

Лаборатория электрослабых и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ Основные результаты полученные в 2017 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 исследований проводимых в эксперименте CMS коллайдера ЛHC опубликованы результаты поиска отклонений от предсказаний Стандартной модели в процессах одиночного рождения топ кварка. Результаты получены на основе анализа данных протон-протонных столкновений при энергиях 7 и 8 ТэВ в эксперименте CMS коллайдера БАК. Представлены верхние ограничения на параметры характеризующие отклонения во взаимодействии топ кварка с W бозоном и b -кварком, и нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействии топ кварка с u - или s -кварком через обмен глюоном. Проводится аналогичный анализ на получаемых в том же эксперименте данных при энергии 13 ТэВ.

Опубликовано первое измерение сечения t -канального одиночного рождения топ кварка при энергии 13 ТэВ. Опубликовано измерение массы топ кварка в процессах электрослабого одиночного рождения. Опубликовано результаты поиска дополнительного векторного заряженного бозона распадающегося на топ кварк и b -кварк в протон-протонных столкновениях при энергии 13 ТэВ. Получены нижние ограничения на массу такого бозона и верхние ограничения на соответствующие константы связи. Проведены измерения зависимости от псевдобыстроты и центральности событий плотности потока поперечной энергии во взаимодействиях протон-свинец при энергии 5 ТэВ в нуклон-нуклонной системе масс. Результаты измерений сравниваются с различными генераторами взаимодействия. Проведена валидация релизов программного пакета CMSSW, связанная с проверкой идентификации струй, порождённых b -кварками, в триггерах высокого уровня (обеспечено двумя месяцами сервисных задач коллаборации CMS). Обеспечена поддержка и развитие кода DQM (Data quality monitoring), использующегося для вышеуказанной валидации (один месяц сервисных задач). Созданы интерфейсы применения методов глубокой тренировки нейронных сетей для анализа данных эксперимента CMS. Проведено сравнение различных подходов и выработаны рецепты использования глубоких нейронных сетей для исследования процессов рождения топ кварка.

Проводятся исследования потенциала эксперимента CMS после модернизации детектора (Phase II Upgrade) запланированного на 2023 год. Моделируются процессы одиночного рождения топ кварка через нейтральные токи меняющие аромат кварков. Проводится оценка

ожидаемой чувствительности модернизированного эксперимента. Результаты планируется опубликовать в Technical Design Report в конце 2017 года.

В эксперименте CMS с использованием калориметра CASTOR, перекрывающего рекордно высокие псевдобыстроты, измерены дифференциальные спектры энергий частиц, попадающих в диапазон $5.2 < \eta < 6.5$. В протон-протонных столкновениях при энергии центра масс 13 ТэВ измерены распределения как по полной суммарной энергии частиц, попадающих в CASTOR, так и по её электромагнитной и адронной составляющим. Спектры демонстрируют чувствительность к моделированию мультипартонных взаимодействий в протон-протонных столкновениях. Результаты измерений предлагают новые ограничения для моделей адронного взаимодействия, используемых для описания как ускорительных экспериментов, так и экспериментов по физике космических лучей.

В эксперименте D0 коллайдера Теватрон измерена масса топ кварка на основе комбинаций всех данных эксперимента D0, полученных при энергиях 1.8 и 1.96 ТэВ. Достигнута точность измерения 0.5%. Результат находится в согласии с результатами других экспериментов. Проведено объединение полного набора данных экспериментов D0 и CDF для измерения асимметрии рождения топ и анти-топ кварков в передней и задней областях детекторов. Получены полное и дифференциальные значения для асимметрии. В пределах неопределенностей эксперимента, результаты $A_{\text{FB}}^{\text{top}} = 0.128 \pm 0.025$ находятся в согласии с последними вычислениями в рамках Стандартной модели.

Используя данные эксперимента ZEUS коллайдера HERA, впервые измерены сечения дифракционного фоторождения прямых фотонов инклюзивно и в сопровождении струй, по широкому набору кинематических переменных. Получены прямые указания на вклад «прямого» померона при $Z_p > 0.9$. Объединив данные экспериментов H1 и ZEUS по рождению частиц включающих с-кварк и используя уравнения эволюции КХД, впервые из данных с ер-коллайдера HERA извлечена “бегущая” масса с-кварка, $m_c(\mu)$, в широком диапазоне виртуальности фотона Q^2 , $2.5 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 2000 \text{ ГэВ}^2$. Результаты опубликованы в двух статьях в высоко рейтинговых научных журналах, и представлены в пленарном докладе на международной конференции PHOTON17.

Рассмотрена модель Рэндалл-Сундрум с двумя бранами, в которой поля Стандартной Модели локализованы на бране с отрицательным натяжением, а в пространстве между бранами распространяются гравитационное поле и дополнительное скалярное поле Гольдберга-Вайза. Построен лагранжиан для скалярных флуктуаций гравитационного и скалярного полей над фоновым решением. Получены эффективный четырехмерный лагранжиан, описывающий нелинейные члены самодействия скалярного поля радиона в полиномиальном приближении с точностью до четвертого порядка, а также нелинейные члены самодействия радиона и полей Стандартной Модели. Получены оценки возможных значений констант самодействия.

Построены квантовые инфляционные сценарии в частности модели неминимально взаимодействующей гравитации с двумя дублетами в с древесным потенциалом Хигса двухдублетной модели, рассмотрена космологическая эволюция и переход через сингулярность в моделях с неминимальным взаимодействием скалярных полей с гравитацией в метрике Бьянки-I.

Введение

Третье поколение фермионов Стандартной модели (СМ) замыкает t -кварк с зарядом $2/3$. 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.

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.

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.

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. В 2017 опубликованы результаты поиска отклонений от предсказаний СМ в процессах одиночного рождения топ кварка при энергиях 7 и 8 ТэВ [JHEP 02 (2017) 028]. Исследовались возможные модельно-независимые отклонения во взаимодействии топ кварка с W бозоном и b-кварком и нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействии топ кварка с u- и c-кварком проходящем через обмен глюоном.

Экспериментально такие отклонения не наблюдались и были найдены верхние ограничения на параметры характеризующие такие взаимодействия. Представлены одномерные, двумерные и трехмерные ограничения на шесть исследуемых параметров проявляющихся в различных расширениях СМ.

На рисунке 1.1 приведены верхние ограничения на вероятности редких распадов топ кварка из-за существования нейтральных токов, меняющих аромат кварков. Экспериментальные ограничения показаны стрелочками. Предсказания в различных теориях расширяющих СМ приведены в виде штрихованных областей. В рамках СМ такие распады сильно подавлены за счет GIM механизма, вероятности показаны сплошной линией. Проводится аналогичный анализ для новых данных столкновений при энергии 13 ТэВ. Рисунок 1.2 демонстрирует распределение выхода Байесовской нейронной сети для смоделированных и отобранных в данных событий при энергии 13 ТэВ. Новый анализ готовится к одобрению коллаборацией CMS.

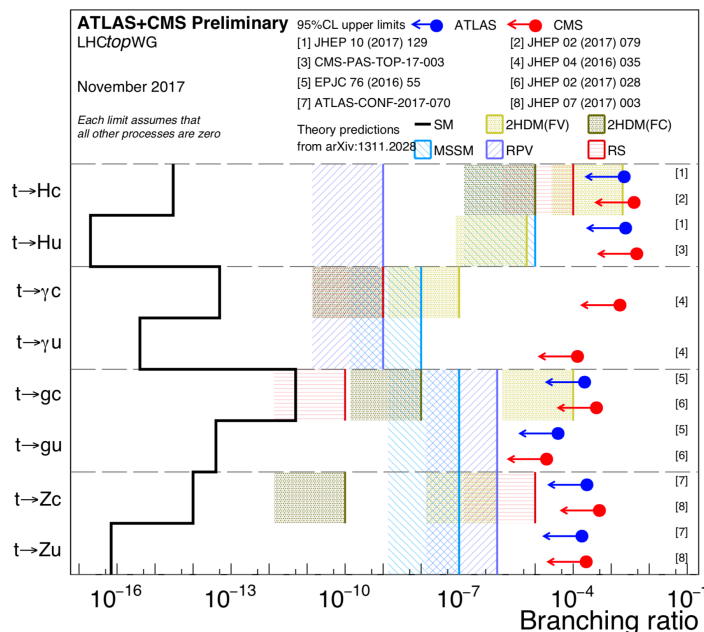


Рисунок 1.1. Редкие распады топ кварка, связанные с нейтральными токами, меняющими аромат кварков.

Опубликовано первое измерение сечения t-канального одиночного рождения топ-кварка при энергии 13 ТэВ [Phys. Lett. B 772 (2017) 752]. Сечение составило 238 ± 13 (stat) ± 29 (syst) пб, также были измерены отношение сечений рождения топ- и антитоп-кварков $R_{t\text{-ch.}} = 1.81 \pm$

$0.18 \text{ (stat)} \pm 0.15 \text{ (syst)}$ и значение параметра V_{tb} матрицы Кабибо-Кабаяши-Маскава $1.05 \pm 0.07 \text{ (exp)} \pm 0.02 \text{ (theory)}$.

Опубликовано первое измерение массы топ кварка в событиях его электрослабого рождения [EPJС 77 (2017) 354], предыдущие измерения проходили в процессах рождения топ кварка в сильных взаимодействиях. Измеренная масс $172.95 \pm 0.77 \text{ (stat)} +0.97-0.93 \text{ (syst)}$ ГэВ находится в согласии с предыдущими измерениями. Рисунок 1.3 показывает распределение отобранных данных, смоделированный сигнал и фон для восстановленной массы топ кварка из продуктов его распада: лептона, адронной струи и реконструированного импульса нейтрино.

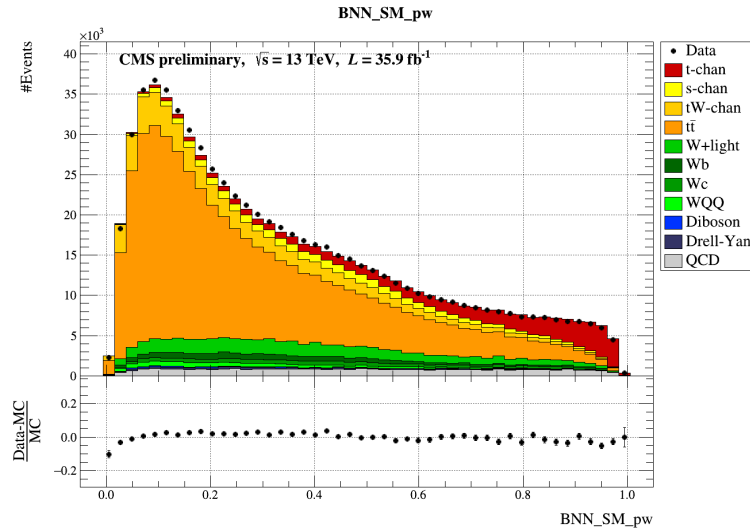


Рисунок 1.2. Распределение данных и моделирования для выхода Байесовской нейронной сети, предварительные результаты измерений при энергии 13 ТэВ.

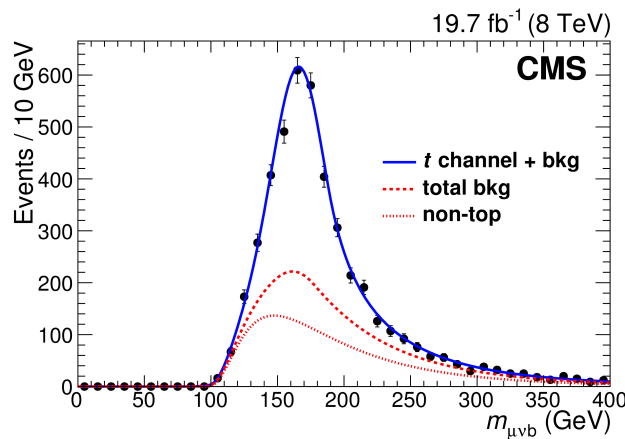


Рисунок 1.3. Измерение массы топ кварка в событиях его электрослабого одиночного рождения.

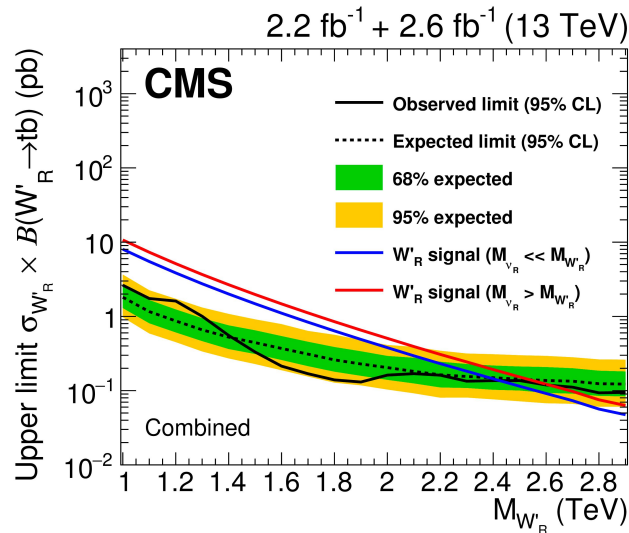


Рисунок 1.4. Нижние ограничения на массу дополнительного векторного бозона W' предсказываемого в различных расширениях СМ. Ограничения являются наиболее жесткими из существующих.

Опубликованы результаты поиска дополнительного векторного заряженного бозона W' предсказываемого в различных теориях за рамками СМ [Phys.Lett. B 777 (2017) 39]. Исследовался возможный канал распада W' на топ кварк и b-кварк. Статистически заметного сигнала существования W' не обнаружено и были установлены нижние ограничения на возможную массу W' и параметры характеризующие взаимодействие W' с топ кварком и b-кварком. Полученные ограничения являются наиболее строгими из существующих. Рисунок 1.4 представляет измеренные нижние ограничения на возможную массу W' в различных сценариях взаимодействий.

Обеспечена поддержка и развитие кода DQM (Data quality monitoring), использующегося для вышеуказанной валидации (один месяц сервисных задач). Созданы интерфейсы применения методов глубокой тренировки нейронных сетей для анализа данных эксперимента CMS. Проведено сравнение различных подходов и выработаны рецепты использования глубоких нейронных сетей для исследования процессов рождения топ кварка.

Проводятся исследования потенциала эксперимента CMS после модернизации детектора (Phase II Upgrade) запланированного на 2023 год. Моделируются процессы одиночного рождения топ кварка через нейтральные токи меняющие аромат кварков. Проводится оценка ожидаемой чувствительности модернизированного эксперимента к таким процессам. Результаты планируется опубликовать в Technical Design Report в конце 2017 года.

1а. Измерение спектра потока энергии на больших псевдобыстротах в эксперименте CMS.

На рисунке 1а.1 показано распределение по полной суммарной энергии частиц, попадающих в диапазон псевдобыстрот $5.2 < \eta < 6.5$, полученное с использованием калориметра CASTOR. Результаты измерений сравниваются с предсказаниями различных моделей.

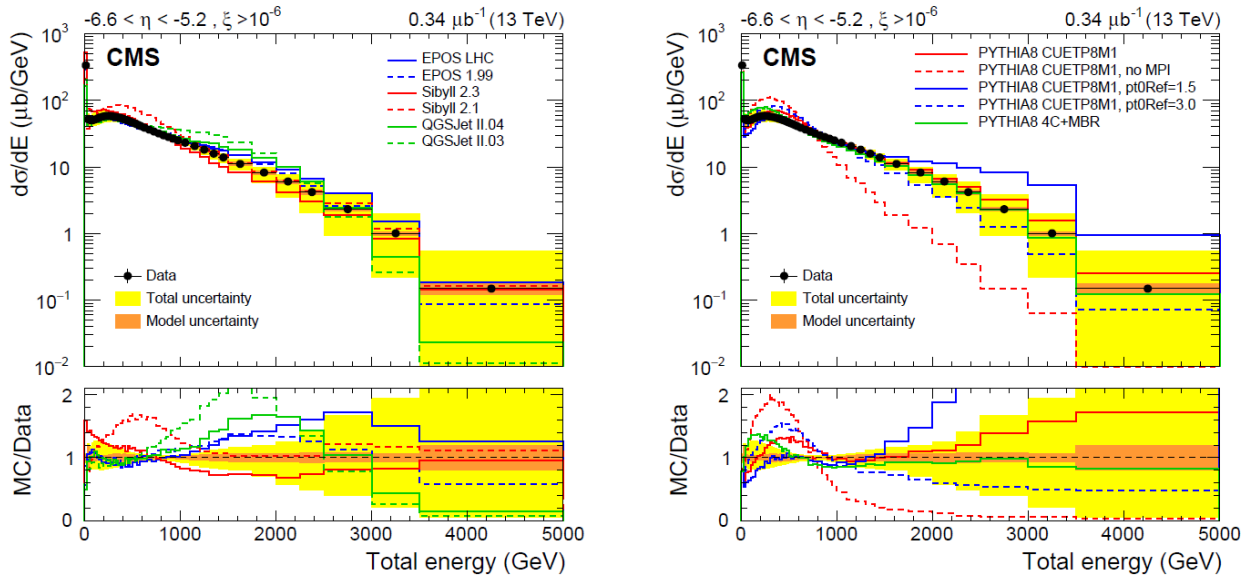


Рисунок 1а.1. Дифференциальное сечение суммарной энергии частиц, попадающих в диапазон псевдобыстрот $5.2 < \eta < 6.5$. Слева - сравнение с генераторами, используемыми для моделирования ШАЛ, справа - сравнение с различными настройками PYTHIA 8.

Ни одна из моделей не воспроизводит распределение на всём диапазоне измерений. Наиболее удовлетворительно спектр описывается генераторами EPOS-LHC и QGSJETII.4, используемого в космических лучах. Степень успешности описания измерений различными настройками генератора PYTHIA 8 в значительной степени определяется моделированием мультипартонных взаимодействий.

2. Исследования топ-кварка в эксперименте D0.

1. Проведено измерение массы топ кварка на основе комбинаций всех данных эксперимента D0, полученных при энергиях 1.8 и 1.96 ТэВ. Объединены два наиболее точных канала распада топ кварка с одним и двумя лептонами в конечном состоянии. Полученный результат $m_t = 174.95 \pm 0.40$ (stat) ± 0.64 (syst) GeV = 174.95 ± 0.75 GeV согласуется с результатами других экспериментов.

2. Проведено объединение данных экспериментов D0 и CMS полученных при энергии 1.96 ТэВ, для измерения асимметрии рождения топ и анти-топ кварков в передней и задней областях детекторов. Измерения проводились на основании разницы распределения количества событий в передней и задней областях, умноженных на знак электрического заряда. Измерены интегральная и дифференциальные асимметрии. На рисунке 1, 2 представлены распределения по дифференциальной асимметрии в зависимости от инвариантной массы топ и анти-топ кварков и интегральная асимметрия в различных каналах. В рамках неопределенностей измерений результат находится в согласии с последними вычислениями в Стандартной модели.

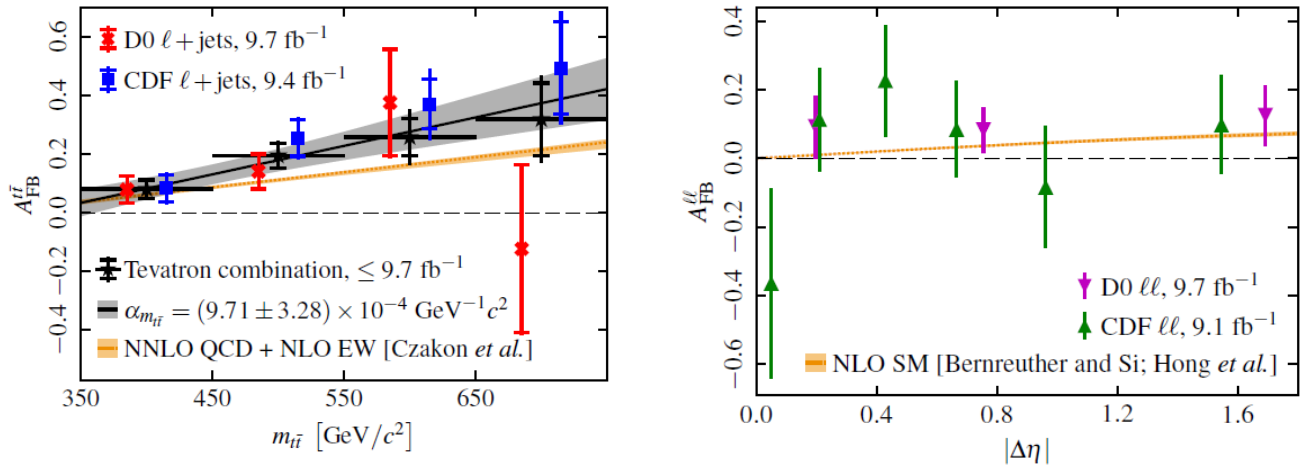


Рисунок 2.1. Распределение дифференциальной асимметрии рождения топ и анти-топ кварков в передней и задней областях детектора.

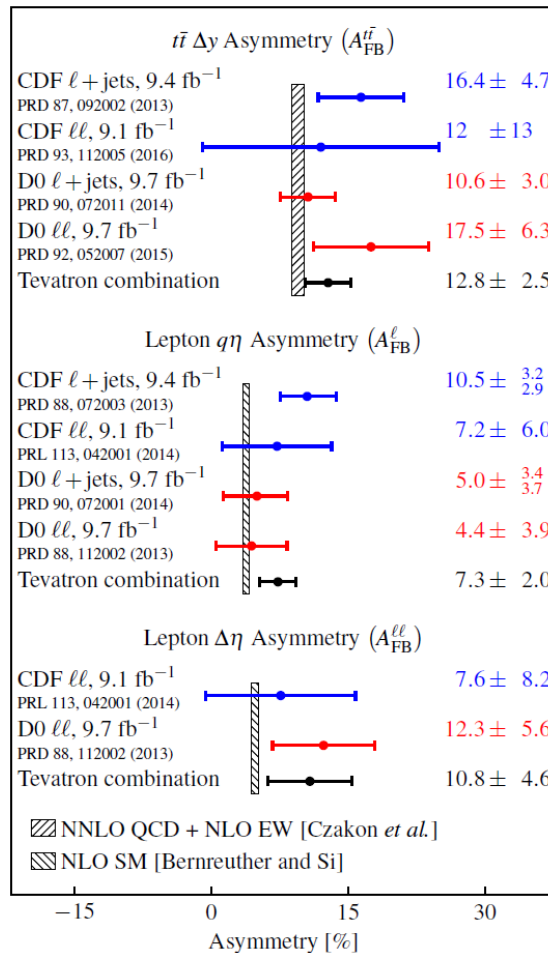


Рисунок 2.2. Интегральная асимметрии рождения топ и анти-топ кварков в передней и задней областях детектора. Приведены различные каналы измерений.

3. Предыдущие исследования данных эксперимента D0 указывали на вероятность связанного состояния двух пар с и анти-с кварков. Для перепроверки этой гипотезы был проведен абсолютно новый(второй) анализ по поиску такого состояния в событиях с парами J/ψ - J/ψ , J/ψ - ψ' , ψ' - ψ' . Для поиска двумерного резонанса в условиях ограниченной статистики был использован специально разработанный "Метод вычисления числа реальных

событий с двумя одинаковыми частицами во множестве событий, отобранных в экспериментах на ускорителях". Проведенные исследования показали, что наблюдаемый ранее на одномерном распределении инвариантных масс пар мезонов избыток событий с массами, близкими к порогу рождения мюонных пар, может быть объяснен эффектом суперпозиции фоновых событий из двумерного комбинаторного фона. Дело в том, что в парных событиях комбинаторный фон для событий с двумя парами мезонов состоит из двух типов фоновых событий: когда один мезон настоящий, а другой случайная комбинация, и когда оба мезона являются случайными комбинациями. Первый тип фоновых событий и создает вблизи порога рождения эффект резонанса. Подготовлена статья для журнала с описанием разработанного метода.

3. 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 2017 году.

- Изучение дифракционного фоторождения изолированных фотонов на HERA[8]. Дифракционные процессы относятся к особому классу адронных взаимодействий, при котором в пространстве быстрот барионная система от налетающего протона отделена “целью” от остальных рожденных частиц. Модельно, рождение такой системы описывается процессом, включающим обмен сложносоставным объектом с квантовыми числами вакуума, помероном IP. Обмен помероном происходит между адроподобным фотоном и кварками из протона-мишени. В рамках современной парадигмы, структура как фотона, так и померона описывается феноменологическими функциями плотности партонов. В итоге, в теоретических моделях вся реакция описывается комбинациями подпроцессов взаимодействия как бесструктурных (прямых) объектов (фотон, померон), так и объектов с внутренней кварк-глюонной структурой.

В данном исследовании изучалось дифракционное фоторождение ($Q^2 < 1 \text{ ГэВ}^2$) жестких изолированных фотонов инклюзивно и в сопровождении, по-крайней мере, одной струи адронов. Такие фотоны возникают от заряженных партонов и их регистрация является свидетельством наличия кварков в структуре померона, что позволяет измерить кварковую компоненту структурной функции померона. В анализе использованы данные двух периодов эксперимента: HERA-I и HERA-II.

Измерялись дифференциальные сечения по широкому набору переменных, характеризующих процесс и конечное состояние: x_γ^{meas} , доля энергии налетающего фотона передаваемая изолированному фотону и струям; x_p , доля энергии протона-мишени, переданная померону; M_X , масса дифракционной системы частиц; z_p^{meas} , доля энергии померона задействованная в жестком процессе, порождающего фотон и струю. $z_p^{\text{meas}}=1$ соответствует событиям с «прямым» помероном; E_γ^T , поперечная энергия конечного изолированного фотона; η_{max} , наибольшая псевдобыстрота частиц, принадлежащих к дифракционной системе; и др. Дифракционным событиям соответствует отбор $\eta_{\text{max}} < 2.5$ и $x_p < 0.03$.

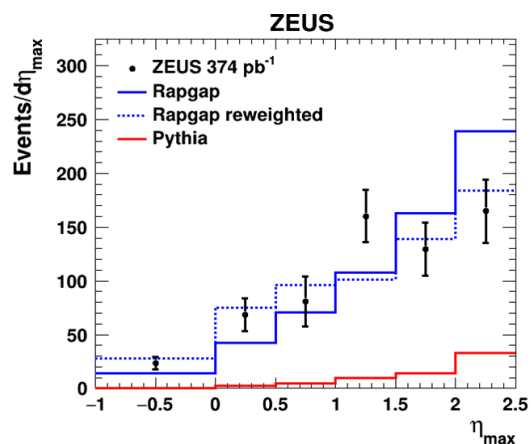
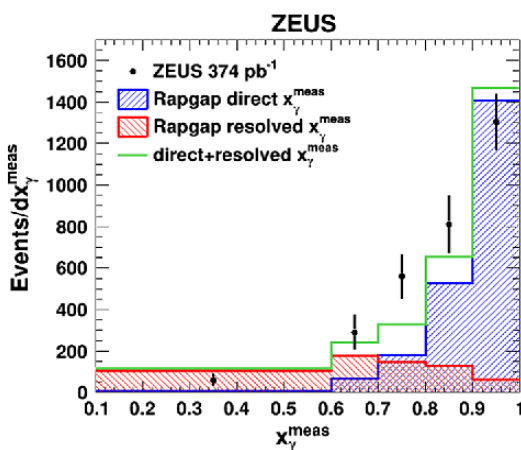


Рисунок 3.1. Показаны зависимость числа отобранных событий с фотоном и струями от x_γ^{meas} (слева) и от η_{max} (справа). Данные сравниваются с предсказаниями МК-генератора Rappap при смешивании событий с «прямыми» и структурированным фотоном в пропорции 70:30. Вклад не дифракционных событий составляет менее 10% (Pythia).

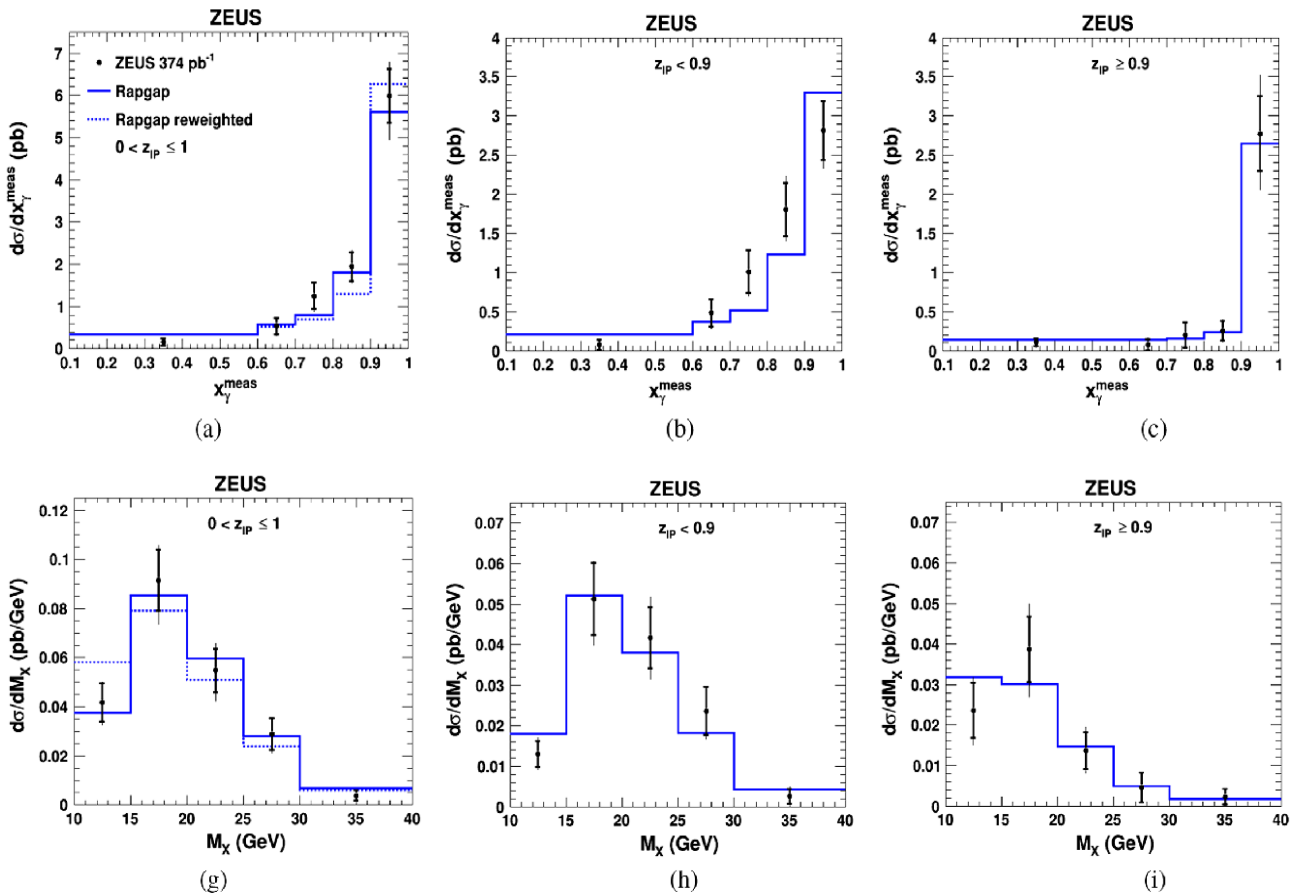
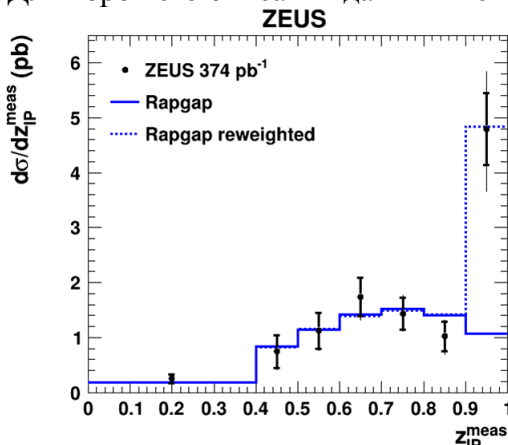


Рисунок 3.2. Дифференциальные сечения рождения изолированного фотона в сопровождении струи по данным HERA-II сравниваются с предсказаниями Rappap, нормированными на данные.

Измеренные сечения сравнивались с КХД и редже-мотивированной феноменологической моделью дифракционных процессов Rappap. После нормировки на экспериментальные сечения, Rappap хорошо воспроизводит формы почти всех сечений (Рисунок 3.2). Однако, для событий с изолированным фотоном и струями, в области $z_p^{\text{meas}} > 0.9$ наблюдается значительное превышение измеренного сечения над номинальными предсказаниями Rappap. Для хорошего описания данных в этой области требуется увеличение в Rappap вклада



процессов с «прямым» фотоном в семь раз (перевзвешивание). Это превышение также означает, что при $z_p^{\text{meas}} > 0.9$ взаимодействуют (преимущественно) «прямой» померон с «прямым» фотоном.

Рисунок 3.3. Показаны дифференциальные сечения рождения изолированного фотона в сопровождении струй в зависимости от z_p^{meas} . Сплошной гистограммой

показаны не взвешенные предсказания Раргар нормированные на данные в области $z_p^{\text{meas}} < 0.9$.

- «Бегущая» масса с-кварка из данных по глубоко неупругому рассеянию на HERA [2]. Практические расчеты по теории возмущений в КХД требуют фиксации схемы перенормировок. Как следствие, в \overline{MS} схеме перенормировок основные параметры КХД (массы, константа связи) зависят от масштаба μ на котором они определяются. В глубоко неупругом рассеянии масштаб μ , в свою очередь, зависит от виртуальности фотона Q^2 . Эволюция массы тяжелых кварков с μ описывается уравнением ренормгруппы.

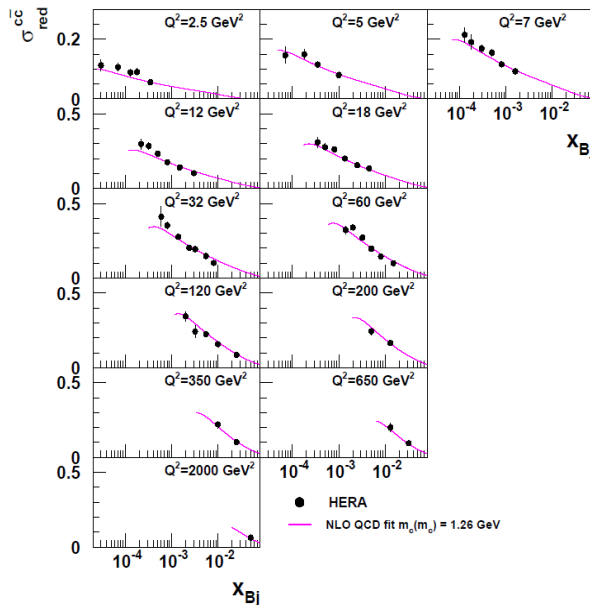


Рисунок 3.4. Приведенные сечения рождения открытого чарма как функции масштабной переменной для 12 интервалов Q^2 . Сплошными x_{Bj} кривыми показан глобальный NLO фит.

«Бегущая» масса b-кварка изучалась ещё в экспериментах на LEP. Однако зависимость массы с-кварка от μ ещё не была измерена. Из данных экспериментов ZEUS и H1 массы с- и b-кварков были определены только в одной точке, на масштабе масс самих кварков. Объединение данных двух экспериментов по рождению чарма позволило заполнить этот пробел и проследить за эволюцией m_c в широком интервале по Q^2 , $2.5 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 2000 \text{ ГэВ}^2$.

Шесть групп данных по сечениям в близких по Q^2 интервалах (см. рисунок) фитировались NLO пакетом OPENQCDRAD для определения $m_c(m_c)$ методом χ^2 , а решая уравнение ренормгруппы в однопетлевом приближении, находилось m_c . Главный результат анализа показан на Рисунке 3.5 и хорошо согласуется с оценкой эволюции в рамках высших приближений КХД (желтая полоса), и результата, полученного в рамках решеточных расчетов (красная точка). Таким образом, подтверждается главная специфика КХД по «бегущим» массам и константам связи.

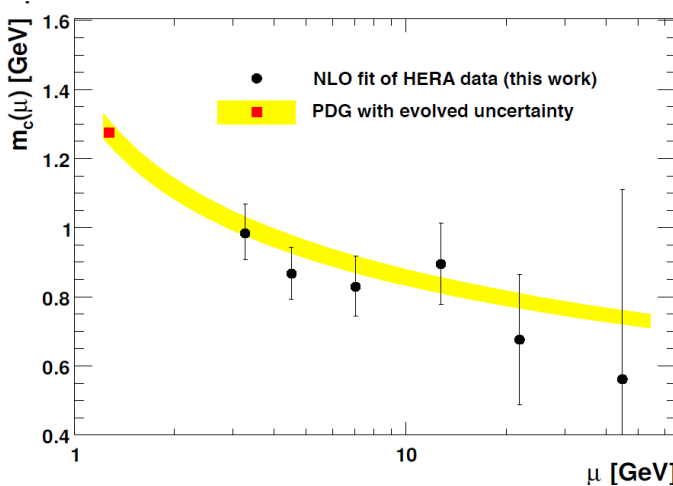


Рисунок 3.5. Зависимость массы с-кварка от масштаба μ в \overline{MS} схеме с «бегущей» массой. Красной точкой показано мировое среднее по данным PDG.

Продолжены работы по изучению функций фрагментации в области мишени Брейт системы. Результаты доложены на сессии ZEUS Analysis Forum в мае 2017.

4. Теоретические исследования.

Проанализированы инфляционные сценарии в космологической модели с двумя хиггс-дублетами минимальной суперсимметричной стандартной модели (MSSM). Получаемые переходом в массовый базис пять скалярных полей неминимально связаны с гравитацией. Вычисляются наблюдаемые данные из такой многополевой инфляции, основанной на MSSM, и строится ряд последовательных инфляционных сценариев. Космологическая эволюция с различными начальными условиями для рассматриваемой системы приводит к инфляционным параметрам, полностью совместимым с наблюдательными данными. Показано, что приближение сильной связи является достаточно точным для описания таких инфляционных сценариев и позволяет найти аналитически приближённые значения инфляционных параметров (M.N. Dubinin, E.Yu. Petrova, E.O. Pozdeeva, M.V. Sumin and S.Yu. Vernov, arXiv:1705.09624).

Изучена космологическая эволюция вселенной Бьянки-I, заполненной конформно связанным безмассовым скалярным полем. На этом примере рассмотрен метод описания пересечения космологической сингулярности с помощью переходов между формулировками Йордана и Эйнштейна. Предложенный метод даёт те же результаты, что и более сложные методы для плоской вселенной Фрийдмана и легко обобщается для случая анизотропной вселенной Бьянки-I. Мы также описали эволюцию Вселенной Бьянки-I в модели индуцированной гравитации с безмассовым скалярным полем (A.Yu. Kamenshchik, E.O. Pozdeeva, A.A. Starobinsky, A. Tronconi, G. Venturi and S.Yu. Vernov, arXiv:1710.02681; A.Yu. Kamenshchik, E.O. Pozdeeva, S.Yu. Vernov, A. Tronconi, and G. Venturi, Phys. Rev. D 95 (2017) 083503 [arXiv:1702.02314]).

В модели индуцированной гравитации с полиномиальными потенциалами шестой степени получены условия существования точных решений типа «отскока» и показано, что все они асимптотически стремятся к неустойчивому решению де Ситтера (E.O. Pozdeeva, S.Yu. Vernov, arXiv:1711.06255).

Одним из возможных расширений Стандартной Модели является модель, в которой материя локализована на двух четырехмерных бранах, ограничивающих пятимерное многообразие. В пространстве между бранами распространяется только гравитационное поле и скалярное поле Гольдберга-Вайза, стабилизирующее расстояние между бранами. Фоновое решение для метрического и скалярного полей содержит факторы, экспоненциально спадающие от одной браны к другой, благодаря чему удается совместить "сильную" гравитацию и ненаблюдаемый характер пятой координаты. Тензорные и скалярные флуктуации над этим решением представляют собой наборы эффективных четырехмерных тензорных и скалярных полей. Среди этих полей присутствует безмассовая тензорная мода, отвечающая обычному четырехмерному гравитационному полю. Кроме того, среди скалярных мод возможно наличие легкой моды (называемой радионом), масса которой может быть сравнима с массой поля Хиггса. Вершины, описывающие линейное взаимодействие бозонных полей Стандартной Модели с радионом похожи на аналогичные вершины, описывающие взаимодействие с полем Хиггса. Структура вершин взаимодействия фермионных полей с радионом сложнее аналогичных вершин с полем Хиггса. Кроме того, имеются вершины с радионом, не имеющие аналогов для поля Хиггса, например четырехточечные вершины, из которых выходят два фермиона, бозон (векторный или скалярный) и радион. Все это позволяет рассчитывать на то, что в процессах с участием фермионов поля радиона и Хиггса должны быть хорошо различимы. Однако, детальное изучение нами процессов с участием фермионов и радиона показало, что во многих случаях форма его взаимодействия неотличима либо подобна аналогичным процессам с участием бозона Хиггса. В частности, нами было показано, что любые процессы с фермионами, в которых рождается одиночный радион в сопровождении произвольного количества любых

векторных бозонов неотличимы от аналогичных процессов, в которых рождается бозон Хиггса. Различие проявляется только в перенормировке параметров - массе, константе взаимодействия. Более того, продемонстрировано, что процессы с парным рождением бозонов Хиггса похожи на процессы с ассоциированным рождением бозона Хиггса и радиона: форма данных процессов оказывается такой же, которая могла бы быть получены из лагранжиана с участием одного только Хиггса, имеющего "нестандартную" константу самодействия в вершине третьего порядка. Это значит, что если масса радиона близка к массе бозона Хиггса, возникает проблема различения (идентификации) участвующих в таких процессах скалярных полей. Это, в свою очередь, делает актуальным более подробное изучение возможных свойств радиона, в частности получение потенциала самодействия более высокого порядка, чем квадратичный, а также нелинейных членов взаимодействия радионов с полями Стандартной модели.

Планы исследований на 2018 год.

Исследования в эксперименте CMS коллайдера БАК проводятся в нескольких направлениях. 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. Планируется проведение измерения зависимости от псевдобыстроты плотности потока энергии во взаимодействия протон-свинец при энергии 8 Тэв в системе масс нуклон-нуклон.

Подготовка модернизации детектора CMS коллайдера БАК требует исследования физического потенциала планируемых изменений в детекторе на точность планируемых измерений и исследований на будущем детекторе. Планируется моделирование процессов проходящих через нейтральные токи меняющие аромат кварков во взаимодействии топ кварка, и процессов с рождением дополнительного векторного заряженного бозона W' . Моделирование будет включать реалистичную модель планируемого детектора. Созданное моделирование позволит провести оценку потенциала модернизированного детектора и найти ожидаемые ограничения на параметры характеризующие такие проявления "новой физики". Результаты планируются включить в Technical Design Report.

В рамках участия МГУ в подготовке проекта нового коллайдера FCC (CERN), с запланированной энергией 100 ТэВ протон-протонных столкновений, будет проведено моделирование процессов одиночного рождения топ кварка через рождение дополнительного векторного заряженного бозона W' и через обмен глюоном в нейтральных токах меняющих аромат кварков. Будет проведено моделирование отклика детектора учитывающего проектируемые параметры и проведена оценка чувствительности будущего эксперимента к исследуемым процессам. Результаты планируются включить в Conceptual Design Report.

Планируется изучение образования тяжелых кварков для определения их массы и поиска возможных новых типов электрон-кварковых взаимодействий. Будет проведено измерение сечения образования прелестных и очарованных кварков в глубоко-неупругом электрон-протонном рассеянии на коллайдере HERA на базе данных экспериментов ZEUS и H1. Комбинированные данные двух экспериментов сравниваются с предсказаниями пертурбативной КХД и используются для получения сечения неупругого рассеяния с тем, чтобы определить «бегущие» массы прелестных и очарованных кварков в \overline{MS} * (Modified Minimal Subtraction Scheme) схеме перенормировки КХД. Тщательный анализ полученных на ускорителе HERA прецизионных экспериментальных данных позволяет исследовать вклады новых взаимодействий в электрон-кварковое рассеяние. 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. Планируется измерение дифференциальных сечений в событиях с изолированными фотонами в глубоко-неупругих ер-взаимодействиях в зависимости от ряда комбинаций пар переменных, связанных с образованием фотона с большим поперечным импульсом, адронной струи и электрона. Планируется детальное сравнение с моделями КХД.

Запланированы разработка и ввод в действие программной системы нового поколения для выравнивания трековых детекторов эксперимента VM@N проекта NICA в Объединённом институте ядерных исследований в Дубне. В рамках этого же проекта запланированы разработка и внедрение пилотного варианта программной системы тагирования результатов физического анализа с целью обеспечения их соответствия требованиям принципа воспроизводимости.

Планируется смоделировать декомпозицию инфлатонного поля в постинфляционный период. Рассмотреть механизмы нагрева постинфляционной Вселенной в многополевых моделях мотивированных физикой частиц. Найти сферически-симметричные решения со скалярными полями.

Запланированы исследования 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 анализов связанных с рождением топ кварка.

Заключение

Продолжаются исследования в экспериментах CMS коллайдера БАК, D0 коллайдера Теватрон и ZEUS коллайдера HERA. Проводятся теоретические и феноменологические исследования в рамках Стандартной модели и различных ее расширений. За 2017 год сотрудники ЛЭНВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ представили 25 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 2017 г.:

- 1) M.Perfilov for CMS and ATLAS collabroations, устный, приглашенный доклад «FCNC results in ATLAS and CMS» [The Fifth Annual Large Hadron Collider Physics Conference \(LHCP2017\)](#) 15-20 Мая 2017, Шанхай, Китай
- 2) [Буничев В.Е.](#), [Перфилов М.А.](#), [Баскаков А.В.](#), [Боос Э.Э.](#), [Волобуев И.П.](#) «Restrictions on the mass of the KK excitation W' from the Higgs boson diphoton decay and the single top production» [The XXIII International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory \(QFTHEP'2017\)](#) 26 июня - 3 июля 2017, Ярославль, Россия
- 3) [Igor Volobuev](#), [Edward Boos](#), [Viacheslav Bunichev](#), [Maxim Perfilov](#), [Mikhail Smolyakov](#) «Extra dimensions hypothesis in high energy physics», [The XXIII International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory \(QFTHEP'2017\)](#), 26 июня - 3 июля 2017, Ярославль, Россия
- 4) [Баскаков А.В.](#), [Боос Э.Э.](#), [Буничев В.Е.](#), [Волобуев И.П.](#), [Перфилов М.А.](#) «Постановка ограничений на массу W' бозона из процессов двухфотонного распада бозона Хиггса и одиночного рождения топ-кварка.» Ломоносовские чтения — 2017, 17-26 апреля 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия
- 5) Lev Kheyn, “Probing the lead wave function with proton-nucleus and photon-nucleus collisions with CMS”, IS2017, 20.09.2017
- 6) Хейн Л.А. “Измерения потока энергии в эксперименте CMS”, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ», Москва, Россия, 20 апреля 2017
- 9) А. Баскаков, «On the top-quark width measurement using a combination of resonant and non resonant cross sections», QFTHEP 2017, Ярославль, Россия, 26 июня - 3 июля 2017
- 10) Gauss-Bonnet Non-local Gravity (Устный)
Авторы: Elizalde E., Odintsov S.D., Pozdeeva E.O., Vernov S.Yu
3-я Международная зимняя школа-семинар по гравитации и космологии «Петровские чтения-2017», Казань, Россия, 27 ноября - 2 декабря 2017
- 11) Multifield inflation and cosmological attractors (Устный)
Авторы: Ekaterina Pozdeeva, Sergey Vernov
3-я Международная зимняя школа-семинар по гравитации и космологии «Петровские чтения-2017», Казань, Россия, 27 ноября - 2 декабря 2017
- 12) Multifield Inflation Scenarios from MSSM (Устный)
Автор: Ekaterina Pozdeeva
Symmetry 2017- The First International Conference on Symmetry, Барселона, Испания, 16-18 октября 2017
- 13) Multifields inflation from MSSM (Устный)
Автор: Ekaterina Pozdeeva
IVth Russian-Spanish Congress: Particle, Nuclear, Astroparticle Physics and Cosmology, Дубна, Россия, 4-8 сентября 2017

- 14) The inflationary scenarios in GUT and MSSM (Устный)
Автор: Pozdeeva E.O.
Geometric Foundations of Gravity in Tartu, Тарту, Эстония, 28 августа - 1 сентября 2017
- 15) Cosmological attractors in multifield inflation (Устный)
Автор: Pozdeeva E.O.
18th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, Россия, 24-30 августа 2017
- 16) Evolution of a bouncing solutions in cosmological models with non-minimally coupled scalar fields (Устный)
Автор: Pozdeeva E.O.
International Workshop "Supersymmetries and Quantum Symmetries - SQS'2017", Joint Institute for Nuclear Research, Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Россия, 31 июля - 5 августа 2017
- 17) Integrable cosmological models in the Bianchi I metric (Устный)
Авторы: Kamenshchik A.Yu, Pozdeeva E.O., Tronconi A., Venturi G., Vernov S.Yu
The International Workshop on "Classical and Quantum Integrable Systems (CQIS-2017)", Dubna, Russia, Россия, 24-28 июля 2017
- 18) Multi-field inflation and cosmological attractors (Устный)
Автор: Pozdeeva E.O.
The XXIII International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2017), г.Ярославль, Россия, 26 июня - 3 июля 2017
- 19) Bouncing models with non-monotonic Hubble parameter (Устный)
Авторы: Vernov S.Yu, Pozdeeva E.O.
Ginzburg Centennial Conference on Physics, Москва, ФИАН, Россия, 29 мая - 3 июня 2017
- 20) Анализ эволюции решений типа "отскока" в пространственно плоской метрике Фридмана (Устный)
Авторы: Вернов С.Ю., Поздеева Е.О., Скугорева М.А., Топоренский А.В.
Ломоносовские Чтения 2017 (НИИЯФ МГУ, 17 - 26 апреля 2017), НИИЯФ МГУ, Россия, 17-26 апреля 2017
- 21) Инфляционные модели с несколькими скалярными полями (Устный)
Авторы: Поздеева Е.О., Вернов С.Ю., Дубинин М.Н., Петрова Е.Ю., Сумин М.В.
Ломоносовские Чтения 2017 (НИИЯФ МГУ, 17 - 26 апреля 2017), НИИЯФ МГУ, Россия, 17-26 апреля 2017
- 22) L. Dudko "Experimental summary of single top couplings, anomalous couplings and FCNC" ST-CMS-WK4th: 4th CMS Single Top Workshop, 8-10 Jun 2017, KIT, Karlsruhe (Germany).
- 23) G. Vortnikov "Anomalous Couplings and FCNC in 13 TeV" ST-CMS-WK4th: 4th CMS Single Top Workshop, 8-10 Jun 2017, KIT, Karlsruhe (Germany).
- 24) L. Dudko «Search for "New Physics" in the events of single top quark production» RDMS CMS Conference 2016: 19th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, 7-11 Sep 2016, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy of the Bulgarian Academy of Sciences, Varna (Bulgaria)

25) Лукина О. Ю., международная конференция PHOTON2017 (CERN, Швейцария), пленарный доклад “Exclusive photoproduction at HERA”.

Публикации за 2017 год:

[1] CMS Collaboration : «Search for anomalous Wtb couplings and flavour-changing neutral currents in t-channel single top quark production in pp collisions at $\sqrt{s}= 7$ and 8 TeV» Published in JHEP 1702 (2017) 028

[2] CMS Collaboration : «Cross section measurement of t-channel single top quark production in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV» Phys.Lett. B772 (2017) 752-776

[3] CMS Collaboration : «Measurement of the top quark mass using single top quark events in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV» Eur.Phys.J. C77 (2017) no.5, 354

[4] CMS Collaboration : «Searches for W' bosons decaying to a top quark and a bottom quark in proton-proton collisions at 13 TeV » JHEP 1708 (2017) 029

[5] CMS Collaboration : «Search for heavy resonances decaying to a top quark and a bottom quark in the lepton+jets final state in proton–proton collisions at 13 TeV» Phys.Lett. B 777 (2017) 39
[10.1016/j.physletb.2017.12.006](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2017.12.006)

[6] Combination of D0 measurements of the top quark mass
D0 Collaboration Phys.Rev. D95 (2017) no.11, 112004
DOI: 10.1103/PhysRevD.95.112004 ; arXiv:1703.06994 [hep-ex]

[7] Combined Forward-Backward Asymmetry Measurements in Top-Antitop Quark Production at the Tevatron CDF and D0 Collaborations Submitted to: Phys.Rev.Lett.
arXiv:1709.04894 [hep-ex]

[8] Подготовлена статья “Метод вычисления числа реальных событий с двумя одинаковыми частицами, отобранными в экспериментах на ускорителях”. В.А. Кузьмин
Направлена в «Ядерная физика»

[9] ZEUS Collaborations; H. Abramowicz et al.
Studies of the diffractive photoproduction of isolated photons at HERA
Phys. Rev. D 96 (2017) 032006

[10] A.Gizhko et al.
Running of the charm-quark mass from HERA deep-inelastic scattering data
Phys. Lett. B 775 (2017) 233

[11] Measurement of the inclusive energy spectrum in the very forward direction in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV
Baskakov A., Belyaev A.V., Boos E., Dubinin M., Dudko L., Ershov A., Gribushin A., Katkov I., Kheyn L., Klyukhin V., Kodolova O., Lokhtin I., Lukina O., Miagkov I., Obraztsov S., Petrushanko S., Popov A.A., Savrin V., Snigirev A., CMS Collaboration
в журнале Journal of High Energy Physics, издательство Institute of Physics Publishing (United Kingdom), том 2017, № 8, с. 46

[12] Shower center of gravity and hadronic interaction characteristics

Kheyn Lev

в журнале *Astroparticle Physics*, издательство Elsevier BV (Netherlands), том 92, с. 7-10

[13] Boos E.E., Keizerov S.I., Rakhmetov E.R., Svirina K.S. «Comparison of the Processes of

Higgs Boson Pair Production and Associated Production of a Radion and a Higgs Boson». В

журнале «Physics of Particles and Nuclei», издательство «Maik Nauka/Interperiodica

Publishing», том 48, № 5, с. 745-747, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063779617050069>

[14] Alexander Yu. Kamenshchik, Ekaterina O. Pozdeeva, Sergey Yu. Vernov, Alessandro Tronconi,

Giovanni Venturi, Bianchi-I cosmological model and crossing singularities, *Phys. Rev. D* **95**,

083503, arXiv:1702.02314

[15] M. N. Dubinin, E. Yu. Petrova, E. O. Pozdeeva, M. V. Sumin, S. Yu. Vernov , MSSM-inspired

multifield inflation, *JHEP*12(2017)036, arXiv:1705.09624

[16] A.Yu. Kamenshchik, E.O. Pozdeeva, A.A. Starobinsky, A. Tronconi, G. Venturi, S.Yu. Vernov,

Induced gravity, and minimally and conformally coupled scalar fields in Bianchi-I cosmological

models, arXiv:1710.02681

[17] E.O. Pozdeeva, S.Yu. Vernov, «Induced gravity models with exact bounce solutions»,

arXiv:1711.06255 [gr-qc]

[18] Andrey Chernoded, Lev Dudko, Igor Myagkov and Petr Volkov, «Deep Learning Neural

Networks and Bayesian Neural Networks in Data Analysis»

[EPJ Web Conf., 158 \(2017\) 06008](#)