации малоуглового калориметра применялась в рабочем сеансе персональная поканальная настройка высоковольтного анодного и катодного питания каждого фотоумножителя, то необходимо обеспечить возможность извлечения этой информации из центральных Oracle CMS баз данных (Oracle\_CMS\_database). С этой целью продолжена разработка программных скриптов в проекте CASTOR\_WinCC\_OA, установленном как служба на виртуальной машине rscmsmsudcs1.cern.ch в облаке CERN.

Разрабатываемое ПО предусматривает дружественный интерфейс, простое и удобное меню для извлечения архивных данных CASTOR\_HV из больших массивов баз данных конфигураций и состояний CMS (рис.1а).

### Castor HV historical data from Oracle Condition Database

Double click **HV\_CASTOR** shortcut (bottom right corner of desktop) to view CASTOR HV information for the selected timestamp from Oracle DataBase

	Group1	Group2	Group3	Group4
Module 1	1200.5	1200.5	1150.5	1100.5
Module 2	1201.5	1201.5	1202.0	1202.0
Module 3	1202.0	1202.0	1201.5	1201.0
Module 4	1201.0	1201.0	1201.5	1201.5
Module 5	1600.0	1600.0	1599.5	1599.5
Module 6	1600.0	1600.5	1800.0	1800.5
Module 7	1800.0	1800.0	1799.5	1800.0
Module 8	1800.0	1799.5	1800.5	1800.0
Module 9	1600.0	1600.0	1599.5	1600.0
Module 10	1599.5	1600.0	1600.5	1600.0
Module 11	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0
Module 12	1600.0	1600.5	1600.0	1600.0
Module 13	1600.0	1600.5	1599.5	1599.5
Module 14	1600.0	1599.5	1600.0	1600.5
Module 15	???	???	???	???
Module 16	???	???	???	???

Рис. 1а. Презентация разработанного программного обеспечения.

Информация об использовании нового разработанного ПО размещена на центральной странице CERN\_CMS\_CASTOR\_twiki. При использовании ПО в тестовом режиме пользователи отметили значительное упрощение процесса калибровки для различных режимов работы форвард-калориметра CASTOR.

В настоящее время 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.

Результаты работы переднего калориметра CASTOR (Centauro и SStrange Object Research) установки CMS в период эксплуатации в сеансах по набору статистики в Run 1 и Run 2 на LHC обобщены и представлены в статье «The very forward CASTOR calorimeter of the CMS experiment» (arXiv:2011.01185 [physics.ins-det]), направленной для публикации в JINST.

## 1б. Первое измерение распределений по быстротным щелям (rapidity gaps) в столкновениях pPb при энергии 8.16 ТэВ.

Л.А. Хейн

С ростом энергии адронного взаимодействия основным переносчиком взаимодействия становятся нейтральные и бесцветные объекты, называемые померонами. Свойства померона наиболее ясно проявляются в процессах неупругой дифракции, в которой взаимодействующие адроны или ядра обмениваются импульсом, одна или обе частицы остаются в исходном состоянии и при этом рождаются новые частицы. Процессы дифракции проявляются в наличие больших пустых интервалов в распределении частиц по псевдобыстроте (rapidity gaps, RG).

Было проведено измерение распределения по RG в столкновения протон-свинец при энергии 8.16 ТэВ на нуклон для померон-свинец и померон-протон топологий.

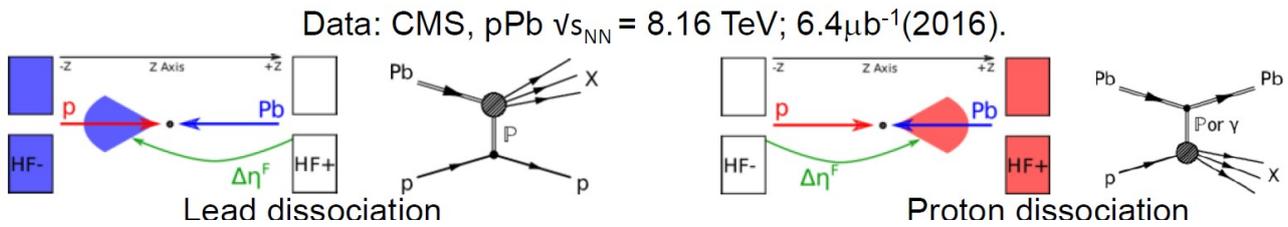


Рисунок 1 Топология изучаемых событий. Слева - диссоциация ядра свинца, справа - диссоциация протона.

Анализ выполнен на большом интервале псевдобыстрот - 10.4 единицы. Проведено сравнение с предсказаниями Монте-Карло моделей HIJING, EPOS-LHC and QGSJETII.

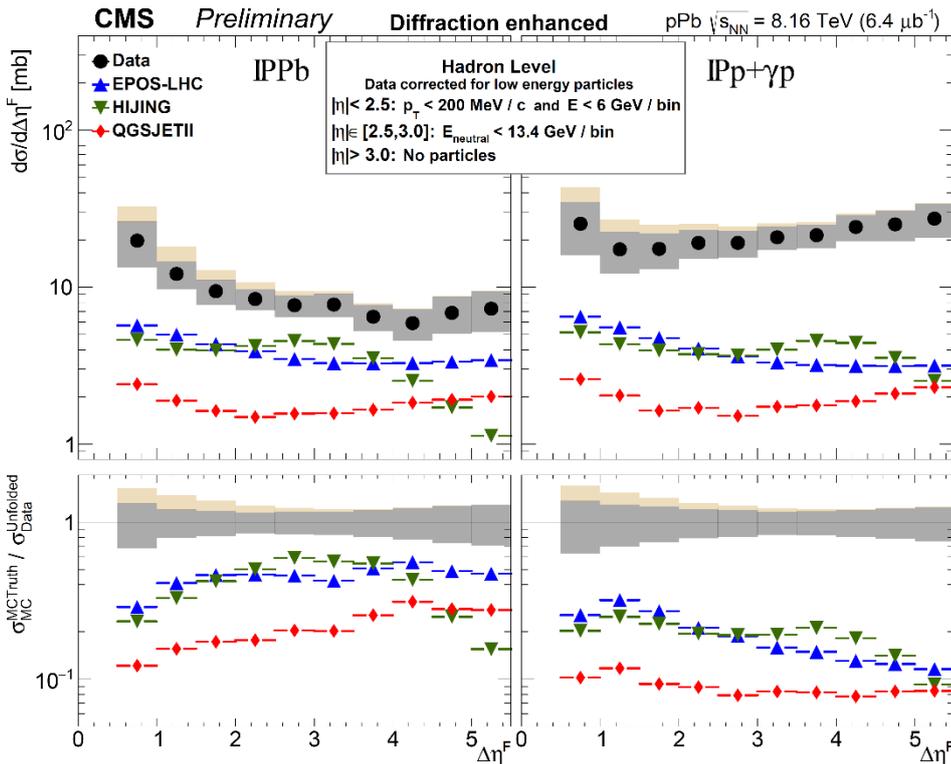


Рисунок 2 Распределения по RG, Слева - взаимодействия померон-свинец и гамма-свинец (диссоциация свинца), справа - померон-протон и гамма-свинец (диссоциация протона). Внизу - отношений сечений Монте-Карло и данных.

На рисунке 2 представлены окончательные результаты - распределения по RG для двух топологий. В случае померон-протон топологии большой дополнительный вклад даёт гамма-протон взаимодействие, поэтому вывод о дифракции сделать трудно. В случае померон-свинец топологии, где вклад гамма-протон взаимодействия мал, главный вывод заключается в том, что при больших RG, где вклад недифракционных взаимодействий пренебрежим, сечение в данных не менее чем в два раза превышает сечения в Монте-Карло. Это существенный результат, так как в дифракции, измеренной в протон-протонных столкновениях, Монте-Карло достаточно хорошо совпадает с данными. Таким образом, ядерные эффекты вносят физические особенности, которые плохо учитываются в моделях.

## 1в. Разработка программного комплекса мониторинга электроники стандарта mTCA

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

Продолжены работы по развитию системы тестирования и подключения к центральной системе управления и контроля (DCS) установки CMS новой модификации электронных карт регистрации крейтов электроники с микроархитектурой для телекоммуникационных вычислений (mTCA). Новая модификация электронных карт входит в систему синхронизации и триггерную систему установки CMS.

Для вновь разрабатываемых компонент в рамках оболочки JCOF Framework (Joint Controls Project – подсистема WinCC OA, предназначенная для управления детекторами на LHC) требуется проверка и адаптация для новых версий компонент ПО всего проекта мониторинга электроники стандарта mTCA в составе центральной DCS установки CMS.

В ходе выполнения работ, связанных с переходом на новые версии ПО, модернизированы панели, рабочие программные скрипты, графические тренды, архивирование данных основного проекта мониторинга электроники стандарта mTCA в составе центральной DCS установки CMS. Запускающие панели проверены в локальных ветвях проекта мониторинга суб-детекторов с электроникой mTCA.

Для решения этой задачи зарегистрирована виртуальная машина в облаке CERN. Созданы запускающие программные скрипты, расположенные на рабочем столе виртуальной машины. Скрипты позволяют просматривать состояние каждого подключенного крейта с электроникой стандарта mTCA, а также вызывать графические тренды, которые показывают изменение всех контролируемых электронных сенсоров во времени (рис. 1в).

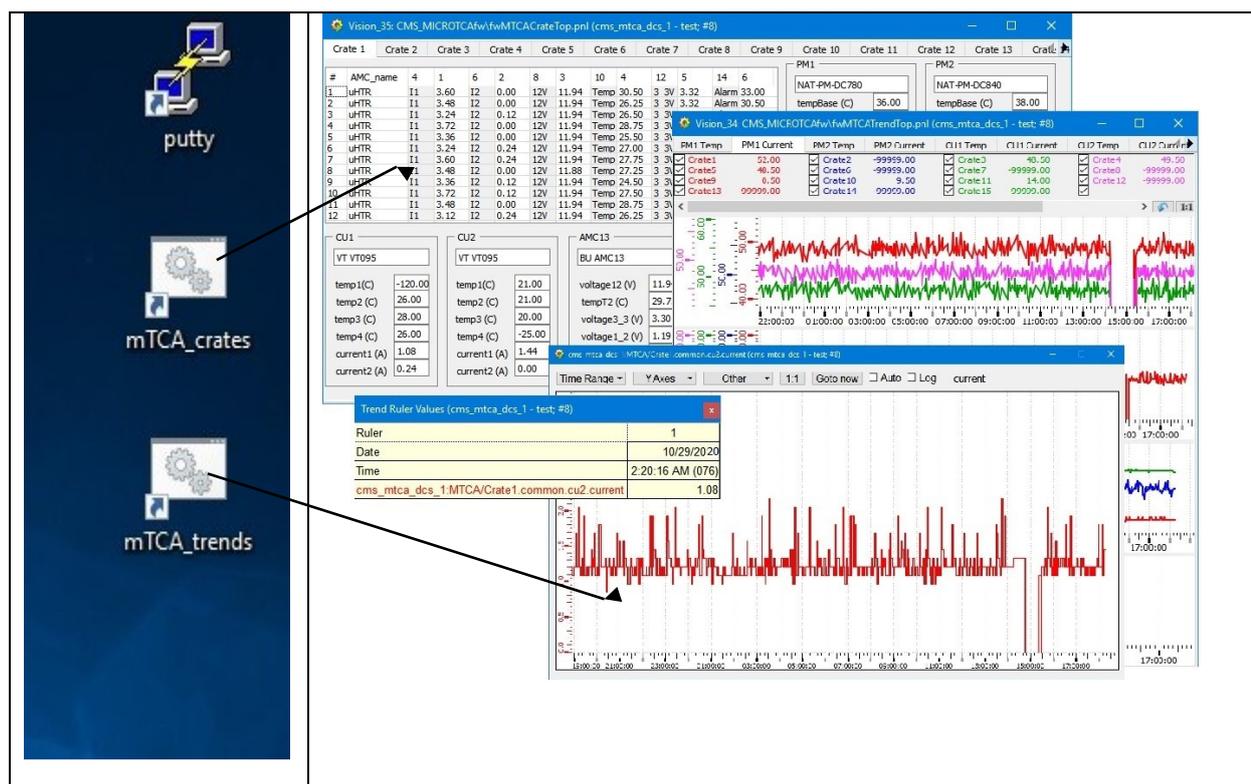


Рис. 1в. Мониторинг электроники стандарта mTCA в составе центральной DCS установки CMS.

## 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)

i. Продолжены исследования в рамках разработки нового метода поиска параметров критической окрестности в релятивистских столкновениях тяжёлых ионов, где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную плазму, при энергии коллайдера NICA (А.Н. Соломин, Л.М. Щеглова).

Указанный подход является частью проекта по поиску подобного рода граничных параметров области образования новой фазы материи, таких как энергия и массы сталкивающихся ядер, при которых наблюдается "смена режима" зависимости известных и новых наблюдаемых от этих параметров. Цель проекта — разработать и применить выдвигаемый в данном проекте новый подход и методы его реализации к исследованию свойств ядерной материи в экстремальных условиях для экспериментов комплекса NICA. В связи с этим специальный акцент направлен на отбор и исследование центральных и ультрацентральных соударений. На основе выдвигаемого подхода планируется цикл экспериментальных исследований, который предполагается выполнять по мере осуществления проекта NICA с набором различных ядер в имеющемся диапазоне энергий.

Разработка нового метода детектирования фазовых переходов адронной материи в ядерных столкновениях проводится на основе имеющихся моделей. В качестве Монте-Карло генератора для калибровки метода выбрана PYTHIA 8.2, в которой имплементировано моделирование физики релятивистских столкновений ядер в диапазоне энергий, захватывающем диапазон NICA.

В результате консультации с одним из создателей PYTHIA Леифом Лённбладом (Leif Lönnblad, Lund University) была решена проблема генерации событий ядро-ядерных взаимодействий при энергиях NICA, т. е. понижена нижняя энергетическая граница описания, которая до этого была на уровне нижней энергии ускорителя RHIC.

Модель хорошо описывает общие свойства конечных адронных состояний таких, как распределения по множественности и поперечному импульсу, но не содержит коллективных эффектов и поэтому может служить основой для понимания неколективного фона наблюдаемых, чувствительных к коллективному поведению.

Исследуется количественная зависимость формы двумерного распределения по множественности отрицательно заряженных частиц и массе одного из ядер, сталкивающихся с  $^{197}\text{Au}$ , от прицельного параметра (см. Рис. 2.1).

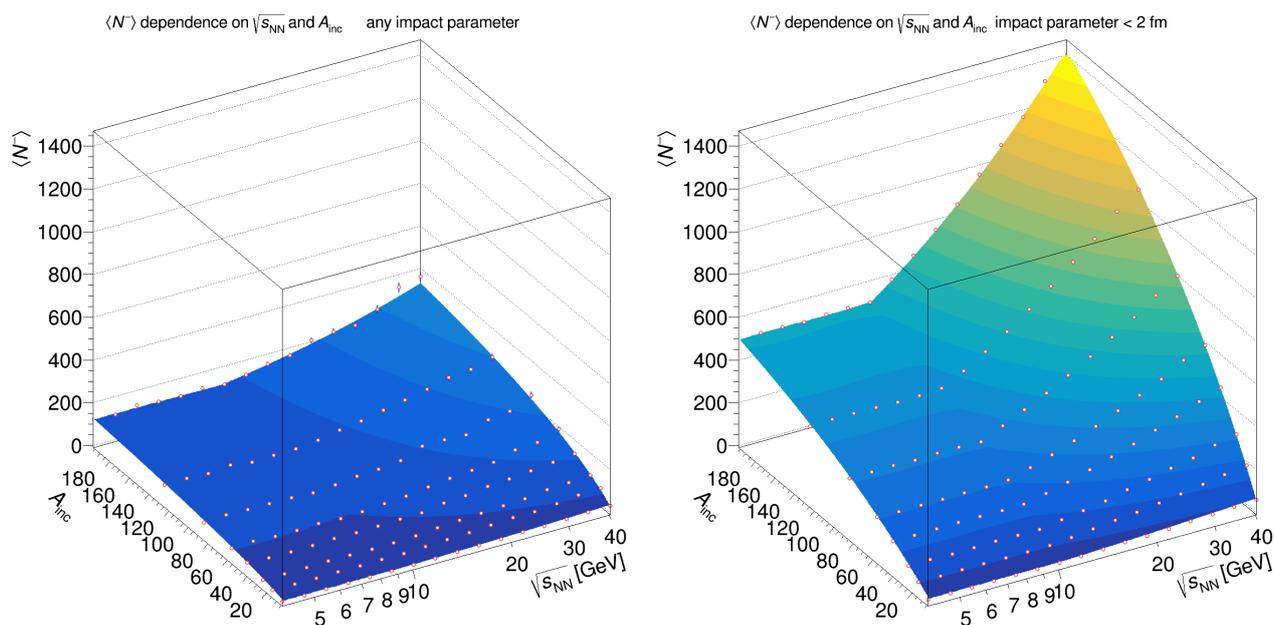


Рис. 2.1 Сравнение двумерной зависимости средней множественности отрицательно заряженных адронов от массы ядра,  $A_{\text{inc}}$ , сталкивающегося с ядром золота,  $^{197}\text{Au}$ , и от энергии нуклон- нуклонного столкновения в системе центра их масс (ряд энергий NICA и RHIC) при всех прицельных параметрах (слева) и для ультрацентральных столкновений при прицельных параметрах в интервале 2 фпрецезионной (справа) в отсутствии фазовых переходов (генератор PYTHIA 8.2).

Для фитирования использовалась эмпирическая функция:

$$f(E, A) = \begin{cases} (C_{E,11} \lg(E) + C_{E,12}(\lg(E))^2 + C_{E,13}(\lg(E))^3) A^{\frac{C_{A,11}197 + C_{A,12}A}{A+197}} 197^{\frac{C_{A,11}A + C_{A,12}197}{A+197}} & E < E_{\text{crit}}(A) \\ (C_{E,21} \lg(E) + C_{E,22}(\lg(E))^2 + C_{E,23}(\lg(E))^3) A^{\frac{C_{A,21}197 + C_{A,22}A}{A+197}} 197^{\frac{C_{A,21}A + C_{A,22}197}{A+197}} & E > E_{\text{crit}}(A), \end{cases}$$

где  $E = \sqrt{s_{\text{NN}}}$ ,  $A$  - масса одного из сталкивающихся ядер, варьируемая в пределах от  $^4\text{He}$  до  $^{197}\text{Au}$ ,  $C_{E,11}, C_{E,12}, C_{E,13}, C_{A,11}, C_{A,12}, C_{E,21}, C_{E,22}, C_{E,23}, C_{A,21}, C_{A,22}$  - подбираемые параметры,  $E_{\text{crit}}(A)$  - энергия, по достижении которой значение верхней формулы фитирующей функции становится больше значения нижней.

Графики демонстрируют сильную чувствительность выбранной зависимости от степени центральности столкновения в диапазоне энергий NICA. Изменение поведения зависимости в районе 10 ГэВ характерно для множественного рождения в адронных столкновениях и не связано с коллективными эффектами. В диапазоне NICA зависимость плоская, следовательно обнаружение каких-либо особенностей в этой области будет признаком возможного фазового перехода.

Разработка метода продолжится с использованием моделей, претендующих на описание предполагаемого перехода.

ii. Продолжена разработка программной системы юстировки время-проекционной камеры многофункционального детектора MPD Мегапроекта NICA на основе использования реальных треков (В.А. Кузьмин).

Разработана вариация методики юстировки прибора по получаемым экспериментальным данным. Было создано упрощенное моделирование работы прибора, с помощью которого показана возможность использовать для юстировки положения секторов время-проекционной камеры её лазерную систему, изначально спроектированную только для мониторинга свойств газа детектора.

Определение прецизионных поправок программного описания геометрии трекового детектора производились путём минимизации функционала вида

$$\chi^2 = F(\bar{q}, \bar{p}) = \frac{\sum_{\text{events}} \sum_i \text{track} \left( \bar{r}_i(\bar{p}_k) - T_i(\bar{q}) \right)^2}{\sigma^2},$$

где  $\mathbf{r}(\mathbf{p})$  — координаты  $i$ -го хита трека, восстановленного по данным  $k$ -го сектора камеры.  $\mathbf{T}(\mathbf{q})$  - координаты ближайшей к хиту точки восстановленного трека с параметрами  $\mathbf{q}$ .

Для исследования свойств функции  $F(\mathbf{q}, \mathbf{p})$  было разработано Монте-Карло моделирование отклика чувствительных элементов время-проекционной камеры (пэдов) на заряженные частицы, движущиеся внутри камеры как в присутствии магнитного поля, так и в его отсутствии.

Результаты моделирования позволили численно оценить искажения в юстировке секторов ТРС в зависимости от типа трека и его толщины.

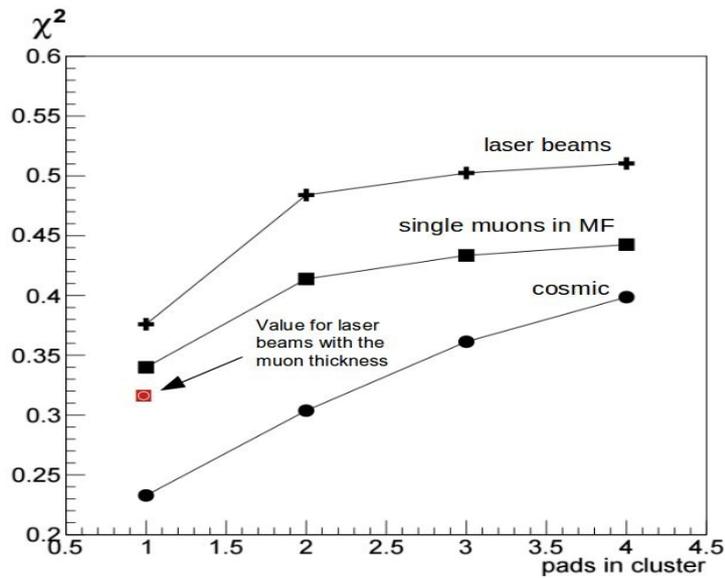


Рис. 2.2

На Рис. 2.2 показана зависимость функции  $F(q,p)$  от вида регистрируемого трека и от максимального числа пэдов при реконструкции кластера.

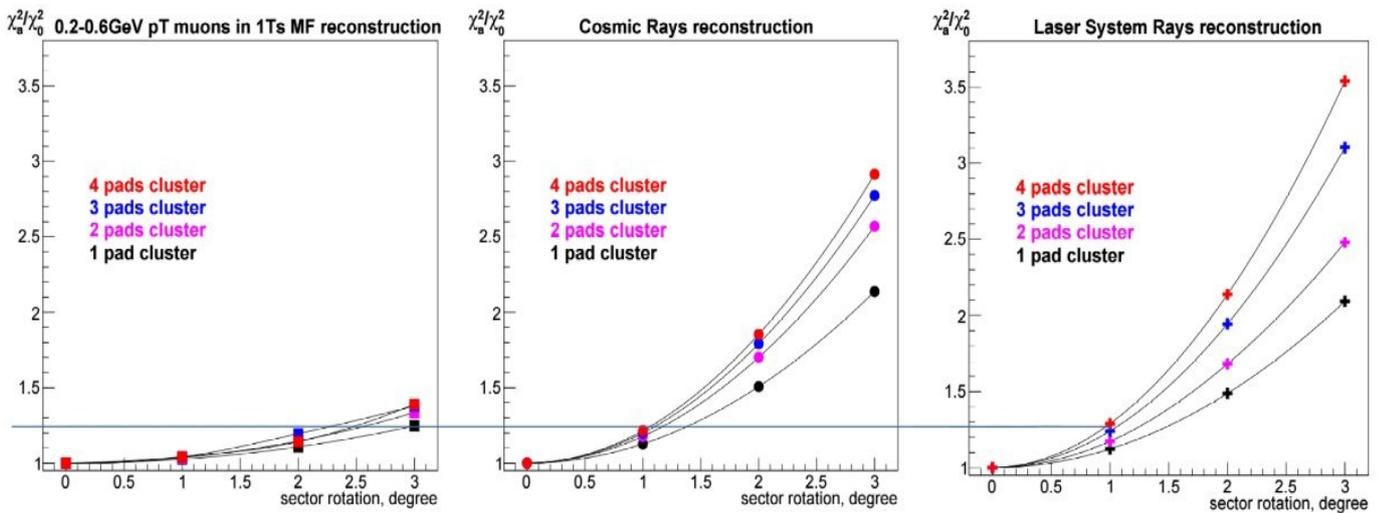


Рис. 2.3

На Рис. 2.3 приведены зависимости чувствительности функционала к величине поворота сектора от количества пэдов вовлечённых в кластер высидившегося заряда от трека различного происхождения.

Моделирование отклика чувствительных элементов время-проекционной камеры для треков различной толщины и их реконструкция в магнитном поле и без него созданы в рамках вычислительной инфраструктуры mpdroot. Исследования точностных характеристик юстировки время-проекционной камеры выполнено средствами созданного ПОю

Показана возможность юстировки время-проекционной камеры по лучам лазерной системы настройки детектора, которая изначально была спроектирована только для калибровки свойств газа детектора. Проведённые расчёты показывают, что именно события от лазерных лучей наиболее чувствительны к искажениям в юстировке т.н. секторов время-проекционной камеры. Результаты представлены в докладе: О. Rogachevsky «Software development & Computing for MPD» на рабочем совещании «VI-th Collaboration Meeting of the MPD Experiment at the NICA Facility»

iii. Продолжена работа в составе экспертной группы по анализу первых результатов по рождению  $\Lambda$  гиперонов на эксперименте BM@N: "Production of  $\Lambda$  hyperons in interactions of the carbon beam of the kinetic energy of 4 A GeV with C, Al, Cu targets" (А.Н. Соломин).

### 3. Исследования в экспериментах ZEUS и H1 коллайдера HERA.

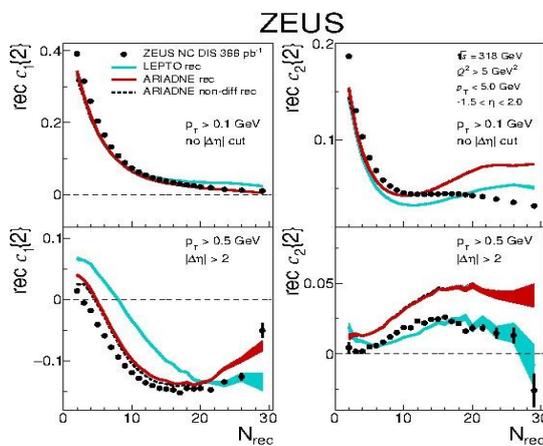
Ю.А. Голубков, Б.Б. Левченко, О.Ю. Лукина, Л.М. Щеглова

#### 3а. Двухчастичные корреляции как пробник коллективного поведения в глубоко-неупругом ер рассеянии на коллайдере HERA [7]

Глубоко-неупругое рассеяние обеспечивает уникальную возможность для исследования динамики многочастичных КХД систем на малых расстояниях. Поиски нового состояния материи, кварк-глюонной плазмы (КГП), являлись основной частью программы исследований с тяжелыми ионами во многих мировых лабораториях. Одним из наиболее важных было наблюдение особенностей коллективного поведения частиц в конечном состоянии, т.е., коррелированное образование конечных частиц.

Асимметрия конечного состояния может быть описана с помощью двухчастичных азимутальных корреляций  $c_n\{2\} = \langle\langle \cos(n \Delta\phi) \rangle\rangle$ , где  $\Delta\phi$  — усредненная разность азимутальных углов двух частиц. Усреднение проводится как внутри события, так и по всем наблюдаемым событиям. Анализировались данные суммарной светимостью  $\sim 366 \text{ pb}^{-1}$ , собранные с помощью детектора ZEUS в период 2003-2007г.г. (HERAII).

В данном корреляционном анализе для сравнения измерений с известными физическими механизмами и для извлечения эффективностей и систематических неопределенностей были



использованы генераторы событий LEPTO 6.5 и ARIADNE 4.12. Физическая картина, лежащая в основе описания процессов КХД каскадов, в генераторах LEPTO и ARIADNE принципиально разная. В LEPTO используется подход, основанный на модели обратной эволюции DGLAP, в то время как в ARIADNE развитие партонного каскада описывается в рамках модели излучения цветного диполя (CDM). Так как вклад дифракционной компоненты мал, то ARIADNE и LEPTO могут быть сравнены с данными с единой точки зрения. Из

приведенного рисунка видно, что ARIADNE описывает  $c_1\{2\}$  лучше, чем LEPTO в панелях (a) и (c). В то же время противоположное справедливо для  $c_2\{2\}$  в панелях (d) при более сильном обрезании по  $p_T$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что ни одна из моделей не даёт полностью удовлетворительного описания данных.

### 36. Изучение партонных распределений в протоне при больших $x$ с использованием данных детектора ZEUS [8]

Пространственные и импульсные распределения кварков и глюонов в адроне в настоящее время не могут быть получены из первых принципов и могут быть извлечены лишь из эксперимента.

Электрон-протонный коллайдер HERA предоставляет подобную возможность. Данные HERA для переменной  $Q^2$ , квадрата переданного четырех-импульса, охватывают диапазон от 650 до 20000 ГэВ<sup>2</sup> и для переменной Бьоркена,  $x$ , область  $0 < x < 1$ .

Для исследования мы использовали статистику, набранную в течение 2004-2007 годов с интегральной светимостью 187 pb<sup>-1</sup> для электрон-протонных и 142 pb<sup>-1</sup> для позитрон-протонных соударений.

Так как существует некоторое перекрытие среди данных использованных в различных публикациях коллаборации ZEUS, значительная часть данных ZEUS по большим  $x$  не были ранее использованы в реконструкциях PDF наборов. В большей части работ по реконструкции наборов PDF использовались комбинированные (ZEUS+H1) данные. Они представлялись в виде сечений, которые извлекались из комбинации данных. Подобная комбинация базировалась на согласованном разбиении кинематически доступного фазового пространства. Представленные данные используют намного более мелкое разбиение, чем использованное в комбинации данных ZEUS+H1.

Расширение исследуемого диапазона вплоть до  $x=1$  и уменьшение размера разбиения переменных ведёт к уменьшению количества событий в бине. Поэтому стандартный метод фитирования с использованием метода  $\chi^2$  становится неадекватным и требуется использовать распределение Пуассона для корректной оценки статистических флуктуаций.

Моделирование событий было выполнено с помощью генератора событий HERACLES совместно с PDF набором NLO CTQ5D, который был реконструирован в приближении нулевых масс тяжёлых ароматов. Программа HERACLES использует  $O(\alpha)$  для QED и  $O(\alpha_s)$  для QCD поправок. QCD моделирование было основано на комбинации двух генераторов ARIADNE4.12 и MEPS6.5.1 для моделирования партонных ливней, аналогично тому, что было использовано при обработке данных ZEUS по большим  $x$ . Моделирование отклика детектора выполнено с помощью пакета GEANT3.21, настроенного с учётом организации детектора ZEUS. Точно такие же шаги были сделаны при выделении чисел событий, полученных при моделировании.

Описанная выше процедура была использована для получения матричных элементов.

В частности, было проверено, что воспроизводимое число событий для набора CTQ5D совпадает с тем, что было опубликовано ранее.

В заключение отметим, что число событий при различных наборах PDF отличаются более, чем в два раза, при больших значениях  $x$ . Также присутствует систематическое отличие в несколько процентов в оценках при меньших  $x$  для различных PDF, что ведёт к различной форме распределений как функции  $x$ . Различие между предсказаниями различных PDF значительно превосходит одно стандартное отклонение для HERAPDF2.0 и NNPDF3.1.

Данные ZEUS при больших  $x$  уникальны и, на сегодняшний день, не были использованы для извлечения партонных распределений. Эти данные должны быть включены в будущие работы по реконструкции PDF, используя матричный подход, описанный в данной работе. Этот набор данных предоставит доступ к не использованной ранее кинематической области и поможет уменьшить большие неопределенности в знании партонной структуры при

наибольших значениях переменной  $x$ . Это указывает на то, что неопределённости в знании PDF сильно недооценены.

#### 4. Исследования проводимые в эксперименте LHCb

*А.Н. Соломин, Н.В. Никитин, А.В. Данилина*

По линии подготовки к началу третьего периода работы LHC, Run 3, в рамках программы апгрейда установки LHCb, в частности, детекторов RICH1 и RICH2, 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 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 базового ПО (core software) юстировки детекторов RICH LHCb для Run 3 LHC. Основным разработчиком является А.Н. Соломин.

К настоящему времени разработана и включена в головные версии пактов «Moore» и «Res» проекта RTA та часть ПО, которая осуществляет полную реконструкцию событий, включая реконструкцию черенковских фотонов, и накопление угловых распределений фотонов для последующего вычисления поправок юстировки. В разработке реализована потокобезопасность в режиме многопоточного распараллеливания.

Ведётся разработка алгоритмов и ПО оптимизации преселекции событий в триггере HLT1.

В 2019 году коллаборация LHCb впервые опубликовала верхний предел на 95% уровне достоверности для распада  $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu_\mu$ . Этот предел оказался равным  $0.16 \cdot 10^{-7}$  (см. LHCb Collaboration, Eur. Phys. J. C 79, no. 8, 675 (2019)). Экспериментальный результат оказался ниже единственного теоретического предсказания, полученного при поддержке данного гранта, для парциальной ширины распада  $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu_\mu$  из работы [A.V.Danilina, N.V.Nikitin. Phys. Atom. Nucl. 81, p.347 (2018)]. В процессе выполнения гранта найдены эффекты, которые сократили разрыв между теоретическим предсказанием для парциальной ширины и экспериментальным верхним пределом. В рамках используемых приближений новое предсказание составляет:  $\text{Br}(B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \nu_\mu) = 0.7 \cdot 10^{-7}$  с ошибкой, не превосходящей 20%. Этот результат хоть и ближе к экспериментальному значению, но все равно его существенно превосходит.

Было сделано предположение, что между  $\rho(770)$  и  $\omega(782)$  - резонансами может возникнуть дополнительная непертурбативная фаза и что учет ненулевых масс лептонов мог бы уменьшить вклад фотонного полюса. Подробное исследование показало, что требуемого из эксперимента значения парциальной ширины можно добиться только при не реальных относительных фазах. А прямой учет ненулевых лептонных масс дает несущественные числовые отличия от предыдущих работ авторов, где было использовано эффективное кинематическое обрезание. Результаты опубликованы в [A.Danilina, N.Nikitin, K.Toms, Phys.Rev.D 101, 096007 (2020)].

С помощью программного пакета EvtGen разработаны новые инструменты для получения парциальных ширин многочастичных распадов B-мезонов, создана модель распада  $B_s^-$

мезона на четыре заряженных лептона в приближении, когда формфакторы по каждому дилептоному каналу факторизуются. Получена предварительная оценка (по порядку величины) парциальной ширины  $\text{Br}(B_s \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-) \sim 7 \cdot 10^{-10}$ , а также некоторые дифференциальные характеристики данного распада, в том числе распределения парциальной ширины по квадратам четырех-импульсов лептонных пар.

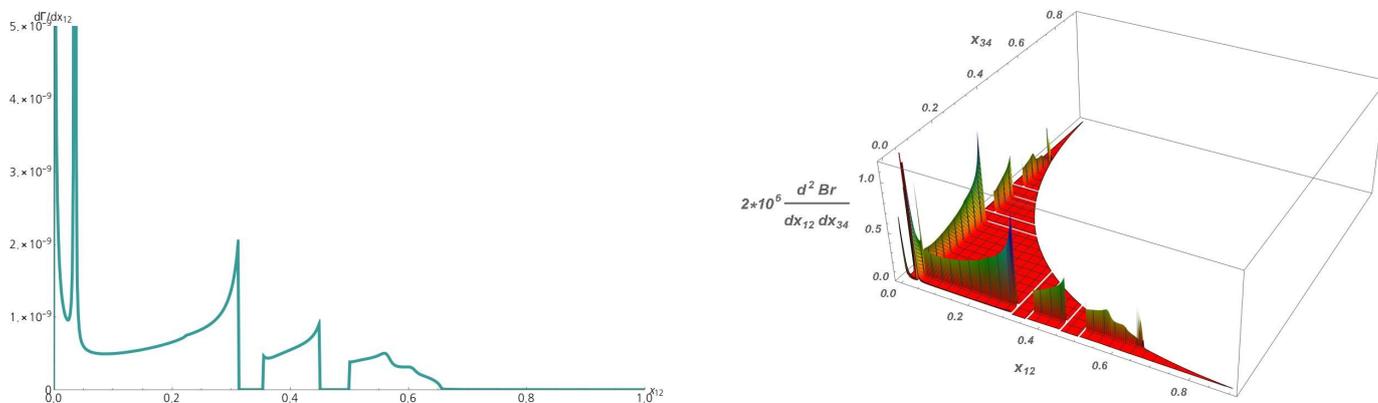


Рис.1 Одномерное (слева) и двухмерное (справа) распределения парциальной ширины  $B_s \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$  по квадратам четырех-импульсов лептонных пар в конечном состоянии. Вклады  $J/\psi$  и  $\psi$  — резонансов вырезаны в соответствии с ограничениями, вводимыми в экспериментальных анализах.

## 5. Теоретические исследования.

### 5а. Нелинейные взаимодействия Радиона. Скалярно-векторный портал взаимодействия полей СМ с темной материей.

С.И. Кейзеров, Э.Р. Рахметов

Получены члены самодействия поля радиона до четвертого порядка включительно, а также члены взаимодействия радиона с полями СМ до второго порядка (того же порядка по константе связи, что и члены самодействия).

Исходя из пятимерной модели Рэндалл-Сундрум выписан эффективный четырехмерный лагранжиан поля радиона и его взаимодействий с полями СМ в полиномиальном приближении с точностью до членов второго порядка по константе связи – т.е. второго порядка по полю радиона при взаимодействии с полями СМ и четвертого порядка при его самодействии. Лагранжиан представлен в форме с неквадратичным кинетическим членом, а также в форме, в которой кинетический член приведен к канонической форме. Показано, что в теории не должно быть дополнительного спонтанного нарушения симметрии. [Волобуев И. П., Кейзеров С. И., Рахметов Э. Р. Нелинейные взаимодействия радиона // *Теоретическая и математическая физика*. — 2020. — Т. 205, № 1. — С. 84–101.]

Продолжено исследование эффекта подобия полей радиона и Хиггса. На древесном уровне по показано, что при произвольном количестве участвующих в процессе векторных и скалярных бозонов СМ и произвольном количестве радионов результат аналогичен процессу с заменой радионов на бозоны Хиггса и заменой масс и констант самодействия радиона.

Скалярно-векторный портал взаимодействия полей СМ с темной материей. Выписаны точные выражения в различных вариантах соотношений параметров модели для масс и констант взаимодействий физических мод.

В теории с дополнительными «темными» скалярным и векторным полями со смешиванием с полями СМ, дополнительной симметрией и спонтанным нарушением симметрии в темном секторе, получены точные выражения для масс и констант взаимодействий полей СМ и возможных полей темного сектора. Отдельно рассмотрены

различные предельные случаи по параметрам модели и их соотношениям. По результатам работы готовится публикация.

## **5б. Исследование моделей модифицированной гравитации.**

Е.О. Поздеева

В гравитации с Гаусс-Бонне слагаемым умноженным на функцию скалярного поля применен эффективный потенциал для поиска решений де Ситтера и анализа их стабильности/нестабильности. На основе проведенного анализа построены инфляционные сценарии с потенциалом четвертой степени поля и Гаусс-Бонне взаимодействиями полиномиального вида с отрицательными степенями поля. Соответствие сконструированных сценариев современным наблюдаемым данным проверено методами численного анализа значений инфляционных параметров: амплитуды скалярных возмущений, спектрального индекса и отношения амплитуд тензорных и скалярных пертурбаций [Phys. Rev. D **102**, 043525].

В рамках приближения медленного скатывания в модели Эйнштейн-Гаусс-Бонне гравитации сформулирована система дифференциальных уравнений в терминах поля и числа е-фолдов. Такое представление позволяют реконструировать исходную модель как в терминах е-фолдов, так и в терминах полей. Построенный сценарий позволяет воспроизвести инфляционные параметры в терминах числа е-фолдов, совпадающие по виду с инфляционными параметрами космологического аттрактора [Eur. Phys. J. C **80**, 612 (2020)]. Без Гаусс-Бонне взаимодействия модель эквивалентна модели, полученной Мухановым в 2013 году на основе предположения о виде уравнения состояния.

Исследована динамика модифицированной введением Гаусса – Бонне слагаемого умноженного на функцию от обратного д'Аламбертиана действующего на член Гаусса – Бонне гравитации. Динамические уравнения модели приведены к локальной форме, на основе которой сформулирована процедура реконструкции. Найдены условия на параметры модели, достаточные для существования решений де Ситтера. Решения де Ситтера представлены в явном виде [Int. J. of Modern Physics A, том35, No. 02n03, 2040045 (2020)].

Метод суперпотенциала применен для нахождения точных космологических решений моделей  $f(R)$  гравитации. Методом конформного преобразования воспроизведен вид модифицированной гравитации. Подробно рассмотрен случай  $R^2$  гравитации [Phys. Part. Nuclei 51, 744–749 (2020)].

## **5в. Влияние собственных полей пучка на динамику пучка в будущих ускорителях: Большой Адронный Коллайдер высокой светимости (БАК-ВС, High-Luminosity LHC)**

Б.Б. Левченко

В БАК и в строящемся БАК-ВС, 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.

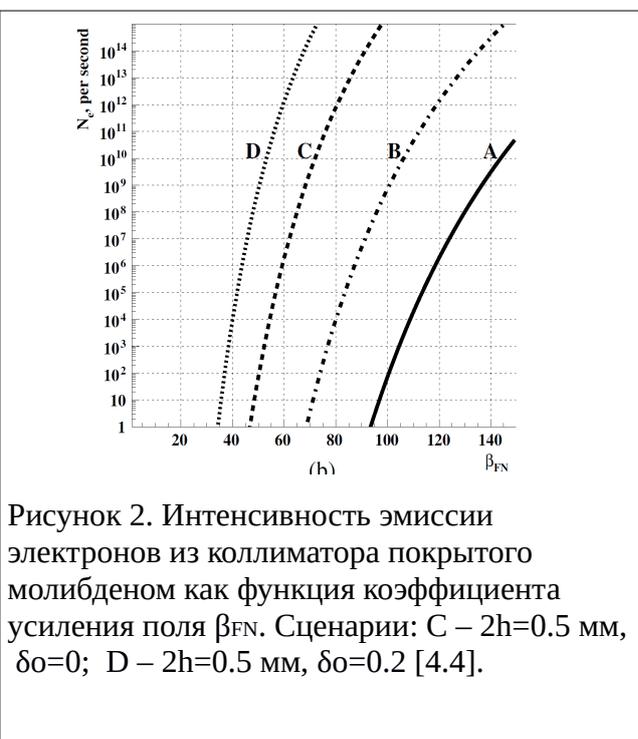
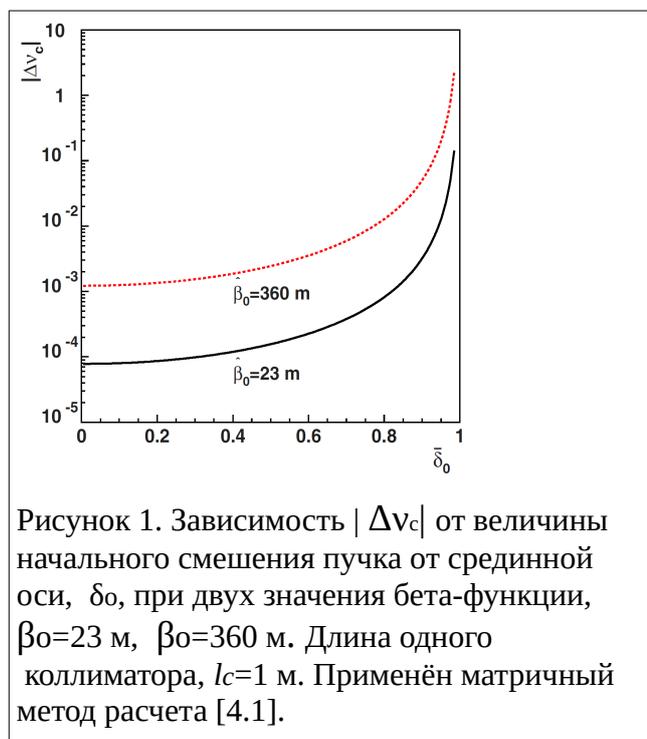
3. Методом зеркальных зарядов и токов впервые точно вычислены [9] одномерные (1D) и двумерные (2D) [10-12] распределения электрических и магнитных полей индуцируемых пучком заряженных частиц между проводящими и ферромагнитными параллельными плоскостями. Рассмотрены случаи плоскостей как бесконечной протяженности, так и параллельные плоские поверхности конечной длины (аналоги коллиматоров и магнитов в

ускорителях). В кратком обзоре-эссе описана история создания метода изображений Уильямом Томсоном (лорд Кельвин) [9].

На начальном этапе [9], решен ряд задач классической электродинамики ультррелятивистских пучков заряженных частиц круглого и эллиптического сечений при различных граничных условиях. Рассмотрены пучки как бесконечной, так и конечной длины:

- Прямые вычисления полей заряженного сгустка частиц (короткий пучок) в вакууме, позволяют проследить за трансформацией векторной суммы индивидуальных электромагнитных полей релятивистских частиц в эффективное внешнее поле пучка;
- Доказана теорема универсальности формы полей ультррелятивистского короткого пучка:  $\gamma \rightarrow \infty$ ,  $E^*(r) \sim V_\phi(r) \sim \lambda(z)/r$ , где  $\lambda(z)$  продольная плотность заряженных частиц в сгустке.

Исследована динамика сгустка заряженных частиц в коллиматоре и между полюсами магнитов. Выведены [9] обобщенные формулы для полевых коэффициентов Ласлетта и сдвигов частот бетатронных колебания пучка,  $\Delta v_c$  (Рис.1) под воздействием сил изображений при движении пучка в коллиматоре как бесконечной, так и конечной протяженности и произвольном начальном отклонении пучка от центральной оси. Расчет показывает, что для  $\delta_0 < 0.6$  и числе коллиматоров,  $N_c = 100$ , суммарное  $|\Delta v_c|$  в поле изображений квадрупольного типа не превышает критической величины порядка 0.1.;



- Для случая протонного пучка, точные 2D решения для электрических и магнитных полей применены [12] для оценки интенсивности эмиссии электронов, активируемой электрическим полем пучка в коллиматорах будущего БАК-ВС (HL-LHC). Расчет показывает, что интенсивность полевой эмиссии очень чувствительна к степени шероховатости  $\beta_{FN}$  поверхности коллиматоров. Кроме того, при относительно небольшом и случайном смещении пучка от срединной траектории, скажем на 20% от полуширины  $h$  зазора коллиматора, интенсивность эмиссии увеличивается в  $1.E+7$  раз (Рис. 2).

## 5г. Теоретические исследования поддержанные РФФ 16-12-10280

Э.Э. Боос, А.В. Баскаков, Г.А. Воротников, А.В. Данилина, Л.В. Дудко, Н.В. Никитин, М.А. Перфилов, А.Д. Козачук

- Завершено моделирование процесса ассоциативного рождения топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком точно учитывающем однорезонансные, двухрезонансные вклады и интерференцию между ними, и включающее основные возможные аномальные операторы за рамками  $SM$ , во взаимодействии топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком. Моделирование проведено ранее разработанным методом включения дополнительных полей. Созданы необходимые для экспериментального поиска Монте-Карло генераторы. Созданные генераторы и смоделированные события внедрены в экспериментальном поиске исследуемых отклонений в эксперименте  $CMS$  коллайдера  $LHC$ , и проходят необходимое официальное моделирование отклика детектора. Предложенный подход кинематического разделения однорезонансных и двухрезонансных вкладов в процесс  $tWb$  с помощью специальной нейронной сети, продемонстрированный в феноменологических публикациях, внедряется в экспериментальном поиске отклонений во взаимодействии топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком ( $Wtb$ ), проводимом в рамках коллаборации  $CMS$ . Применение разработанного комплексного подхода включающего точное моделирование разных вкладов, кинематическое разделение с помощью нейронной сети и последующее выделение возможных отклонений от  $SM$  во взаимодействии  $Wtb$  позволит существенно повысить чувствительность экспериментального анализа. Разработанные методы описаны в публикациях, представлены на конференции сессии ОЯФ РАН (Новосибирск, Март 2020) и на рабочих совещаниях коллаборации  $CMS$ .

- Опубликован и представлен общий метод формирования набора наблюдаемых для применения глубоких нейронных сетей в анализе процессов рассеяния на коллайдерах. Метод разработан для оптимизации проводимых исследований в рамках гранта и представлен в докладах на сессии ОЯФ РАН (Новосибирск, Март 2020) и конференции посвященной машинному обучению состоявшейся в ЦЕРНе (IML workshop, CERN, октябрь 2020).

- проведено исследование границ применимости EFT подхода при нахождении экспериментальных ограничений на вклад аномальных операторов исходя из условия унитарности. Были рассмотрены операторы описывающие нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействиях топ кварка. Вычислены аналитические зависимости амплитуды таких процессов. Проведены численные вычисления зависимостей поведения сечений при различных энергиях. Продемонстрировано стабильное поведение сечений при возрастании энергии. Аналитические выражения для амплитуды процессов позволили показать, что получаемые экспериментальные ограничения не выходят за границы унитарности и используемый подход исследований может быть применен не только для современных коллайдеров, но и планируемого коллайдера FCC при энергии 100 ТэВ. Исследования таких процессов были проведены ранее в рамках данного гранта, а опубликованная работа позволила количественно подтвердить применимость использованного подхода для современных и планируемых коллайдеров.

- Были получены ограничения на аномальные каплинги  $Wtb$  вершины в случае, когда значения всех каплингов могут отличаться от значений, соответствующих Стандартной модели. Было получено, что значения аномальных каплингов, соответствующих Стандартной модели, попадают в 95% доверительную область, но находятся вне 68% доверительной области. Также было получено, что данные результаты отличаются от таковых для случая, когда значение каждого аномального каплинга варьируется отдельно, а значения остальных строго соответствуют Стандартной модели.

- Изучено влияние возможной относительной непертурбативной фазы и ненулевых лептонных масс на парциальные ширины и распределения распадов заряженного псевдоскалярного  $B$ -мезона на три заряженных лептона и нейтрино.

- В модели с симметричными формфакторами получена численная оценка парциальной ширины  $\text{Br}(B_s \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-) \sim 7 \cdot 10^{-10}$ , а также некоторые дифференциальные характеристики, в том числе двойное дифференциальное распределение парциальной ширины по квадратам четырехимпульсов дилептонных пар.

- Показано, что моногамия запутанных состояний запрещает сверхсветовую передачу сигналов между двумя макроскопическими наблюдателями при помощи запутанных состояний.

## Планы исследований на 2021 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. В настоящий момент завершена обработка и понимание данных 2016 и частично 2017 годов. Исследуются полученные данные 2018 года. Обработка данных эксперимента по столкновению протонов при энергии 13 ТэВ позволит провести поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ кварка с  $u$ - и  $s$ -кварками проходящем через обмен 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. Проведено моделирование и на новых 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.

Измерения зависимости от псевдобыстроты и центральности событий плотности потока поперечной энергии во взаимодействиях протон-свинец при энергии 8 ТэВ и свинец-свинец при энергии 5 ТэВ в нуклон-нуклонной системе масс.

Планируется публикация статей по оценке скорости виртуальных фотонов и размеру кварка в ер-рассеянии. Анализ данных коллаборации ZEUS для экспериментальной оценки скорости виртуальных фотонов.

В эксперименте LHCb будет продолжена разработка методики и нового ПО прецизионной юстировки RICH детекторов для третьего периода работы LHC.

Для экспериментов на установке MPD комплекса NICA продолжится разработка нового метода поиска и измерения критической окрестности параметров столкновения тяжёлых ионов, связанной с переходом адронной материи в кварк-глюонную материю в столкновениях ядер золота с последовательным по возрастанию массы набором ядер от дейтона до золота в диапазоне энергий NICA.

Продолжится разработка системы программной юстировки TPC MPD на основе использования реальных треков.

В эксперименте ZEUS планируется продолжить новый анализ по исследованию инклюзивных сечений образования струй с данными HERA II, будет продолжено исследование отношения сечений образования  $\psi(2S)/\psi(1S)$  в процессах фоторождения, а также коллективных эффектов в азимутальных корреляциях в событиях фоторождения. В рамках анализа по

изучению эволюции фрагментационных функций в зависимости от переданного импульса  $Q^2$  и переменной Бьёркена  $X_{Bj}$  будет продолжено исследование полученного указания на нарушение скейлинга в поведении импульсных скейлинговых переменных  $x_p$  в области мишени в Брейт системе, в частности, в области больших  $Q^2$  и  $X_{Bj}$ .

Планируется публикация статей по оценке скорости виртуальных фотонов и размеру кварка в ер-рассеянии. Анализ данных коллаборации ZEUS для экспериментальной оценки скорости виртуальных фотонов.

Планируется продолжить изучения свойств моделей модифицированной гравитации со скалярными полями. В частности, планируются исследования моделей с Гаусс-Бонне слагаемым и неминимально взаимодействующим с гравитацией скалярным полем. Планируются рассмотреть постинфляционный разогрев в инфляционных сценариях, согласующихся с современными наблюдаемыми данными, рассмотреть бариогенезис и сценарии отскока на ранних этапах развития Вселенной. Планируется продолжить поиск точных решений моделей модифицированной гравитации и изучение их свойств.

Запланированы дальнейшие исследования на тему иерархии энергетических масштабов в теориях с дополнительными измерениями за счет эффекта Казимира. Подготовка публикации. (Рассмотрение модели совместного Хиггсовского и векторного смешивания со скалярным и векторным полями темной материи (т.н. Хиггс-векторный портал).

В системе из скалярного и спинорного полей в пространстве с  $N$  дополнительными измерениями с компактификацией планковского масштаба вычислено спонтанное нарушение симметрии с учетом эффекта Казимира. Продемонстрировано возникновение после редукции эффективной четырехмерной скалярной моды имеющей ненулевую массу меньше планковской величины. Планируется завершить диссертацию С. Кейзерова и представить результаты к защите.

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.

Планируется получение теоретических предсказаний для парциальных ширин и дифференциальных характеристик четырехлептонных распадов нейтральных и заряженных  $W$ -мезонов в рамках SM, а также исследование чувствительности дифференциальных характеристик и корреляций четырехлептонных распадов к различным расширениям SM в рамках терминологии, принятой в физике  $t$ -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 2020 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 18 докладов на международных конференциях и большое количество докладов на рабочих совещаниях международных коллабораций. Полученные результаты опубликованы в индивидуальных публикациях и от имени коллабораций CMS, ZEUS.

## Доклады на конференциях в 2020 г.:

1) "New physics searches with electroweak top quark production"

Дудко Л., Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, 10-12 March 2020

<https://indico.inp.nsk.su/event/26/timetable/>

(устный доклад)

2) "Implication of the Subsidiary Fields Method to the Modeling of the Top Pair and Single Top Production Processes with tWb Final State."

Перфилов М., Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, 10-12 March 2020

<https://indico.inp.nsk.su/event/26/timetable/>

(устный доклад)

3) "Different approaches to constrain possible BSM contribution of the top quark interactions"

Воротников Г., Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, 10-12 March 2020

<https://indico.inp.nsk.su/event/26/timetable/>

(устный доклад)

4) "General recipe to form input space for deep learning analysis of NER scattering processes."

Dudko L. 4th Inter-experiment Machine Learning Workshop, CERN, Швейцария 19-23 October 2020

<https://indico.cern.ch/event/852553/timetable/>

(устный доклад)

5) "Методы экспериментального поиска проявления «новой физики» в процессах с рождением топ кварка."

Воротников Г.А. Ломоносовские чтения 2020, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 21-28 октября 2020

(устный доклад)

6) "Применение нейронных сетей в задаче поиска нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ-кварка на БАК (LHC) и планируемых коллайдерах."

Волков П.В. Ломоносовские чтения 2020, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 21-28 октября 2020

(устный доклад)

7) "Scaled Momentum Spectra in the Target Region in DIS. Status Report"

Lydia Shcheglova, Nick Brook, Corinna Catterall.

ZEUS meeting, November 24th-25th 2020, DESY, Hamburg, Germany

8) Cosmological attractor in Einstein-Gauss-Bonnet gravity (Приглашенный), Автор: Pozdeeva Ekaterina, International Conference on Mathematical Physics in Memory of V.S. Vladimirov,

Steklov International Mathematical Center Steklov Mathematical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Россия, 23-27 ноября 2020

9) Поиск решений де Ситтера и анализ их стабильности в моделях с Гаусс-Бонне членом (Устный), Авторы: Поздеева Е.О., Вернов С.Ю., Ломоносовские чтения 2020. Секция математики, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 21-28 октября 2020

10) Построение моделей F(R)-гравитации с точными космологическими решениями (Устный), Авторы: Вернов С.Ю., Иванов В.Р., Поздеева Е.О., Ломоносовские чтения 2020. Секция математики, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 21-28 октября 2020

11) Cosmological attractor approximation in Einstein-Gauss-Bonnet gravity (Устный), Автор: Pozdeeva Ekaterina, The virtual conference of the Polish Society on Relativity 2020, Europe/Warsaw, Польша, 24 сентября - 26 октября 2020

12) Stability of de Sitter Solutions in the Gauss-Bonnet Gravity (Приглашенный), Автор: Ekaterina Pozdeeva, The VI Cosmology and the Quantum Vacuum workshop, Испания, Барселона, Испания, 5-7 марта 2020

13) Measurement of diffraction in pPb collisions at 8.16 TeV with the CMS experiment (Устный) Автор: Lev Kheyn  
CORSIKA2020: CORSIKA Cosmic Ray Simulation Workshop, Karlsruhe, Германия, 22-25 июня 2020

### **Публикации за 2020 год:**

[1] *CMS Collaboration*: “Measurement of differential cross sections and charge ratios for  $t$ -channel single top quark production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV” *Eur. Phys. J. C* **80** (2020) 370

[2] *CMS Collaboration*: “Measurement of CKM matrix elements in single top quark  $t$ -channel production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV”, *Phys. Lett. B* **808** (2020) 135609

[3] E. Boos, V. Bunichev, L.Dudko, M.Perfilov, G.Vorotnikov “Eligibility of EFT Approach to Search for tqg FCNC Phenomenon” *Physics of Atomic Nuclei*, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 921–925

[4] E. Boos, V. Bunichev, L.Dudko, M.Perfilov “Application of the Subsidiary Fields Method to the Modeling of  $tW + t\bar{b}$  Processes with the Anomalous  $Wtb$  Interactions” *Physics of Atomic Nuclei*, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 926–930.

[5] L.Dudko, G.Vorotnikov, P.Volkov, D.Ovchinnikov, M.Perfilov “General recipe to form input space for deep learning analysis of HEP scattering processes” *Int.J.Mod.Phys.A* **35** (2020) 21, 2050119

[6] 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)

e-Print: 2011.01185 [physics.ins-det] (направлена в JINST)

[7] ZEUS Collaboration; I. Abt, ..., Golubkov Yu.A., Levchenko B.B., Lukina O.Yu., Shcheglova L.M. et al

Two-particle azimuthal correlations as a probe of collective order in deep inelastic ep scattering at HERA [JHEP 04 \(2020\) 070](#)

[8] ZEUS Collaboration; I. Abt, ..., Golubkov Yu.A., Levchenko B.B., Lukina O.Yu., Shcheglova L.M. et al

Study of proton parton distribution functions at high x using ZEUS data  
[Phys. Rev. D 101 \(2020\) 112009](#)

[9] B. B. Levchenko,

Modification of the relativistic beam fields under the influence of external conducting and ferromagnetic flat boundaries

*Prog. Theor. Exp. Phys.*, Vol. 2020, No. 1, 013G01-013G29 (2020); DOI: 10.1093/ptep/ptz132

[10] Б.Б. Левченко,

Поля релятивистского пучка заряженных частиц между параллельными плоскостями. Точные двумерные решения методом изображений,

*Теор. и мат. физика*, т.203, н.2, 311-320 (2020); DOI: 10.4213/tmf9833

[11] B. B. Levchenko,

Fields of a relativistic beam of charged particles between parallel planes: Exact two-dimensional solutions obtained by the method of images,

*Theor. Math. Phys.*, Vol. 203, 700-708 (2020); DOI: 10.1134/S0040577920050116

[12] B. B. Levchenko,

Fields of an ultra-relativistic beam of charged particles between parallel plates.

Exact two-dimensional solutions by the method of images and applications to the HL-LHC,

*Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 103, 83-95 (2020); DOI:10.2528/PIERC20032903

[13] E. O. Pozdeeva, Generalization of cosmological attractor approach to Einstein–Gauss–Bonnet gravity, *European Physical Journal C*, том 80, № 7, 612 (2020) DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-8176-3

[14] E. O. Pozdeeva, M. R. Gangopadhyay, M. Sami, A. V. Toporensky, S. Yu. Vernov, Inflation with a quartic potential in the framework of Einstein-Gauss-Bonnet gravity, *Physical Review D*, том102, № 4, 043525 (2020), DOI: 10.1103/PhysRevD.102.043525

[15] E. Elizalde, E. O. Pozdeeva, S. Yu. Vernov, Reconstruction procedure for nonlocal Gauss-Bonnet models, *International Journal of Modern Physics A*, том35, No. 02n03, 2040045 (2020), DOI: 10.1142/S0217751X2040045X

[16] S.Yu. Vernov, V.R. Ivanov, E.O. Pozdeeva, Superpotential method for F(R) cosmological models, *Phys. Part. Nuclei*, том51, №4, 744–749 (2020), DOI:

10.1134/S1063779620040735

(С.Ю. Вернов, В.Р. Иванов, Е.О. Поздеева, Метод суперпотенциала для космологических моделей F(R) гравитации, *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, том 51, № 4, с. 865-876 (2020))

[17] Волобуев И. П., Кейзеров С. И., Рахметов Э. Р. Нелинейные взаимодействия радиона // *Теоретическая и математическая физика*. — 2020. — Т. 205, № 1. — С. 84–101.

[18] Bose-Einstein correlations of charged hadrons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV

Baskakov A., Belyaev A.V., Boos E., Ershov A.A., Gribushin A., Katkov I., Khein L., Klyukhin V., Kodolova O., Lokhtin I., Lukina O., Miagkov I., Obraztsov S., Petrushanko S., Попов А.А., Savrin V., Snigirev A., Zhukov V.Yu, CMS Collaboration  
в журнале *Journal of High Energy Physics*, издательство *IOP Publishing ([Bristol, UK], England)*, том 2020, № 3, с. 14 DOI

[19] Study of central exclusive  $\pi^+ \pi^-$  production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 5.02$  and 13 TeV

Belyaev A.V., Boos E., Ershov A.A., Gribushin A., Khein L., Klyukhin V., Kodolova O., Lokhtin I., Lukina O., Obraztsov S., Petrushanko S., Savrin V., Snigirev A., CMS Collaboration  
в журнале *European Physical Journal C*, издательство *Springer Verlag (Germany)*, том 80, № 8, с. 718 DOI

[20] Decays of charged B mesons into three charged leptons and a neutrino

A. Danilina, N. Nikitin, and K. Toms, *Phys. Rev. D* 101, 096007 – Published 11 May 2020, DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.096007>