

## Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ Основные результаты полученные в 2018 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 LHC, проведены исследования ожидаемой чувствительности эксперимента CMS в режиме высокой светимости (HL-LHC, 14 ТэВ). Исследовались проявления нейтральных токов меняющих аромат кварков во взаимодействии топ кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком через обмен глюоном. Проведено полное моделирование, включая моделирование отклика обновленного детектора. Найдены условия оптимальные для экспериментального поиска. Получены ожидаемые ограничения на константы связи, характеризующие возможное проявление таких отклонений от предсказаний СМ. Проведена экстраполяция и получена ожидаемая эффективность для режима высокой энергии (HE-LHC, 27 ТэВ). Продолжены исследования данных получаемых в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. На основе получаемых данных анализируется возможное проявление отклонений от предсказаний СМ в процессах одиночного рождения топ кварка. Готовятся результаты новых измерений констант связи характеризующих проявления нейтральных токов во взаимодействиях топ кварка с  $u$ - или  $s$ -кварком. Готовятся измерения характеристик взаимодействия топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком с целью поиска возможных отклонений и установки ограничений на параметры характеризующие такие отклонения. Впервые, планируется провести скоррелированные измерения в различных каналах рождения топ кварка, что даст возможность существенно ужесточить новые ограничения на возможные отклонения от СМ, или измерить такие отклонения на новом уровне чувствительности. На данных протон-протонных столкновений набранных в 2016 году при энергии 13 ТэВ проведен ряд измерений сечений ассоциативного рождения одиночного топ кварка и калибровочных бозонов. Проведено измерение сечения ассоциативного рождения топ кварка и  $W$  бозона, измеренное сечение составило  $63.1 \pm 1.8$  (stat)  $\pm 6.4$  (syst)  $\pm 2.1$  (lumi) пб. Проведено измерение ассоциативного рождения топ кварка и  $Z$  бозона измеренное сечение составило  $123^{+33}_{-31}$  (stat)  $^{+29}_{-23}$  (syst) фб, а статистическая значимость  $3.7\sigma$ . Проведено измерение ассоциативного рождения одиночного топ кварка и фотона. Измеренное сечение составило  $115 \pm 17$  (stat)  $\pm 30$  (syst) фб при статистической значимости  $4.4\sigma$ . Измеренные значения согласуются с предсказаниями СМ. Подготовлена новая версия аппаратных и программных средств системы управления и контроля (DCS)

форвард-калориметра CASTOR детектора CMS, осуществлялось экспертное сопровождение функционирования детектора в процессе набора данных. В 2018 году основной задачей были работы по подготовке форвард-калориметра к набору данных в сеансах на тяжелых ионах – HI-2018. Проводится оптимизация интерфейсов и методов применения глубоких нейронных сетей для анализа данных эксперимента CMS. Проводится сравнение различных подходов и находятся рецепты практического использования глубоких нейронных сетей для исследования процессов рождения топ кварка.

В 2018 году был продолжен ряд расширенных анализов в эксперименте ZEUS коллайдера HERA. Использовалась объединенная база данных экспериментов H1 и ZEUS на HERA в различных кинематических режимах. В процессах глубоко-неупругого рассеяния (ГНР,  $Q^2 > 10 \text{ ГэВ}^2$ ) для целого ряда кинематических наблюдаемых были измерены дифференциальные сечения образования изолированного фотона в сопровождении адронной струи. Выполнено сравнение данных с предсказаниями КХД моделей [JHEP 1801 (2018) 032]. Объединение данных экспериментов H1 и ZEUS по рождению адронов включающих с- и b-кварки, позволило экспериментально продемонстрировать “бегущий” характер массы как с-кварка,  $m_c(\mu)$ , так и b-кварка,  $m_b(\mu)$ , в широком диапазоне виртуальности фотона  $Q^2$ ,  $2.5 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 2000 \text{ ГэВ}^2$  [Eur.Phys.J. C78 (2018) no.6, 473]. Термин «бегущий», обозначает изменение той или иной физической величины (силы взаимодействия, масса частицы и пр.) при изменении внешних параметров. Следует отметить, что в 2017 году группа ZEUS опубликовала статьи по схожим тематикам, но для других классов процессов: дифракционному фоторождению ( $Q^2 \sim 0 \text{ ГэВ}^2$ ) изолированных фотонов и по “бегущей” массе только с-кварка. Опубликовано две статьи в высоко рейтинговых научных журналах. Сделан один доклад на IV Международной конференции по физике частиц и астрофизике (ICPPA).

По линии участия в экспериментах [BM@N](#) и MPD мегасайенс-проекта «Комплекс NICA» на базе ОИЯИ, Дубна, разработан проект по тематике «Поиск и исследование наблюдаемых, чувствительных к новым фундаментальным явлениям в плотной адронной и кварк-глюонной материи, и разработка методов их анализа на экспериментальных установках BM@N и MPD комплекса NICA».

В контексте исследований радиона в моделях типа Рэндал-Сандрум были вычислены константы самодействия и взаимодействия радиона в стабилизированной модели Рэндалл-Сандрум с полями Стандартной Модели до четвертого порядка включительно. Получены самосогласованные фоновые решения в модели «мира на бране» с двумя дополнительными измерениями.

Проведены исследования в пространствах с кривизной: построены инфляционные сценарии в неминимально-взаимодействующей гравитации с потенциалами мотивированными минимальной суперсимметричной стандартной моделью с произвольным углом смешивания; рассмотрены модели нелокальной гравитации с Гаусс-Бонне слагаемым; рассмотрены возможности перехода через сингулярность в неминимально взаимодействующей со скалярными полями гравитации во вселенной Бьянки-I.

## Введение

Иерархию масс кварков замыкает t-кварк с зарядом  $2/3$  из третьего поколения (дублета) фермионов Стандартной модели (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 три механизма одиночного рождения топ-кварка: (1)  $s$ -канальный  $ud \rightarrow bt$ ; (2)  $t$ -канальный ( $Wg$ -fusion); (3) ассоциативное рождение  $tW$  ( $bg \rightarrow tW$ , как в  $s$ - так и  $t$ -каналах). В эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся комплексные исследования физики топ-кварка в событиях протон-протонных столкновений при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ. В эксперименте проведен поиск возможных отклонений от СМ во взаимодействии топ-кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком, и поиск нейтральных токов, меняющих аромат кварков. Существование таких отклонений требуется различными современными теориями, расширяющими СМ. Статистически значимых отклонений от предсказаний СМ не зарегистрировано, и найдены ограничения на параметры, характеризующие такие отклонения.

Новые физические явления 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.

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 во столкновениях ядер даёт информацию о начальной стадии взаимодействия (initial state), определяющей возможное дальнейшее развитие фазы кварк-глюонной плазмы.

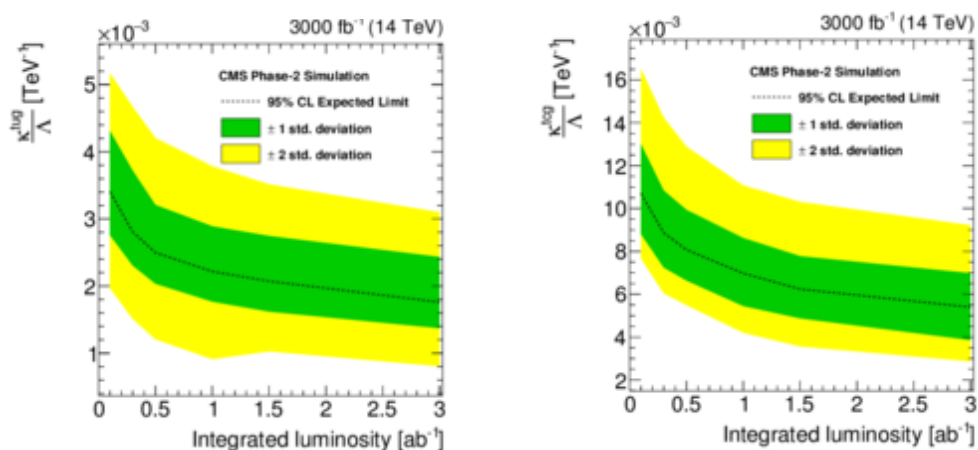
Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях — одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной физики. Эксперименты по столкновению тяжёлых ионов, в которых создаются условия сверхвысоких температур и плотностей, интенсивно ведутся или планируются на ускорителях в различных 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 конstituентов — кварков и глюонов. Обнаружение и измерение окрестности критической точки такого фазового перехода имеет принципиальное значение. Имеющаяся к настоящему времени совокупность экспериментальных данных и теоретических моделей, дают основание предполагать, что эта точка находится в диапазоне энергий сооружаемого комплекса NICA.

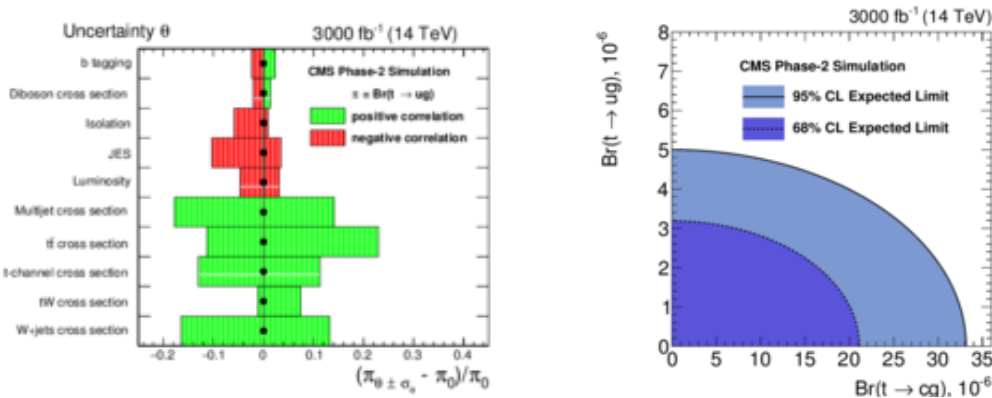
## Результаты

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

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 2018 году проведено исследование потенциала модернизированного детектора CMS в режиме высокой светимости БАК (HL-LHC) и в режиме высокой энергии (HE-LHC). Исследовалось рождение одиночного топ кварка проходящее через нейтральные токи меняющие аромат кварков. Было проведено моделирование сигнальных и фоновых процессов, полное моделирование отклика будущего, модернизированного детектора. Созданы байесовские и глубокие нейронные сети, необходимые для эффективного выделения таких процессов. Найденны методы и условия для оптимального выделения таких процессов. Получены оценки чувствительности эксперимента и найдены ожидаемые ограничения на параметры, характеризующие возможное проявление нейтральных токов во взаимодействии топ кварка. Эти результаты одобрены коллаборацией CMS и опубликованы в PAS-FTR-18-00 и в HL-LHC Yellow Report.. На рис. 1.1 приведены результаты оценок чувствительности эксперимента в зависимости от светимости ускорителя. Показаны верхние ограничения на параметры, характеризующие отклонения от предсказаний SM во взаимодействии топ кварка с  $u$ - или  $c$ -кварком, проходящем через обмен глюоном.

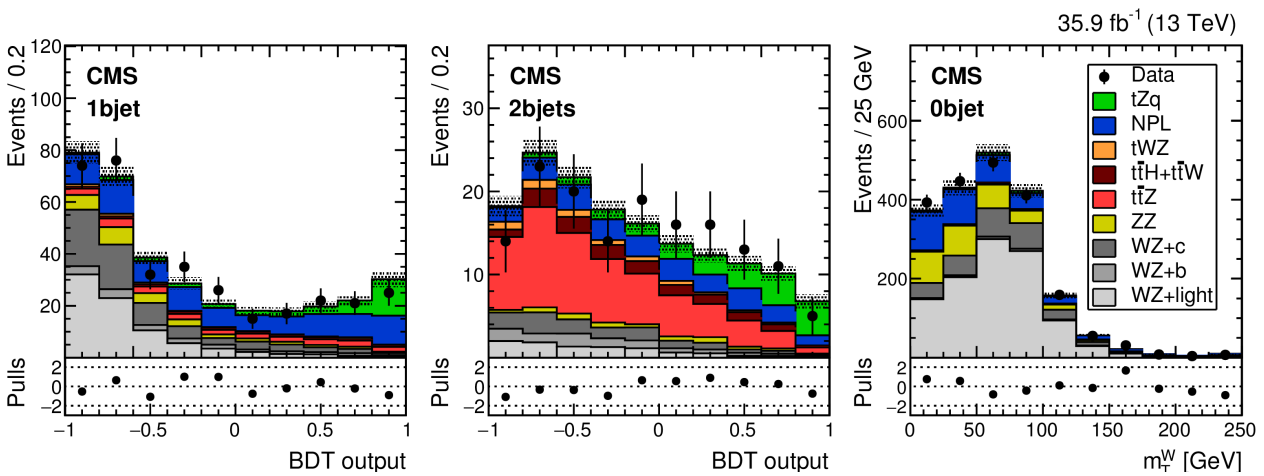


**Рисунок 1.1.** Показана зависимость верхнего ограничения на константу связи характеризующую нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействии топ кварка с  $u$ -кварком (левый рисунок) и  $s$ -кварком (правый рисунок) в зависимости от ожидаемой светимости ускорителя в режиме высокой светимости (HL-LHC).

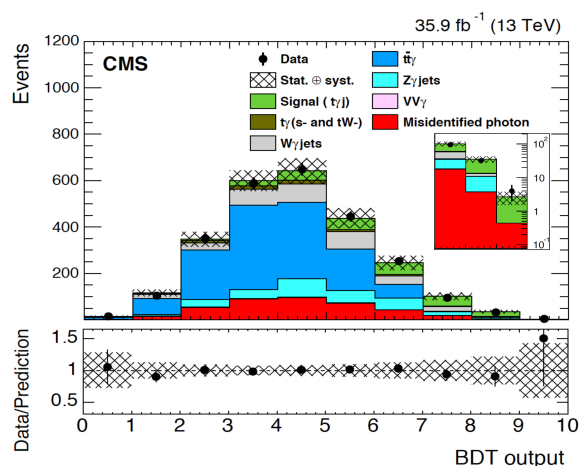


**Рисунок 1.2.** На левом рисунке показана найденная зависимость ограничений на редкие распады топ кварка от основных систематических неопределённости. Правый рисунок показывает ожидаемые ограничения на редкие распады топ кварка, в режиме высокой светимости БАК.

На рис. 1.2 слева показаны найденные зависимости результата от основных систематических неопределённости. Рисунок справа демонстрирует полученные ожидаемые ограничения на нейтральные токи, выраженные в виде вероятностей (бренчингов) редких распадов топ кварка на  $ug$  и  $cg$ . Контур ограничений получен при одновременном фитировании двух констант связи.



**Рисунок 1.3.** Измерение сечения ассоциативного рождения одиночного топ кварка и  $Z$  бозона. На левом и среднем рисунках показаны распределения данных и моделирования для дискриминанта деревьев решений. Правый рисунок демонстрирует распределение по поперечной массе  $W$ -бозона в контрольной области необходимой для точной оценки фона.



**Рисунок 1.4.** Измерение сечения ассоциативного рождения одиночного топ кварка и фотона. Показано распределения данных и моделирования для дискриминанта деревьев решений.

В 2018 году продолжен анализ получаемых данных протон-протонных столкновений при энергии 13 ТэВ. Исследуются возможные отклонения во взаимодействии топ кварка с  $W$ -бозоном и  $b$ -кварком и нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействии топ кварка с  $u$ - и  $s$ -кварком проходящем через обмен глюоном. Экспериментальное наблюдение такого рода отклонений будет означать проявление «Новой физики»; при отсутствии экспериментальных проявлений таких отклонений устанавливаются верхние ограничения на соответствующие константы связи, что дает возможность ограничить целые классы различных теорий за рамками СМ. В рамках соответствующего анализа проводится очистка и подготовка данных, моделирование сигнальных и фоновых процессов, создаются глубокие и байесовские нейронные сети и оцениваются все возможные систематические неопределенности. Предварительные результаты регулярно представляются на рабочих совещаниях коллаборации CMS и готовятся к публикации. Измерены и опубликованы сечения одиночного рождения топ кварка в ассоциации с калибровочными бозонами  $W$ ,  $Z$  и  $\gamma$ . Измерения проведены в данных протон-протонных столкновений при энергии 13 ТэВ набранных в 2016 году. Измеренное сечение процесса ассоциативного рождения одиночного топ кварка и  $W$ -бозона составило  $63.1 \pm 1.8$  (stat)  $\pm 6.4$  (syst)  $\pm 2.1$  (lumi) пб. Впервые было измерено сечение ассоциативного рождения одиночного топ кварка и  $Z$ -бозона. Измеренное сечение составило  $123^{+33}_{-31}$  (stat)  $^{+29}_{-23}$  (syst) фб при статистической значимости  $3.7\sigma$ . Впервые было измерено сечение ассоциативного рождения одиночного топ кварка и энергичного фотона. Измеренное сечение составило  $115 \pm 17$  (stat)  $\pm 30$  (syst) фб при статистической значимости измерения  $4.4\sigma$ . Измеренные значения согласуются с предсказаниями СМ.

## 1а. Форвард-калориметр CASTOR установки CMS

Подготовлена новая версия программного обеспечения системы управления и контроля субдетектора CASTOR адаптированного для последней версии многооконного центра с открытой архитектурой WinCC OA 3.15, установленной на центральном проекте CMS DCS. Новая версия СПО проинсталлирована и протестирована в центральном проекте. Все ветви системы DCS CASTOR: Pmon, WinCC OA log, Component handler, Automation, FSM, Generic Plotter, Alert Screen настроены через веб-интерфейс cmsonline для работы в сеансе на тяжелых ионах.

Разработано ПО для обеспечения полной визуализации всех контролируемых сенсоров калориметра CASTOR и аварийных сообщений. Информация на экране аварийных сообщений показывает все критические состояния контролируемых датчиков. В связи с необходимостью проведения калибровки калориметра CASTOR во время сеанса созданы наборы рецептов высоковольтного питания для сканирования и калибровки по катодному и

динодному напряжению каждого канала калориметра. Во время проведения сеанса на тяжелых ионах обеспечено экспертное сопровождение системы управления и контроля (DCS) форвард-калориметра CASTOR.

Предварительные результаты обработки данных в столкновениях ядер свинца, полученных с помощью калориметра CASTOR в сеансе HI-2018, демонстрирует хорошее качество набора данных. Готовится публикация «The CASTOR very forward calorimeter of CMS», CMS PRF-18-002. Сервисные работы группы НИИЯФ МГУ/CASTOR в 2018 году составляют 6 чел.месяцев (EPR = 6 months).

## 16. Измерение плотности потока поперечной энергии в максимальном диапазоне псевдобыстрот детектора CMS $-6.6 < \eta < 6.6$

Измерена зависимость от псевдобыстроты плотности потока поперечной энергии в максимальном диапазоне псевдобыстрот детектора CMS  $-6.6 < \eta < 6.6$  во взаимодействия протон-свинец при энергии в системе масс 5.02 ТэВ на нуклон. Представлены результаты при разных центральностях столкновения. Измерения характеризуют начальную стадию ядерного взаимодействия (initial state), определяющую возможное дальнейшее развитие фазы кварк-глюонной плазмы. Результаты измерений сравниваются с предсказаниями различных Монте-Карло моделей, как используемых для описания взаимодействий в ускорительной физике высоких энергий (HIJING), так и применяемых в моделировании прохождения космических лучей через атмосферу (EPOS-LHC, QGSJETII).

На рисунке 1 представлено распределение плотности поперечной энергии по псевдобыстроте  $dE_t/d\eta$  для minimum-bias событий. Результаты измерений сравниваются с предсказаниями моделирования. Удовлетворительно согласуется с данными только генератор EPOS-LHC. На рисунке 2 показаны  $dE_t/d\eta$  при разных центральностях столкновения. Приводятся результаты, полученные с использованием трёх переменных для определения центральности. QGSJETII существенно завышает поток энергии при большой центральности.

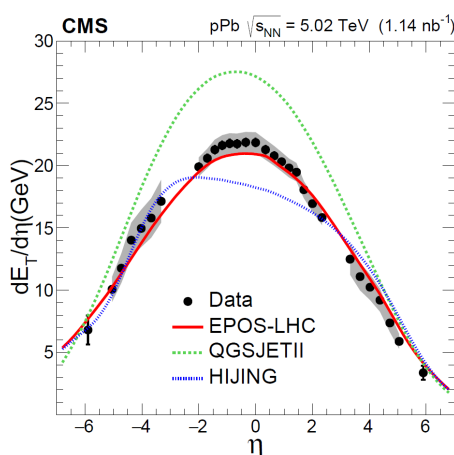


Рисунок 2. Распределения  $dE_t/d\eta$  для minimum-bias событий.

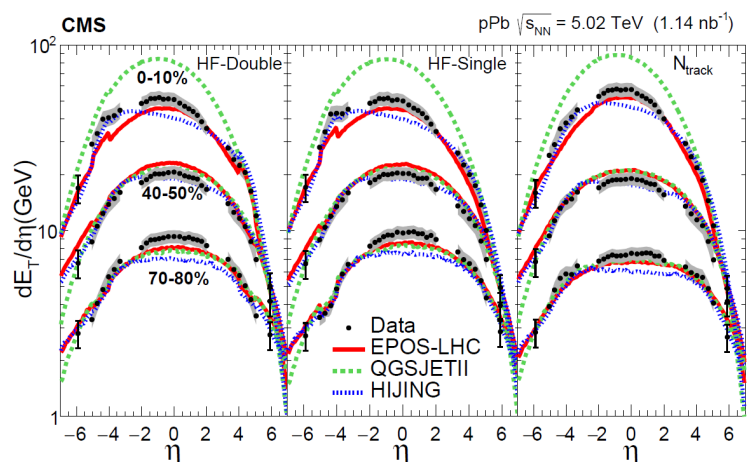
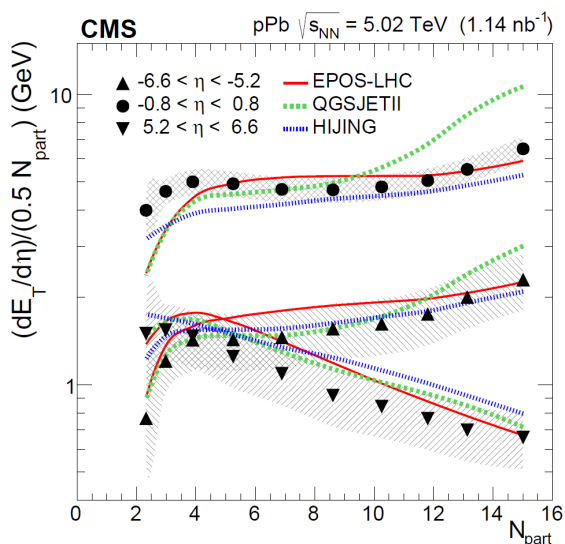


Рисунок 2. Распределения  $dE_t/d\eta$  при разных центральностях столкновения.

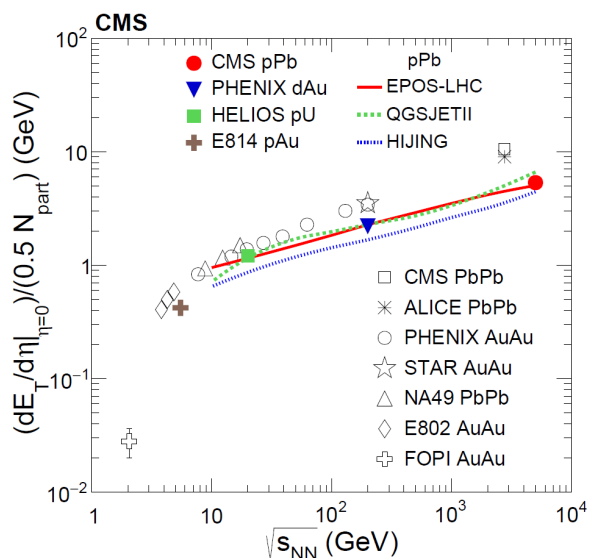
Рисунок 3 показывает  $dE_t/d\eta$ , отнесённую к числу взаимодействующих нуклонов,  $N_{part}$ , как функцию  $N_{part}$  для трёх диапазонов псевдобыстрот: центральной области и областей фрагментации протона и свинца.

В центральной области псевдобыстрот скейлинг по  $N_{part}$  выполняется достаточно хорошо за исключением самых периферических и наиболее центральных взаимодействий. Все

генераторы испытывают трудности при малых  $N_{part}$ , при этом QGSJETII уходит вверх от данных при высоких  $N_{part}$ , т.е. при большой центральности, что отмечалось ранее. В области фрагментации свинца следует ожидать скейлинг не по полному числу взаимодействующих нуклонов,  $N_{part}$ , а по числу взаимодействующих нуклонов ядра свинца, т.е.  $N_{part\_targ} = N_{part} - 1$ , поэтому скейлинг по  $N_{part}$  слабо нарушается, то время как в области фрагментации протона зависимость от  $N_{part\_targ}$  должна быть очень слабой, по этой причине скейлинг по  $N_{part}$  не соблюдается совсем.



**Рисунок 3.** Распределения  $dE_t/d\eta$ , отнесённые к числу взаимодействующих нуклонов,  $N_{part}$ , как функцию  $N_{part}$  нуклонов, для трёх диапазонов псевдобыстрот.



**Рисунок 4.** Плотность потока поперечной энергии в центральной области псевдобыстрот, отнесённая к числу взаимодействующих, в столкновениях ядро-ядро и протон-ядро, при разных энергиях взаимодействия.

На рисунке 4 представлены результаты всех проведённых на настоящее время измерений плотности потока поперечной энергии в столкновениях ядро-ядро и протон-ядро для при разных энергиях взаимодействия. Показано распределение  $dE_t/d\eta$ , отнесённое к числу взаимодействующих нуклонов, в центральной области псевдобыстрот. Красным цветом показан результат наших измерений. Скорость роста с энергией плотности потока энергии для взаимодействий протон (дейтрон)-ядро меньше, чем для взаимодействий ядро-ядро, но нужно заметить, что для второго случая показаны результаты для наиболее центральных столкновений, в то время, как для первого случая для всех за исключением дифракционных взаимодействий. На рисунке также показаны результаты моделирования для столкновения протон-свинец. Лучше всех согласуется с данными генератор EPOS-LHC.

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

В 2017 г. в рамках НИР “Экспериментальные исследования по физике тяжёлых кварков, электрослабых и нестандартных взаимодействий при высоких энергиях” опубликованы две статьи в высоко рейтинговых научных журналах. В основу статей легли результаты анализа данных экспериментов ZEUS и H1, полученных на электрон-протонном коллайдере HERA (г. Гамбург, Германия).

Среди наиболее значимых следует отметить следующие физические результаты, полученные при активном участии физиков НИИЯФ МГУ в 2018 году.



## 2а. Рождение изолированного фотона в сопровождении струи в глубоко-неупругом рассеянии на HERA [JHEP 1801 (2018) 032].

Характеристики изолированных высокоэнергичных фотонов, излучаемых в соударениях с участием адронов, не затрагиваются процессами адронизации партонов. Процессы рождения таких фотонов отображают партонную структуру процессов и дают информацию о структуре протона. Эти процессы схематично показаны на Рис. 2.1. Подобные “прямые” фотоны излучаются входящим или выходящим кварком или же лептоном. В первом случае фотоны далее обозначаются как “QQ”-фотоны и адронные процессы имеют два жестких масштаба: виртуальность  $Q^2$  начального обменного фотона и квадрат поперечного импульса вылетающего прямого фотона. Во втором случае фотоны обозначаются как “LL”-фотоны и излучаются входящим или выходящим лептонами.

Представляемый анализ требует наличия рассеянного электрона, высоко-энергичного исходящего фотона и адронной струи. Требование изолированности фотона подавляет фоновые события. Фотонный кандидат идентифицировался как “energy-flow-object” (EFO).

Струи были реконструированы при помощи  $k_t$  алгоритма и выбиралась струя с наибольшей поперечной энергией  $E_t$ . Смоделированные события были обработаны программами моделирования детектора ZEUS и триггерных условий, а затем эти события реконструировались и анализировались к и экспериментальные данные.

Результаты настоящего анализа сравнивались с предсказаниями МК генератора событий RUTHIA и двух генераторов (учитывающих высшие поправки) на партонном уровне. Неопределенности в масштабе КХД вносят неопределенности в нормировке на уровне +/- 8%. Теоретические вычисления были проведены в системе центра масс и пересчитаны в лабораторную систему, что вносило дополнительные неопределенности в величину сечения в некоторых кинематических областях из-за непертурбативных эффектов. Отобранные указанным способом события в большей степени являются фоном от распадов нейтральных мезонов; таким образом, фотонный сигнал был выделен статистически, аналогично подходу, примененным в предыдущих работах коллаборации ZEUS.

Дифференциальные сечения образования изолированного фотона и сопутствующей адронной струи в ГНР были измерены в лабораторной системе отсчета в кинематическом диапазоне  $4 < E_T\gamma < 15$  ГэВ,  $-0.7 < \eta_\gamma < 0.9$ ,  $E_T\text{jet} > 2.5$  ГэВ and  $-1.5 < \eta_{\text{jet}} < 1.8$ . Рассеянный электрон был ограничен угловым диапазоном  $\theta_e > 140^\circ$ , с энергией, большей 10 ГэВ и  $10 < Q^2 < 350$  ГэВ<sup>2</sup>. Дифференциальные сечения для полного диапазона  $Q^2$  как функции  $\Delta\eta_{e,\gamma}$  приведены на Рис. 2.2.

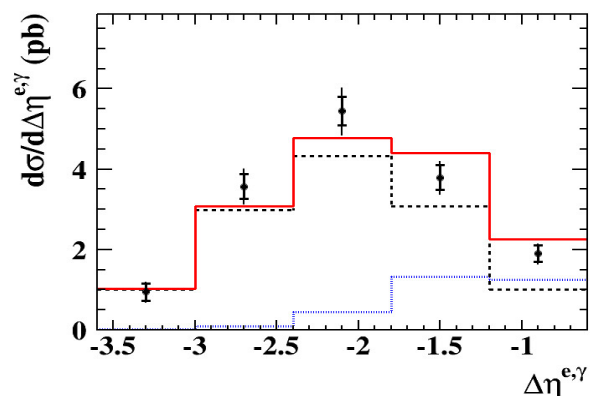
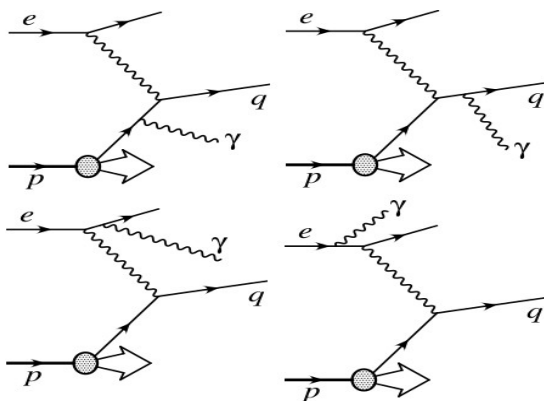


Рис. 2.1. Диаграммы, описывающие образование прямых фотонов.

Рис. 2.2. Дифференциальные сечения рождения фотонов для всех  $Q^2$ .

**2b. Объединение и КХД анализ данных по сечениям рождения чармированных и прелестных адронов в глубоко неупругом рассеянии на HERA [Eur.Phys.J. C78 (2018) no.6, 473].**

Изучение образования открытого чарма и прелести в процессах с нейтральными токами в глубоко-неупругих процессах (ГНП) на коллайдере HERA дает важную информацию для проверки теории сильных взаимодействий - Квантовой Хромодинамики (КХД). Как известно, образование тяжелых кварков в ГНП происходит, в основном, благодаря процессу бозон-глюонного слияния. Поэтому сечение сильно зависит от распределения глюонов в протоне и массы тяжелого кварка. Помимо массы тяжелого кварка, эти процессы зависят также и от других масштабов КХД (переданный импульс, поперечный импульс вылетающего кварка и др.). Наличие различных масштабов усложняет расчеты процессов в рамках пертурбативной КХД. Для теоретических расчетов используются массивная схема с фиксированным числом ароматов (FFNS) и различные реализации схемы с переменным числом ароматов (VFNS).

В этой работе представлена комбинация измеренных сечений рождения чарма и прелести. Сечения образования прелести измерены впервые. Как результат представлен единый набор измерений сечений образования чарма и прелести на данных HERA, включая все корреляции. Набор покрывает кинематический диапазон виртуальностей фотона  $2.5 \text{ GeV}^2 \leq Q^2 \leq 2000 \text{ GeV}^2$  и диапазон переменной Бюркена  $3 \times 10^{-5} \leq x_{bj} \leq 5 \times 10^{-2}$ . Для теоретических предсказаний образования тяжелых кварков в ГНП использовалась программа HVQDIS с бегущей константой взаимодействия " $\alpha$ ".

Результаты извлечения сечений рождения чарма и прелести из данных экспериментов H1, ZEUS представлены на Рис.2.3 и 2.4, соответственно. Комбинированные сечения, оказываются намного более точными, чем любой индивидуальный набор для сечений чарма или прелести, полученный независимо, Рис.2.5 и 2.6.

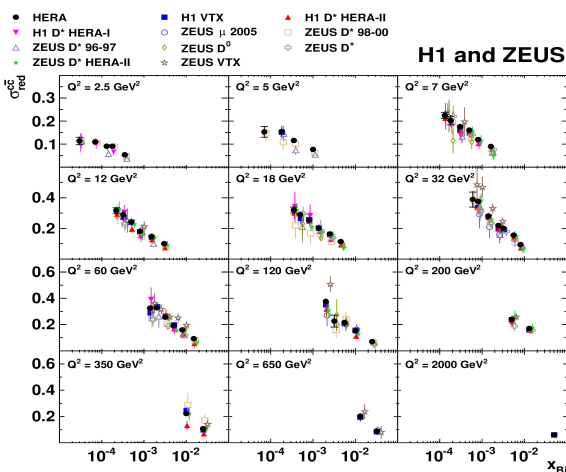


Рис.2.3.Сечения образования чарма.

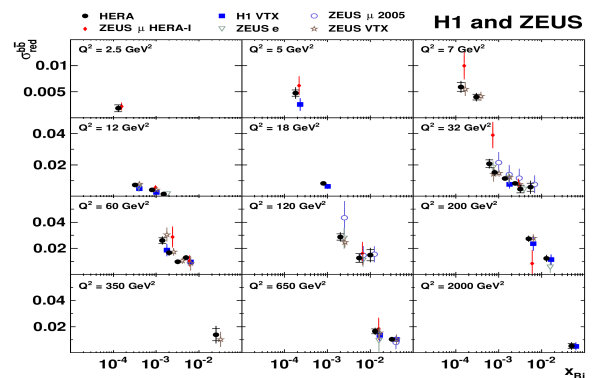


Рис.2.4. Сечения образования прелестных адронов.

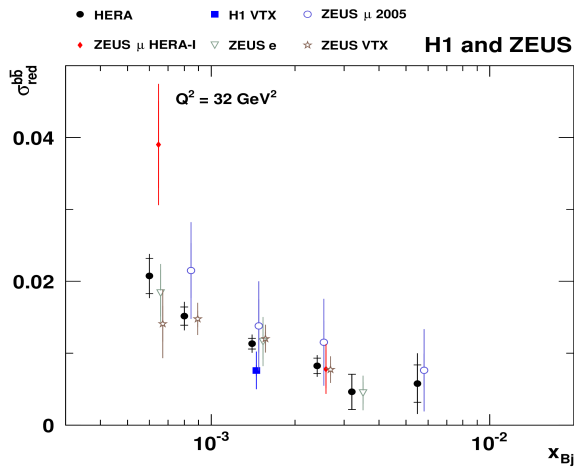


Рис.2.5 Сравнение комбинированных и индивидуально измеренных сечений образования прелести.

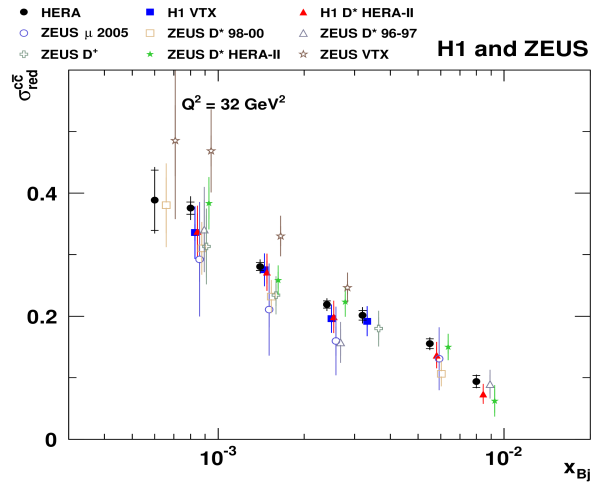


Рис.2.6. Сравнение комбинированных и индивидуально измеренных сечений и индивидуально измеренных сечений

Рисунки 2.7 и 2.8 демонстрируют сравнение экспериментально найденных сечений рождения чарма и прелести с теоретическими вычислениями.

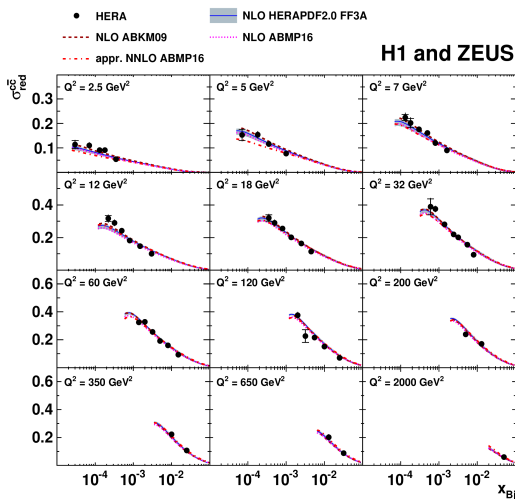


Рис.2.7. Сравнение комбинированных измеренных сечений образования чарма с теоретическими вычислениями.

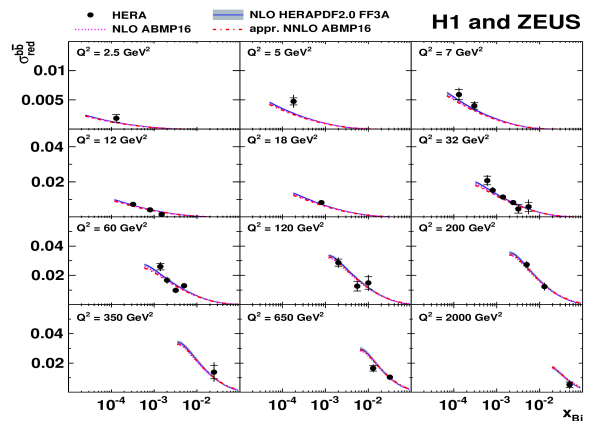


Рис.2.8. Сравнение комбинированных измеренных сечений образования прелести с теоретическими вычислениями.

Продолжена работа по исследованию фрагментационных функций в глубоко-неупругих взаимодействиях (DIS) в области мишени в Брейт системе, результаты доложены на Форуме Анализа Данных эксперимента ZEUS (ZEUS Analysis Forum, Hamburg, October 2018) <https://indico.desy.de/indico/event/21843/>. В докладе представлены итоговые результаты по

исследованию акцептансов треков и DIS событий, эффективности, чистоты (purity) треков, их разрешающей способности для разных областей Бьёркеновской переменной  $X_{Bj}$  и переданного импульса  $Q^2$ , которые были получены с помощью 2-х методов реконструкции, DA (Double Angle) и  $\Sigma$ -метода. Анализ указанных характеристик скейлинговых распределений  $\ln(1/x_p)$  с использованием трековых детекторов CTD (Central Tracking Detector) совместно с STT (Straw tube tracing detector) и MVD (Micro Vertex Detector) был проведён впервые в эксперименте ZEUS на данных HERA II и существенно расширяет область анализа по переменным  $Q^2$  и  $X_{Bj}$ , а использование 2-х методов реконструкции (в отличие от традиционного DA) позволяет значительно улучшить характеристики качества реконструкции треков и событий в области малых и средних переданных импульсов  $10 < Q^2 < 1280$ , куда попадает большая часть исследуемых DIS событий, что позволит провести детальное сравнение с моделями КХД в рамках физической задачи по поиску возможного нарушения скейлинга в области мишени.

### 3. Исследования в экспериментах BM@N и MPD комплекса NICA.

Написан новый проект «Разработка нового метода поиска и измерения критической окрестности параметров столкновения тяжёлых ионов, где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную материю, и применение этого метода в экспериментах на установках BM@N и MPD комплекса NICA. Развитие алгоритмов трекинга, включая элайнмент (юстировку) трековых детекторов, в программных комплексах BMNROOT и MPDROOT».

Этот проект подан на Конкурс РФФИ на лучшие проекты по теме «Фундаментальные свойства и фазовые превращения адронной и кварк-глюонной материи: установка класса мегасайенс «Комплекс NICA» («Мегасайенс – NICA»). Заявка номер 18-02-40136.

Проект по линии «Мегасайенс – NICA» состоит из двух непосредственно связанных частей.

а. Разработка нового метода поиска и измерения критической окрестности параметров столкновения тяжёлых ионов, где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную материю, и применение этого метода в экспериментах на установках BM@N и MPD комплекса NICA.

б. Развитие алгоритмов трекинга, включая элайнмент (юстировку) трековых детекторов, в программных комплексах BMNROOT и MPDROOT.

Основные положения метода отражены в препринте НИИЯФ МГУ № 2018-2/893.

### 4. Теоретические исследования.

Эффективное самодействие поля радиона, получаемое в стабилизированной Рэндалл-Сандрум модели имеет неполиномиальный характер. Более того, кинетический член, т.е. член с производными радиона, также имеет нелинейный неполиномиальный характер. Неполиномиальный характер имеет и взаимодействие радиона с полями Стандартной модели. В работах [1], [2] представлены эффективные лагранжианы в низших порядках по полям радиона (квадратичная часть, описывающая свободный радион, и слагаемые с линейным взаимодействием радиона с полями СМ). В текущем исследовании получен лагранжиан радиона с точностью до четвертого порядка в виде

$$L_r = - \left( \frac{1}{2} + \frac{\bar{\alpha}_1}{\Lambda} r + \frac{\bar{\alpha}_2}{\Lambda^2} r^2 \right) \eta^{\mu\nu} r_{,\mu} r_{,\nu} - \mu^2 \left( \frac{1}{2} r^2 + \frac{\bar{\beta}_3}{\Lambda} r^3 + \frac{\bar{\beta}_4}{\Lambda^2} r^4 \right)$$

где  $\bar{\alpha}_i$  и  $\bar{\beta}_i$  - некоторые безразмерные константы, зависящие от параметров модели. Предложено нелинейное преобразование поля радиона, приводящее лагранжиан к виду, в

котором кинетический член имеет стандартный вид, а все самодействие сосредоточено в потенциале. Показано, что самодействие третьего порядка много слабее четвертого. Также показано, что минимум потенциала находится в нуле, т.е. не должно быть эффектов спонтанного нарушения симметрии. По материалам исследования готовится публикация.

Для модели «мир на бране» с двумя дополнительными измерениями и набором полей из гравитационного, комплексного скалярного и калибровочного векторного, выписана система уравнений движения и получены частные решения со сферической и осевой симметрией (совместно с Э.Р. Рахметовым).

Подготовлен черновой вариант диссертации С. Кейзера с рабочим названием «Сравнение свойств радиона с бозоном Хиггса». В диссертацию включены результаты предыдущих исследований на тему сравнения процессов одиночного и парного рождения бозонов Хиггса и радиона, а также получение членов взаимодействия более высоких порядков.

В рамках минимальной суперсимметричной стандартной модели с неминимально взаимодействующей гравитацией специального вида рассмотрены инфляционные сценарии не противоречащие современным наблюдаемым данным при различных углах смешивания. Установлено, что приближение сильной связи позволяет классифицировать данную модель как космологический аттрактор даже при произвольных углах смешивания.

Исследована космологическая динамика гравитационной теории с нелокальными поправками, включающими степенной обратный оператор Даламбера и члены Гаусса — Бонне. Локализация динамических уравнений модели позволяет найти как решения де Ситтера, так и решения с параметром Хаббла степенного вида. Найдены условия на параметры модели необходимые и достаточные для существования решения де Ситтера. Исследована возможность существования решения с параметром Хаббла степенного вида. Показано: модель, имеющая решения де Ситтера, не имеет решений с параметром Хаббла степенного вида. Найдена модель, соответствующая, эпохе доминирования материи во вселенной.

Изучена динамика модели индуцированной гравитации с потенциалом полиномиального вида 6-ой степени. Найдены условия на потенциал, при которых существуют решения типа отскока, изучена стабильность этих решений.

Изучена космологическая эволюция и пересечение сингулярности во вселенной Бьянки-I заполненной скалярным полем конформно-взаимодействующим с гравитацией. Проведено сравнение с космологической эволюцией и пересечением сингулярности во вселенной Бьянки -I заполненной минимально взаимодействующим с гравитацией скалярным полем. Также представлены решения для вселенной Бьянки -I в индуцированной гравитации. Изучены интегрируемые модели в метрике Бьянки-I со скалярными полями минимально и неминимально взаимодействующими с гравитацией и соответствие между их общими решениями. Используя модель с минимально взаимодействующим скалярным полем и постоянным потенциалом, в качестве примера, мы показываем как получить общие решения в соответствующих моделях неминимально взаимодействующей гравитации.

## **Планы исследований на 2019 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 практически проведена 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. Будет проведено 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 проведен экспериментальный поиск дополнительного векторного заряженного бозона  $W'$  и получены нижние ограничения на массу такого гипотетического бозона и параметры характеризующие его взаимодействие с топ кварком и  $b$ -кварком.

В эксперименте ZEUS планируется исследовать образования чарма в глубоко-неупругом рассеянии через заряженный ток в  $e^+p$  и  $e^-p$  взаимодействиях, а также сделать оценки вклада странного кварка в структуру протона на базе сравнения с теоретическими предсказаниями КХД с использованием различных модельных подходов с тяжёлыми ароматами кварков. Тщательный анализ полученных на ускорителе HERA прецизионных экспериментальных данных позволяет исследовать вклады новых взаимодействий в электрон-кварковое рассеяние. В рамках схемы  $eeqq$  контактных взаимодействий (КВ) будет проведена оценка пределов на существование возможных высоко-энергетических вкладов в электрон-кварковое рассеяние вне рамок Стандартной Модели. Анализ отклонений от Стандартной Модели, обусловленных конечным радиусом кварков, а также новыми электрон-кварковыми взаимодействиями в рамках  $(eeqq)$  контактного взаимодействия (КВ) может расширить предел на массовый масштаб, КВ вплоть до 10 ТэВ в зависимости от используемого сценария КВ.

В рамках анализа по изучению эволюции фрагментационных функций в зависимости от переданного импульса  $Q^2$  и переменной Бьёркена  $X_{Bj}$  планируется продолжить исследование поведения скейлинговых переменных  $\ln(1/x_p)$  в области мишени в Брейт системе, в частности, в области больших  $Q^2$  и  $X_{Bj}$ , где требуется улучшение качества реконструкции треков.

В эксперименте на установке  $BM@N$  комплекса NICA планируется исследование с использованием 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 дейтонами, ядрами гелия, углерода, меди, аргона, криптона и золота в диапазоне энергий Нуклотрона.

Планируется разработка элайнмента нового поколения для трековых детекторов установки  $BM@N$  на основе применения Калман-фильтра.

Планируется дальнейшее исследование теоретических моделей с кривизной: продолжение анализа моделей с Гаусс-Бонне слагаемым и скалярными полями, описание различных этапов эволюции наблюдаемой Вселенной с помощью подобных моделей.

Будут продолжены исследования сходства и различий радиона и бозона Хиггса.

Планируется получение эффективного лагранжиана для малых колебаний в модели с двумя дополнительными измерениями на полученных фоновых решениях. 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, планируется разработать и внедрить в эксперименте CMS коллайдера БАК систему нейронных сетей глубокого обучения для оптимизации исследований связанных с рождением топ кварка.

## Заключение

Продолжаются исследования в экспериментах CMS коллайдера БАК, D0 коллайдера Теватрон и 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 2018 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 10 докладов на международных конференциях и большое количество докладов на рабочих совещаниях международных коллабораций. Полученные результаты опубликованы в индивидуальных публикациях и от имени коллабораций CMS, D0 и ZEUS.

## Доклады на конференциях в 2018 г.:

- 1) Lev Dudko "FCNC tqg" HL/HE-LHC Physics Workshop, 19 Oct 2018, CERN
- 2) Баскаков А., Боос Э., Буничев В., Дудко Л., Чернодед А., Перфилов М., Воротников Г., Волков П., Мандрик П., Сковпень К., Попов А., Слабоспитский С.  
"Prospects for the search of FCNC at the HL-LHC" и "Status of tqg FCNC searches at 13 TeV"  
5th CMS Single Top workshop, Испания, Овьедо, 30.11.2018
- 3) Баскаков А., Боос Э., Буничев В., Дудко Л., Чернодед А., Перфилов М., Воротников Г., Волков П., Мандрик П., Сковпень К., Попов А., Слабоспитский С.  
"Status of tqg FCNC searches at 13 TeV"  
5th CMS Single Top workshop, Испания, Овьедо, 30.11.2018
- 4) В.В. Levchenko «Search for contact interactions in inclusive ep scattering at HERA: the effective quark “radius”»  
IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Москва, Россия, 22-26 октября 2018
- 5) Б.Б. Левченко «О новом механизме рождения лептонных пар на LHC»  
Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 16-24 апреля 2018
- 6) Б.Б. Левченко «О происхождении «колена» в спектре энергии космических лучей»  
Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Россия, 16-24 апреля 2018
- 7) Shcheglova L.M. «Scaled momenta in the target region», ZEUS Analysis Forum, DESY, Hamburg, Германия, 17-18 октября 2018  
Авторы: Shcheglova L.M., N.Brook, C. Catterall
- 8) De Sitter and Power-law Solutions in Non-local Gauss-Bonnet Gravity (Устный)

Автор: Ekaterina Pozdeeva

IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Москва, Россия, 22-26 октября 2018

**9) Интегрируемые гравитационные модели, переход через сингулярность (Устный)**

Авторы: Поздеева Е.О., Каменщик А.Ю., Вернов С.Ю.

Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Россия, 16-24 апреля 2018

**10) Инфляционные модели, мотивированные МССМ (Устный)**

Авторы: Петрова Е.Ю., Поздеева Е.О., Вернов С.Ю., Дубинин М.Н.

Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Россия, 16-24 апреля 2018

**Публикации за 2018 год:**

- [1] *CMS Collaboration* : «Prospects for a search for gluon-mediated FCNC in top quark production with the CMS Phase-2 detector at the HL-LHC», published in CMS-PAS-FTR-18-004.
- [2] *CMS and ATLAS Collaboration* : «HL-LHC Yellow Report», in preparation.
- [3] *CMS Collaboration* : «Measurement of the production cross section for single top quarks in association with W bosons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV», JHEP 10 (2018) 117.
- [4] *CMS Collaboration* : «Measurement of the associated production of a single top quark and a Z boson in pp collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV», Phys.Lett.B 779 (2018) 358.
- [5] *CMS Collaboration* : «Evidence for the associated production of a single top quark and a photon in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV», accepted by Phys.Rev.Lett.
- [6] *ZEUS Collaboration* : «Further studies of isolated photon production with a jet in deep inelastic scattering at HERA», JHEP 1801 (2018) 032.
- [7] *ZEUS Collaboration* : «Combination and QCD analysis of charm and beauty production cross-section measurements in deep inelastic ep scattering at HERA», Eur.Phys.J. C78 (2018) no.6, 473].
- [8] Exclusive production at HERA, Lukina O. в трудах конференции PHOTON-2017, Proceedings of the PHOTON-2017 Conference, CERN-Proceedings-2018-001, vol.1, 2018, p. 171-176 ; <https://doi.org/10.23727/CERN-Proceedings-2018-001>
- [9] Новый метод поиска критической окрестности параметров релятивистских столкновений тяжёлых ионов, где плотная адронная материя переходит в кварк-глюонную материю, и предложение его реализации в экспериментах BM@N и MPD на ускорительном комплексе NICA, Соломин А.Н., препринт НИИЯФ МГУ № 2018-2/893
- [10] De Sitter and power-law solutions in non-local Gauss–Bonnet gravity, Elizalde E., Odintsov S.D., Pozdeeva E.O., Vernov S.Yu , в журнале International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, издательство World Scientific Publishing Co (Singapore), том 15, № 11, с. 1850188
- [11] Induced Gravity Models with Exact Bounce Solutions, Pozdeeva E.O., Vernov S.Yu, в журнале Physics of Particles and Nuclei, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 49, № 5, с. 914-917
- [12] Induced gravity and minimally and conformally coupled scalar fields in Bianchi-I cosmological models , Kamenshchik Alexander Yu, Pozdeeva Ekaterina O., Vernov Sergey Yu, Starobinsky Alexei A., Tronconi Alessandro, Venturi Giovanni, в журнале Physical Review D, издательство American Physical Society (United States), том 97, № 2, с. 023536
- [13] Integrable cosmological models in the Einstein and in the Jordan frames and Bianchi-I cosmology, Kamenshchik A.Yu, Pozdeeva E.O., Tronconi A., Venturi G., Vernov S.Yu, в журнале



Physics of Particles and Nuclei, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 49, № 1, с. 1-4

[14] MSSM inflation and cosmological attractors, Dubinin M.N., Petrova E.Yu, Pozdeeva E.O., Vernov S.Yu, в журнале International Journal of Geometric Methods in Modern Physics, издательство World Scientific Publishing Co (Singapore), том 15, с. 1840001(1)-1840001(15)