

Федеральное агентство научных организаций  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УТВЕРЖДАЮ  
директор член-корр. РАН

Л.В.Кравчук  
22 января 2018

УДК 539.1, 539.12, 539.123

№ государственной регистрации АААА-А16-116022510114-8

Инв.№

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных  
полей и фундаментальных взаимодействий, космология

(промежуточный за 2017 год)

Научный руководитель темы  
заместитель директора по научной работе д.ф.-м.н.

Либанов М.В.  
22 января 2018

Москва 2018

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

д.ф.-м.н.Либанов М.В. (введение, заключение)  
22 января 2018

Исполнители:

д.ф.-м.н. Красников Н.В. (раздел 1,10,11)  
22 января 2018

д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 2-9)  
22 января 2018

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 86 с., 35 рис., 2 табл.

РАСШИРЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИЯ, АСТРОФИЗИКА, ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ, МОДЕЛИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ, ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ИНФЛЯЦИЯ, ИНТЕГРИРУЕМЫЕ МОДЕЛИ, МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, РЕДКИЕ РАСПАДЫ МЮОНА. НАРУШЕНИЕ ЛЕПТОННЫХ ЧИСЕЛ, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, РЕДКИЕ РАСПАДЫ В-МЕЗОНОВ, НАРУШЕНИЕ СР-ЧЕТНОСТИ, КАЛОРИМЕТРИЯ

В области теоретической ядерной физики объектом исследования являются модели физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели, в частности суперсимметричные теории и теории с дополнительными пространственными измерениями, расширения Стандартной модели, содержащие стерильные нейтрино, в рамках которых можно интерпретировать экспериментальные данные об осцилляциях нейтрино и тёмной материи, модифицированные теории гравитации, в том числе теории с нарушенной Лоренц-инвариантностью, модели физики и астрофизики космических лучей сверхвысоких энергий, методы Монте-Карло моделирования атмосферных ливней, процессы, происходившие в ранней Вселенной, такие как процессы фазового перехода, генерации барионной асимметрии, образования структур, процессы, происходившие на инфляционной стадии.

Цель работы — построение новых теорий и моделей физики высоких энергий, способных решить широкий круг проблем современной теоретической физики, возникающих на стыке сразу нескольких направлений, таких как физика элементарных частиц, астрофизика и космология, а также обеспечение достижения научных результатов мирового уровня, подготовка и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирования эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

Основным инструментом для исследования процессов и явлений в физике элементарных частиц и космологии был использован аппарат квантовой теории поля, квазиклассическое приближение, методы теории симметрий, а также суперсимметрий. В рамках НИР этот математический аппарат был существенно развит и дополнен новыми методами, позволяющими получить количественные характеристики экспериментально наблюдаемых величин, таких как время жизни частиц, сечение рассеяния, вероятность туннельного прохождения и так далее. При исследовании как равновесных, так и неравновесных процессов, происходивших в ранней Вселенной, были использованы методы квантовой теории поля при конечных температурах, которые являются синтезом методов квантовой теории поля и статистической физики. Для решения задач, не поддающихся аналитическому исследованию, были использованы пакеты

программ, такие как LatticeEasy, CompHEP, microOMEGAs, HYDJET++, CASCADE, PYTHIA, NMSSMTools и другие.

Наиболее важные результаты, полученные коллективом Отдела теоретической физики в 2017г.:

1) Показано, что модель с лёгким изосинглетным скаляром и несколькими хиггсовскими изодублетами способна объяснить не только мюонную ( $g-2$ ) аномалию, но и правильно воспроизвести наблюдаемую на эксперименте плотность тёмной материи.

2) Проанализированы нейтринные события, зарегистрированные в глубоководном нейтринном эксперименте NT200 в озере Байкал за пять лет наблюдений в направлении на тёмные карликовые галактики Южной полусферы (dSphs) и на Большое Магелланово Облако (LMC). Какого-либо значимого превышения в числе наблюдаемых событий относительно ожидаемого фона от атмосферных нейтрино не обнаружено.

3) В рамках широкого класса суперсимметричных моделей было показано, что присутствие лёгких сголдстино усиливает ограничение на масштаб нарушения суперсимметрии в 1.5 раза по сравнению со случаем очень тяжёлых сголдстино. Получены ограничения на массу сголдстино и масштаб нарушения суперсимметрии из данных экспериментов ATLAS и CMS по поиску двухджетовых резонансов.

4) Проведён анализ влияния нестандартных нейтринных взаимодействий, имеющих вид четырехфермионных взаимодействий, на распространение нейтрино с энергией 1-1000 ГэВ, возникающих от аннигиляции частиц тёмной материи в Солнце. Показано, что результирующие потоки мюонных нейтрино на уровне Земли могут значительно отличаться от полученных в стандартном случае.

5) Исследованы классические решения в расширенной теории гравитации Хорндески, интересные с космологической точки зрения. Был найден явный пример модели, в которой существует стабильное на протяжении всей эволюции пространственно-плоское отскоковое решение без сингулярности. Исследованы свойства возмущений в теориях Хорндески. Показано, что в теории Хорндески невозможно существование стабильных сферически симметричных решений в виде кротовой норы и при этом не содержащих нефизические степени свободы. Кроме того, показано, что в частном случае кубичного галилеона нестабильны также решения типа «полузамкнутый мир»: кротовые норы, ведущие из плоского мира в замкнутый.

6) Показано, что первичные космологические возмущения с плоским спектром, растущие на пост-инфляционной материально-доминированной стадии, могут произвести малое количество таких чёрных дыр, которых, тем не менее, может быть достаточно для уничтожения вакуума в видимой части Вселенной.

7) Рассмотрена (1+1)-мерная модель дилатонной гравитации с отражающей динамической границей. После получения общего классического решения модели подробно изучен подкласс специальных солитонных решений. Последние решения описывают отражение материи от границы при низких энергиях и формирование чёрных дыр при энергиях, превышающих критическую.

8) Полностью исследовали коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксиноподобных частиц. Показано, что столкновения частиц в центре звезды производят поток релятивистских аксионов, покидающих звезду и уносящих около 30% от ее первоначальной массы.

9) В обобщениях Стандартной модели физики частиц с иерархичным спектром суперпартнёров была показана возможность производства гравитационных волн в ранней Вселенной в эпоху электрослабого фазового перехода.

10) Были уточнены сечения захвата низкоэнергетических нейтрино галлием, что позволило повысить чувствительность нового эксперимента BEST (ИЯИ РАН, пос. Нейтрино) к моделям с гипотетическими стерильными нейтрино эВ-ных масс, а также получить оценки перспектив проверки галлиевой аномалии в этом эксперименте с искусственным источником на основе цинка-65.

11) В моделях со стерильными нейтрино кэВ-ных масс показано, как специфическая динамика взаимодействующего с ними нового скалярного поля, может существенно подавить их рождение в ранней Вселенной. Это открывает возможность объяснения появления масс активных нейтрино в результате смешивания с этими стерильными нейтрино (механизм качелей), причём такую модель смогут напрямую проверить действующие установки Троицк-ню-масс и KATRINE.

12) Подробно исследовано влияние гипотетической субдоминантной компоненты тёмной материи, распадающейся в радиацию между рекомбинацией и современной эпохой, на эволюцию малых неоднородностей материи в расширяющейся Вселенной. Из данных по барионным акустическим осцилляциям получены ограничения на возможную долю такой компоненты на уровне нескольких процентов.

13) Найдено, что очень лёгкие (псевдо)скалярные поля, предсказываемые в широком классе струнных обобщений физики частиц, могут приводить к перепроизводству радиации в ранней Вселенной, изменяя её тем расширения в критические эпохи. В частности, наблюдаемая распространённость лёгких химических элементов, созданных в эпоху первичного нуклеосинтеза, отмечает возможность послеинфляционного разогрева Вселенной через распад инфлатона преимущественно в скаляры (в частности, модель Старобинского) и универсальный распад во все частицы, если лёгких скалярных полей ожидаемо много.

14) Изучено влияние фермионов на стабильность солитонов в модели с плоским направлением. Было показано, что влияние фермионов на эффективный потенциал приводит к нестабильности солитонов с большим значением скалярного поля, что соответствует большим зарядам.

15) Изучены нетопологические солитоны в модели Вика-Катковского. Было показано, что зависимость энергии от заряда в этой модели можно получить аналитически и она качественно похожа на аналогичную зависимость для Бозе-звёзд.

16) Исследован процесс туннельного распада  $Q$ -шаров с малым радиусом на свободные частицы.

17) Построено перенормировочное предписание (схема перенормировок) для суперсимметричного расширения теории сильных взаимодействий КХД.

18) Исследованы результаты применения калибровочно-зависимой процедуры минимальных импульсных вычитаний. В калибровке Ландау обнаружено неожиданное свойство совпадения структуры теоретической связи между КХД выражением для характеристик процесса глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах и характеристики процесса полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны с известной ранее структурой этой теоретико-возмущенческой связи, которая считалась справедливой лишь в классе калибровочно-инвариантных процедур устранения ультрафиолетовых расходимостей.

19) Показано, что в калибровке Ландау коэффициенты третьей и четвертой поправки ТВ в КХД к правилу сумм Бьеркена резко минимизируются, что позволяет осуществить в дальнейшем более согласованный анализ с данными коллаборации COMPASS, извлеченными с использованием компьютерных программ, использующих лишь первые два приближения теории возмущений для ренорм-групповой эволюции соответствующих структурных функций данного процесса.

20) Получено аналитическое выражение для 4-х петлевого приближения к полному сечению рождения пары лептонов  $\tau^+\tau^-$  в процессе электрон-позитронных столкновений при высоких энергиях, испускающих один промежуточный фотон.

21) Для квантовых интегрируемых систем, связанных с простейшей квантовой алгеброй петель, выведены все функциональные соотношения в универсальном (модельно-независимом) виде.

22) Предложена самосогласованная модель, объясняющая спектр и массовый состав космических лучей при энергиях свыше 0.1 ЭэВ, а также поток астрофизических нейтрино в рамках единственного класса источников, таких как активные ядра галактик.

23) Выполнено обзорное исследование, посвященное изучению космических лучей ультравысоких энергий.

24) На основе анализа данных установки ШАЛ-МГУ получено наиболее строгое в мире ограничение на поток астрофизических фотонов с энергиями порядка  $10^{17}$  эВ.

25) Показано, что широко обсуждаемый избыток мюонов в составе широких атмосферных ливней по сравнению с моделированием отсутствует для мюонов с энергиями выше 10 ГэВ, на расстояниях порядка 100 м от осей ливней, вызванных первичными частицами с энергиями порядка  $10^{17}$  эВ.

26) Показано, что наивно противоречивые наблюдательные данные о профиле плотности гало окологалактического газа можно согласовать друг с другом при естественном предположении зависящего от радиуса химического состава газа.

27) В модели, дающей успешное описание экспериментальных результатов и теоретической асимптотики электромагнитного формфактора пи-мезона, вычислен аналогичный формфактор К-мезона как функция квадрата переданного импульса.

28) Мотивирована концепция высокогорного черенковского телескопа для наземных наблюдений астрофизических гамма-квантов с низким порогом. Предложена реализация этой концепции - инструмент ALEGRO, который можно разместить в пустыне Атакама (Чили) или на горе Эльбрус (Россия).

29) Показано, что для изучения астрофизически мотивированной области параметров аксионоподобных частиц достаточно увеличить чувствительность экспериментов по сравнению с лучшими мировыми результатами в  $\sim 3$  раза по константе аксион-фотонного взаимодействия, что тем не менее не требует значительных экспериментальных усилий. Разработана концепция и предложены технические решения для такого эксперимента - Троицкого аксионного солнечного телескопа (TASTE).

30) С помощью современных техник многокомпонентного анализа данных наземной решетки детекторов эксперимента Telescope Array исследован массовый состав частиц, инициирующих широкие атмосферные ливни с энергиями от 1 ЭэВ и выше.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

В экспериментальной задаче «Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов» основным результатом проведённой в 2017 году работы является проведение трёх полноценных сеансов измерений по 3 недели каждый. Продолжен набор статистики прецизионного измерения бета спектра трития с целью поиска сигналов стерильного нейтрино в диапазоне энергии электронов 14-18.5 кэВ. Данные находятся в стадии обработки. Параллельно с имеющейся системой регистрации был разработан и реализован вариант с полной оцифровкой сигналов с детектора. Это позволило полностью

устранить проблему учёта мертвого времени электроники и сузить временной интервал сигналов с наложениями. Данные накапливались параллельно обеими системами, однако новый вариант стал основным для процесса обработки данных. Выполнен ряд запланированных методических и расчётных работ по оптимизации режима работы электронной пушки. В двух сеансах были проведены совместные тестовые испытания образцов пиксельного детектора нового типа на основе кремниевого дрейфового детектора (SDD). SDD были изготовлены в Мюнхене, Германия, в рамках коллаборации TRISTAN. Два прототипа имели по 7 пикселей размером в 1 и 2 мм. Измерения продемонстрировали, что такой тип детектора существенно улучшит качество данных при измерении бета спектра трития и даст возможность сдвинуться к самому нижнему краю бета спектра. В течение 2017 года постоянно проводились работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования. Запущены новые системы хранения и транспортировки гелия.

В задаче «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов» исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета- распаде трития в эксперименте КАТРИН. Дается краткое описание состояния проекта. В 2017 году выполнены следующие работы. Рассчитаны поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике. Рассматривались систематические поправки при измерении спектра неупругих потерь электронов. Предложен эксперимент по исследованию зависимости сечения возбуждения электронных состояний молекул трития от энергии налетающих электронов. Велась подготовка программного обеспечения для проектов КАТРИН и TRISTAN (поиск стерильного нейтрино). Проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления, подбор оптимального предусилителя.

В задаче «Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «Mu2e» исследования направлены на решение фундаментальной проблемы сохранения лептонных квантовых чисел. Обнаружение связи между семействами лептонов будет свидетельством существования новых физических явлений вне рамок Стандартной модели. Цель работы - поиск процесса конверсии мюона на ядре, идущего с нарушением закона сохранения лептонных чисел с уровнем чувствительности ( $B\Gamma \approx 10^{-17}$ ) превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение, в международном эксперименте Mu2e проводимом в FNAL (Chicago) США. Основная идея эксперимента предложена (1989 г.) и разработана сотрудниками института ядерных исследований. Повышение уровня чувствительности в эксперименте Mu2e на пять порядков может привести к обнаружению новых взаимодействий, порождаемых новыми

тяжелыми частицами с массами  $\leq 1000$  ТэВ, которые невозможно получить в ближайшем будущем на ускорителях.

Основная цель группы ИЯИ РАН заключается в экспериментальном исследовании основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO с новым фотодетектором APD (Avalanche Photodiode) большой площади, разработка новой концепции эксперимента (3in1), позволяющей поиск трех редких распадов  $\mu \rightarrow e$  конверсии,  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu \rightarrow eee$  на одной установке. Разработка и изготовление электроники, предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех. В качестве детекторов рассматриваются: лавинные фотодиоды (APD), фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и нейтронные газовые He3 счетчики.

В задаче «Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях» в рамках подхода, использующего ядерную спектральную функцию, современные экспериментальные данные о сечениях соответствующих элементарных процессов, исследована в инклюзивных фотон- и эксклюзивных фотон- и протон-ядерных реакциях модификация свойств (масс, или реальной части ядерного скалярного потенциала)  $\eta'$ -,  $J/\psi$  мезонов и  $\Lambda$  гиперонов в ядерной среде при обычной ядерной плотности. Получены предсказания для абсолютных (и относительных) сечений рождения этих частиц в данных реакциях в различных сценариях изменения их масс в ядерной материи, часть из которых сравнена с имеющимися экспериментальными данными. В частности, из этого сравнения извлечена величина реальной части  $\eta'$ -ядерного оптического потенциала (или сдвига массы  $\eta'$ - мезона) при импульсе  $\eta'$  мезона порядка 0.5 ГэВ/с. Сделаны важные выводы о возможности экспериментального наблюдения экзотических ядерных систем, состоящих из связанных  $\eta'$  – мезонов и обычных нуклонов, модификации свойств  $J/\psi$  – мезонов на ускорительных комплексах FAIR и CEBAF, а также о возможности получения надежной информации о импульсной зависимости  $\Lambda$  гиперон-ядерного потенциала из анализа новых данных по рождению  $\Lambda K(+)$  пар в pA-реакциях при энергии 2.83 ГэВ. Подготовлен к публикации обширный обзор, показывающий современное состояние (главным образом экспериментальных) исследований в области мезон ( $K^+$ ,  $K^0$ ,  $K^-$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $J/\psi$ ,  $D$ ) – ядерных взаимодействий при относительно малых энергиях.

В задаче «Изучение редких распадов B-мезонов в эксперименте LHCb» объектом исследования работы являются редкие распады B-мезонов и прецизионное измерение параметров CP-нарушения с целью проверки Стандартной модели и поиска эффектов Новой Физики. Эксперимент LHCb сегодня является мировым лидером по изучению физики тяжёлых кварков. В 2017 г. продолжен набор данных на энергии пучков 6.5 ГэВ, было набрано 1.71/fb интегральной светимости. Также продолжается обработка набранных ранее данных, получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе измерение вероятности редкого распада  $B_s \rightarrow \mu\mu$ , наиболее точное измерение угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания из комбинации  $B \rightarrow DK$

распадов, проверка «лептонной универсальности» используя полулептонные  $\tau$ -распады  $B_0$  и впервые  $B_c$  мезонов, распады  $B_0 \rightarrow K^*0 l^+l^-$ , первое в мире наблюдение наиболее редкого распада  $B_0$  мезона  $B_0 \rightarrow p^+p^-$  и ряд других. В эксперименте LHCb Институт ядерных исследований РАН участвует в разработке и создании калориметрической системы, ранее в ИЯИ был изготовлен предливневый детектор. За время эксплуатации предливневого детектора не было выявлено существенных изменений параметров элементов детектора. В 2017 г. сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных фотоумножителей калориметрической системы. Кроме обеспечения текущей работы калориметра группа ИЯИ РАН также проводит работы по подготовке эксперимента к работе на повышенной светимости. Так, проведена разработка тестового стенда и методики испытаний запасных высоковольтных делителей в сборе с ФЭУ калориметрической системы.

Целью работы «Осцилляции частиц в поглощающей среде» является разработка принципиально новой модели процесса.

В задаче «Эксперимент CMS» произведён поиск правого  $W_R$ -бозона и тяжёлого нейтрино в событиях, содержащих один электрон или мюон, один распадающийся на адроны  $\tau$ -лептон и как минимум две адронные струи. Получены новые ограничения на массу  $W_R$ -бозона и массу тяжёлого нейтрино. Получено ещё более яркое указание на возможное проявление эффектов асимптотического поведения КХД (БФКЛ-эффекты) в образовании адронных струй на БАК.

В задаче «Эксперимент NA64» показано, что в зависимости от массы тёмного фотона и энергии сталкивающихся электронов возникают существенные отличия от дифференциального сечения, вычисленного в приближении эквивалентных фотонов. Показано, что модель с лёгким изосинглетным скаляром и несколькими хиггсовскими изодублетами способна объяснить не только мюонную ( $g-2$ )-аномалию, но и правильно предсказать наблюдаемую на эксперименте плотность тёмной материи.

## СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Содержание	11
Введение	12
Основные научно-исследовательские работы.	17
1. Разработка теоретических проблем физики элементарных частиц, фундаментальных взаимодействий и космологии.	17
2. Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов	26
3. Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов	28
4. Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «Mu2e»	43
5. Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях	45
6. Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях	46
7. Осцилляции частиц в поглощающей среде.	51
8. Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах	52
9. Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb	53
10. Эксперимент CMS	62
11. Эксперимент NA64	65
Заключение.	66
Публикации	74

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследование теоретических проблем физики частиц и космологии и в особенности их взаимосвязи является одной из наиболее актуальных проблем современной физики. Это связано с новыми экспериментальными возможностями, в частности, с работой Большого адронного коллайдера. Эксперименты на Большом адронном коллайдере позволят не только решить ряд принципиальных вопросов физики элементарных частиц (проблема возникновения масс и нарушение электрослабой симметрии), но и, возможно, установить связь с астрофизикой и космологией (структура тёмной материи).

Одной из основных проблем современной физики является проблема тёмной материи. Среди множества моделей тёмной материи в последнее время большое внимание уделяется моделям с лёгкой тёмной материи с массой частиц тёмной материи, меньших массы протона. Особый интерес представляет поиск таких частиц на ускорителях. В этом направлении были предприняты важные теоретические и экспериментальные исследования, основные результаты которых приведены в основной части отчёта.

Важным направлением исследований является теоретический поиск характерных процессов и явлений (сигнатур) возможных расширений Стандартной Модели физики элементарных частиц (СМ). С их помощью получены новые ограничения на параметры таких моделей из совокупности имеющихся экспериментальных данных, а также определены оптимальные пути поиска указанных сигнатур для действующих и планируемых экспериментов в этой области. Задача поиска сигнатур процессов за рамками СМ требует повышения точности теоретических расчётов таких процессов. Прецизионные расчёты необходимы также для уточнения с их помощью параметров СМ, в том числе нейтринного сектора.

В работах, посвященных сверхранней Вселенной, были применены современные методы квантовой теории поля, такие как метод эффективных лагранжианов, адС/КТП-соответствие и т. п., для построения новых моделей, как инфляционных, так и альтернативных инфляции. Изучены корреляционные свойства скалярных и тензорных возмущений, генерируемых в моделях с нетривиальной динамикой. Полученные результаты сравнивались с наблюдательными данными эксперимента Planck и других астрофизических экспериментов, получены ограничения на их параметры.

Роль группы симметрий в теоретико-групповом подходе к квантовым интегрируемым системам играют квантовые группы. Наиболее интересными среди них являются квантовые алгебры петель. Определяющие свойства квантовой интегрируемой системы вытекают из характеристик используемых представлений квантовой группы, с которой система ассоциирована. Эти свойства обычно выражаются функциональными уравнениями для

объектов интегрируемости (таких, например, как матрица монодромии и трансфер-матрица). Следовательно, в рамках алгебраического подхода исследование квантовой интегрируемой системы сводится к изучению функциональных соотношений между их объектами интегрируемости. Поэтому исследование представлений квантовых групп и соответствующих функциональных соотношений представляет собой важнейшую задачу в данной области математической физики. Более того, решение этой задачи закладывает математическую основу для последующего вычисления корреляционных функций в квантовых интегрируемых системах.

Задача «Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов». Определение массовой шкалы абсолютных и число нейтрино массовых состояний является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизике. Ненулевая масса для левых активных нейтрино, косвенно наблюдалась в экспериментах по осцилляции нейтрино, что допускает существование правых стерильных нейтрино. Диапазон возможных значений массы нейтрино для правых нейтрино ничем не ограничен в настоящее время. Предположение о том, одного очень легкого состояния нейтрино в дополнение к трем активным состояниям кажется спорным в стандартной космологии, но может быть совместимо с современными космологическими данными. Стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько кэВ могут являться естественным кандидатом на роль тёмной материи.

Задача «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов». Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития. Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку позволяет сделать выбор между различными моделями генерации массы, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино определяет динамику эволюции Вселенной.

Институт ядерных исследований РАН участвует в совместном международном эксперименте Mu2e (FNAL, США) по поиску процесса  $\mu \rightarrow e$  конверсии с уровнем чувствительности превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение на данный процесс. Основная идея эксперимента предложена и разработана сотрудниками института ядерных исследований. Поиск процессов вне рамок Стандартной модели представляет собой одну из главных задач современной физики. Повышение уровня

чувствительности в эксперименте Mu2e на несколько порядков может привести к обнаружению новых взаимодействий, порождаемых новыми тяжелыми частицами с массами  $\approx 1000$  ТэВ, которые невозможно получить в ближайшем будущем на ускорителях.

Современная теория элементарных частиц не может предсказать процесс наиболее чувствительный к поиску нарушения лептонных чисел. Поиск трех редких мюонных процессов ( $\mu \rightarrow e$  конверсии,  $\mu \rightarrow e\gamma$  и  $\mu \rightarrow eee$ ) чувствительных к трем возможным новым взаимодействиям лептон-кварк, лептон-фотон и лептон-лептон на базе одной установки повышает вероятность открытия новых физических явлений связанных с нарушением лептонных чисел. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре (рис. 1) на ускорителе FNAL, Batavia, USA был принят DOE (Department of Energy, US) 11 ноября 2009.

В задаче «Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях» целью является поиск решения на стыке физики элементарных частиц и ядерной физики, которое возможно благодаря изучению свойств соответствующих ядерно-подобных систем или ядер.

Задача «Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях». Изучение рождения псевдоскалярных мезонов (заряженных каонов,  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов), лёгких векторных мезонов ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ), мезонов с «открытым» и «скрытым» чармом ( $D$ ,  $J/\psi$ ), а также гиперонов при взаимодействии ядер и элементарных проб (протонов, пионов, фотонов) с ядрами стало предметом весьма интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в последние годы. Основным интересом к данным реакциям был обусловлен возможностью изучения в них ренормализации свойств этих частиц, предсказываемой различными теоретическими моделями (киральной теорией возмущений, релятивистскими среднеполевыми подходами, подходами, основанными на использовании эффективных длин рассеяния, и т.д.), в горячей/плотной ядерной материи. Знание этих свойств является крайне важным, в частности, для понимания таких фундаментальных вопросов теории сильных взаимодействий-квантовой хромодинамики, (КХД), астрофизики и адронной физики как наличие киральной симметрии (приближенной) у лагранжиана КХД и ее частичное восстановление не только в плотной ядерной среде, но уже и при обычных ядерных плотностях, строение необычных звездных объектов-нейтронных звезд и их динамические и статические характеристики, короткодействующая часть нуклон-нуклонного потенциала.

Свидетельством актуальности проблемы являются проводимые и планируемые эксперименты в области «in-medium physics» во всех ведущих физических центрах мира.

В задаче «Осцилляции частиц в поглощающей среде» регенерация короткоживущей компоненты К-мезонов - одно из самых интересных и важных явлений. Оно прямо связано с CP,

Т и СРТ-инвариантностью.

В задаче «Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах» поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций, наряду с поиском распада протона, является одним из важнейших направлений современной физики, ведущих к пониманию явлений, лежащих за рамками Стандартной модели.

Возможны два направления поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций. Одним из таких направлений является поиск осцилляций в высокоинтенсивных нейтронных пучках от ядерных реакторов или нейтронных пучках сильноточных ускорителей. Лучший результат в измерении периода осцилляций был получен в Гренобле (ILL) на интенсивном пучке реакторных холодных нейтронов. В результате получена следующая оценка на период осцилляций [1]:  $\tau_{n-\bar{n}} \geq 0,86 * 10^8 \text{ с}$ .

В последние 2 десятилетия, прошедшие с момента получения этого результата, произошло значительное развитие технологии в области нейтронного эксперимента. Недавно предложен новый эксперимент по поиску осцилляций на нейтронном пучке ESS [2]. По предварительным оценкам в этом эксперименте можно улучшить результат, полученный в ILL, на 2-3 порядка.

Другим направлением является поиск  $n \rightarrow \bar{n}$  переходов внутри ядра. Косвенные ограничения на период  $n \rightarrow \bar{n}$  осцилляций можно получить из экспериментов по поиску нестабильности материи на больших подземных детекторах. Поиском такого рода событий, связанных с аннигиляцией антинейтронов на ядрах, занимается ряд крупных международных коллабораций, например Супер-Камиоканде (ядро  $^{16}\text{O}$ ), Судан-2 (ядро  $^{56}\text{Fe}$ ). Ограничение, полученное на время жизни ядра  $\tau_m$  связано с периодом осцилляции свободного нейтрона через размерный фактор R:  $\tau_m = R\tau_{n-\bar{n}}^2$ . Так в эксперименте Судан-2 получено ограничение на время жизни ядра железа  $\tau_{\text{Fe}} \geq 7,2 * 10^{31}$  лет, что соответствует ограничению на период осцилляций  $\tau_{n-\bar{n}} \geq 1,3 * 10^8 \text{ с}$  [3].

Будущие эксперименты на крупных подземных детекторах могут улучшить ограничения на процессы с  $\Delta B = \pm 2$  до  $\sim 10^{33} - 10^{35}$  лет [4]. В настоящее время идет подготовка эксперимента по поиску  $n \rightarrow \bar{n}$  переходов в ядре  $^{40}\text{Ar}$  на большом жидкоаргоновом детекторе DUNE[4].

Эксперименты следующего поколения способны достичь нижней границы  $\tau_{n-\bar{n}} \sim 10^{10}$  с. Будут или нет обнаружены  $n \rightarrow \bar{n}$  осцилляции в этих экспериментах зависит от масштаба, где начинается новая физика, выходящая за рамки Стандартной модели. В любом случае эти результаты будут иметь огромное значение для понимания фундаментальных свойств материи и создания теоретической модели, описывающей эти свойства.

Из оценки величины периода осцилляции  $\tau_{\bar{n}n} \gtrsim 10^8 \text{ с}$  следует очень малая величина

ожидаемого эффекта: для тепловых нейтронов примесь антинейтронов составляет  $\bar{n}/n \lesssim 10^{-18}$ . Поэтому эксперимент должен обладать максимальной эффективностью регистрации очень редких антинейтронов, а для этого необходима подробная информация о процессе аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах. Целью настоящей работы является создание модели для описания аннигиляции медленных антинейтронов на ядре углерода для эксперимента по поиску осцилляций в потоке свободных нейтронов на пучке ESS [2]. Так же сделаны первые шаги для моделирования аннигиляции антинейтрона при  $n \rightarrow \bar{n}$  переходе в ядре  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$  для эксперимента DUNE[4].

Эксперимент LHCb нацелен на изучение физики тяжелых кварков на большом адронном коллайдере LHC. Основная цель эксперимента – прецизионное измерение нарушения CP четности и редких распадах адронов с c- и b- кварками и поиск эффектов Новой Физики, в том числе измерением параметров, имеющих точное предсказание в Стандартной модели (SM). За годы успешной работы уже получены ключевые результаты, особенно чувствительные к проявлениям Новой Физики. Среди них такие, как измерение вероятности редкого распада  $B_s \rightarrow \mu\mu$ , измерение угла  $\gamma$  унитарного треугольника матрицы смешивания, проверка «лептонной универсальности» используя полулептонные  $\tau$ -распады  $B_0$  и впервые  $B_c$  мезонов, распады  $B_0 \rightarrow K^*0 l+l^-$  и ряд других.

Институт ядерных исследований участвует в коллаборации LHCb начиная с проектной стадии эксперимента 1993 г. Вкладом ИЯИ РАН на этапе создания установки БАК-би являлась разработка и создание составляющей части калориметрической системы – сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов. Калориметрическая система эксперимента LHCb играет важную роль в идентификации и измерении энергии частиц и выработке триггера нулевого уровня. За время работы эксперимента калориметрическая система показала устойчивую работу. Сотрудники ИЯИ РАН принимают участие в наборе и контроле качества данных калориметрической системы установки БАК-би, в том числе в изучении и операционном контроле характеристик предливневого и сцинтилляционно-падового детекторов. Параллельно набору и обработке текущих данных эксперимент LHCb проводит подготовку к работе на модернизированном ускорителе LHC при большей энергии и светимости. Основная цель необходимой модернизации установки LHCb – обеспечение возможности работы на светимости до  $2 \cdot 10^{33}/\text{см}^2/\text{сек}$ . Для этого требуется модернизация электроники всех подсистем и создание гибкого программируемого триггера. Модернизированный детектор во второй фазе эксперимента должен быть способен за 10 лет набрать статистику около 50/фб-1 интегральной светимости. В этой связи, в частности, существенно возрастают требования к радиационной стойкости электроники и фотодетекторов, включая приемную электронику и элементы питания фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) калориметров.

В экспериментах CMS и NA64 в ЦЕРНе ведётся поиск проявлений новой физики, в том числе, исследуется возможность появления новых частиц.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ.

### 1. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И КОСМОЛОГИИ.

Сотрудниками Отдела теоретической физики в 2017 году провели исследования по следующим задачам.

Исследования проблем квантовой теории поля и физики элементарных частиц. Руководитель — Н.В. Красников.

Для модели с векторным переносчиком взаимодействия между обычной материей и темной материей были произведены точные древесные вычисления рождения темного фотона в электрон-ядерных столкновениях с учётом полной симуляции отклика детектора в эксперименте NA64 в ЦЕРНе. Показано, что в зависимости от массы тёмного фотона могут быть существенные отличия от сечений, вычисленных в приближении эквивалентных фотонов. Проанализированы данные эксперимента NA64 по электрон-ядерным столкновениям и на их основе получены рекордные ограничения на константу связи тёмного фотона с электроном. Показано, что модель с лёгким изосинглетным скаляром и несколькими хиггсовскими изодублетами способна объяснить не только мюонную ( $g-2$ ) аномалию, но и правильно воспроизвести наблюдаемую на эксперименте плотность тёмной материи. Прделанное исследование было принципиально важно для аккуратного извлечения из данных эксперимента NA64 ограничений на константу связи взаимодействия тёмного фотона – переносчика взаимодействия между обычной материей с тёмной материей, что позволило существенно ограничить параметры модели и, в частности, исключить объяснение мюонной ( $g-2$ ) аномалии, как результат существования лёгкого векторного бозона с универсальными связями с кварками и лептонами. Результаты исследований опубликованы в работах [Публикации.1.1-5].

Поиск тёмной материи является одной из наиболее актуальных проблем в физике элементарных частиц. Одним из методов поиска сигнала от тёмной материи является поиск возможных продуктов их аннигиляции. Нами были проанализированы нейтринные события, зарегистрированные в глубоководном нейтринном эксперименте NT200 в озере Байкал за пять лет наблюдений в направлении на тёмные карликовые галактики Южной полусферы (dSphs) и на Большое Магелланово Облако (LMC). Для этого было проведено моделирование ожидаемого углового распределения сигнальных и фоновых событий в направлении на эти источники. Мы не обнаружили какого-либо значимого превышения в числе наблюдаемых событий относительно ожидаемого фона от атмосферных нейтрино во всех тестируемых направлениях - в двадцати двух карликовых галактиках (dSphs) и в галактике Большое Магелланово Облако (LMC). Для ансамбля из пяти отобранных карликовых галактик с наибольшим ожидаемым нейтринным сигналом мы провели комбинированный анализ данных методом максимального правдоподобия. Получив соответствие наблюдения нулевой гипотезе о присутствии только фоновых событий, были установлены верхние пределы на 90% д.у. на сечения аннигиляции частиц тёмной материи с массой от 30 ГэВ до 10 ТэВ в нескольких каналах аннигиляции как в комбинированном анализе отобранного набора галактик, так и в анализе в направлении LMC. Наиболее сильные ограничения на уровне  $7 \cdot 10^{-21}$  см<sup>3</sup>/с были получены для направления на галактику LMC в канале аннигиляции в пару нейтрино. Данным анализом был завершён цикл работ по данным NT200 в поиске сигнала от аннигиляции тёмной материи в астрофизических объектах. По результатам работы опубликована статья

[Публикации.1.1]. Кроме того, часть результатов, полученных за прошлые годы, опубликованы в работе [Публикации.1.2].

Имеются серьезные основания считать, что Стандартная модель не является полной теорией, описывающей физику элементарных частиц. Одним из наиболее интересных классов моделей, обобщающих Стандартную модель и решающую ее основные проблемы, является класс суперсимметричных теорий, изучение феноменологии которых является в настоящее время актуальным вопросом. В моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии легчайшим суперпартнером является гравитино, т.е. суперпартнер гравитона. Одной из наиболее интересных экспериментальных сигнатур для поиска проявлений такого класса моделей на Большом Адронном Коллайдере является поиск событий с одним джетом и видимым несохранением закона сохранения импульса, который уносится гравитино. Был проведен анализ такого рода событий по данным эксперимента CMS с учётом возможного присутствия лёгкого суперпартнера гравитино - сголдстино. В этом случае, в конечном состоянии образуются сголдстино и адронная струя, при этом сголдстино распадается в пару гравитино. Было показано, что присутствие лёгких сголдстино усиливает ограничение на масштаб нарушения суперсимметрии в 1.5 раза по сравнению со случаем очень тяжёлых сголдстино. Кроме того, были получены ограничения на массу сголдстино и масштаб нарушения суперсимметрии из данных экспериментов ATLAS и CMS по поиску двухджетовых резонансов. Полученные результаты показывают, что ограничения из поисков двухджетовых и одноджетовых событий взаимно дополняют друг друга в разных областях параметров модели. Результаты работы представлены в докладе [Публикации.1.6] и подготовлена публикация [Публикации.1.8].

Существование нейтринных осцилляций указывает на существование массы нейтрино, выяснение природы которой является актуальной задачей современной физики частиц. В большинстве моделей новой физики, объясняющих возникновение этой массы, нейтрино имеют новые типы взаимодействий, помимо стандартных взаимодействий, обусловленных нейтральными и заряженными токами. Был проведён анализ влияния нестандартных нейтринных взаимодействий, имеющих вид четырехфермионных взаимодействий, на распространение нейтрино с энергией 1-1000 ГэВ, возникающих от аннигиляции частиц тёмной материи в Солнце. Показано, что в случае достаточно больших диагональных значений параметров нестандартных нейтринных взаимодействий в центре Солнца флейворные состояния нейтрино являются собственными состояниями гамильтониана в веществе. Кроме того, показано, что в этом случае возможно выполнение условий для нового резонанса Михеева-Смирнова-Вольфенштейна, который оказывает сильное влияние на распространение нейтрино не только в Солнце, но и в Земле. Проведено моделирование распространения нейтрино в случае монохроматических нейтрино без учёта влияния рассеяния и поглощения нейтрино в веществе Солнца, а также полное моделирование каналов аннигиляции  $W+W^-$ ,  $\tau\tau^-$  и  $bb$ . Данное моделирование выполнено для нескольких значений констант связи нестандартных взаимодействий, причем эти значения были выбраны феноменологически приемлимыми. Показано, что результирующие потоки мюонных нейтрино на уровне Земли могут значительно отличаться от полученных в стандартном случае. В частности, отклонение мюонного сигнала от аннигиляции частиц тёмной материи в Солнце, который регистрируется в нейтринных телескопах, может достигать до 30% при определенных величинах констант связи нестандартных нейтринных взаимодействий. При этом поток

электронных нейтрино может изменяться в 5-10 раз. Результаты работы представлены в докладе [Публикации.1.7], в настоящее время готовится статья к публикации.

Исследование в области космологии и астрофизики. Руководитель — В.А. Рубаков.

В 2017 г. коллективом ОТФ были исследованы классические решения в расширенной теории гравитации Хорндески. Такие теории интересны тем, что наличие старших производных в лагранжиане не повышает степени производных по времени в уравнениях движения – они остаются второго порядка. Это позволяет нарушить условие энергодоминантности, вообще говоря, без возникновения нефизических степеней свободы. Кроме того, эти теории обобщают (включают в себя как частный случай) большинство моделей ранней Вселенной с дополнительным скалярным полем. Был найден явный пример модели, в которой существует стабильное на протяжении всей эволюции пространственно-плоское отскоковое решение без сингулярности [Публикации.1.9]. В модели динамика устроена таким образом, что изначально скалярное поле подчиняется полному лагранжиану, однако на больших временах все члены, кроме стандартного квадратичного, становятся малыми и в результате остается безмассовое скалярное поле с минимальной связью с гравитацией. Кроме того, исследованы свойства возмущений в теориях Хорндески. Доказана эквивалентность различных подходов, используемых в литературе для построения квадратичного действия в таких теориях [Публикации.1.10]. Показано, что в теории Хорндески невозможно существование стабильных сферически симметричных решений в виде кротовой норы и при этом не содержащих нефизические степени свободы. В любом несингулярном решении с необходимостью возникают духовые или градиентные неустойчивости [Публикации.1.11]. Кроме того, показано, что в частном случае кубичного галилеона нестабильны также решения типа «полузамкнутый мир»: кротовые норы, ведущие из плоского мира в замкнутый [Публикации.1.12].

Существует предположение о том, что маленькие испаряющиеся чёрные дыры индуцируют быстрый распад ложного электрослабого вакуума. Коллективом ОТФ было показано [Публикации.1.13], что первичные космологические возмущения с плоским спектром, растущие на пост-инфляционной материально-доминированной стадии, могут произвести малое количество таких чёрных дыр, которых, тем не менее, может быть достаточно для уничтожения вакуума в видимой части Вселенной. Если бы вероятность распада вакуума в окрестности чёрной дыры планковской массы была порядка единицы, как предполагается в литературе, отсутствие таких объектов в ранней Вселенной привело бы к жёстким ограничениям на инфляцию и последующие стадии, исключая хорошо мотивированные модели (например,  $R^2$ -инфляцию) и указывая на необходимость введения новой физики в хиггсовском секторе. Однако, мы приводим качественный аргумент в пользу того, что экспоненциальное подавление вероятности должно присутствовать и для чёрных дыр малой массы. Это дополнительное подавление может ослабить наши космологические ограничения, а если оно достаточно сильно — отменить их.

Рассмотрена (1+1)-мерная модель дилатонной гравитации с отражающей динамической границей [Публикации.1.14]. Граница отсекает область сильной связи и делает причинную структуру модели похожей на структуру сферически-симметричного сектора многомерной гравитации. Мы демонстрируем, что модель обладает симметрией  $SL(2, C)$  на уравнениях движения и является точно решаемой на классическом уровне. После получения общего классического решения модели мы подробно изучаем подкласс специальных солитонных решений. Последние решения описывают отражение материи от границы при

низких энергиях и формирование чёрных дыр при энергиях, превышающих критическую. Эти решения могут быть поставлены в соответствие собственным состояниям вспомогательной интегрируемой модели — цепочки Годена. Мы показываем, что несмотря на точную решаемость классическая эволюция в нашей модели в критическом режиме, т.е. на грани формирования чёрных дыр, обладает динамическими нестабильностями, присущими хаотическим системам. Данная модель может быть интересна для изучения чёрных дыр и гравитационного рассеяния.

В связи с усиливающимися ограничениями на модели низкоэнергетической суперсимметрии, всё больший интерес в последнее время вызывает возможность формирования тёмной материи из лёгких скалярных (аксиноподобных) частиц. Такая тёмная материя образуется в ранней Вселенной с помощью специального механизма, связанного с перестройкой вакуума, что приводит к ряду космологических и астрофизических особенностей. В частности, частицы этой тёмной материи рождаются с очень маленькими начальными скоростями, поэтому в результате дальнейшей эволюции они могут образовать компактные Бозе-звёзды — гравитационно связанные капельки аксионного Бозе-конденсата. Недавние численные симуляции показали, что Бозе-звёзды действительно формируются из сверхлёгкой тёмной материи ( $m=10^{-22}$  eV). Кроме, того, было высказано предположение, что они могут образоваться даже в случае тёмной материи, состоящей из аксионов КХД. В работе [Публикации.1.15] мы впервые полностью исследовали коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксиноподобных частиц. Во-первых, аксиноподобные частицы начинают падать на центр сверхкритической звезды. Во-вторых, столкновения частиц в центре звезды производят поток релятивистских аксионов, покидающих звезду и уносящих около 30% от ее первоначальной массы. Оставшаяся часть аксионов после этого конденсируется в Бозе-звезду подкритической массы. Данное явление может существенно изменить предсказание ряда космологических моделей с аксиноподобной тёмной материей. Во-первых, коллапс уничтожает часть нерелятивистских частиц тёмной материи, а их энергию покоя конвертирует в кинетическую энергию испущенных аксионов. Это может изменить энергетический баланс во Вселенной и повлиять на образование галактик в случае, если существенная часть тёмной материи прошла через стадию образования Бозе-звёзд. Во-вторых, плотность аксионов в центре коллапсирующей звезды многократно увеличивается, что может, в принципе, привести к лавинному рождению радиофотонов или других наблюдаемых частиц.

Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели.  
Руководитель — Д.С. Горбунов

В обобщениях Стандартной модели физики частиц с иерархичным спектром суперпартнёров была показана возможность производства гравитационных волн в ранней Вселенной в эпоху электрослабого фазового перехода. В этих моделях возможно образование асимметрии между материей и антиматерией, и наблюдение рождённых в том же переходе гравитационных волн даёт независимый способ их экспериментальной проверки. Были уточнены сечения захвата низкоэнергетических нейтрино галлием, что позволило повысить чувствительность нового эксперимента BEST (ИЯИ РАН, пос. Нейтрино) к моделям с гипотетическими стерильными нейтрино эВ-ных масс, а также получить оценки перспектив проверки галлиевой аномалии в этом эксперименте с искусственным источником на основе цинка-65. В моделях со стерильными нейтрино кэВ-ных масс показано, как специфическая динамика взаимодействующего с ними нового скалярного поля, может существенно подавить

их рождение в ранней Вселенной. Это открывает возможность объяснения появления масс активных нейтрино в результате смешивания с этими стерильными нейтрино (механизм качелей), причём такую модель смогут напрямую проверить действующие установки Троицк-ню-масс и KATRINE. Подробно исследовано влияние гипотетической субдоминантной компоненты тёмной материи, распадающейся в радиацию между рекомбинацией и современной эпохой, на эволюцию малых неоднородностей материи в расширяющейся Вселенной. Из данных по барионным акустическим осцилляциям получены ограничения на возможную долю такой компоненты на уровне нескольких процентов. Найдено, что очень лёгкие (псевдо)скалярные поля, предсказываемые в широком классе струнных обобщений физики частиц, могут приводить к перепроизводству радиации в ранней Вселенной, изменяя её темп расширения в критические эпохи. В частности, наблюдаемая распространённость лёгких химических элементов, созданных в эпоху первичного нуклеосинтеза, отменяет возможность послеевфузионного разогрева Вселенной через распад инфлатона преимущественно в скаляры (в частности, модель Старобинского) и универсальный распад во все частицы, если лёгких скалярных полей ожидаемо много. Результаты опубликованы в работах [Публикации.1.16-28].

Изучены [Публикации.1.29,30] свойства нетопологических солитонов в присутствии дополнительных полей. В частности, в работе [Публикации.1.29] изучалось влияние фермионов на стабильность солитонов в модели с плоским направлением. Такие модели изначально возникли в суперсимметричных теориях для описания тёмной материи, однако, с учётом экспериментов на БАК, полезно проанализировать их в более общем случае. Было показано, что влияние фермионов на эффективный потенциал приводит к нестабильности солитонов с большим значением скалярного поля, что соответствует большим зарядам. Важно, что для космологических приложений изучались решения с зарядом порядка  $10^{22}$  и более. При таких энергиях радиационные поправки от фермионов становятся важными, так как приводят к нестабильности [Публикации.1.32]. Изучены нетопологические солитоны в модели Вика-Каткосского [Публикации.1.30]. Эта модель допускает анализ связанных состояний при помощи метода Бете-Солпитера и содержит дополнительное безмассовое скалярное поле, приводящее к притяжению (т.н. «скалярная гравитация»). Было показано, что зависимость энергии от заряда в этой модели можно получить аналитически и она качественно похожа на аналогичную зависимость для Бозе-звёзд. Исследован процесс туннельного распада маленьких Q-шаров на свободные частицы [Публикации.1.31]. Известно, что Q-шары – солитоноподобные «мешки» с глобально заряженными притягивающимися частицами – абсолютно стабильны, если их полный сохраняющийся заряд Q достаточно велик, а модель обладает массовой щелью. Также известно, что если заряд Q-шара относительно мал, то он нестабилен, т.к. его масса превышает минимальную энергию  $mQ$  свободных глобально заряженных частиц. В то же время, такие маленькие Q-шары не могут распадаться, испуская заряженные частицы одну за другой. Действительно, можно показать, что эти объекты стабильны относительно малых классических возмущений. Поэтому в квантовой теории они долгое время «живут» в метастабильном состоянии, а затем «взрываются», испуская Q частиц в процессе коллективного туннелирования. Коллективом был разработан квазиклассический метод вычисления времени жизни маленьких метастабильных Q-шаров.

Расчеты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели.  
Руководитель — А.Л. Катаев

Построено перенормировочное предписание (схема перенормировок) для суперсимметричного расширения теории сильных взаимодействий КХД [Публикации.1.33]. В данной схеме перенормировок выполняется точное соотношение между коэффициентами разложения по степеням малой константы взаимодействия для характеристик для функции  $D(E)$ , связанной с полным сечением процесса электрон-позитронной аннигиляции в тяжёлые частицы — суперсимметричные партнеры кварков и глюонов, и ренорм-групповой функции, связанной с определением масс суперсимметричных партнеров кварков. С использованием метода регуляризации высшими ковариантными производными, предложенного А.А. Славновым, найдено выражение для коэффициента второй поправки теории возмущений для функции  $D(E)$  и подтверждено вычисленное ранее с помощью другой регуляризации значение лидирующей поправки по константе связи.

Исследованы результаты применения предложенной в 2009 г в работе Л. Смекала, К. Мальтмана и А. Стэнбека и популярной в настоящее время калибровочно-зависимой процедуры минимальных импульсных вычитаний для определения аналитических и численных вкладов высших поправок теории возмущений в КХД (вплоть до поправки 4-го порядка) в характеристики процессов рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах [34]. В калибровке Ландау обнаружено неожиданное свойство совпадения структуры теоретической связи между КХД выражением для данной характеристики процесса глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах и характеристики процесса полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны с известной ранее структурой этой теоретико-возмущенческой связи, которая считалась справедливой лишь в классе калибровочно-инвариантных процедур устранения ультрафиолетовых расходимостей. Показано, что в калибровке Ландау коэффициенты третьей и четвертой поправки ТВ в КХД к правилу сумм Бьеркена резко минимизируются, что позволяет осуществить в дальнейшем более согласованный анализ с данными коллаборации COMPASS, извлечёнными с использованием компьютерных программ, использующих лишь первые два приближения теории возмущений для ренорм-групповой эволюции соответствующих структурных функций данного процесса.

Получено аналитическое выражение для 4-х петлевого приближения к полному сечению рождения пары лептонов  $\tau^+\tau^-$  в процессе электрон-позитронных столкновений при высоких энергиях, испускающих один промежуточный фотон. Результаты получены в схеме минимальных вычитаний и в физической схеме перенормировки на массовой поверхности. Обнаружено, что в физической схеме перенормировок ряд теории возмущений имеет значительно меньшие численные коэффициенты чем в схеме минимальных вычитаний, используемой в численных расчётах, что ставит проблему учёта в этих программах пересчёта на физическую схему вычитаний на массовой поверхности. С теоретической точки зрения результаты представляют интерес для изучения эффектов конформной симметрии и её нарушения, проявляющихся при изучении результатов вычисления многопетлевых графов Фейнмана.

Для квантовых интегрируемых систем, связанных с простейшей квантовой алгеброй петель, выведены все функциональные соотношения в универсальном (модельно-независимом) виде. Для определения универсальных объектов интегрируемости мы использовали конечномерное произвольного спина и бесконечномерное  $q$ -цилляторное представления квантовой группы. Универсальные функциональные соотношения конкретизированы далее на такие частные случаи, как спиновая цепочка XXZ и модель Фатева-Замолотчикова. Впервые

получены явные формулы для операторов монодромии в представлении спина 1 квантовой группы. Дан исчерпывающий анализ модулей Верма над квантовыми группами общелинейных алгебр Ли произвольного ранга. С помощью гомоморфизма Джимбо построены представления квантовых алгебр петель, соответствующих этим квантовым группам. Ограничение найденных представлений на положительные подалгебры Бореля используются для построения универсальных трансфер-операторов. Используя сдвинутые аналоги этих представлений, мы построили особые представления положительных подалгебр Бореля, подходящие для объектов интегрируемости принципиально другого класса, так называемых универсальных Q-операторов. Для полученных представлений квантовых групп мы дали интерпретацию в терминах q-деформированных осцилляторов. Были найдены явные выражения для l-весов и l-весовых векторов q-осцилляторных представлений со старшими l-весами для положительных подалгебр Бореля квантовых алгебр петель, соответствующих общелинейной алгебре Ли произвольного ранга. Используя их, мы установили взаимосвязи между q-осцилляторными и префундаментальными представлениями. Мы показали, что префундаментальные представления можно получать через тензорные произведения q-осцилляторных представлений. Соответствующие выражения позволяют выводить все функциональные соотношения между объектами интегрируемости в квантовых интегрируемых системах, ассоциированных с рассматриваемыми квантовыми алгебрами петель. Кроме того, мы нашли явные выражения для операторов монодромии и L-операторов, лежащих в основе трансфер-операторов и Q-операторов. Результаты исследований опубликованы в работах [Публикации.1.35-38].

Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей. Руководитель — С.В. Троицкий.

На основе анализа данных установки ШАЛ-МГУ получено наиболее строгое в мире ограничение на поток астрофизических фотонов с энергиями порядка  $10^{17}$  эВ [Публикации.1.39].

Показано, что широко обсуждаемый избыток мюонов в составе широких атмосферных ливней по сравнению с моделированием отсутствует для мюонов с энергиями выше 10 ГэВ, на расстояниях порядка 100 м от осей ливней, вызванных первичными частицами с энергиями порядка  $10^{17}$  эВ [Публикации.1.40].

Показано, что наивно противоречивые наблюдательные данные о профиле плотности гало окологалактического газа можно согласовать друг с другом при естественном предположении зависящего от радиуса химического состава газа. Получены приближенные профили плотности и металличности газа и показано, что окологалактического газа в Млечном Пути достаточно для решения проблемы "missing baryons" [Публикации.1.41].

В модели, дающей успешное описание экспериментальных результатов и теоретической асимптотики электромагнитного формфактора пи-мезона, вычислен аналогичный формфактор К-мезона как функция квадрата переданного импульса [Публикации.1.42]. Показано, что учёт такой функциональной зависимости даёт хорошее согласие с решеточными результатами при получении значения зарядового радиуса К-мезона из экспериментальных данных, однако точность последних оставляет желать лучшего. Продемонстрировано, что ожидаемые в ближайшее время результаты эксперимента Jefferson Laboratory по измерению формфактора К-мезона при больших переданных импульсах помогут

ограничить поведение формфактора при малых переданных импульсах и существенно улучшить точность определения зарядового радиуса каона.

Мотивирована концепция высокогорного черенковского телескопа для наземных наблюдений астрофизических гамма-квантов с низким порогом. Предложена реализация этой концепции - инструмент ALEGRO, который можно разместить в пустыне Атакама (Чили) или на горе Эльбрус (Россия) [Публикации.1.43].

Показано, что для изучения астрофизически мотивированной области параметров аксионоподобных частиц достаточно увеличить чувствительность экспериментов по сравнению с лучшими мировыми результатами в  $\sim 3$  раза по константе аксион-фотонного взаимодействия, что тем не менее требует значительных экспериментальных усилий. Разработана концепция и предложены технические решения для такого эксперимента - Троицкого аксионного солнечного телескопа (TASTE) [Публикации.1.44,45].

Предложена самосогласованная модель, объясняющая спектр и массовый состав космических лучей при энергиях свыше 0.1 ЭэВ, а также поток астрофизических нейтрино в рамках единственного класса источников, таких как активные ядра галактик. В данной модели предполагается, что взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с газом и излучением вблизи источника существенно искажают первичный спектр инжекции и вносят значительный вклад во вторичный сигнал нейтрино и гамма-излучения. Также показано, что экспериментальные данные по спектру космических лучей и нейтрино можно объяснить и в рамках более простой модели, ограничившись лишь взаимодействием с газом, однако в этом случае предсказываемый массовый состав оказывается тяжелее наблюдаемого. Продемонстрировано, что указанная модель не противоречит экспериментальным данным по потоку диффузного гамма излучения. Поток вторичных гамма-квантов от взаимодействий космических лучей составляет порядка 30% от полного, наблюдаемого в эксперименте Ферми LAT. По результатам работы опубликована статья [Публикации.1.46] и подготовлен доклад [Публикации.1.47] на международной конференции.

Выполнено обзорное исследование [Публикации.1.48], посвященное изучению космических лучей ультравысоких энергий. В работе описаны как современные экспериментальные установки по детектированию космических лучей, такие как обсерватория Pierre Auger, Telescope Array и орбитальная обсерватория TUS, так и планируемые эксперименты такие как KLPVE and JEM-EUSO. Приводятся современные результаты по спектру, массовому составу и анизотропии направлений прилета космических лучей. Наконец, обсуждается связь между космическими лучами ультравысоких энергий и нейтрино и фотонами сверхвысоких энергий.

Защищена докторская диссертация [Публикации.1.49] “Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения.” Диссертация посвящена одной из наиболее актуальных и сложных задач современной астрофизики частиц, проблеме происхождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ). Экспериментальные исследования в данной области сильно осложнены из-за малости потока частиц указанных энергий. Анализ наблюдений включает моделирование взаимодействий КЛУВЭ в атмосфере. Это требует экстраполяции существующих экспериментальных данных по сечениям нуклон-нуклонных взаимодействий до энергий в сотни ТэВ в системе центра масс, что вносит неизбежную систематическую ошибку во все

косвенные оценки и особенно в измерения массового состава КЛУВЭ. Наименее подвержено влиянию систематики определение направлений прихода космических лучей. В современных экспериментах точность определения этой величины составляет примерно полтора градуса. Однако интерпретация направлений прихода сильно зависит от предполагаемого массового состава, поскольку космические лучи могут заметно отклоняться магнитным полем галактики. В условиях, когда массовый состав не удаётся достоверно измерить, а интерпретация направлений прихода не очевидна, особую значимость приобретает альтернативный подход, основанный на изучении сопутствующих сигналов от взаимодействия КЛУВЭ со средой вокруг источника и межгалактической средой на их пути к наблюдателю. Данный подход, развитый в диссертации, позволяет получить независимые ограничения на массовый состав и указать на вероятные источники КЛУВЭ.

В 2017 г. получены важные результаты, связанные с работой установки Telescope Array. С помощью современных техник многокомпонентного анализа исследован массовый состав частиц, инициирующих широкие атмосферные ливни с энергиями от 1 ЭэВ и выше. Данный результат получен с использованием данных наземной решётки детекторов эксперимента Telescope Array. Результат доложен на конференции International Cosmic Ray Conference (ICRC-2017) и опубликован в сборнике трудов этой конференции [Публикации.1.51,52]. Другими важными результатами, полученным с помощью данных наземной решетки детекторов установки Telescope Array являются ограничения на диффузный поток космических фотонов и нейтрино с энергиями более 1 ЭэВ. Эти результаты также доложены на конференции ICRC-2017 и опубликованы в сборнике её трудов [Публикации.1.53].

## 2. ПРЯМЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ПОИСКИ ТЯЖЁЛОЙ КОМПОНЕНТЫ НЕЙТРИНО В КИНЕМАТИКЕ РАДИОАКТИВНЫХ РАСПАДОВ

Руководитель темы д.ф.-м.н. В.С.Пантуев.

Нейтринные состояния, такие как  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  и стерильные нейтрино  $\nu_s$  не являются собственными массовыми состояниями, и могут быть представлены в виде когерентных сумм таких состояний. В частности, спектр электронов в бета-распаде можно представить как  $S(E) = \sum U_{ei}^2 * S(E, m_{2i})$ , где  $S(E, m_{2i})$  является спектром с определённой массой собственного состояния нейтрино. Число стерильных состояний нейтрино неизвестно. Если три первых состояния имеют массу близкую к нулю, то можно отдельно выделить вклад тяжёлого нейтрино,  $m_{24}$ , и записать как

$$S(E) = (1 - U_{e4}^2) * S(E, 0) + U_{e4}^2 * S(E, m_{24}).$$

Существующие лучшие ограничения на  $U_{e4}^2$ , полученные в прямых экспериментах, показаны на рис. 1. В диапазоне масс  $m_N$  0.1 – 2 кэВ лучшие пределы были получены нашей группой в Троицке [Публикации.2.1,2].

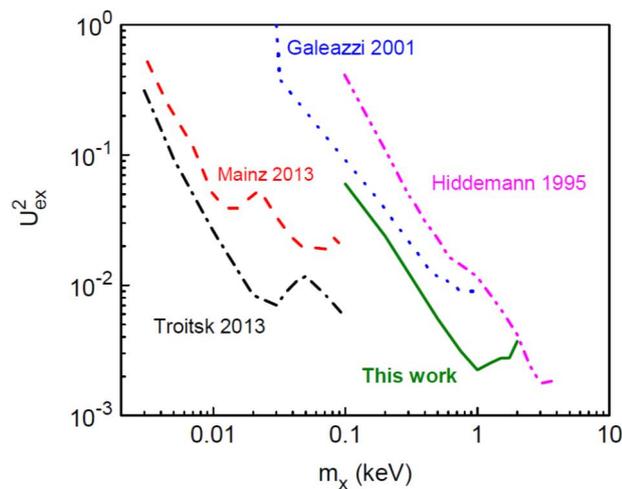


Рисунок 1. Существующие экспериментальные ограничения (95% CL) на примесь тяжелого нейтрино в электронном нейтрино в зависимости от массы. Сплошная кривая взята из публикации полученных ранее наших данных [Публикации.2.2].

В представленном эксперименте, мы расширяем энергетический диапазон измерения бета спектра эти поиски и исследовать стерильными массы нейтрино в диапазоне до нескольких кэВ. В 2017 году было проведено три полноценных сеанса измерений бета спектра трития (в январе, мае-июне и в ноябре) с целью увеличения набранной статистики. Во всех сеансах были задействованы: безоконный тритиевый источник, электростатический спектрометр с магнито-адиабатической коллимацией и криогенный центр по оживлению гелия. Все элементы источника

и спектрометра содержат сверхпроводящие магниты, которые заполняются жидким гелием в замкнутом цикле.

Экспериментальная установка. Установка «Троицк ню-масс» состоит из двух основных частей: безоконного источника трития и электростатического спектрометра с магнитной адиабатической коллимацией, Рис.2.

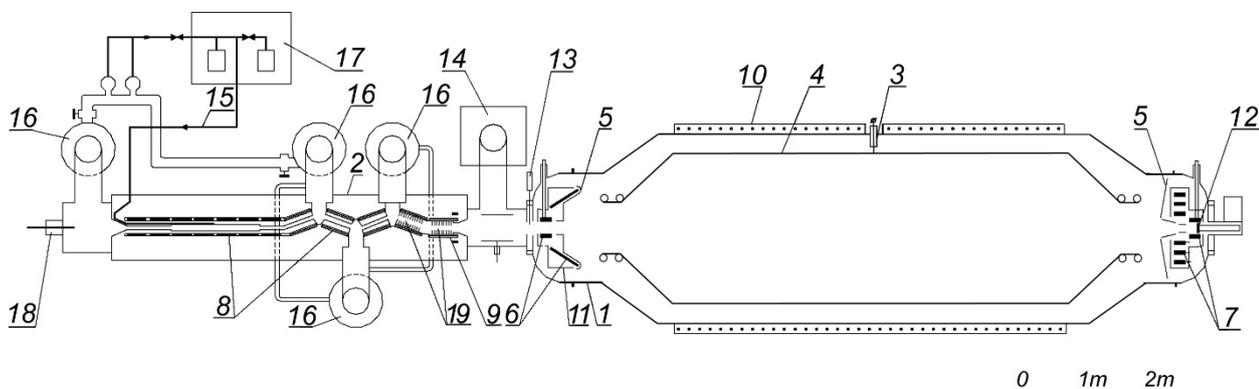


Рисунок 2. Основные элементы установки, тритиевый источник расположен слева, спектрометр - справа: 8 – безоконный тритиевый источник, 15 – система замкнутой циркуляции трития, 10 – электростатический спектрометр, 12 – регистрирующий детектор.

Для охлаждения сверхпроводящих магнитов жидким гелием на установке используется криогенная система TCF-50 фирмы LINDE, рис. 3.



Рисунок 3. Фотография части криогенной системы.

Подробности установки и описание принципа работы можно найти в статье [Публикации.2.3].

### 3. ПОИСК МАССЫ ЭЛЕКТРОННОГО АНТИНЕЙТРИНО: ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Руководитель темы к.ф.-м.н. Н.А.Титов.

При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0,1 эВ, все типы нейтрино имеют одинаковую массу и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино (рис.4).

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада (Майорановские нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (Майрановские и Дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ/c<sup>2</sup>.

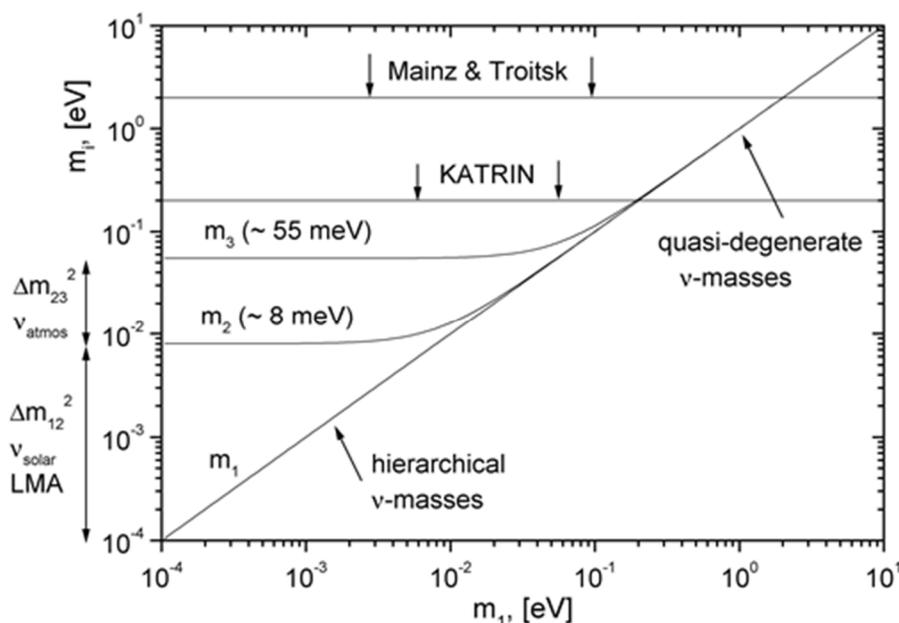


Рисунок 4. Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия)

Альтернативный подход к измерению массы электронного нейтрино основан на применении болометрических детекторов для регистрации полного энергосодержания в процессах бета-распада и К-захвата. Группа эксперимента MARE изучала возможность исследования бета-распада в рении-187. Принципиальной проблемой такого эксперимента является образование метастабильных состояний, искажающее наблюдаемый спектр бета-

распада. В настоящее время группа эксперимента MARE переключилась на проект HOLMES по поиску массы электронного нейтрино в К-захвате в гольмии-163 [Публикации.3.1]. Этот же процесс исследуется в эксперименте ECHO Collaboration [Публикации.3.2].

Новый подход предложен в Project8 [Публикации.3.3]. Предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. В рамках Project8 получен важный результат, удалось зарегистрировать одиночные электроны в ловушке и измерить их энергию [Публикации.3.4].

Некоторое время назад обсуждался проект PTOLEMY и даже анонсировалось проведение измерений в 2017 году [Публикации.3.5]. Новой информации по проекту не поступало. По-видимому, было признано противоречие предложенного подхода закону сохранения фазового объема.

По состоянию на конец 2017г., в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино, только проект КАТРИН близок к возможности улучшить ограничение на массу электронного антинейтрино.

Следует упомянуть новую большую программу TRISTAN, предложенную для установки КАТРИН. Она состоит в поиске в бета-распаде трития сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно  $1\text{эВ}/c^2$  до нескольких  $\text{кэВ}/c^2$  [Публикации.3.6]. В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трех состояний с определенной массой. Кроме того, есть основания предполагать существование дополнительных состояний, не участвующих в взаимодействиях в рамках Стандартной Модели и называемых поэтому «стерильными». Эти состояния являются смесью массовых состояний отличных от входящих в состав активных нейтрино. Одновременно, естественно предположить существование в активных нейтрино небольшой примеси стерильных состояний. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада активный нейтрино, спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из трех массовых состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады. Так, примесь четвертого массового состояния должна проявляться в изломе  $\beta$ -спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [Публикации.3.7]. Установка КАТРИН предоставляет для поиска стерильных нейтрино прежде всего уникальный беззаконный источник газообразного трития активностью 100 ГБк (примерно 3 Ки). В тоже время, ее система регистрации электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена. При наборе данных в течение трех лет КАТРИН имеет возможность ограничить

вклад стерильных нейтрино с массой несколько кэВ на уровне не исключенным существующими астрофизическим наблюдениями.

Оптимизация работы электронной пушки. В 2017 году были проведены дополнительные расчеты поведения пучка электронов по всей длине транспортного канала, Рис.5. На рисунке видно, что после поворотного магнита первоначально однородный пучок электронов заполняют только часть сечения в транспортном канале и в результате наблюдается характерное «винтовое» движение электронов. Выполненный комплекс мер позволил оптимизировать режимы работы пушки для энергий в интервале 14-20 кэВ. Однако по-прежнему наблюдаются не статистические флуктуации интенсивности. Данный вопрос требует дальнейшего рассмотрения с трассировкой электронной пушки через все элементы газового источника и спектрометра.

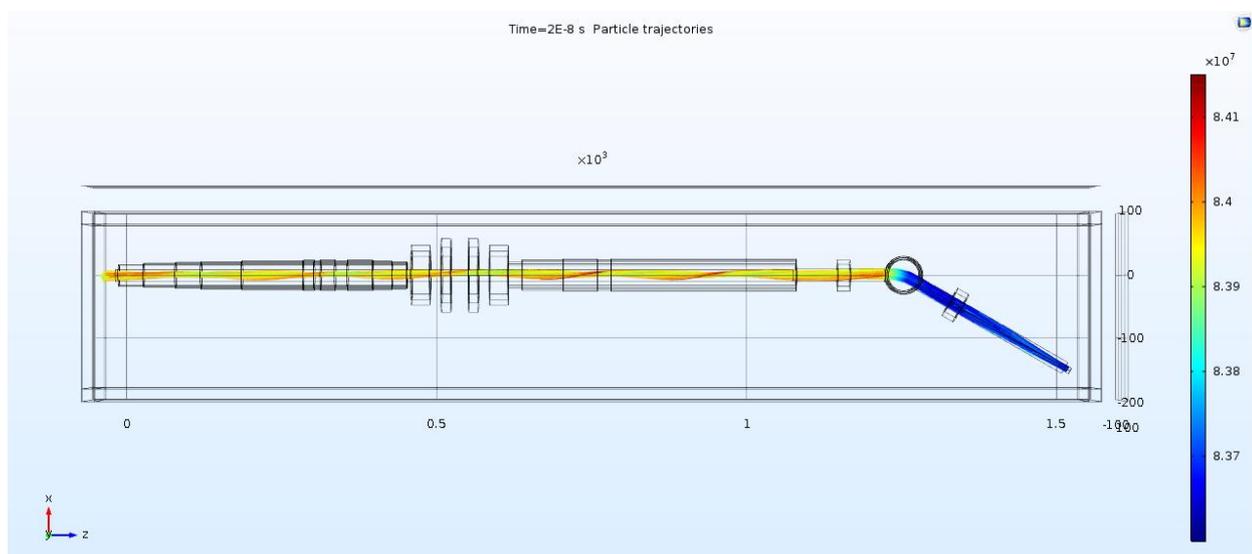


Рисунок 5. Трассировка электронов в транспортном канале электронной пушки. Электроны рождаются на катоде справа и затем отклоняется в транспортный канал.

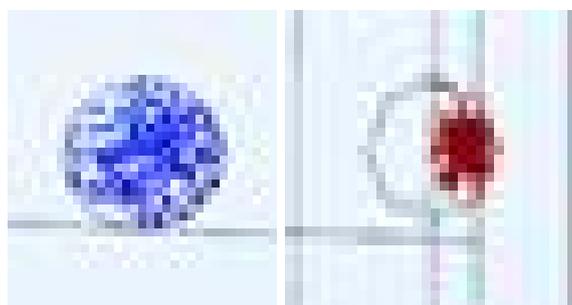


Рисунок 6. Заполнение электронами канала пушки перед поворотным магнитом – слева, электронный пучок в одном из сечений транспортного канала – справа.

Запуск нового канала регистрации с полной оцифровкой сигнала детектора.

Для перехода от стандартного канала с АЦП для измерения амплитуды с кремниевого детектора был выбран промежуточный вариант с сохранением старого канала и нового

параллельно с ним на базе платы –осциллографа ЛАН10 – 12РСІ. Плата позволяет проводить параллельный набор данных с фиксированным мертвым временем в 87.5%, определяемым внутренними временными характеристиками платы на считывание и запись. В старом варианте электроники мертвое время электроники слегка варьировалось в пределах примерно 5% в зависимости от амплитуды сигнала.

Для оптимальной обработки получаемой с карты информации был выполнен ряд подготовительных работ с полным моделированием входных сигналов, рис. 7, и шума электроники, рис.8.

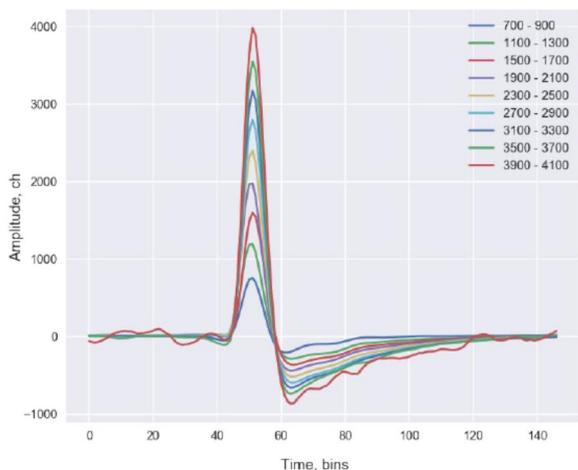


Рисунок 7. Смоделированные амплитудные сигналы после усилителя по времени, которые полностью воспроизводят реальную форму импульсов.

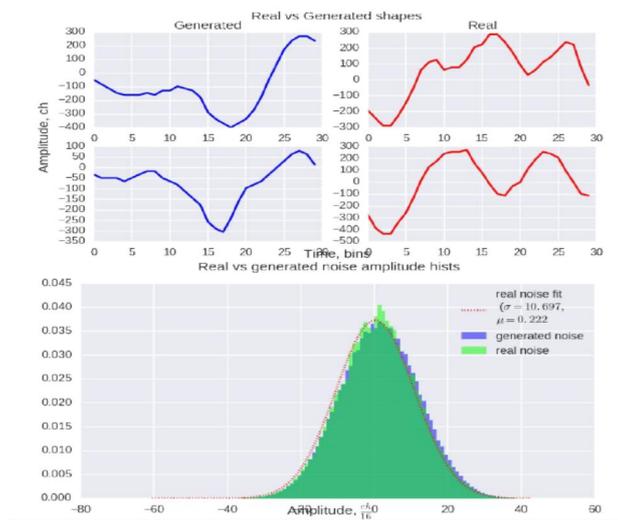


Рисунок 8. Пример сгенерированных и реальных шумовых импульсов и сравнение их амплитудных спектров.

Все это было необходимо для развития методики выделения импульсов в реальных условиях при использовании больших загрузок. Данные трёх сеансов обрабатываются.

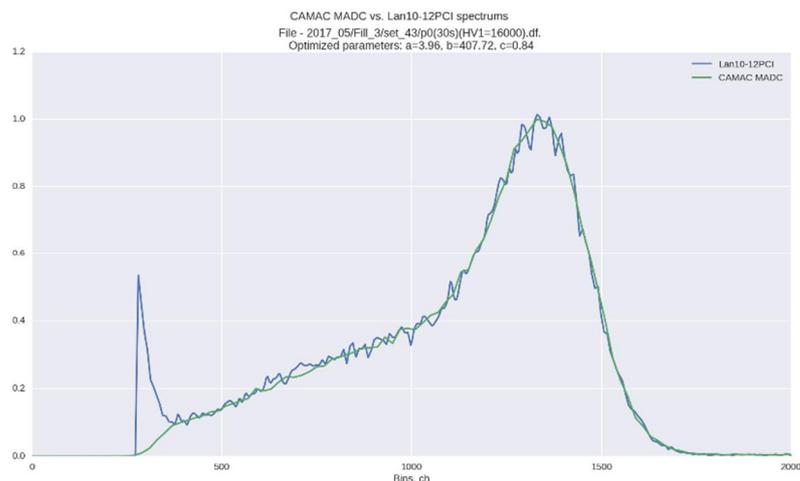


Рисунок 9. Предварительное сравнение спектров энерговыделения предыдущим методом и с помощью карты оцифровки.

Набор статистики. Проведение измерений бета спектра трития. На Рис. 10 приводится один из измеренных спектров бета-электронов от трития, получаемый прямо во время набора и до введения необходимых систематических поправок. Обработка спектров требует тщательного учета различных поправок (основные поправки перечислены в статье [Публикации.3.3]). Процесс окончательной обработки спектров продолжается.

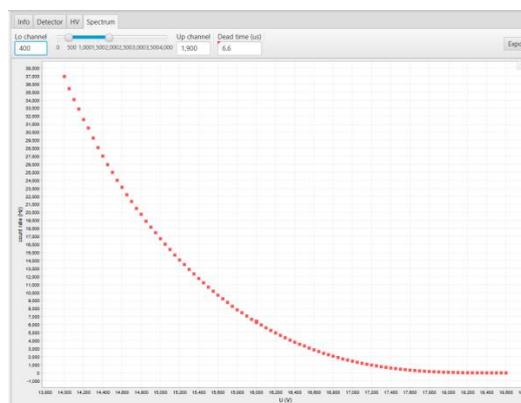


Рисунок 10. Интегральный он-лайн спектр электронов по энергии в зависимости потенциала на спектрометре в одном из сотен файлов измерений с тритием.

Калибровка нового типа детекторов для регистрации электронов на основе кремниевого детектора дрейфа – SDD.

Для расширения возможностей по измерению спектра электронов необходимо иметь низко шумящие детектор и электронику, которые позволили бы опустить порог регистрации и существенно уменьшить ряд систематических эффектов. Такие возможности открываются с использованием кремниевых дрейфовых детекторов, SDD. Такие детекторы имеют ряд неоспоримых преимуществ: очень тонкое входное окно, распределенный потенциал, который

позволяет применить центральный анод с очень малой емкостью (меньше одного пикофарада), а значит, уменьшить уровень шумов. Кроме этого, возникает возможность организовать много каналов детектирования с, практически, отсутствием мертвых зон. В полупроводниковой лаборатории в Институте Планка в Мюнхене начато изготовление отдельных опытных образцов таких детекторов. Первоначально они разрабатывались для регистрации мягких гамма квантов для астрофизических исследований. Было предложено испытать эти детекторы для низкоэнергичных электронов.

В 2017 году в двух сеансах участвовала группа из Института Макса Планка, Мюнхен. Образцы 7-пиксельных детекторов были прокалиброваны на различных источниках электронов доступных только на «Троицк ню-масс». Это электронная пушка с энергией до 20 кэВ, электроны автоэмиссии при определенной конфигурации магнитных полей, и электроны от трития.

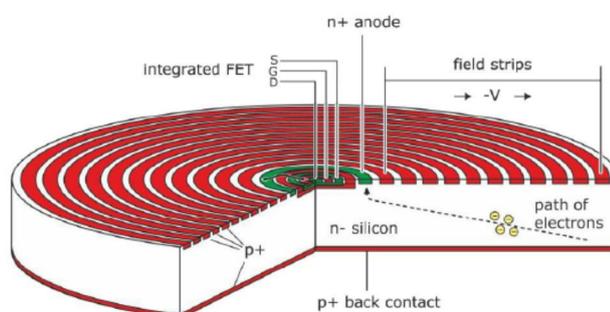


Рисунок 11. Структура SDD используемая при тестировании.

Испытания показали, что детектор имеет очень хорошие параметры по уровню шумов и энергетическому разрешению, которое составило примерно 400 эВ (ширина на полу высоте) для электронов с энергией 20 кэВ. Дальнейшее улучшение шумов возможно с применением численных фильтров шумов.

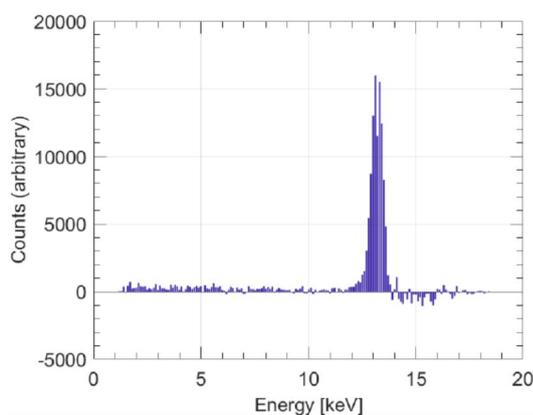


Рисунок 12. Дифференциальный спектр трития, полученный вычитанием двух интегральных спектров при 13.0 и 13.5 кВ. Ширина пика определяется преимущественно шириной выбранного бина в 0.5 кВ.

Проект КАТРИН. В 2001 году, в Технологическом институте в Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) был принят проект КАТРИН по созданию новой установки, которая позволит поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне 0,2 эВ/c2 [Публикации.3.8].

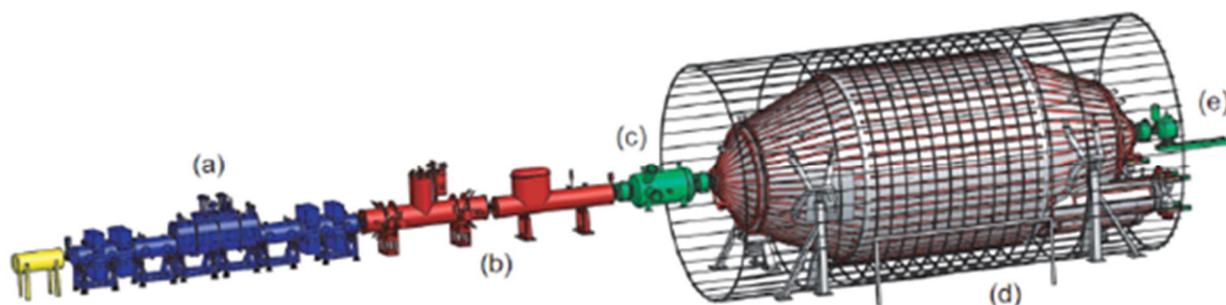


Рисунок 13. Установка КАТРИН. Буквами обозначены части установки: а – безоконный газовый источник трития, б – канал транспортировки электронов с дифференциальной и криогенной откачками, с – предварительный спектрометр, d – основной спектрометр, е – сегментированный детектор.

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк ню-масс», которая является прототипом установки КАТРИН [Публикации.3.9].

Многие параметры новой установки являются рекордными: общая длина 70м, диаметр спектрометра 10м и вакуум на уровне 1.10-11 мбар [Публикации.3.10], безоконный источник трития и канал транспортировки общей длиной 25м сформированы цепочкой из 29 сверхпроводящих соленоидов с полем от 3.6 до 5.6 Тл, температура газового источника поддерживается в пределах 25 мК и т.д.

Проект КАТРИН является полигоном для применения самых передовых экспериментальных технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей и т.д. Следует отметить также применение последних достижений в области программного обеспечения как сбора, так и обработки физических данных. Таким образом, участие в проекте КАТРИН предоставляет возможность находиться в курсе современных подходов в физическом эксперименте. Это особенно важно для подготовки молодых сотрудников.

14-го октября 2016 года начался запуск установки как целого. Впервые электроны, излученные с «задней стенки» установки, были зарегистрированы детектором, расположенным на ее противоположном конце, на расстоянии 70м.

В 2017 году велись работы по монтажу «задней стенки» и системы рециркуляции трития. «Задняя стенка» - общее название комплекса устройств, обеспечивающих однородное распределение электрического потенциала по площади газового источника, эмиссию электронов для нейтрализации объёмного заряда в источнике и электронную пушку, формирующую тестовый пучок электронов с узким энергетическим разбросом и узким и регулируемым угловым распределением. Система рециркуляции трития обеспечивает замкнутую циркуляцию трития через газовый источник. Система включает многоступенчатую дифференциальную откачку выходящего из источника трития, его очистку от неводородных примесей, изотопное обогащение, анализ изотопного состава и компрессию для повторной инъекции в источник. Оба устройства контактируют с объемом, содержащим тритий активностью не менее 300 ГБк (10 Ки), поэтому при создании этой уникальной системы необходимо выполнить весьма жесткие требования по радиационной безопасности.

В целях тестирования установки в 2017 году был проведен эксперимент по регистрации электронов внутренней конверсии от распада источника - метастабильного криптона-83м. Изотоп криптона-83 образовывался в генераторе, содержащем материнский изотоп рубидия-83 и посредством диффузии инжестировался в газовый источник КАТРИН. При выключенной системе дифференциальной откачки криптона-83м заполнял весь объем источника и канала транспортировки и в его конце адсорбировался на холодной поверхности криогенной откачной станции.

В газовый источник криптона-83 попадает в виде метастабильного состояния криптона-83м ( $1/2^-$ ), с временем жизни 1,83 часа, с некоторой примесью основного состояния. Метастабильно состояние распадается каскадом переходов через состояние ( $7/2^+$ ) с энергиями 32,15кэВ и 9,41кэВ. Оба перехода сильно конвертированы.

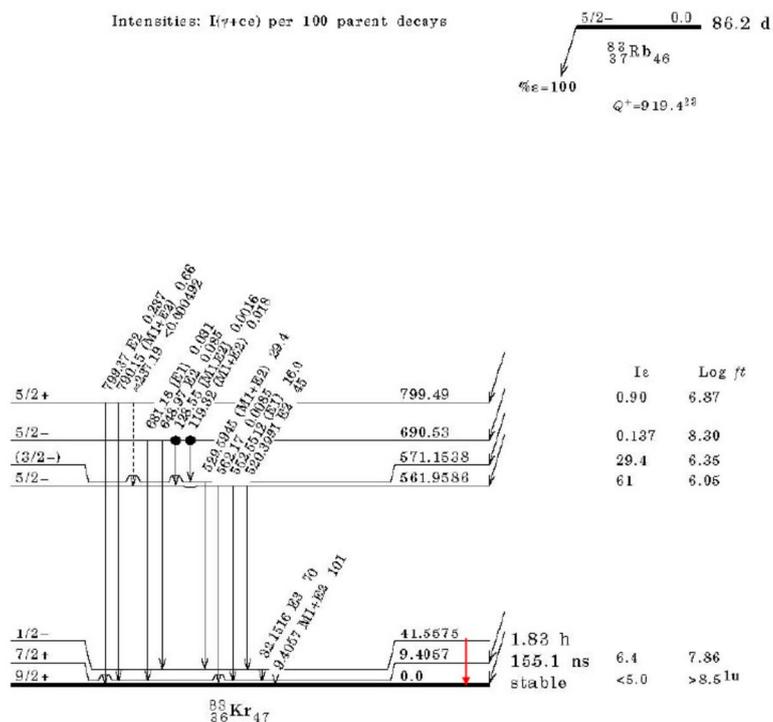


Рисунок 14. Схема распада рубидия-83[Публикации.3.11].

Интерес представляет метастабильное состояние с временем жизни 1,83 часа.

Красной стрелкой показан гипотетический прямой переход на основное состояние.

Для перехода 32,15 кэВ наблюдаются линии электронов в диапазоне 17,5 ... 32 кэВ, соответствующие конверсии на К-, L-, M- и N-оболочках.

В результате проведенного эксперимента оказалось возможным протестировать систему регистрации данных от 146-пиксельного детектора при загрузках до 103 имп/сек на пиксель. Проверялось разрешение отдельных пикселей детектора, стабильность коэффициента усиления, уровень собственных шумов и т.д. Была исследована структура распределения запирающего электрического потенциала в анализирующей плоскости спектрометра и ее проекция на детектор, расположенный на расстоянии 5м в фокальной плоскости спектрометра. Результаты эксперимента будут опубликованы в 2018 году.

Любопытным физическим результатом может оказаться аномалия в фоновой части спектра при энергии 40кэВ, поскольку она может быть связана с конверсионными электронами не наблюдавшегося ранее перехода из состояния (1/2)- прямо на основное состояние криптона-83.

Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН. Влияние внутреннего движения атомов в молекуле трития на потерю энергии электронов при упругом рассеянии в газовом источнике.

Упругое рассеяние электронов на атоме трития приводит к потере ими энергии за счет чисто кинематического эффекта отдачи. Размытие величины энергии отдачи за счет теплового движения при низких температурах приводит к пренебрежимо малым поправкам. Ситуация

существенно меняется в случае рассеяния на молекулярном тритии за счет «нулевых» колебаний атомов в молекуле трития.

Разработан модуль программного обеспечения, позволяющий учитывать дополнительный вклад внутреннего движения на упругое рассеяние электронов. Модуль встроен в общий пакет программ KASSIOPEIA, используемый для расчётов и моделирования спектра электронов в эксперименте КАТРИН.

Упругое рассеяние в источнике является одним из эффектов, дающих вклад в систематическую неопределённость в эксперименте КАТРИН. Такое рассеяние приводит к дополнительному размытию спектра электронов с одной стороны, а также изменению распределения электронов по углам с другой.

Влияние внутреннего движения атомов в молекуле трития на процесс бета-распада было исследовано в работах [Публикации.3.12,13]. В последней работе было высказано предположение о возможном вкладе внутреннего движения в процесс упругого рассеяния электрона на молекуле трития.

Кинематически процессы рассеяния и распада оказываются очень схожими. Существенным отличием является то, что энергия отдачи ядра при распаде фиксирована, а при рассеянии может изменяться в пределах от 0 до 6.8 эВ.

Для расчётов была использована техника функций рассеяния. Функция рассеяния связывает переданный момент и энергию отдачи (потерю энергии). Она позволяет учесть начальное распределение рассеивающих ядер по скоростям. Тем самым, расчёт влияния внутреннего движения осуществляется через получение распределения ядер трития в молекуле по энергиям.

Основной вклад во внутреннее движение в молекуле трития даёт энергия нулевых колебаний ядер. Считая распределение ядер по импульсам нормальным, можно получить функцию рассеяния, также имеющую гауссову форму.

Используя далее дифференциальное сечение процесса упругого рассеяния и сворачивая его с функцией рассеяния можно получить функцию потерь энергии для электронов. Переход к случаю без учёта внутреннего движения осуществляется с помощью замены функции рассеяния на дираковскую дельта-функцию.

Функция рассеяния позволяет одновременно учитывать изменения энергии и углового распределения для рассеянных электронов, а также рассеяние на большие углы. Численная оценка вклада движения атомов в молекуле трития в потери энергии при упругом рассеянии показала, что потери энергии и изменения угла оказываются в пределах требований эксперимента КАТРИН к неопределённости упругого рассеяния.

Разработка программного обеспечения проекта КАТРИН. Одной из задач группы анализа данных эксперимента КАТРИН стала разработка генератора Монте-Карло для моделирования данных. Такой генератор может быть использован для тестирования для различных частей программного обеспечения. Конечной целью создания такого генератора может быть полноценное тестирование всей цепочки программных инструментов анализа от сырых данных до получения оценок массы нейтрино.

Открытыми остаются следующие вопросы: какой инструментарий должен быть использован для моделирования данных, сходных с данными реального измерения; каков должен быть результат работы генератора; какая модель должна использоваться.

Для генерации данных можно использовать, например, событийное моделирование, аналитическое моделирование с использованием свёрток, а также подход, использующий ковариационные матрицы.

Первая версия генератора может создавать предобработанные файлы для дальнейшего фитирования; генератор должен получать на входе план измерений.

В качестве модели в первой версии используется программное обеспечение КАТРИН, в частности модель спектра и источника SSC.

Тестирование, сравнение и проверка программного обеспечения и методов обработки данных в эксперименте КАТРИН. В настоящее время в обработке данных КАТРИН применяется целый ряд различных программных систем. Одной из задач группы обработки данных становится фиксация процедуры проверки согласованности всех используемых программ. Для полноценного анализа предполагается существование по крайней мере двух независимых команд обработчиков. Это позволит избежать возможных ошибок в программном коде, и гарантирует более надёжный результат. Каждая команда участвует в тестировании на моделированных данных.

Анализ экспериментального спектра на присутствие примеси тяжёлых стерильных нейтрино. Установка КАТРИН позволяет проводить измерения и анализировать данные в рамках различных стратегий поиска тяжёлого стерильного нейтрино, с использованием первых сеансов с пониженной статистикой.

Первым способом измерения является интегральный метод, когда спектрометр КАТРИН используется в обычном режиме: спектр бета-распада измеряется для набора запирающих напряжений. Отличием от стандартных измерений массы электронного антинейтрино будет лишь набор измеряемых точек – для стерильного нейтрино с массой в несколько кэВ необходимо знать спектр бета-распада вдали от граничной энергии ( $E_0=18.6$  кэВ).

Вторым способом измерения может быть получение полного дифференциального бета-спектра с использованием разрешающей способности самого детектора электронов. На спектрометре устанавливается в этом случае запирающее напряжение близкое к 0 В.

Два способа измерений могут быть использованы по отдельности или совместно для достижения максимально возможной чувствительности к стерильным нейтрино с массой порядка нескольких кэВ.

Стратегия измерений определяется распределением времени между дифференциальным и интегральным методами, а также набором запирающих напряжений для интегрального спектра. Полное время считается фиксированным. Процедура анализа данных выбирается тогда в соответствии с методом измерения и предварительными исследованиями чувствительности.

В чисто дифференциальном способе измерения для фитирования полученного спектра используется либо некоторая модель отклика детектора, либо измеренная или моделированная функция отклика, а затем производится учёт соответствующих неопределённостей. Фитирование интегрального спектра сильно зависит от флуктуаций в источнике, которые могут имитировать сигнал от стерильного нейтрино. Эти два важнейших систематических эффекта могут быть уменьшены при объединении двух способов измерения.

Непосредственное объединение двух методов можно осуществить фитированием данных от каждого из измерений. Можно ожидать, что возможные флуктуации в источнике в интегральном измерении будут скорректированы дифференциальным спектром, а неопределённости в отклике детектора компенсируются интегральным измерением, когда детектор используется только как счётчик.

Более изящным методом комбинирования дифференциального и интегрального измерения оказывается так называемый метод декомпозиции. Идея метода заключается в измерении отклика детектора в интегральной моде и его дальнейшее использование для извлечения чистого спектра электронов из дифференциальной моды. Интегральный спектр не используется для извлечения информации о стерильных нейтрино, и требование стабильности источника может быть ослаблено. При достаточной статистике неопределённости функций отклика могут быть существенно уменьшены. Важными систематическими эффектами здесь оказываются эффективность детектора и влияние запирающего напряжения на отклик детектора.

Результаты представлены в пленарном докладе на рабочем совещании КАТРИН в Технологическом институте Карлсруэ, Германия (6-11 марта 2017) “Совместный анализ данных для поиска стерильных нейтрино”. В докладе рассматривались преимущества совместного анализа интегрального и дифференциального спектров трития

При работе над проектом “Модель спектра электронов бета-распада трития в широком диапазоне энергий с учётом эффектов источника, спектрометра и детектора” была разработана библиотека для вычисления/моделирования измеряемого спектра электронов во всём диапазоне энергий электронов (0-18.6 кэВ). Для вычисления измеряемого спектра используется предварительный расчёт функций отклика каждого из компонентов установки КАТРИН (источника, спектрометра, детектора) и последующая свёртка теоретического спектра с этими функциями отклика.

Измерения массы электронного антинейтрино в эксперименте КАТРИН потребовали разработки предельно точной теоретической модели измеряемого интегрального спектра с учётом эффектов газового источника, сложной конфигурации электрических и магнитных полей и других. Однако, для измерения массы лёгкого нейтрино используются лишь диапазон в несколько десятков эВ вблизи конца спектра.

Для поиска тяжёлого стерильного нейтрино в спектре бета-распада трития необходимо иметь модель спектра в широком диапазоне энергий (несколько кэВ от конца спектра). Кроме того, важно учитывать ряд новых эффектов (неадиабатичность движения электронов, рассеяние на задней стенке источника, отклик детектора). Подобные расчёты могут быть очень затратны по времени и не позволяют непосредственно использовать полную модель для анализа данных и фитирования.

Решением проблемы скорости расчётов может стать использование предварительно рассчитанных функций отклика каждого из элементов установки КАТРИН (источник, задняя стенка, спектрометр, детектор).

Измеряемый спектр становится в таком случае свёрткой всех функций отклика в нужном порядке с теоретическим спектром бета-распада. Таким образом затратное по времени моделирование проводится лишь один раз для нескольких конфигураций эксперимента, а предрассчитанные функции отклика используются затем для фитирования измеренного спектра

Измерения спектра неупругих потерь при рассеянии электронов на молекулах газообразного трития были выполнены ранее на установке «Троицк ню-масс» [Публикации.3.14]. Для обработки данных в эксперименте КАТРИН нужно провести новые измерения спектра неупругих потерь, существенно повысив их точность. В том числе, необходимо уточнить представления о систематике таких измерений.

В рамках указанной программы было, в том числе, рассмотрено влияние поправок на спиральность движения электронов в газовом источнике трития. В процессе рассеяния происходит перемешивание электронов, вылетевших изначально под разными углами. При этом в магнитном поле электроны, испущенные под бóльшим углом к магнитному полю, имеют бóльшую вероятность рассеяния. Соответствующая поправка в форму спектра потерь энергии

электронов имеет сложную зависимость от толщины источника и должна учитываться при извлечении данных из экспериментальных кривых пропускания (см. рис.15).

Проведение эксперимента измерению спектра неупругих потерь планировалось на 2017-й год, но было перенесено на 2018-й.

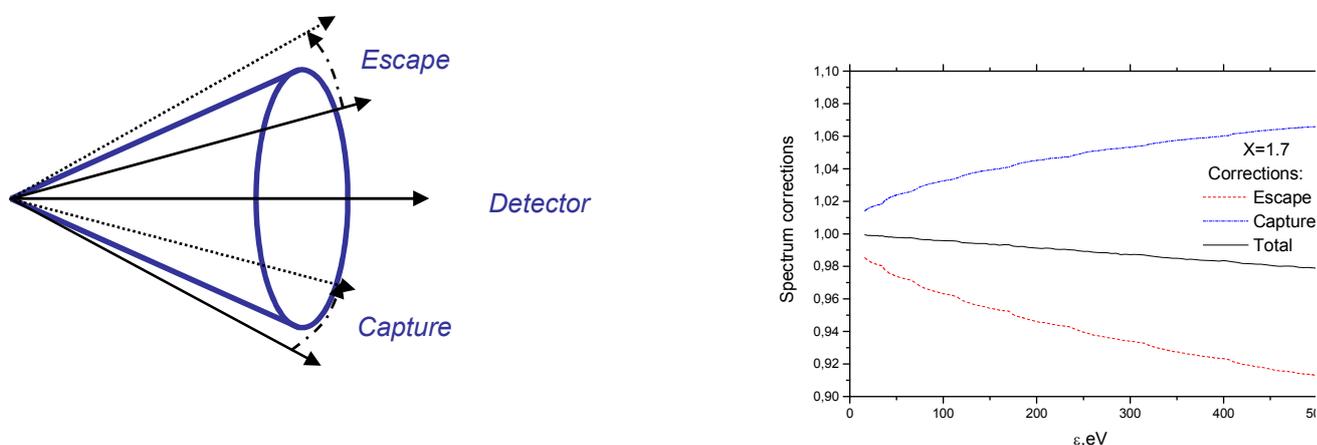


Рисунок 15. Изменение числа электронов, попадающих в детектор(слева) за счёт процессов вылета(escape) и захвата (capture) и поправки к числу регистрируемых электронов в зависимости от величины потери энергии ( $\epsilon$ ) при толщине источника  $X=\sigma pl=1.7$  (справа)

Измерение зависимости сечения возбуждения электронных состояний молекул трития от энергии налетающих электронов

Определение спектра потерь энергии электронами при неупругом рассеянии на молекулах трития (см. выше) достаточно затратная по времени процедура, поэтому она будет проводиться при одной, максимум двух, энергиях электронов. Для оценки формы спектра при других энергиях необходимо уметь правильно делать его интерполяцию/экстраполяцию. Спектр потерь энергии состоит из двух частей, связанных с возбуждением электронных состояний и ионизацией, соответственно. Существуют различия как в оценке относительного вклада обеих частей (см. Табл.1), так и их зависимости от энергии налетающих электронов.

Таблица 1. Вклады возбуждения электронных состояний и ионизации

Источник, метод	Excitation/Ionization
R.K.Janev, W.D.Langer, K.Evans,Jr., D.E.Post,Jr Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas. Cross Sections and Reaction Rate coefficients.. ISBN 3-540-17588-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Экстраполяция экспериментальных данных, полученных при энергии электронов ниже 2 кэВ.	60/40

В.Н.Асеев и др. European Physical Journal D10 (2000) ,39-52. Эксперимент при энергии электронов 18 кэВ	57,4/42,6
J.W. Liu Phys. Rev. A7 (1973) 103 Теоретический расчёт, оба сечения примерно следуют одной зависимости $\sim 1/T \ln T$	

Предлагается поставить короткий эксперимент, в котором измеряется пропускание электронов разной энергии через газовый источник, работающий в стационарном режиме. Измерения проводятся в области потерь 0 ... 20эВ, где присутствует только вклад однократного рассеяния и нет необходимости в измерениях с пустым источником для определения потока электронов при каждой энергии.

Комитет по распределению времени на установки КАТРИН отложил проведение эксперимента на неопределенное время. При этом учитывался тот факт, что с рассматриваемым эффектом связана малая поправка к наблюдаемой массе нейтрино, которая может быть внесена при завершающей обработке данных.

Исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления. Одной из основных проблем проведения эксперимента по поиску тяжелых стерильных нейтрино является необходимость с разумным уровнем просчётов регистрировать высокие потоки электронов с энергией масштаба 10...20 кэВ. Частично задача решается за счёт секционирования детектора и организации независимой регистрации сигналов от каждой секции. Тем не менее, состоит задача обеспечить скорость счета  $10^6 \dots 10^7$  в секунду для каждого единичного детектора.

Для решения проблемы высокой скорости счета исследовалась возможность применения микропиксельного лавинного фотодиода (МЛФД) производства Zecotek Photonics Inc, Дубна, с улучшенным временем восстановления параметров. В данном приборе нет пикселей в обычном понимании. Активная площадь для фотонов близка к 100%. Описание детектора приведено в работе [Публикации.3.15]:

фоточувствительная площадь —  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ;

толщины первого и второго эпитаксиального слоя р-типа проводимости —  $3.5 \text{ }\mu\text{m}$ ;

удельные сопротивления обоих эпитаксиальных слоев —  $7 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$  (или концентрация примесей —  $1.85 \cdot 10^{15} \pm 5\% \text{ atom/cm}^3$ );

диаметр пикселей (т.е. n+-областей) вдоль поверхности —  $2 \text{ }\mu\text{m}$ ;

толщина пикселей (n+-областей) — около  $0.8 \text{ }\mu\text{m}$ ;

интервал между пикселями вдоль поверхности —  $3 \text{ }\mu\text{m}$ ;

поверхностная плотность пикселей —  $4 \cdot 10^4 \text{ pixel/mm}^2$ ;

защитный слой ( $\text{SiO}_2$ ) = 0.5  $\mu\text{m}$ .

время восстановления не более 30 нс

В 2017 году велись работы по разработке помехоустойчивого предусилителя. Полученные в ходе работ результаты собраны и опубликованы в виде препринта ИЯИ РАН [16].

Планировались совместные испытания детектора на стенде в КИТ, Карлсруэ, но вследствие высокой загруженности коллег работами по запуску «Задней стенки» они были перенесены на январь 2018 года.

#### 4. ПОИСК РЕДКИХ МЮОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «MU2E»

Руководитель темы д.ф.-м.н. Р.М.Джилкибаев.

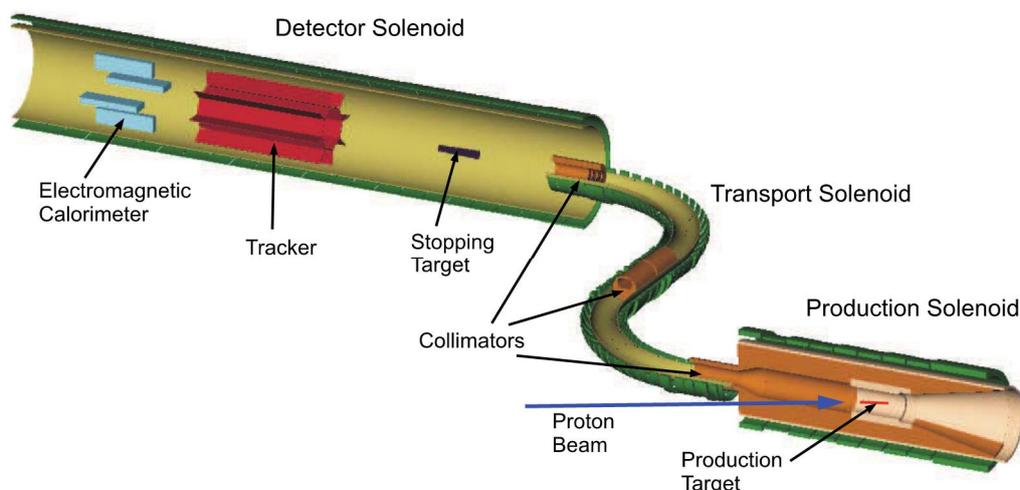


Рисунок 16. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре на ускорителе FNAL, (Batavia, USA, web cite <http://mu2e.fnal.gov>)

Состояние эксперимента «Mu2e» в 2017 году. В 2017 г. завершена стадия CD-2/3 эксперимента : проведение конструкторских и опытных работ. Одобрен и утвержден бюджет следующей стадии CD-3 эксперимента комитетом DOE США в 2017 г. Планируется завершить стадию CD-3 в 2018 г. и переход к стадии CD-3с завершающей создание установки.

Разработка и изготовление электроники с низким уровнем шумов. В 2017 г. проводились работы по разработке и изготовлению электроники, предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех. В качестве детекторов рассматриваются: лавинные фотодиоды (APD), фото-электронные умножители (ФЭУ) и нейтронные газовые He3 счетчики.

Электроника одного канала детектора состоит их зарядо-чувствительного предусилителя, усилителя-формирователя, двух-порогового дискриминатора, сумматора логических сигналов и выходных усилителей для передачи сигналов на длинную линию (скрученная пара). Для предусилителя была выбрана схема зарядо-чувствительного усилителя с полевыми транзисторами на входе. Для повышения быстродействия и уменьшения шумов используются два быстрых низко-шумящих полевых транзистора J2SK443, соединенных параллельно. Предусилитель имеет парафазный выход, состоящий из двух операционных усилителей противоположной полярности, для уменьшения синфазных наводок. Усилитель-формирователь имеет дифференциальный вход, усиливающий разность сигналов на входе. Шумы наводки внешних сигналов на кабель дают сигналы одной полярности на входе усилителя-формирователя, поэтому результирующий сигнал от шумов наводки будет компенсироваться.

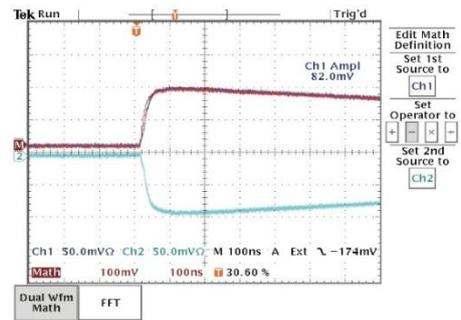
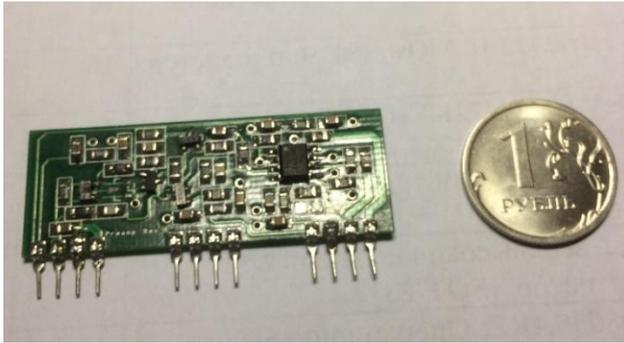


Рисунок 17. Образец зарядо-чувствительного предусилителя с парафазным выходом (слева) и осциллограмма сигналов на выходе предусилителя при подаче тестового сигнала равного 0.1 пК (справа).

Формирователь состоит из дифференциального усилителя на входе, электронного Sallen-Key фильтра и парафазного выхода. Формирователь имеет дифференциальный усилитель на входе и электронный Sallen-Key фильтр с парафазным выходом.

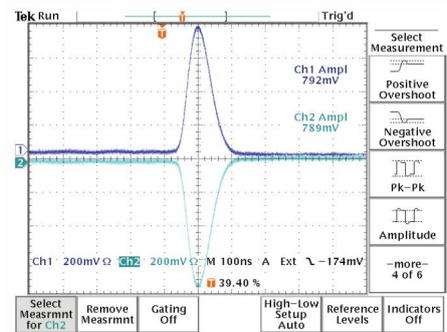
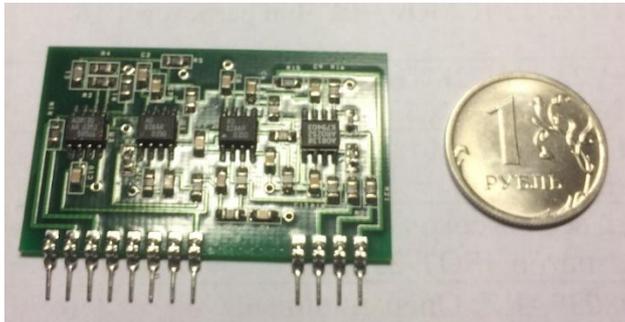


Рисунок 18. Образец формирователя с парафазным входом и выходом (слева) и осциллограмма сигналов на выходе формирователя при подаче тестового сигнала равного 0.1 пК (справа).

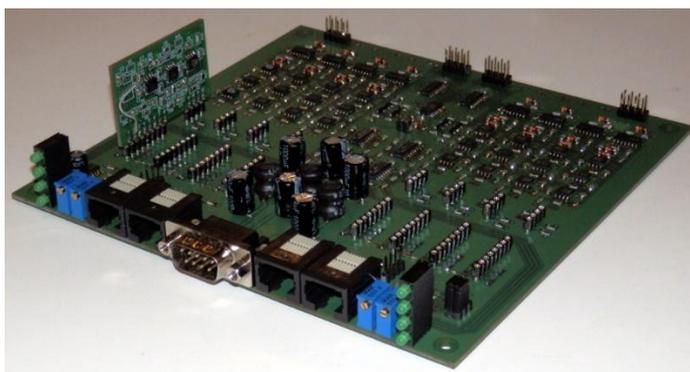


Рисунок 19. Образец материнской платы на 8 каналов. Один канал состоит из усилителя-формирователя, двух-порогового дискриминатора. Плата имеет 8 индикаторов сигнала, два логических сумматора (ИЛИ) на 4 канала и 16 парафазных выходов, рассчитанных на передачу сигналов 8 цифровых и 8 аналоговых по ethernet UTP-5E кабелю.

Разработано и изготовлено 8 каналов предусилителей и формирователей, две материнские платы электроники усиления, формирования и дискриминации сигналов с

парафазным входом/выходом для передачи на длинную линию (110 м) УТР. Проведены тестовые измерения электроники с тестовыми сигналами, имитирующими работу детекторов.

## 5. СВОЙСТВА БАРИОНОВ И ЯДЕР В ТОПОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЫХ СОЛИТОННЫХ МОДЕЛЯХ

Руководитель темы к.ф.-м.н. В.Б.Копелиович.

В 1983-1984 г. в работах Е.Виттена, Г.Адкинса и Ч.Наппи был развит революционно новый подход к описанию свойств барионов и барионных систем как топологических (киральных) солитонов эффективных лагранжианов, записываемых в терминах мезонных полей.

Этот подход, предложенный изначально Т.Скирмом ещё в 1961 г., успешно применяется для описания барионов и барионных систем в течение многих лет, вплоть до настоящего времени.

Обнаружено, что энергия квантованных конфигураций, состоящая из массы солитона и квантовой поправки, не является минимумом энергии и может быть понижена, в частности, посредством изменения размера солитона (рескейлинга). При этом масса нуклона уменьшается незначительно, масса Дельта-изобары уменьшается на 100 - 150 Мэв, что приводит к необходимости изменить параметры модели (в сторону их увеличения), которые в пионерских работах определялись именно подгонкой масс нуклона и Дельта(1232).

По-видимому, учёт рескейлинга потребует пересмотра многих результатов, полученных в топологических солитонных моделях в течение последних 30 лет.

Установлено, что рескейлинг квантованных скирмионов (то есть изменение их размеров – расширение за счёт центробежных сил, либо сжатие при связывании тяжёлого мезона, имеющего флейвор очарование, или прелесть) существенно уменьшает их энергию (массу).

Этот эффект заметен уже для нуклона и важен для Дельта-изобары (1232). Найдена существенная поправка к известной работе G.Adkins, C.Nappi, E.Witten (1983), в частности, несколько увеличиваются значения параметров модели, определённые в 1983 г. Рескейлинг существен для «очарованных» барионов, весьма важен для барионов, имеющих флейвор «прелесть», но приводит к относительно небольшим поправкам в случае странных барионов. Рассчитано влияние рескейлинга на массы пентакварков с положительной чётностью и «скрытым» флейвором (странностью, очарованием или прелестью) [1].

Совместно с Д.Е.Ланским (НИИЯФ МГУ) и И.К.Поташиковой (Университет Санта Мария, Вальпараисо, Чили) проведены расчёты спектров ядерных состояний с квантовыми числами очарование и прелесть (бьюти). Расчёты энергий связи проводятся в рамках

топологической солитонной модели. Впервые изучается влияние на энергию связи изменения масштаба всего скирмиона (сжатия или расширения как целого).

В ряде случаев получены отрицательные результаты, то есть отсутствие связанности барионных систем (ядер). См. Публикации.5.

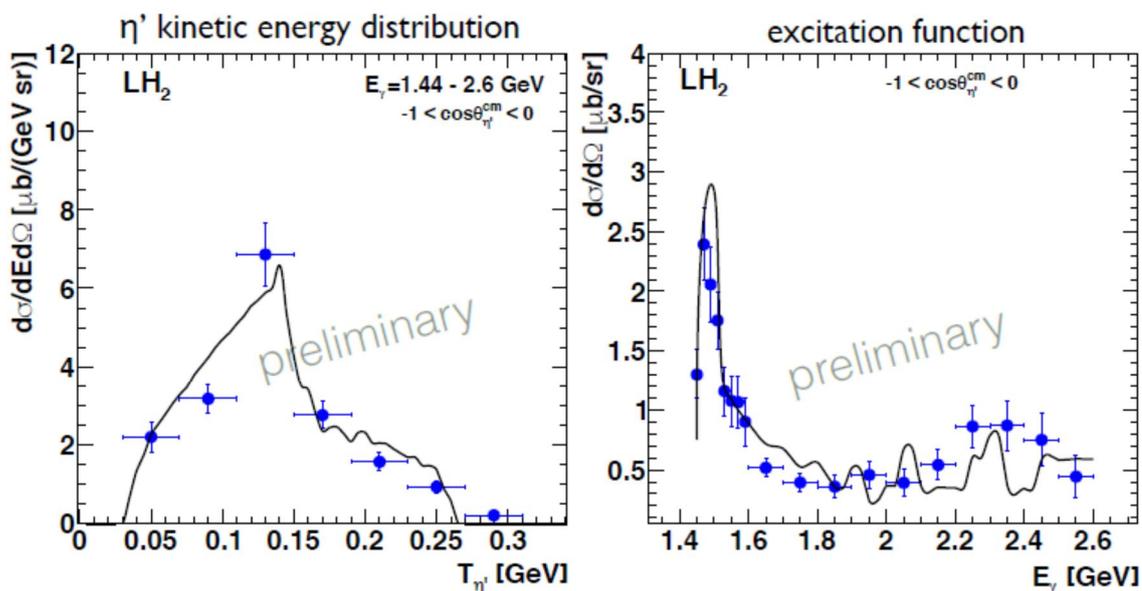
## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДПОРОГОВОГО РОЖДЕНИЯ ЛЁГКИХ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ И ЗАРЯЖЕННЫХ КАОНОВ В ПРОТОН И ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Руководитель темы д.ф.-м.н. Э.Я.Парьев.

Свойства  $\eta'$ - мезонов в ядерной среде. Для контроля правильности выполненного мной анализа экспериментальных данных по рождению  $\eta'$  мезонов на ядре углерода в эксклюзивной реакции  $(\gamma, \eta'p)$ , изученной коллаборацией CBELSA/TAPS на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), были выполнены расчеты спектров и функций возбуждения  $\eta'$  мезонов на жидководородной мишени в кинематических условиях соответствующего эксперимента, проведенного данной коллаборацией на этом ускорителе. Проведено сравнение результатов этих расчетов с полученными экспериментальными данными на свободном протоне. Пример такого сравнения показан на прилагаемом ниже рисунке 20. Он подтверждает достоверность методики анализа изучаемой реакции на ядре углерода, а также достоверность вывода о модификации свойств  $\eta'$  мезонов в ядерной среде, сделанного на основе выполненного анализа.

### LH<sub>2</sub>: $\eta'$ -p coincidences

calculations: E. Paryev, J. Phys. G 43 (2016) 015106 and priv. comm.  
based on inclusive CBELSA/TAPS data: V. Crede et al. PRC 80 (2009) 055202



reasonable agreement with calculations; test of analysis procedure

Рисунок 20. Сравнение расчётов с экспериментальными данными на свободном протоне.

Результаты данной работы докладывались на заседании Немецкого физического общества (DPG meeting) – Мюнстер, 30 марта 2017 г. Статья направлена в журнал Eur. Phys. J. A.

Свойства  $J/\psi$ - мезонов в ядерной среде. Для нужд планируемого эксперимента CBM на ускорительном комплексе FAIR (Германия) впервые были получены предсказания для импульсной зависимости абсолютных сечений рождения  $J/\psi$  мезонов в протон-ядерных реакциях при околопороговых и подпороговых начальных энергиях протонов (8-23 ГэВ). Для этого была разработана соответствующая физическая модель, учитывающая как поглощение  $J/\psi$  мезонов в ядерном веществе, так и ренормализацию их массы в ядерной материи, предсказываемой современными, основанными на КХД адронными моделями. Проведены соответствующие численные расчеты, которые показали (см. рис. 21 ниже), что из данных по импульсной зависимости абсолютных сечений рождения  $J/\psi$  мезонов на ядрах, полученных в области малых импульсов при околопороговых начальных энергиях протонов, можно достаточно надежно определить величину сдвига массы  $J/\psi$  мезонов в ядерной среде, представляющего в настоящее время значительный интерес.

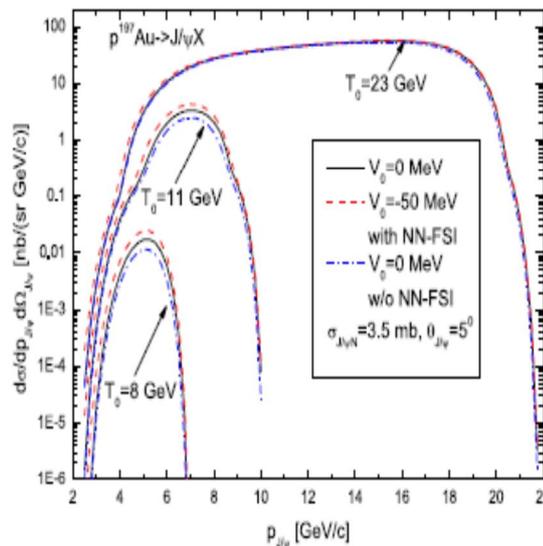
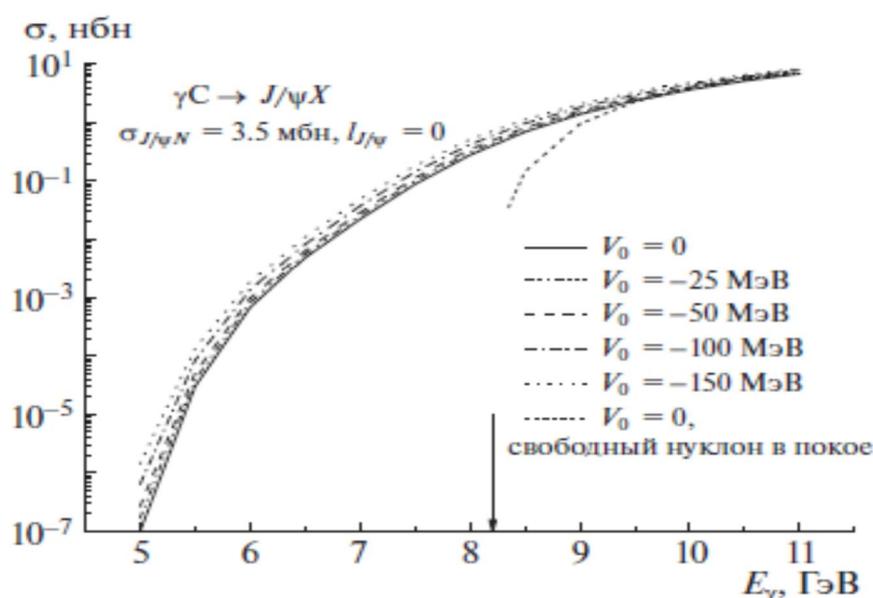


Fig. 3. (Color online.) Double differential cross section for production of  $J/\psi$  mesons from primary  $pN \rightarrow pNJ/\psi$  reactions proceeding on off-shell target nucleons for protons of kinetic energies  $T_0 = 8, 11$  and  $23$  GeV incident on Au target nucleus. The curves are calculations for  $\sigma_{J/\psi N} = 3.5$  mb and outgoing  $J/\psi$  laboratory angle  $\theta_{J/\psi} = 5^\circ$  with an in-medium  $J/\psi$  mass shift of  $V_0 = -50$  MeV at normal nuclear matter density and without it as well as with and without elementary NN-FSI effects.

Рисунок 21. Расчёт абсолютных сечений рождения  $J/\psi$  мезонов на ядрах.

Проведенные исследования дополнительно показали (см. рис. 22 ниже), что из данных по функциям возбуждения  $J/\psi$  мезонов на ядрах в фотоядерных реакциях, полученным в подпороговой области энергий первичных фотонов (5-8 ГэВ), также можно извлечь важную и актуальную в настоящее время информацию о возможном сдвиге массы  $J/\psi$  мезона в ядерной среде.

Знание этого сдвига важно, как для понимания механизма генерации масс мезонов со скрытым чармом в QCD, так для понимания различных аспектов “in-medium” адронной физики.



**Рис. 5.** Функция возбуждения реакции образования  $J/\psi$ -мезонов на ядре  $^{12}\text{C}$ , рожденных в прямых процессах  $\gamma N \rightarrow J/\psi N$  на немассовых ядерных нуклонах и на свободных покоящихся нуклонах. Расчеты выполнены при значениях  $\sigma_{J/\psi N} = 3.5$  мбн и  $l_{J/\psi} = 0$  и при различных предположениях о сдвиге массы  $J/\psi$ . Стрелкой указана пороговая энергия фоторождения  $J/\psi$  на свободном нуклоне.

Рисунок 22. Функция возбуждения  $J/\psi$  мезонов на ядрах.

Результаты этого исследования опубликованы в работах 1 и 2, указанных в прилагаемом ниже списке публикаций.

Совместно с немецкими коллегами (Profs. V. Metag, M. Nanova) подготовлен к публикации обзор “Meson-nucleus potentials and the search for meson-nucleus bound states” (его аннотация прилагается ниже) в один из самых высокорейтинговых физических журналов Progress in Particle and Nuclear Physics (Impact Factor 2016/2017-11.229), так и его публикация

здесь (объем 62 стр, 67 рис.), см. работу Публикации.6.3 в прилагаемом ниже списке публикаций.

Данный обзор легкодоступен, так как он также “выложен” в архив, см. работу 4 в прилагаемом ниже списке публикаций.

Обзор получил весьма хорошие отзывы от ведущих ученых в данной области исследований (из Германии, Испании, Австрии, Израиля, Японии) и по информации из поисковой системы Research Gate уже востребован.

Изучение  $\Lambda$  гиперон-ядерного оптического потенциала. Продолжено теоретическое изучение эксклюзивного рождения  $\Lambda$  гиперонов совместно с  $K(+)$  мезонами в  $pA$ -столкновениях при энергии пучка 2.83 ГэВ на основе разработанной нами соответствующей модели протон-ядерного взаимодействия.

Цель этой работы - определение импульсной зависимости  $\Lambda$ -ядерного оптического потенциала (его вещественной части) при импульсах порядка 0.5--1 ГэВ/с из анализа данных, полученных в эксперименте на ускорителе COSY Коллаборацией ANKE (Юлих, Германия) в рамках российско-германского научного сотрудничества. Современные теоретические подходы (см., например, M. Kohno, PRC 81 (2010) 014003; D. Cabrera et al., PRC 90 (2014) 055207; S. Petschauer et al., EPJA 52 (2016) 15), использующие различные версии элементарного  $YN$  взаимодействия дают для этой зависимости существенно различающиеся предсказания.

Поэтому, её экспериментальное извлечение из сравнения результатов расчётов с ожидаемыми экспериментальными данными представляется в настоящее время крайне важным как для понимания  $\Lambda$ - $N$  взаимодействия при конечных импульсах, так и для проверки предсказаний соответствующих теоретических подходов. На основе нашей модели были рассчитаны как абсолютные, так и относительные сечения изучаемой реакции на ядрах C, Si, Ag, Au в различных предположениях о величине центральной части  $\Lambda$ - $A$  ядерного скалярного потенциала и в кинематических условиях данного эксперимента. Примеры таких расчетов показаны на прилагаемых ниже рисунках 23 и 24. Из них, в частности, следует, что наибольшая чувствительность к этому потенциалу ожидается в самой “мягкой” части совпадательных спектров  $\Lambda$ -гиперонов.

Эта информация крайне важна для правильного разбиения изучаемого диапазона импульсов  $\Lambda$ -гиперонов на бины в анализе полученных данных с целью извлечения величины реальной части  $\Lambda$ - $A$  потенциала при импульсах порядка 0.5-0.7 ГэВ/с.

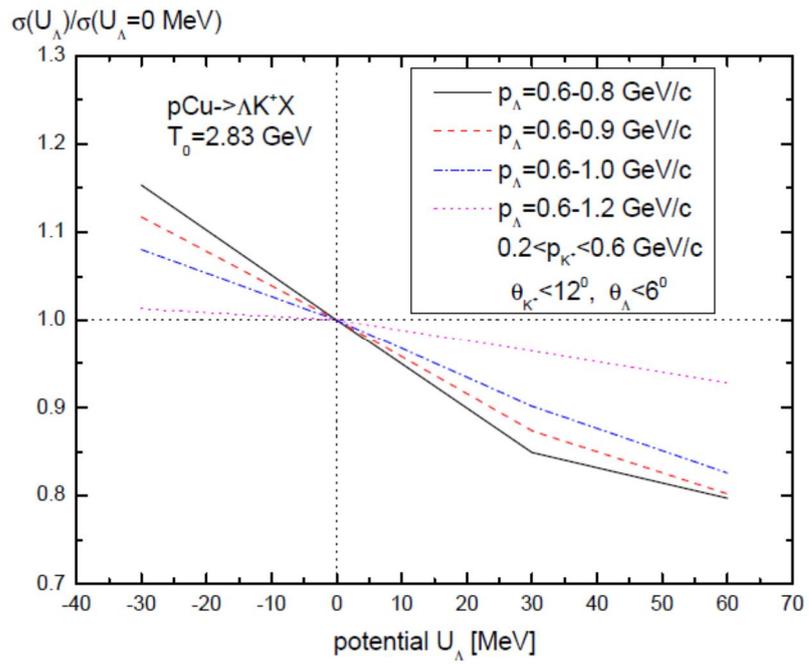


Рисунок 23.

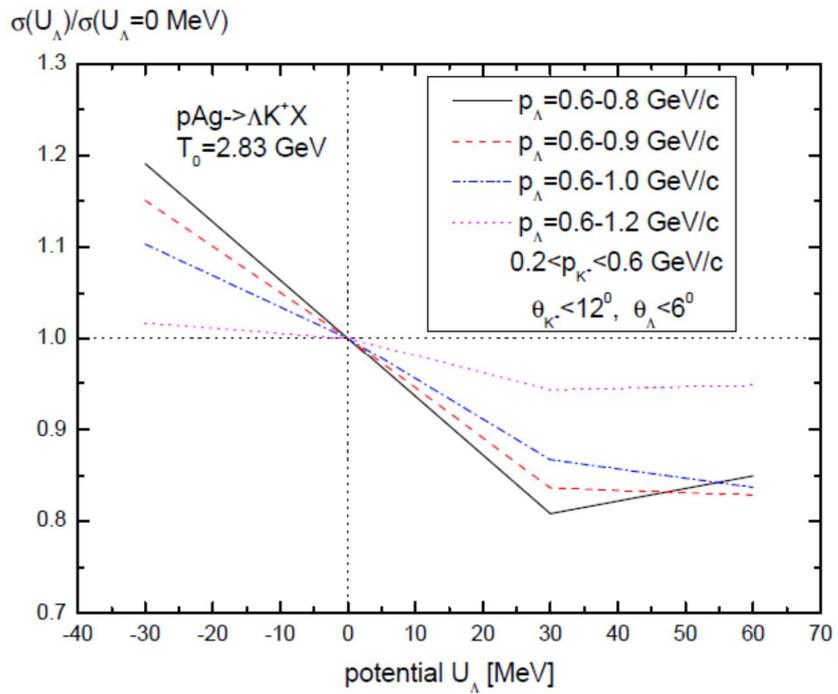


Рисунок 24.

Результаты проделанной работы опубликованы в статье Публикации.6.5.

## 7. ОСЦИЛЛЯЦИИ ЧАСТИЦ В ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ.

Предыдущие расчеты, основаны на старой модели процесса, которая исходит из несвязных уравнений движения. Показано что это является принципиальной ошибкой, которая приводит к качественному расхождению результатов. Нами предложен принципиально новый подход. В работах [Публикации.7.1,2] используется теория возмущений. Работы, выполненные в 2016 г. основаны на точном решении системы связанных уравнений движения. В работах [Публикации.7.3,4] показано, что оба подхода дают одинаковые результаты. В настоящее время препринт [Публикации.7.4] принят к публикации в рецензируемом зарубежном журнале с импакт фактором 5,1.

## 8. СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ КАОНОВ, ГИПЕРОНОВ И ГИПЕРЯДЕР В АННИГИЛЯЦИИ АНТИПРОТОНА НА ЯДРАХ

Модель аннигиляции антинейтронов для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций.

Для описания аннигиляции медленных антинейтронов на ядре углерода для эксперимента по поиску осцилляций в потоке свободных нейтронов на пучке ESS (NNbar Collaboration at European Spallation Source, LUND, Sweden) используется оптико-каскадная модель, впервые предложенная в работе [Публикации.8.5]. Поглощение медленного антинейтрона описывается в рамках оптической модели. Для описания процесса аннигиляции антинейтрона на внутриядерном нуклоне используется комбинация экспериментальных данных статистической модели с SU(3) симметрией. Распространение в ядре аннигиляционных пионов и мезонных резонансов описывается в рамках модели внутриядерного каскада, учитывающей нелинейный эффект уменьшения плотности ядра. Процесс девозбуждения описывается комбинацией испарительной модели и модели Фермиевского взрывного развала. Такой подход демонстрирует хорошее согласие с экспериментальными данными при моделировании аннигиляции остановившихся антипротонов на ядре углерода и позволяет надежно предсказать характеристики процесса поглощения медленного антинейтрона.

В рамках NNbar коллаборации совместно с университетом Теннеси (США) ведется работа над созданием генератора для моделирования событий аннигиляции медленных антинейтронов на углеродной мишени. С использованием разработанной программы, описывающей аннигиляцию медленных антинейтронов на ядрах углерода, созданы файлы с событиями для дальнейшего использования при проектировании детектора для готовящегося эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций.

Ведётся работа над моделью для описания процесса аннигиляции антинейтронов, образовавшихся в результате  $n \rightarrow \bar{n}$  перехода в ядре Ar для эксперимента DUNE. Однако, в случае поиска  $n \rightarrow \bar{n}$  перехода внутри ядра (например  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ) для создания корректной модели необходимо определить радиальную зависимость плотности вероятности  $n \rightarrow \bar{n}$  перехода.

По результатам подготовлена публикация с описанием статистической модели аннигиляции антинейтронов для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций [Публикации.8.6].

## 9. ИЗУЧЕНИЕ РЕДКИХ РАСПАДОВ В-МЕЗОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ LHCb

Основная цель эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах В-мезонов. В 2017 году в период июнь – декабрь эксперимент БАК-би уже набрал 1.71/фб интегральной светимости, что сравнимо с набранной светимостью за тот же период 2016 г. Энергия столкновений по сравнению с 2010-2011 г.г. увеличилась с 3.5 до 6.5 ГэВ. Пиковая светимость установлена на уровне  $4 \cdot 10^{32}$  см<sup>-2</sup>\*сек<sup>-1</sup>, что соответствует оптимальному режиму набора данных. Возросла загрузка каналов сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов. Кроме набора новых данных эксперимент LHCb в 2017 г. продолжил работу в области обработки ранее набранных данных, получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями.

Среди важнейших результатов, полученных LHCb в 2017 году можно выделить следующие:

Наиболее точное измерение СКМ угла  $\gamma$  из комбинации  $B \rightarrow DK$  распадов [Публикации.9.74].

В LHCb выполнено обновление результата по измерению на древесном уровне угла  $\gamma$  матрицы смешивания СКМ из комбинации  $B \rightarrow DK$  распадов. Используя этот результат в комбинации с другими измерениями LHCb, значение угла смешивания оказывается равным  $\gamma = (76.8 \pm 5.1 - 5.7)^\circ$ . Полученный результат является наиболее точным измерением в отдельном эксперименте в мире и дает важный вклад в глобальный фит параметров СКМ матрицы.

Первое наблюдение распада  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  в одном эксперименте [Публикации.9.75].

Впервые LHCb коллаборация представила результат наблюдения сигнала от распада  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  на уровне  $3.5\sigma$  в 2012 г. Затем в 2015 г. был опубликован совместный с CMS результат наблюдения на уровне  $6.2\sigma$ . Теперь, после обработки новых данных, впервые достигнуто наблюдение распада на уровне  $7.8\sigma$  в отдельном эксперименте. Измеренная величина вероятности распада  $(3.0 \pm 0.6 + 0.3 - 0.2) \times 10^{-9}$  совпадает с предсказаниями Стандартной Модели. Точность результата позволяет отсеять многие модели расширения и сфокусировать будущие поиски Новой Физики.

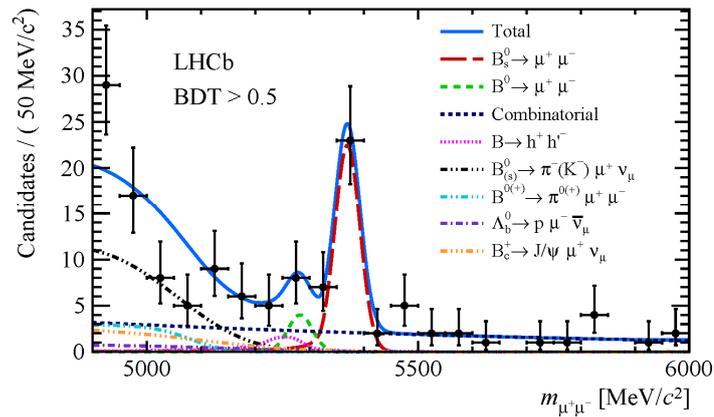


Рисунок 25. Результаты измерений масс пар  $\mu^+\mu^-$  мезонов в LHCb за 2011-2016 г.г.

Тест «лептонной универсальности» используя полулептонные  $\tau$ -распады  $B^0$  и впервые  $B_c$  мезонов [Публикации.9.76-77].

«Лептонная универсальность» означает тот факт, что в Стандартной Модели СМ разные лептоны взаимодействуют идентично. Наиболее свежий результат, доложенный LHCb, описывает измерение величины отношения вероятностей распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu$ . Результат  $R(J/\psi) = 0.71 \pm 0.17 \pm 0.18$  отличается от предсказаний СМ на 2 стандартных отклонения. Кроме того, это первое измерение ( $3\sigma$ ) полулептонного  $\tau$  – распада «чарм»-«бьюти» мезонов. Также недавно доложен результат по измерению величины отношения вероятностей распадов  $B^0 \rightarrow D^* \tau^+ \nu_\tau$  и  $B^0 \rightarrow D^* \mu^+ \nu_\mu$ .

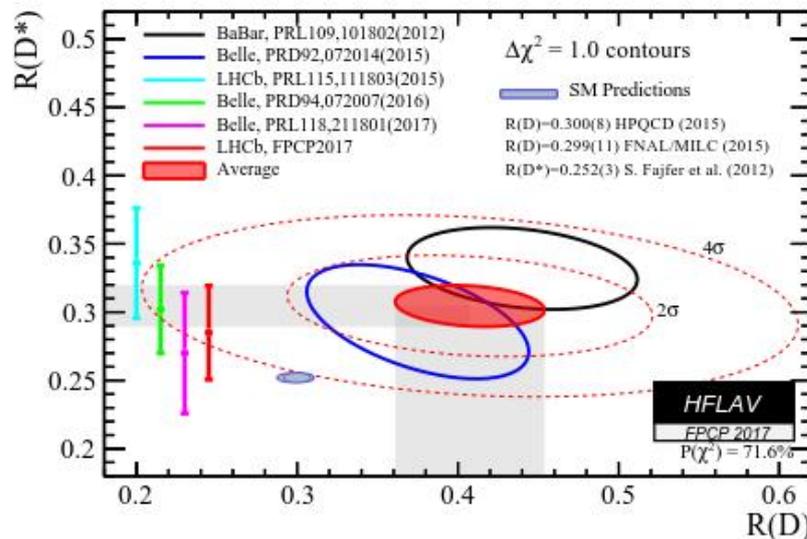


Рисунок 26. Полученное значение  $R(D^*) = 0.306 \pm 0.026$  также отличается от предсказаний СМ, как показано на рисунке. Интересно отметить, что разные эксперименты используют разные методики и разные пучки, LHCb –  $pp$ , Belle и BaBar –  $e^+e^-$ , но результаты отклоняются от предсказаний в одну сторону. Это придает еще больший интерес к дальнейшему изучению этих распадов.

Тест «лептонной универсальности» используя распады  $B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$  [Публикации.9.78].

Анализ охватывает данные p-p соударений, светимостью 3/fb, при энергиях 6.5 и 7 ТэВ. Чтобы минимизировать систематические ошибки, измерялась величина двойного отношения  $R(K^*) = [B(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-) / B(B^0 \rightarrow K^{*0} J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-))] / [B(B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-) / B(B^0 \rightarrow K^{*0} J/\psi (\rightarrow e^+ e^-))]$ .

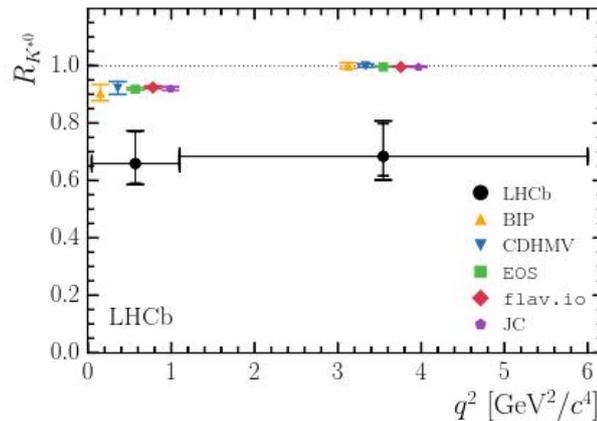


Рисунок 27. Измеренное значение  $R(K^*)$  оказалось меньше предсказанного теорией на 2.1-2.5  $\sigma$ , как показано на рисунке. Полученные результаты создают большую мотивацию для будущих исследований.

Наиболее точное измерение параметров резонансов  $\chi_{c1}$  и  $\chi_{c2}$  [Публикации.9.79].

LHCb коллаборация представила результат измерений масс  $\chi_{c1}$  и  $\chi_{c2}$  мезонов, используя впервые наблюдаемый каскадный распад  $\chi_{c1,2} \rightarrow J/\psi \gamma^*$ ,  $\gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Оба  $\chi_{c1}$  и  $\chi_{c2}$  и  $J/\psi$  составлены из пар c- кварков, связанных сильными взаимодействиями. Они отличаются разными значениями спинов и углового момента. Точное измерение массы и ширины «чармониевых» состояний поможет уточнить модельные расчеты в рамках квантовой хромодинамики. Полученные результаты сравнимы по точности и находятся в хорошем согласии с лучшими предыдущими измерениями E760 и E835, выполненными по другим методикам.

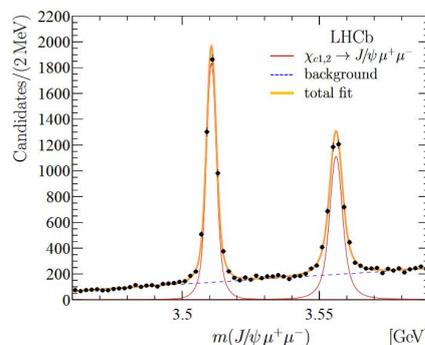


Рисунок 28. Результаты измерений масс  $\chi_{c1}$  и  $\chi_{c2}$  мезонов в распаде в  $(J/\psi \mu^+ \mu^-)$ .

Первое наблюдение наиболее редкого распада  $B^0$  мезона [Публикации.9.80].

В LHCb произведено первое в мире наблюдение распада  $B^0 \rightarrow p\bar{p}$  на уровне достоверности 5.3 стандартных отклонений. Данная мода распада происходит с вероятностью  $(1.25 \pm 0.27 \pm 0.18) \times 10^{-8}$ . Этот результат поможет понять динамику адронных распадов и уточнить модельные расчеты в рамках квантовой хромодинамики. Спектр  $p\bar{p}$  масс показан на рисунке ниже.

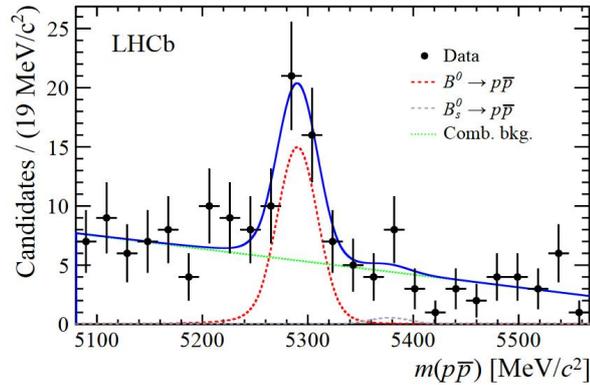


Рисунок 29. Спектр  $p\bar{p}$  масс.

Модернизация калориметрической системы.

Модернизированный детектор БАК-би должен будет работать при жестких условиях повышенной энергии и нагрузках: энергия встречных пучков  $\sqrt{s} = 14$  ТэВ; мгновенная светимость  $1033 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ , при временном интервале между соседними сгустками протонов 25 нсек и среднем числе взаимодействий на одно пересечение сгустков  $\mu=2$ . Планируемая интегральная светимость -  $5 \text{ fb}^{-1}$  за год и  $50 \text{ fb}^{-1}$  за весь период эксплуатации. При этом существенно возрастают требования к быстродействию и радиационной стойкости электроники и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) калориметров. На электромагнитном калориметре обнаружилась потеря пропускания пластиковых оптических волокон калибровочной системы из-за радиационных повреждений. Было принято решение заменить их (6000 шт) на радиационно-стойкие кварцевые. Сотрудники ИЯИ РАН принимали участие в работах по подготовке к замене оптоволокон, в том числе – отборе светодиодов для замены из партии в 1000 шт.

Замена фотоумножителей в адронном и электромагнитном калориметрах. Для адронного калориметра была выявлена проблема старения фотоумножителей, когда ток резко возрастает с ростом загрузки. Были выявлены характерные для некондиционных фотоумножителей зависимости анодного тока со временем. По результатам измерений было принято решение и закуплены в начале 2017 г. дополнительные фотоумножители в количестве 500 шт. Поскольку предполагаются измерения на долговременную стабильность, что потребует больших затрат времени, было принято решение о создании автоматизированного

измерительного стенда, позволяющего проводить измерения с 12 фотоумножителями одновременно. После распайки на постоянные делители и перед установкой на калориметр потребуется дополнительная проверка фотоумножителей в сборе с делителями. В совокупности подготовка 500 фотоумножителей к установке на калориметр может потребовать 3-4 месяца работы. Сотрудники ИЯИ РАН приняли участие в создании такого автоматизированного измерительного стенда. Составные части стенда: автоматизированная система сбора информации, блоки питания с электроникой регистрации сигналов и светоизолирующий ящик с посадочными местами для установки фотоумножителей.

Обеспечение работоспособности сцинтилляционно-падового и предливневого детектора в процессе набора данных в 2017 г.

Вкладом ИЯИ РАН в разработку эксперимента БАК-би являлось создание составляющей части калориметрической системы – сцинтилляционно-падового и предливневого детекторов. Основной задачей, стоящей перед членами коллаборации БАК-би после запуска установки, является обеспечение бесперебойной работы всех детекторов установки и эффективный набор физических данных. Сотрудники ИЯИ РАН принимают участие в наборе и контроле качества данных калориметрической системы установки БАК-би, изучении характеристик и операционном контроле предливневого и сцинтилляционно-падового детекторов, дежурствах на установке в качестве начальника смены и дежурного по калориметрической системе, так и в другое время в случае необходимости замены аппаратных частей.

Так, например, на предливневом детекторе были заменены модули электроники, которые показали неустойчивую работу. На сцинтилляционно-падовом детекторе работы проводились на регуляторах низковольтного напряжения и был заменен модуль входной электроники VFE50, отвечающий за регистрацию информации с элементов детектора в центральной части. Эта область особенно важна для регистрации событий с малой множественностью. Кроме того, была произведена замена шестидесяти фотодетекторов (сборок ФЭУ+делитель Кокрофт-Уолтона) на адронном калориметре. На электромагнитном калориметре основной проблемой были плохие контакты на фотоумножителях (~30 штук) и светодиодах калибровочной системы (~3 шт). Деградивовавшие фотоумножители должны быть заменены, для этого на фирме Хамаматцу (Hamamatsu, Япония) было заказано 500 однотипных с используемыми в настоящий момент на калориметрах установки БАК-би фотоумножителей. Первая партия из 50 штук была получена и проверена на подготовленном для этого стенде.

Большое количество каналов современных установок требует очень большого количества кабелей, и соответствующего количества разъёмов, на которых - в случае неполного контакта – могут происходить дополнительные искажения данных. Это может приводить,

например, к перегрузке карт считывания данных TELL1 – как в результате плохой синхронизации, так и неправильного конфигурирования. Так, например, в результате тщательной проверки в апреле 2017 г. было обнаружено, что некоторые порты гигабайтных линий связи на карте предливневого детектора PSTELL01 и на карте адронного калориметра HSTELL04 не включены вовсе.

Всего до конца мая были заменены:

карта входной электроники VFE50 сцинтилляционно-падового детектора;

карта считывания предливневого детектора PSTELL01;

модуль входной электроники предливневого детектора PRS0FEB7;

карта считывания электромагнитного калориметра ESTELL1;

карта оптической связи модуля считывания крейта CROC;

карта электроники ZA2258 многоанодного ФЭУ, соответствующая модулю входной электроники PS4FEB14 предливневого детектора;

модуль управления светодиодами калибровочной системы предливневого детектора LEDTSTB2;

карта считывания электромагнитного калориметра ESTELL19.

В июле 2017 г. были заменены модули предливневого детектора PS1FEB09 и PS4FEB17. В сентябре 2017 г. были заменены модули EC10FEB10 электромагнитного калориметра и HC22FEB09 адронного. Появление аппаратных ошибок могло быть вызвано аварийной потерей напряжения питания на установке в сентябре 2017 г.

В целом калориметрическая система установки БАК-би демонстрирует устойчивую работу с уровнем неисправностей заметно ниже, чем в 2016 г.

За время командировок в 2017 году сотрудники ИЯИ РАН отдежурили 19 дней в качестве начальника смены и 28 дней в качестве дежурного по калориметрической системе.

Предливневый детектор устроен аналогично сцинтилляционно-падовому детектору с одним отличием, что размеры ячеек чуть больше из-за проективной геометрии всей установки. Так как предливневый детектор расположен после свинцового конвертора, по сигналу в предливневом детекторе можно отличить электромагнитные частицы от адронов на уровне триггера L0. Для этого происходит оцифровка сигнала с помощью электронных преобразователей ЦАП, и сравнение полученных амплитуд сигналов с пороговыми значениями. Величина порогов получается из предварительной калибровки на данных, и требует периодической проверки для возможной корректировки эффектов старения элементов детектора и ФЭУ. Очередную калибровку планируется выполнить в начале 2018 г.

В целом, в 2017 г. предливневый детектор отработал достаточно гладко. Одним из заметных вопросов, который удалось решить – точная подстройка фаз оцифровки амплитуд с

электромагнитного калориметра по отношению к входам карт передней электроники предливневого детектора, PS2FEB07 и PS2FEB17. Сдвигка фаз на 1 нсек позволила снизить частоту ошибочных срабатываний триггера L0 от электромагнитных триггеров с величины 10-4 до уровня  $1.5 \cdot 10^{-6}$ , что соответствует уровню ошибок адронного триггера.

#### Калибровка сцинтилляционно-падового детектора.

Учет сигналов сцинтилляционно-падового детектора совместно с выделением сигналов от ливня в калориметрах и последующая обработка данных позволяет решить многие задачи по разделению нейтральных и заряженных частиц,  $\gamma$ -квантов, электронов и адронов. Кроме этого учет количества сработавших ячеек позволяет на уровне триггера принять решение о последующей обработке/отбраковке данного события. Например, отбраковывать события с большой множественностью выгодно ввиду значительного компьютерного времени, требуемого на их обработку. Ввиду того, что условия работы сцинтилляционно-падового детектора в эксперименте сопряжены с высокой загрузкой и радиационным облучением, многие элементы детектора подвергаются деградации основных характеристик. Многоканальные (мультианодные) фотоумножители подвержены уменьшению чувствительности фотокатода и усиления вследствие аккумулированного фототока. Для того, чтобы компенсировать падение усиления ФЭУ, приходится периодически поднимать высокое напряжение. В 2017 году был выполнен подъем напряжения на мультианодных ФЭУ. Диапазон приращения напряжения до +30V.

Старение элементов детектора и ФЭУ приводит к уменьшению амплитуд сигналов во время работы эксперимента. Для того, чтобы компенсировать эти потери, необходимо периодически проводит калибровку каналов электроники методом сканирования порогов дискриминаторов. Для этого при значениях порогов 0.3,0.5,0.8,1,1.5,2.0 MIP производится набор статистики с заряженными треками, 15M треков для каждого значения порога. В конце процедуры высокое напряжение на ФЭУ выставляется так, чтобы достичь 95% эффективности. Такая калибровка позволяет скорректировать уменьшения сигналов путем соответствующего уменьшения относительной величины порогов. Фитирование кривых эффективности регистрации позволяет:

оценить среднюю величину сигнала от минимально-ионизирующей частицы  
сравнить эту величину с предыдущей калибровкой и получить коэффициент коррекции.

по форме распределения оценить световыход ячеек, т.е. среднее количество фотоэлектронов, получаемых при прохождении MIP через ячейку.

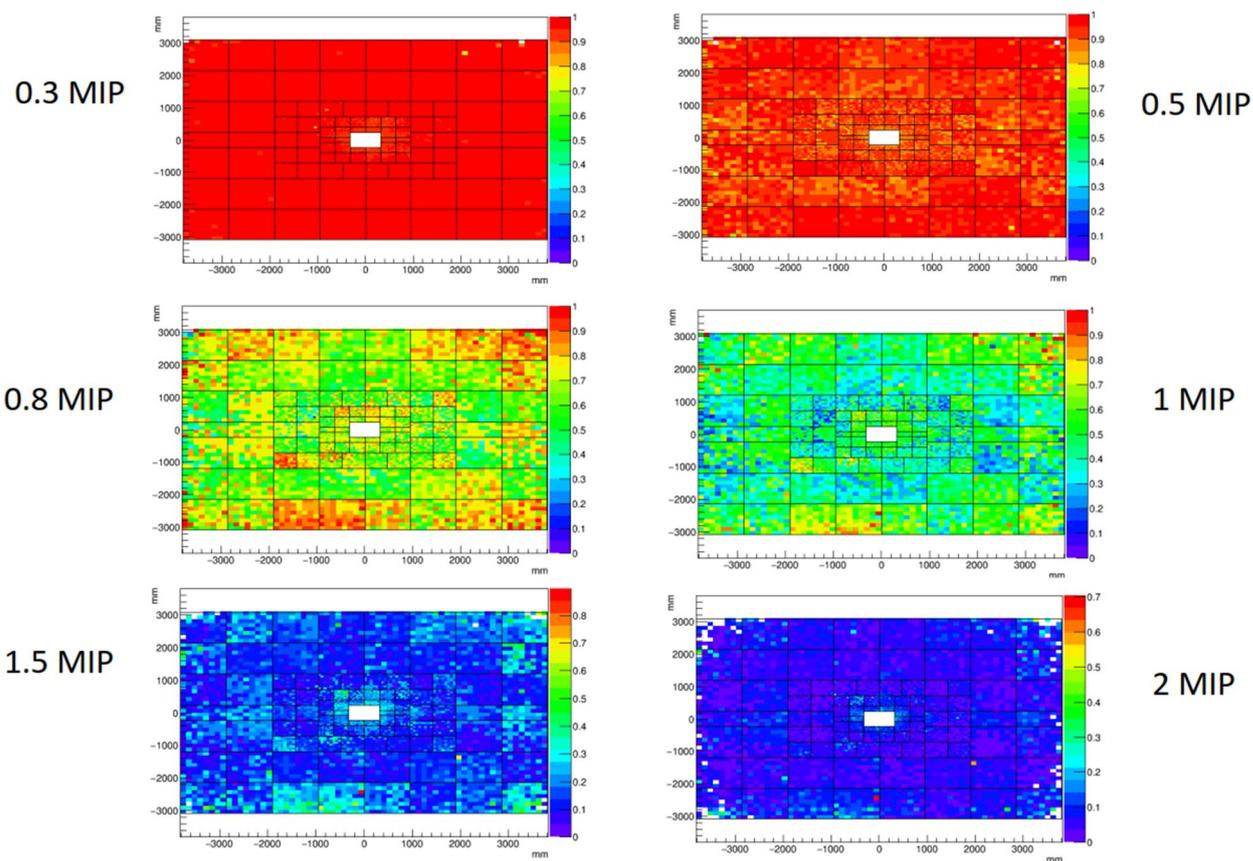


Рисунок 30. Показаны эффективности ячеек сцинтилляционно-падового детектора, измеренные в 2017 г., при разных порогах регистрации: 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5 и 2 амплитуды сигнала от MIP.

В целом, эффективность детектора после калибровки и коррекции высокого напряжения остается на хорошем уровне. Средняя эффективность всего детектора 94%, отдельно по зонам – 91, 95, 96% для внутренней, средней и внешней зон. Эффективность зон детектора была изучена в августе 2017 г.

Таблица 2. Сводные данные по эффективности сцинтилляционно-падового детектора за все время эксплуатации с 2010 г. по 2017 г.

	Inner	Middle	Outer	'average'	Int Lumi (fb <sup>-1</sup> )	
June 2011	91.9%	94.6%	95.7%	94%	0.6	
April 2012	91.5%	94.3%	94.9%	94%	1.1	
November 2012	83.9%	88.7%	91.6%	88%	3.2	
October 2015	86.8%	92.4%	94.0%	91%	+ 0.3	Run II starts
May 2016	92.1%	94.0%	95.3%	94%	+ 0.1	Correction applied (Nov 2015)
August 2016	89.9%	91.1%	93.1%	92%	1.2	
October 2016	89.0%	90.3%	92.6%	91%	1.9	
August 2017	90.7%	95.5%	95.7%	94%	+0.7	Correction applied (Jul 2017)

Как видно из таблицы, калибровка и последующая коррекция усиления фотоумножителей позволяет поддерживать эффективность детектора на высоком уровне ~94%. Эффективность в средней и внешней зонах детектора остается на уровне 96%, во внутренней части эффективность чуть ниже, возможно из-за повышенной загрузки и более интенсивных эффектов старения.

В качестве заключения по калибровке и текущей эффективности сцинтилляционно-падового детектора можно отметить:

Эффективность в средней и внешней зонах детектора остается на достаточно высоком уровне ~96%.

Эффективность во внутренней части чуть ниже, возможно из-за повышенной загрузки и более интенсивных эффектов старения.

Периодическая подстройка величин порогов в регистрирующей электронике позволяет корректировать потери амплитуды сигналов, вызванных старением элементов детектора. Следующая калибровка сцинтилляционно-падового детектора и корректировка величин порогов планируется в 2018 г.

## 10. ЭКСПЕРИМЕНТ CMS

Произведен поиск правого  $W_R$ -бозона и тяжёлого нейтрино в событиях, содержащих один электрон или мюон, один распадающийся на адроны тау- лептон и как минимум две адронные струи. Получены новые ограничения на массу  $W_R$ -бозона и массу тяжелого нейтрино. Для случая, когда масса тяжелого нейтрино равна половине массы правого нейтрино, правый  $W_R$ -бозон с массой 2900 ГэВ и меньше исключен.

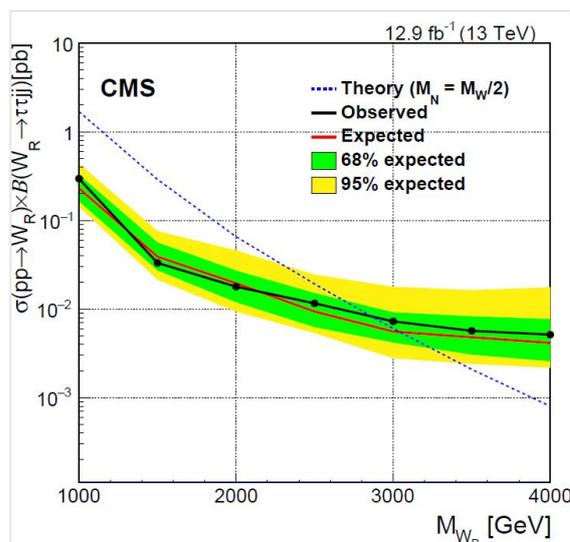


Рисунок 31. Ограничения на массу  $W_R$ -бозона и массу тяжёлого нейтрино.

Продолжены измерения отношения сечений инклюзивных двухструйных событий к выходу двухструйных событий как функции относительной быстроты между струями с вето на дополнительные струи по поперечному импульсу с использованием данных при 2,76, 7 и 8 ТэВ. Новая наблюдаемая - отношение двухструйных сечений (К-фактор) с применением вето на рождение дополнительных струй значительно усиливает чувствительность к вкладу эффектов асимптотического поведения КХД.

На рисунке 32 показаны отношения сечений двухструйных событий: инклюзивных событий к «эксклюзивным» как функция интервала быстроты между струями для струй с  $p_T \text{ min} = 35$  ГэВ (левая колонка) при 2,76 ТэВ. На нижнем ряду показаны относительные величины для предсказаний ГЛАПД-генераторов. На рисунке 33 показано то же самое, только для частного случая инклюзивного события, когда учитывается только пара струй с максимальным разделением по скорости (пары струй Мюллера-Навеле). Из рисунков видно, что как и в случае 7 ТэВ «К-фактор» и при 2,76 ТэВ описывается ГЛАПД-генератором РУТНІА, однако при наложении вето на образование дополнительных струй в случае «эксклюзивных» событий, ни один из ГЛАПД-генераторов уже не описывает данные.

Таким образом, получено еще более яркое указание на возможное проявление эффектов асимптотического поведения КХД (БФКЛ-эффекты) в образовании адронных струй на БАК.

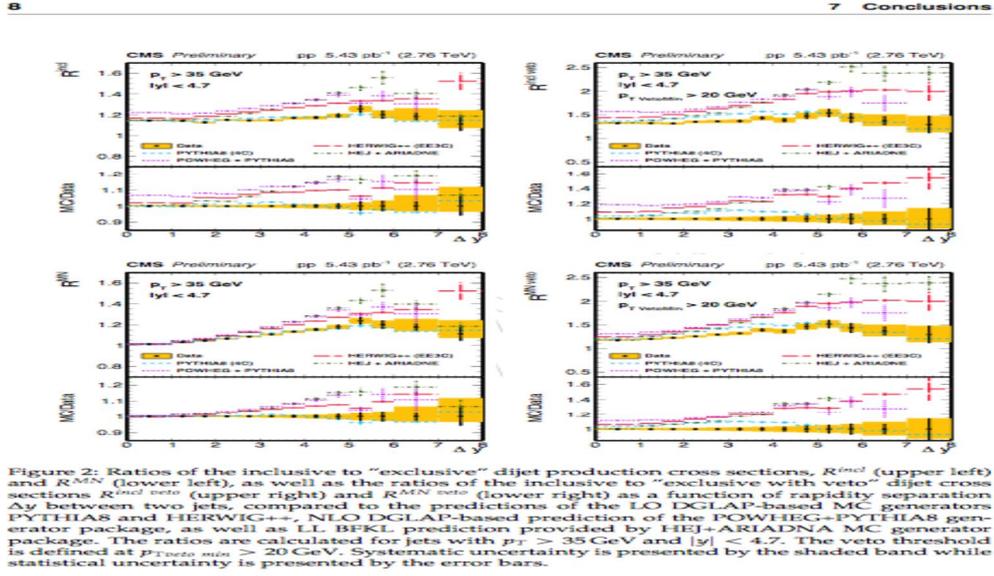


Figure 2: Ratios of the inclusive to “exclusive” dijet production cross sections,  $R^{incl}$  (upper left) and  $R^{MN}$  (lower left), as well as the ratios of the inclusive to “exclusive with veto” dijet cross sections  $R^{incl veto}$  (upper right) and  $R^{MN veto}$  (lower right) as a function of rapidity separation  $\Delta y$  between two jets, compared to the predictions of the LO DGLAP-based MC generators PYTHIA8 and HERWIG++, NLO DGLAP-based prediction of the POWHEG+PYTHIA8 generator package, as well as LL BFKL prediction provided by HEJ+ARIADNE MC generator package. The ratios are calculated for jets with  $p_T > 35$  GeV and  $|y| < 4.7$ . The veto threshold is defined at  $p_{T veto min} > 20$  GeV. Systematic uncertainty is presented by the shaded band while statistical uncertainty is presented by the error bars.

Рисунок 32. Отношение сечений двухструйных событий («К-фактор») при 2,76 ТэВ для струй с  $p_{T min} = 35$  ГэВ.

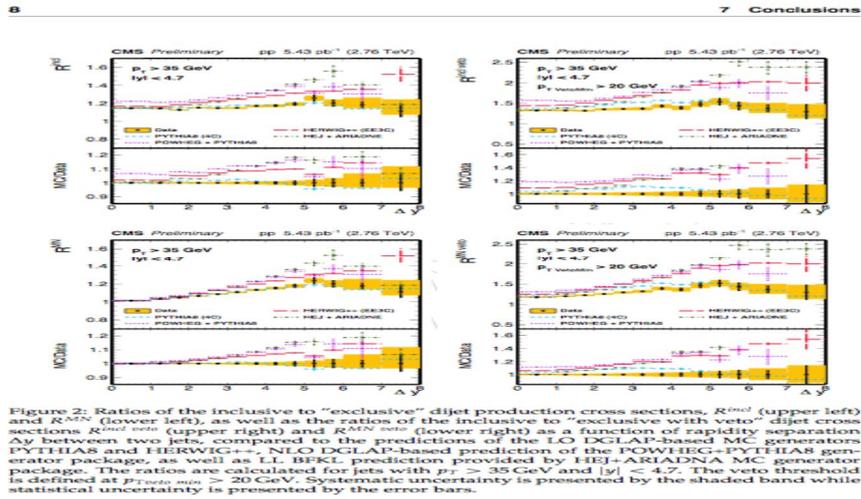


Figure 2: Ratios of the inclusive to “exclusive” dijet production cross sections,  $R^{incl}$  (upper left) and  $R^{MN}$  (lower left), as well as the ratios of the inclusive to “exclusive with veto” dijet cross sections  $R^{incl veto}$  (upper right) and  $R^{MN veto}$  (lower right) as a function of rapidity separation  $\Delta y$  between two jets, compared to the predictions of the LO DGLAP-based MC generators PYTHIA8 and HERWIG++, NLO DGLAP-based prediction of the POWHEG+PYTHIA8 generator package, as well as LL BFKL prediction provided by HEJ+ARIADNE MC generator package. The ratios are calculated for jets with  $p_T > 35$  GeV and  $|y| < 4.7$ . The veto threshold is defined at  $p_{T veto min} > 20$  GeV. Systematic uncertainty is presented by the shaded band while statistical uncertainty is presented by the error bars.

Рисунок 33. Отношение сечений двухструйных событий («К-фактор») при 2,76 ТэВ для струй с  $p_{T min} = 35$  ГэВ, где учитываются пары струй с максимальным разделением по быстройте.

Выполнены исследования по тематике рабочей группы Noise WG, изучающей шумы адронного калориметра (HCAL) в составе группы DPG (Detector Performance Group). Изучались способы борьбы с шумами в передней и задней (HF) частях адронного калориметра, расположенных в непосредственной близости от пучка. Основные фильтры для подавления шума в HF используют разность сигналов с длинных и коротких волокон (топологические фильтры). Первым фильтром является PET-фильтр (Polynomial Energy Threshold), в котором строится отношение  $R = (L-S)/(L+S)$ , где L и S – сигналы с длинных и коротких волокон соответственно. Вторым топологическим фильтром является S9S1-фильтр. Это изоляционный фильтр, предназначенный для борьбы с шумом в длинных волокнах, он определяет изолированность энерговыделения в длинном волокне по отношению к энерговыделению в окружающих волокнах (длинных и коротких). Суммарный эффект от применения различных HF-фильтров представлен на рисунке 34, где показан хвост распределения по недостающей энергии (MET). Распределение получено алгоритмами группы JetMET установки CMS. Этот рисунок является официально утвержденным группой DPG.

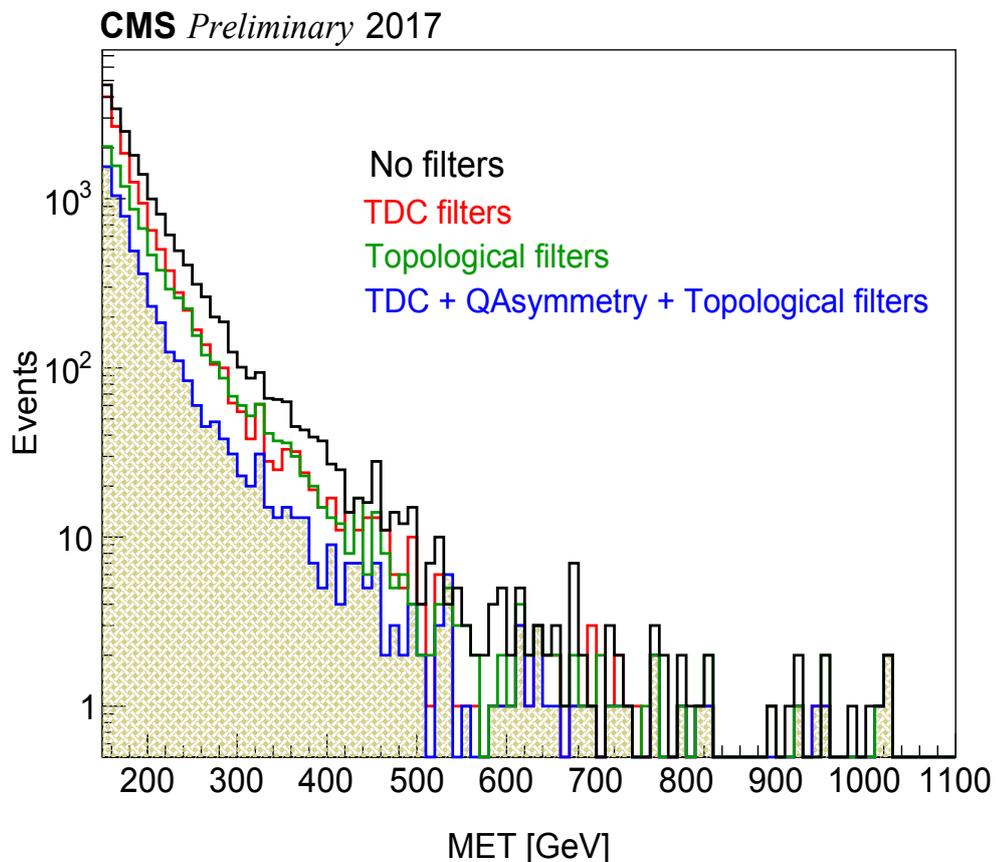


Рисунок 34. Хвост распределения по недостающей энергии.

## 11. ЭКСПЕРИМЕНТ NA64

Продолжены исследования по возможному проявлению лёгкой тёмной материи в экспериментах на коллайдерах. Для модели с векторным переносчиком взаимодействия между обычной материей и тёмной материей были произведены точные древесные вычисления рождения темного фотона в электрон-ядерных столкновениях с учетом полной симуляции детектора для эксперимента NA64 в ЦЕРНе. Показано, что в зависимости от массы темного фотона и энергии сталкивающихся электронов возникают существенные отличия от дифференциального сечения, вычисленного в приближении эквивалентных фотонов. Проанализированы данные эксперимента NA64 и на их основе получены новые рекордные ограничения на константу связи темного фотона с электроном. Показано, что модель с лёгким изосинглетным скаляром и несколькими хиггсовскими изодублетами способна объяснить не только мюонную  $(g-2)_\mu$ -аномалию, но и правильно предсказать наблюдаемую на эксперименте плотность тёмной материи.

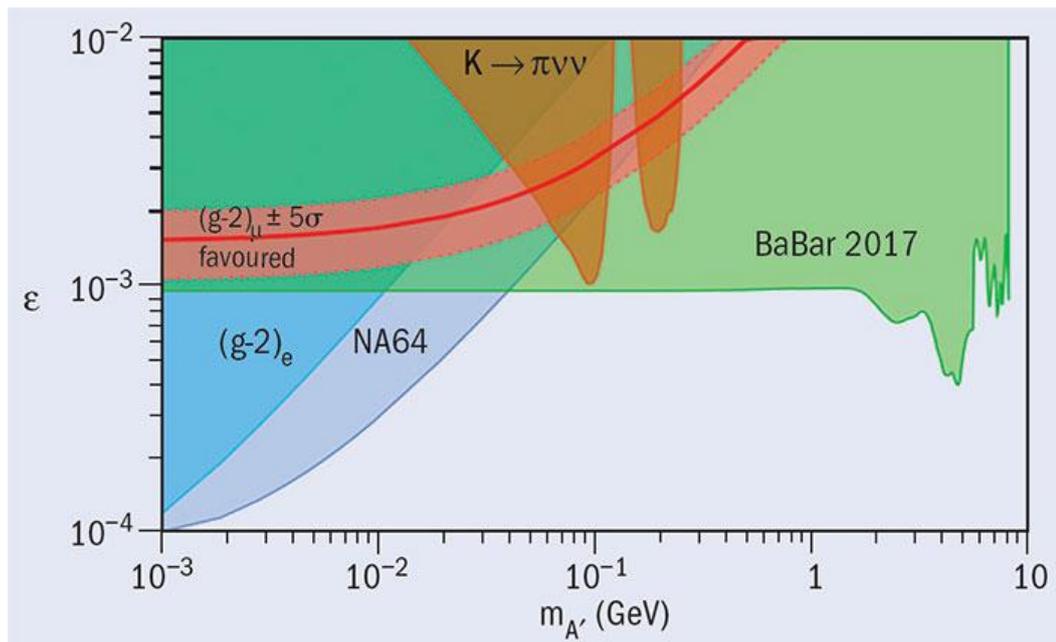


Рисунок 35 – Ограничения на константы связей лёгкого векторного бозона – переносчика взаимодействия лёгкой тёмной материи с наблюдаемым веществом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее важные результаты, полученные коллективом Отдела теоретической физики в 2017г.:

1) Показано, что модель с лёгким изосинглетным скаляром и несколькими хиггсовскими изодублетами способна объяснить не только мюонную ( $g-2$ ) аномалию, но и правильно воспроизвести наблюдаемую на эксперименте плотность тёмной материи.

2) Проанализированы нейтринные события, зарегистрированные в глубоководном нейтринном эксперименте NT200 в озере Байкал за пять лет наблюдений в направлении на тёмные карликовые галактики Южной полусферы (dSphs) и на Большое Магелланово Облако (LMC). Какого-либо значимого превышения в числе наблюдаемых событий относительно ожидаемого фона от атмосферных нейтрино не обнаружено.

3) В рамках рассматриваемой суперсимметричной модели было показано, что присутствие лёгких сголдстино усиливает ограничение на масштаб нарушения суперсимметрии в 1.5 раза по сравнению со случаем очень тяжёлых сголдстино. Получены ограничения на массу сголдстино и масштаб нарушения суперсимметрии из данных экспериментов ATLAS и CMS по поиску двухджетовых резонансов.

4) Проведён анализ влияния нестандартных нейтринных взаимодействий, имеющих вид четырехфермионных взаимодействий, на распространение нейтрино с энергией 1-1000 ГэВ, возникающих от аннигиляции частиц тёмной материи в Солнце. Показано, что результирующие потоки мюонных нейтрино на уровне Земли могут значительно отличаться от полученных в стандартном случае.

5) Исследованы классические решения в расширенной теории гравитации Хорндески, интересные с космологической точки зрения. Был найден явный пример модели, в которой существует стабильное на протяжении всей эволюции пространственно-плоское отскоковое решение без сингулярности. Исследованы свойства возмущений в теориях Хорндески. Показано, что в теории Хорндески невозможно существование стабильных сферически симметричных решений в виде кротовой норы и при этом не содержащих нефизические степени свободы. Кроме того, показано, что в частном случае кубичного галилеона нестабильны также решения типа «полузамкнутый мир»: кротовые норы, ведущие из плоского мира в замкнутый.

6) Показано, что первичные космологические возмущения с плоским спектром, растущие на пост-инфляционной материально-доминированной стадии, могут произвести малое количество таких чёрных дыр, которых, тем не менее, может быть достаточно для уничтожения вакуума в видимой части Вселенной.

7) Рассмотрена (1+1)-мерная модель дилатонной гравитации с отражающей динамической границей. После получения общего классического решения модели подробно изучен подкласс специальных солитонных решений. Последние решения описывают отражение материи от границы при низких энергиях и формирование чёрных дыр при энергиях, превышающих критическую.

8) Полностью исследовали коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксиноподобных частиц. Показано, что столкновения частиц в центре звёзды производят поток релятивистских аксионов, покидающих звезду и уносящих около 30% от ее первоначальной массы.

9) В обобщениях Стандартной модели физики частиц с иерархичным спектром суперпартнёров была показана возможность производства гравитационных волн в ранней Вселенной в эпоху электрослабого фазового перехода.

10) Были уточнены сечения захвата низкоэнергетических нейтрино галлием, что позволило повысить чувствительность нового эксперимента BEST (ИЯИ РАН, пос. Нейтрино) к моделям с гипотетическими стерильными нейтрино эВ-ных масс, а также получить оценки перспектив проверки галлиевой аномалии в этом эксперименте с искусственным источником на основе цинка-65.

11) В моделях со стерильными нейтрино кэВ-ных масс показано, как специфическая динамика взаимодействующего с ними нового скалярного поля, может существенно подавить их рождение в ранней Вселенной. Это открывает возможность объяснения появления масс активных нейтрино в результате смешивания с этими стерильными нейтрино (механизм качелей), причём такую модель смогут напрямую проверить действующие установки Троицк-ню-масс и KATRINE.

12) Подробно исследовано влияние гипотетической субдоминантной компоненты тёмной материи, распадающейся в радиацию между рекомбинацией и современной эпохой, на эволюцию малых неоднородностей материи в расширяющейся Вселенной. Из данных по барионным акустическим осцилляциям получены ограничения на возможную долю такой компоненты на уровне нескольких процентов.

13) Найдено, что очень лёгкие (псевдо)скалярные поля, предсказываемые в широком классе струнных обобщений физики частиц, могут приводить к перепроизводству радиации в ранней Вселенной, изменяя её тем расширения в критические эпохи. В частности, наблюдаемая распространённость лёгких химических элементов, созданных в эпоху первичного нуклеосинтеза, отмечает возможность послеинфляционного разогрева Вселенной через распад инфлатона преимущественно в скаляры (в частности, модель Старобинского) и универсальный распад во все частицы, если лёгких скалярных полей ожидаемо много.

14) Изучено влияние фермионов на стабильность солитонов в модели с плоским направлением. Было показано, что влияние фермионов на эффективный потенциал приводит к нестабильности солитонов с большим значением скалярного поля, что соответствует большим зарядам.

15) Изучены нетопологические солитоны в модели Вика-Катковского. Было показано, что зависимость энергии от заряда в этой модели можно получить аналитически и она качественно похожа на аналогичную зависимость для Бозе-звезд.

16) Исследован процесс туннельного распада маленьких  $Q$ -шаров на свободные частицы.

17) Построено перенормировочное предписание (схема перенормировок) для суперсимметричного расширения теории сильных взаимодействий КХД.

18) Исследованы результаты применения калибровочно-зависимой процедуры минимальных импульсных вычитаний. В калибровке Ландау обнаружено неожиданное свойство совпадения структуры теоретической связи между КХД выражением для характеристик процесса глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах и характеристики процесса полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны с известной ранее структурой этой теоретико-возмущенческой связи, которая считалась справедливой лишь в классе калибровочно-инвариантных процедур устранения ультрафиолетовых расходимостей.

19) Показано, что в калибровке Ландау коэффициенты третьей и четвертой поправки ТВ в КХД к правилу сумм Бьеркена резко минимизируются, что позволяет осуществить в дальнейшем более согласованный анализ с данными коллаборации COMPASS, извлеченными с использованием компьютерных программ, использующих лишь первые два приближения теории возмущений для ренорм-групповой эволюции соответствующих структурных функций данного процесса.

20) Получено аналитическое выражение для 4-х петлевого приближения к полному сечению рождения пары лептонов  $\tau^+\tau^-$  в процессе электрон-позитронных столкновений при высоких энергиях, испускающих один промежуточный фотон.

21) Для квантовых интегрируемых систем, связанных с простейшей квантовой алгеброй петель, выведены все функциональные соотношения в универсальном (модельно-независимом) виде.

22) Предложена самосогласованная модель, объясняющая спектр и массовый состав космических лучей при энергиях свыше 0.1 ЭэВ, а также поток астрофизических нейтрино в рамках единственного класса источников, таких как активные ядра галактик.

23) Выполнено обзорное исследование, посвященное изучению космических лучей ультравысоких энергий.

24) На основе анализа данных установки ШАЛ-МГУ получено наиболее строгое в мире ограничение на поток астрофизических фотонов с энергиями порядка  $10^{17}$  эВ.

25) Показано, что широко обсуждаемый избыток мюонов в составе широких атмосферных ливней по сравнению с моделированием отсутствует для мюонов с энергиями выше 10 ГэВ, на расстояниях порядка 100 м от осей ливней, вызванных первичными частицами с энергиями порядка  $10^{17}$  эВ.

26) Показано, что наивно противоречивые наблюдательные данные о профиле плотности гало окологалактического газа можно согласовать друг с другом при естественном предположении зависящего от радиуса химического состава газа.

27) В модели, дающей успешное описание экспериментальных результатов и теоретической асимптотики электромагнитного формфактора пи-мезона, вычислен аналогичный формфактор К-мезона как функция квадрата переданного импульса.

28) Мотивирована концепция высокогорного черенковского телескопа для наземных наблюдений астрофизических гамма-квантов с низким порогом. Предложена реализация этой концепции - инструмент ALEGRO, который можно разместить в пустыне Атакама (Чили) или на горе Эльбрус (Россия).

29) Показано, что для изучения астрофизически мотивированной области параметров аксионоподобных частиц достаточно увеличить чувствительность экспериментов по сравнению с лучшими мировыми результатами в  $\sim 3$  раза по константе аксион-фотонного взаимодействия, что тем не менее требует значительных экспериментальных усилий. Разработана концепция и предложены технические решения для такого эксперимента - Троицкого аксионного солнечного телескопа (TASTE).

30) С помощью современных техник многокомпонентного анализа данных наземной решетки детекторов эксперимента Telescope Array исследован массовый состав частиц, инициирующих широкие атмосферные ливни с энергиями от 1 ЭэВ и выше.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

В задаче «Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов».

- Проведено три сеанса набора статистики по прецизионному измерению бета спектра трития. Результаты обрабатываются.

- Разработан вариант с полной оцифровкой сигналов с детектора.

- Выполнено математическое моделирование поиска и оценки амплитуды сигнала в режиме оцифровки сигнала.

- Реализовано подключение нового канала оцифровки параллельно с основной схемой с использованием АЦП.

- Выполнен ряд методических и расчетных работ по оптимизации режима работы электронной пушки.

- Проведены тестовые испытания образцов пиксельного детектора нового типа на основе кремниевого дрейфового детектора (SDD).

- Проведены работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования. Запущены дополнительные новые системы хранения и транспортировки гелия.

В задаче «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов».

- Разработан модуль программного обеспечения, позволяющий учитывать вклад внутреннего движения на упругое рассеяние электронов. Модуль встроен в общий пакет программ KASSIOPEIA предназначенный для расчётов и моделирования спектра электронов в эксперименте КАТРИН.

- Проводилось Монте-Карло моделирование данных эксперимента КАТРИН; тестирование, сравнение и проверка программного обеспечения и методов обработки данных в эксперименте КАТРИН;

- Для моделирования поиска стерильных нейтрино разрабатывалась модель спектра электронов бета-распада трития в широком диапазоне энергий с учетом эффектов источника, спектрометра и детектора;

- В рамках подготовки эксперимента по измерению спектра неупругих потерь энергии электронами в рассеянии на молекулярном тритии рассматривались систематические поправки. Проведение эксперимента перенесено на вторую половину 2018 года.

- Оформлено предложение эксперимента по исследованию зависимости от энергии налетающих электронов сечения возбуждения электронных состояний молекул трития.

- Проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления, подбор оптимального предусилителя. Совместные измерения на стенде в КИТ, Карлсруэ перенесены на январь 2018 года.

В задаче «Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «Mu2e» разработана и изготовлена 8 канальная система быстрой малошумящей электроники (front-end) работающей в условиях высоких электрических помех. Проведены измерения электроники с тестовыми сигналами, имитирующих работу детекторов с помощью современной системы по оцифровке формы сигналов CAEN WDT 5742.

В задаче «Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях».

- Обнаружено, что энергия квантованных конфигураций, состоящая из массы солитона и квантовой поправки, не является минимумом энергии и может быть понижена, в частности, посредством изменения размера солитона (рескейлинга). При этом масса нуклона уменьшается незначительно, масса Дельта-изобары уменьшается на 100 - 150 МэВ, что приводит к необходимости изменить параметры модели (в сторону их увеличения), которые в пионерских работах определялись именно подгонкой масс нуклона и Дельта(1232).

- Установлено, что рескейлинг квантованных скирмионов (то есть изменение их размеров – расширение за счёт центробежных сил, либо сжатие при связывании тяжёлого мезона, имеющего флейвор очарование, или прелесть) существенно уменьшает их энергию (массу).

- Совместно с Д.Е.Ланским (НИИЯФ МГУ) и И.К.Поташниковой (Университет Санта Мария, Вальпараисо, Чили) проведены расчеты спектров ядерных состояний с квантовыми числами очарование и прелесть (бьюти). Расчеты энергий связи проводятся в рамках топологической солитонной модели.

В задаче «Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях».

- Прямое сравнение эксклюзивных данных по фоторождению  $\eta/\eta'$ -мезонов на ядре углерода, полученных коллаборацией CBELSA/TAPS на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), с результатами выполненных нами теоретических исследований позволило извлечь величину сдвига массы этих мезонов в ядерной материи (или реальной части их скалярного ядерного потенциала) при относительно малых импульсах порядка 0.5 ГэВ/с.

- Показано, что в пределах экспериментальных ошибок отсутствует зависимость этого сдвига от их импульса. Учитывая найденную в предыдущих экспериментах мнимую часть этого потенциала, которая оказалась существенно меньше реальной части (см. рис. 6), можно надеяться на существование таких экзотических ядерных объектов как  $\eta'$ -мезик ядра - связанные системы обычных нуклонов и  $\eta'$ -мезонов.

- Сделан важный вывод о возможности получения надежной информации о возможном сдвиге массы  $J/\psi$  мезонов в ядерной среде из изучения импульсной зависимости их рождения в протон-ядерных реакциях при околопороговых начальных энергиях, а также из околопорогового и подпорогового рождения чармония в фотоядерных реакциях. Полученные результаты важны для планирования соответствующих экспериментов в Hall C и в проекте CBM на ускорительных комплексах CEBAF (США) и FAIR (Германия).

Задача «Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах»..

- Данная модель может использоваться как генератор событий при проектировании системы детектирования для готовящегося эксперимента по поиску  $n \leftrightarrow \bar{n}$  осцилляций на пучке холодных нейтронов ESS.

- Данный подход является универсальным и позволяет моделировать процесс аннигиляции антинейтрона на различных ядрах. Однако в случае поиска превращения нейтрона в антинейтрон внутри ядра (например,  $^{40}_{18}\text{Ar}$ ) для создания корректной модели необходимо определить радиальную зависимость плотности вероятности  $n \rightarrow \bar{n}$  перехода. Хотя и созданная в настоящее время модель в первом приближении может быть использована в предварительном моделировании.

В задаче «Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb».

- В 2017 г. группой ИЯИ РАН были полностью выполнены все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы LHCb. Эксперимент LHCb в 2017 г. продолжил работу по набору статистики на энергии протонов 6.5 ТэВ. Также продолжена обработка набранных ранее данных, получен ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями. В том числе наиболее точное измерение СКМ угла  $\gamma$  из комбинации  $B \rightarrow DK$  распадов, первое наблюдение распада  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  в одном эксперименте, тест «лептонной универсальности» используя полуплептонные  $\tau$ -распады  $B_0$  и впервые  $B_c$  мезонов, распады  $B_0 \rightarrow K^*0 l^+l^-$  и ряд других.

- На этапе создания установки LHCb группа ИЯИ РАН разработала и изготовила предливневый детектор, являющийся частью калориметрической системы. За время эксплуатации было показано, что конструкция предливневого детектора является надежной и удовлетворяет поставленным требованиям эксперимента. С точки зрения операционной эксплуатации общая эффективность детектора близка к 100%. В 2017 г. сотрудниками ИЯИ РАН проведены работы по проверке и замене неисправных фотоумножителей калориметрической системы.

- В рамках модернизации калориметрической системы LHCb в результате проведения научно-исследовательской работы разработана техническая документация на изготовление элементов электронного управления калориметрической системы. Также изготовлен тестовый стенд и разработана методика испытаний запасных высоковольтных делителей повышенной радиационной стойкости в сборе с ФЭУ. Разработанные компоненты и технологии изготовления соответствуют техническим требованиям на модернизацию элементов супердетектора БАК-би.

В эксперименте CMS:

- Произведён поиск правого WR-бозона и тяжёлого нейтрино в событиях, содержащих один электрон или мюон, один распадающийся на адроны тау- лептон и как минимум две адронные струи. Получены новые ограничения на массу WR-бозона и массу тяжелого нейтрино.

Для случая, когда масса тяжелого нейтрино равна половине массы правого нейтрино, правый WR -бозон с массой 2900 ГэВ и меньше исключен.

- Продолжены измерения отношения сечений инклюзивных двухструйных событий к выходу двухструйных событий как функции относительной скорости между струями с вето на дополнительные струи по поперечному импульсу с использованием данных при 2,76, 7 и 8 ТэВ.

- Выполнены исследования по тематике рабочей группы Noise WG, изучающей шумы адронного калориметра (HCAL) в составе группы DPG (Detector Performance Group).

В эксперименте NA64:

- Продолжены исследования по возможному проявлению легкой темной материи в экспериментах на коллайдерах. Для модели с векторным переносчиком взаимодействия между обычной материей и темной материей были произведены точные древесные вычисления рождения темного фотона в электрон-ядерных столкновениях с учетом полной симуляции детектора для эксперимента NA64 в ЦЕРНе. Показано, что в зависимости от массы темного фотона и энергии сталкивающихся электронов возникают существенные отличия от дифференциального сечения, вычисленного в приближении эквивалентных фотонов.

- Проанализированы данные эксперимента NA64 и на их основе получены новые рекордные ограничения на константу связи темного фотона с электроном. Показано, что модель с лёгким изосинглетным скаляром и несколькими хиггсовскими изодублетами способна объяснить не только мюонную ( $g-2$ )-аномалию, но и правильно предсказать наблюдаемую на эксперименте плотность темной материи.

## ПУБЛИКАЦИИ

### 1. ПУБЛИКАЦИИ СОТРУДНИКОВ ОТДЕЛА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

1. S.N.Gninenko, D.V.Kirpichnikov, M.M.Kirsanov and N.V.Krasnikov, The exact tree-level calculation of the dark photon production in high-energy electron scattering at the CERN SPS, arXiv:1712.05706(2017).

2. NA64 Collaboration (S.N.Gninenko et al.), Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS, Phys. Rev. Lett. 118, 011802 (2017)

3. NA64 Collaboration (S.N.Gninenko et al.), Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode, arXiv:1710.00971, to be published in Phys.Rev.D.

4. N.V.Krasnikov, Light scalars, (g-2) muon anomaly and dark matter in a model with a Higgs democracy, arXiv:1707.00508(2017), arXiv:1707.00508(2017).

5. S.N.Gninenko and N.V.Krasnikov, Search for light dark vector boson; NA64 experiment, Proceedings, Quantum field theory at the limits:from strong fields to heavy quarks; Conference:C17-07-18.8(2017), Published by Verlag Deutsches Elektronen-Synchrotron.

6. Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200. BAIKAL Collaboration (A.D. Avrorin et al.). JETP Vol. 152 (7) (2017).

7. Status of the Baikal-gvd Project: First Cluster Dubna, BAIKAL Collaboration (A.D. Avrorin et al.), Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Jun 2017, pp. 160-163.

8. Missing energy signature for low scale supersymmetry breaking, S.V. Demidov, I.V. Sobolev, Published in EPJ Web Conf. 158 (2017) 02008

9. R. Kolevatov, S. Mironov, N. Sukhov, V. Volkova, "Cosmological bounce and Genesis beyond Horndeski," JCAP 1708 (2017) no.08, 038

10. R. Kolevatov, S. Mironov, V. Rubakov, N. Sukhov, V. Volkova, «On perturbations in generalized Galileon theories», arXiv:1708.04262

11. O. A. Evseev and O. I. Melichev, " No static spherically symmetric wormholes in Horndeski theory," arXiv:1711.04152, submitted to Physical Review D.

12. O. A. Evseev and O. I. Melichev, "Instability of static semiclosed worlds in generalized Galileon theories," Phys. Rev. D 96, 024030 (2017)

13. Dmitry Gorbunov, Dmitry Levkov, Alexander Panin "Fatal youth of the Universe: black hole threat for the electroweak vacuum during preheating", JCAP 1710 (2017) no.10, 016 [ arXiv:1704.05399]

14. Maxim Fitkevich, Dmitry Levkov, Yegor Zenkevich, "Exact solutions and critical chaos in dilaton gravity with a boundary", JHEP 1704 (2017) 108, arXiv:1702.02576.

15. D.G. Levkov, A.G. Panin, I.I. Tkachev, “Relativistic axions from collapsing Bose stars”, arXiv:1609.03611, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) 011301.
16. Dmitry Gorbunov, What could we learn about high energy particle physics from cosmological observations at largest spatial scales? EPJ Web Conf. 164 (2017) 01034
17. Dmitry Gorbunov, Initial conditions in chaotic inflation with modified gravity, EPJ Web Conf. 164 (2017) 01015
18. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov., Gravitational waves from phase transition in split NMSSM, e-Print: arXiv:1712.00087 hep-ph.
- 19.. A. Chudaykin, D. Gorbunov, I. Tkachev., A dark matter component decaying after recombination: sensitivity to BAO and RSD probes, e-Print: arXiv:1711.06738
20. Dmitry Gorbunov, Sterile neutrino dark matter production, EPJ Web Conf. 158 (2017) 05006
21. Vladislav Barinov, Bruce Cleveland, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, Tatiana Ibragimova, “Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly“, e-Print: arXiv:1710.06326 hep-ph.
- 22.. DUNE Collaboration (B. Abi (Oxford U.) et al.), The Single-Phase ProtoDUNE Technical Design Report, e-Print: arXiv:1706.07081 [physics.ins-det] | PDF
23. F. Bezrukov, A. Chudaykin, D. Gorbunov, Hiding an elephant: heavy sterile neutrino with large mixing angle does not contradict cosmology, JCAP 1706 (2017) no.06, 051
24. SHiP Collaboration (A. Akmete (Middle East Tech. U., Ankara) et al.), The active muon shield in the SHiP experiment, JINST 12 (2017) no.05, P05011
25. Dmitry Gorbunov, Anna Tokareva, On the dark radiation problem in the axiverse, JCAP 1706 (2017) no.06, 016
26. W. Bonivento, D. Gorbunov, M. Shaposhnikov, A. Tokareva, Polarization of photons emitted by decaying dark matter, Phys.Lett. B765 (2017) 127-131
27. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov, Split NMSSM with electroweak baryogenesis, JHEP 1611 (2016) 148, Erratum: JHEP 1708 (2017) 080
28. M. Drewes, A White Paper on keV Sterile Neutrino Dark Matter, JCAP 1701 (2017) no.01, 025
29. A.V. Kovtun and E.Y. Nugaev, Radiative corrections and instability of large Q-Balls, Mod.Phys.Lett. A32 (2017) no.37, 1750198
30. E.Y. Nugaev and M.N. Smolyakov, Q-balls in the Wick-Cutkosky model, Eur.Phys.J. C77(2017) no.2, 118
31. D.Levkov, E.Nugaev and A.Popescu, The fate of small classically stable Q-balls, arXiv:1711.05279 [hep-ph], JHEP 1712 (2017) 131

32. <http://www.gc2.lpi.ru/talks.html>
33. A.L. Kataev, A.E. Kazantsev and K.V. Stepanyantz, “The Adler D-function for N=1 SQCD regularized by higher covariant derivatives in the three-loop approximation”, arXiv: 1710.03941, Nucl.Phys. B926 (2018) 295-320
34. A.L.Kataev and V.S. Molokoedov “The analytical  $\mathcal{O}(a^4_s)$  expression for the polarized Bjorken sum rule in the miniMOM scheme and the consequences for the generalized Crewther relation”, arXiv: 1711.03997, J.Phys.Conf.Ser. 938 (2017) no.1, 012050
35. Kh. S. Nirov and A. V. Razumov, “Quantum groups and functional relations for lower rank”, J. Geom. Phys. 112 (2017) 1-28
36. Kh. S. Nirov and A. V. Razumov, “Quantum groups, Verma modules and  $q$ -oscillators: General linear case”, J. Phys. A: Math. Theor. 50 (2017) 305201
37. H. Boos, F. G\"ohmann, A. Kl\"umper, Kh. S. Nirov and A. V. Razumov, “Oscillator versus prefundamental representations II. Arbitrary higher ranks”, J. Math. Phys. 58 (2017) 093504
38. Kh. S. Nirov and A. V. Razumov, “Highest  $\ell$ -weight representations and functional relations”, SIGMA 13 (2017) 043
39. By Yu.A. Fomin, N.N. Kalmykov, I.S. Karpikov, G.V. Kulikov, M. Yu Kuznetsov, G.I. Rubtsov, V.P. Sulakov, S.V. Troitsky., “Constraints on the flux of  $\sim (10^{16} - 10^{17.5})$  eV cosmic photons from the EAS-MSU muon data”, arXiv:1702.08024  
Phys.Rev. D95 (2017) no.12, 123011.
40. Yu.A. Fomin, N.N. Kalmykov, I.S. Karpikov, G.V. Kulikov, M.Yu. Kuznetsov, G.I. Rubtsov, V.P. Sulakov, S.V. Troitsky, No muon excess in extensive air showers at 100–500 PeV primary energy: EAS–MSU results. ArXiv:1609.05764, Astropart.Phys. 92 (2017) 1-6.
41. Sergey Troitsky, “Density and metallicity of the Milky-Way circumgalactic gas”, arXiv:1607.05442, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 468 (2017) no.1, L36-L40.
42. A.F. Krutov, S.V. Troitsky, V.E. Troitsky., The  $K$ -meson form factor and charge radius: linking low-energy data to future Jefferson Laboratory measurements, arXiv:1610.06405, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.7, 464.
43. The ALEGRO project., A.M. Bykov ... S.V. Troitsky ... et al., Cherenkov gamma-ray telescopes: Past, present, future., Tech.Phys. 62 (2017) no.6, 819-836.
44. S.V. Troitsky., Axion-like particles and the propagation of gamma rays over astronomical distances, arXiv:1612.01864, JETP Lett. 105 (2017) no.1, 55-59.
45. V. Anastassopoulos ... R. Djilkibaev ... A. Gangapshev ... S. Gninenko, N. Golubev ... L. Kravchuk, M. Libanov ... V. Matveev ... V. Pantuev ... K. Ptitsyna, G. Rubtsov ... I. Tkachev, Towards a medium-scale axion helioscope and haloscope, arXiv:1706.09378 [hep-ph], JINST 12 (2017) no.11, P11019.

46. M. Kachelrieß, O. Kalashev, S. Ostapchenko and D. V. Semikoz, “Minimal model for extragalactic cosmic rays and neutrinos”, Phys. Rev. D 96, no. 8, 083006 (2017)

47. M. Kachelrieß, O. Kalashev, S. Ostapchenko and D. V. Semikoz, “A minimal model for extragalactic high-energy particles”, Proceedings, 7th International Fermi Symposium: Garmisch-Partenkirchen, Germany, October 15-20, 2017

48. M.Y. Zotov, O.E. Kalashev, M.S. Pshirkov, “The current status of research in ultrahigh-energy cosmic ray physics: A brief review” M.S. Moscow Univ. Phys. (2017) 72: 144.

49. Калашев О.Е. “Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения.”, докторская диссертация, <http://inr.ru/rus/referat/kalashev/dis.pdf>

50. <https://pos.sissa.it/301/536/>, Proceedings of Science, (ICRC2017) 536

51. <https://pos.sissa.it/301/543/>, Proceedings of Science, (ICRC2017) 543

53. <https://pos.sissa.it/301/551/>, Proceedings of Science, (ICRC2017) 551

## 2. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов»

1. A.I. Belesev et al., An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from ‘Troitsk nu-mass’ data, JETP Lett. 97 (2013) 67 [arXiv:1211.7193].

2. D.A. Abdurashitov et al., First measurements in search for keV sterile neutrino in tritium beta-decay in the Troitsk nu-mass experiment, JETP Letter 105 (2017), 753 [arXiv:1703.10779].

3. D.A. Abdurashitov et al., The current status of “Troitsk nu-mass” experiment in search for sterile neutrino. JINST 10 (2015) T1005. [arXiv:1504.00544].

## 3. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов»

1. E. Ferri et. al. The status of the MARE experiment with  $^{187}\text{Re}$  and  $^{163}\text{Ho}$  isotopes. Physics Procedia 61 ( 2015 ) 227 – 231.

2. <https://www.kip.uni-heidelberg.de/echo/>

3. <http://www.project8.org/>

4. D.M. Asner e.a., PRL, 114, 162501.

5. <https://www.princeton.edu/main/news/archive/S45/75/52Q77/index.xml?section=science>.

6. <http://arxiv.org/abs/1409.0920>

7. <http://arxiv.org/abs/1204.5379>

8. <http://www.katrin.kit.edu/>

9. arXiv:hep-ex/0109033v1

10. M.Arenz et. al. Commissioning of the vacuum system of the KATRIN Main Spectrometer Journal of Instrumentation 11 P04011- April 2016.
11. E.A. McCutchan, Nuclear data Sheets 125 (2015) 201.
12. L.I. Bodine, D.S. Parno, R.G.H. Robertson, Phys.Rev. C91 (2015) 035505
13. A. V. Lokhov, N. A. Titov. Anharmonicity of internal atomic oscillation and effective antineutrino mass evaluation from gaseous molecular tritium  $\beta$ -decay J. Phys. G 43(7) (2016) 075102
14. V.N.Aseev et.al.. European Physical Journal D10 (2000) ,39-52
15. З. Садыгов, Х. Абдуллаев, Н. Анфимов, Ф. Ахмедов, Р. Мадатов, Р. Мухтаров, А. Ольшевский, А. Титов “Микроканальный лавинный фотодиод с быстрым временем восстановления параметров” Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 11
16. Берлев А. И., Голубев А.А., Задорожный С. В., Титов Н.А. «Исследование возможности создания детектора электронов низких энергий на основе микропиксельного лавинного фотодиода». Препринт ИЯИ РАН 1432/2017, Москва 2017.
17. N.Titov, INR RAS for the KATRIN Collaboration. KATRIN-2017: Background studies, sensitivity. International Session - Conference of SNP PSD RAS "Physics of Fundamental Interactions". Кабардино-балкарский государственный университет 6-8 июня, 2017, Нальчик
18. XXXII совещание по проекту КАТРИН: Alexey Lokhov. пленарный доклад на тему: “Совместный анализ данных для поиска стерильных нейтрино”
19. Совещание по программному обеспечению и анализу данных для эксперимента КАТРИН Университет Карнеги-Меллон, Питтсбург, США: устный доклад Alexey Lokhov: Монте-Карло моделирование данных эксперимента КАТРИН;
20. Там же, устный доклад Alexey Lokhov: Тестирование, сравнение и проверка программного обеспечения и методов обработки данных в эксперименте КАТРИН;
21. Берлев А. И., Голубев А.А., Задорожный С. В., Титов Н.А. «Исследование возможности создания детектора электронов низких энергий на основе микропиксельного лавинного фотодиода». Препринт ИЯИ РАН 1432/2017, Москва 2017.
22. N.Titov KATRIN 2016: Project status and prospects. Studies of systematics. Physics of Particles and Nuclei 48(6):1030-1031 DOI: 10.1134/S1063779617060569

#### 4 ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Поиск редких мюонных процессов в эксперименте $\langle\mu e\rangle$ »

Р.М. Джилкибаев “Исследования кристалла LYSO для калориметра в области низких энергий”, Приборы и Техника Эксперимента, 2017, n 3, с 28-33.

5. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Свойства барионов и ядер в топологических и иных  
солитонных моделях»

1. Rescaling of quantized skyrmions: from nucleon to heavy flavored baryons  
Vladimir B. Kopeliovich (Moscow, MIPT and Moscow, INR), Irina K. Potashnikova (CCTVal,  
Valparaiso and Santa Maria U., Valparaiso). Phys Rev D 96, 056020 (2017); arXiv:1703.04373 [hep-th]

2. Mathematical aspects of the nuclear glory phenomenon; from backward focusing to Chebyshev  
polynomials. V.B. Kopeliovich (Moscow, MIPT and Moscow, INR) Journal of Physics: Conf. Series 798  
(2017) 012079.

3. Доклад “Mathematical aspects of the nuclear glory phenomenon; from backward focusing  
to Chebyshev polynomials”. ICPPA-2 (МЕРФИ, Moscow, October 2016) опубликован в трудах  
конференции.

4. Доклад “Rescaling of quantized skyrmions: from nucleon to heavy flavored baryons”  
представлен на Ломоносовской конференции (<http://www.icas.ru/english/index.htm>. МГУ,  
Москва, август 2017) и направлен на конференцию ICPPA-2017  
(<http://indico.cfr.mephi.ru/e/ICPPA2017>. Москва, МИФИ, октябрь 2017).

6 ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Исследование подпорогового рождения лёгких векторных  
мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях»

1. Э. Я. Парьев, Ю. Т. Киселев. Околопороговое фоторождение  $J/\psi$ -мезонов на ядрах.  
Ядерная Физика, том 80, № 1, с. 70-80 (2017).

2. E. Ya. Paryev, Yu. T. Kiselev, Yu. M. Zaitsev. Momentum dependence of  $J/\psi$  production  
in proton-nucleus reactions at near-threshold beam energies. Nucl. Phys. A 968 (2017) 1-13.

3. V. Metag, M. Nanova, E. Ya. Paryev. Meson-nucleus potentials and the search for meson-  
nucleus bound states. Review. Progress in Particle and Nuclear Physics. 97 (2017) 199-260.

4. V. Metag, M. Nanova, E. Ya. Paryev. Meson-nucleus potentials and the search for meson-  
nucleus bound states. Review. ArXiv: 1706.09654 [nucl-ex] (2017).

5. E. Ya. Paryev, M. Hartmann, Yu. T. Kiselev, Medium effects in  $\Lambda K(+)$  pair  
production by 2.83 GeV protons on nuclei. Chinese Physics C Vol. 41, No. 12 (2017) 124108.

6. JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH Devoted to the 90th anniversary of  
Academician A.M. Baldin XXIII INTERNATIONAL BALDIN SEMINAR ON HIGH ENERGY  
PHYSICS PROBLEMS RELATIVISTIC NUCLEAR PHYSICS & QUANTUM  
CHROMODYNAMICS Dubna, Russia, September 19-24, 2016

7. Yu. T. Kiselev, M. Hartmann, E. Ya. Paryev, A.Yu. Poliansliy “Properties of the strange  
mesons in nuclear matter”, XXIII Int. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna,  
September 19-24, 2016. EPJ Web of Conferences 138, 04002 (2017).

#### 7. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Осцилляции частиц в поглощающей среде»

1. V.I. Nazaruk, Kaon regeneration in perturbation theory. Int.J.Mod.Phys.E Vol. 26, No.3 (2017) 1750007.
2. V.I. Nazaruk, arXiv:1510.01629v7 [hep-ph] Kaon regeneration in perturbation theory
3. V.I. Nazaruk, Regeneration of  $K^0_S$  mesons. arXiv:1705.08289 [hep-ph].
4. V.I. Nazaruk, New model of the kaon regeneration. arXiv:1708.042926 [hep-ph].

#### 8. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах»

1. M.Baldo-Ceolin et al. Z.Phys, C 63(1994)409-416
2. D.G.Phillips II et al. Physics Reports 612(2016)1-45
3. J.Chung et al. Phys.Rev.,D 66(2002)032004-1 032004-11
4. C.Adams et al. (The LBNE Collaboration), arXiv:1307.7335[hep-ex]
5. A.S.Iljinov, V.I.Nazaruk, S.E Chigrinov Phys.A382(1982)378-400
6. Е.С.Голубева Модель аннигиляции антинейтронов для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций. Препринт ИЯИ РАН 1436/2017.

#### 9. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «LHCb»

1. Measurement of the  $B^{\pm}$  production cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 13 TeV, LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). JHEP 1712 (2017). 026.
2. Search for dark photons produced in 13 TeV pp collisions, LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). arXiv:1710.02867 [hep-ex].
3. Measurement of CP observables in  $B^{\pm} \rightarrow D K^{*\pm}$  decays using two- and four-body  $DS$  final states, LHCb Collaboration (R. Aaij et al.). JHEP 1711 (2017) 156.
4.  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$  Resonance Parameters with the Decays  $\chi_{c1,c2} \rightarrow J/\psi \mu^+ \mu^-$ , LHCb Collaboration. Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.22, 221801.
5. Measurement of CP violation in  $B^0 \rightarrow J/\psi K^0_{\text{S}}$  and  $B^0 \rightarrow \psi(2S) K^0_{\text{S}}$  decays, LHCb Collaboration. JHEP 1711 (2017) 170.
6. First observation of forward  $Z \rightarrow b \bar{b}$  production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV, LHCb Collaboration. Phys.Lett. B776 (2018) 430-439.
7. Measurement of the shape of the  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \mu^- \bar{\nu}$  differential decay rate, LHCb Collaboration. Phys.Rev. D96 (2017) no.11, 112005.

8. Bose-Einstein correlations of same-sign charged pions in the forward region in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV, LHCb Collaboration, JHEP 1712 (2017) 025.
9. Measurement of the  $\Upsilon$  polarization in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV, LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). arXiv:1709.01301 [hep-ex].
10. First Observation of the Rare Purely Baryonic Decay  $\Lambda^0 \rightarrow p \bar{p}$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.23, 232001.
11. Measurement of the ratio of the  $\Lambda^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_{\tau}$  and  $\Lambda^0 \rightarrow D^{*-} \mu^+ \nu_{\mu}$  branching fractions using three-prong  $\tau$ -lepton decays, LHCb Collaboration, arXiv:1708.08856 [hep-ex].
12. Measurement of  $CP$  observables in  $B^{\pm} \rightarrow D^{(*)} K^{\pm}$  and  $B^{\pm} \rightarrow D^{(*)} \pi^{\pm}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B777 (2018) 16-30.
13. Study of  $\bar{b}$  correlations in high energy proton-proton collisions, LHCb Collaboration, JHEP 1711 (2017) 030.
14. Search for Baryon-Number Violating  $\Xi_{bb}^0$  Oscillations, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.18, 181807.
15. Observation of  $D^0$  meson decays to  $\pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$  and  $K^+ K^- \mu^+ \mu^-$  final states, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.18, 181805.
16. Study of prompt  $D^0$  meson production in  $pPb$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV, LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). JHEP 1710 (2017) 090.
17. Updated branching fraction measurements of  $\Lambda_{cb}^0 \rightarrow K_{S^0} h^+ h'^-$  decays, LHCb Collaboration, JHEP 1711 (2017) 027.
18. Observation of the doubly charmed baryon  $\Xi_{cc}^{++}$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.11, 112001.
19. Prompt and nonprompt  $J/\psi$  production and nuclear modification in  $pPb$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B774 (2017) 159-178.
20. Study of charmonium production in  $b$ -hadron decays and first evidence for the decay  $B_{(s)}^0 \rightarrow \phi \phi \phi$ , LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 609.
21. Improved limit on the branching fraction of the rare decay  $K_{S^0} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.10, 678.
22. Updated search for long-lived particles decaying to jet pairs, LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.12, 812.

23. Test of lepton universality with  $B^0 \rightarrow K^{*0} \ell^+ \ell^-$  decays, LHCb Collaboration, JHEP 1708 (2017) 055.
24. Measurement of  $B^0_{(s)}$  and  $D^{*-}_{(s)}$  meson lifetimes, LHCb Collaboration Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.10, 101801.
25. Observation of charmless baryonic decays  $B^0_{(s)} \rightarrow p \bar{p} h^+ h^{\prime-}$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 051103.
26. Resonances and  $CP$  violation in  $B_s^0$  and  $\overline{B}_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$  decays in the mass region above the  $\phi(1020)$ , LHCb Collaboration, JHEP 1708 (2017) 037.
27. First observation of a baryonic  $B_s^0$  decay, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.4, 041802.
28. Observation of the decays  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p K^-$  and  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c2} p K^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.6, 062001.
29. Observation of the  $B^{*+} \rightarrow D^{*-} K^+ \pi^+$  decay, LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). Phys.Rev. D96 (2017) no.1, 011101.
30. Measurement of  $B^0$ ,  $B^0_s$ ,  $B^{*+}$  and  $\Lambda_b^0$  production asymmetries in 7 and 8 TeV proton-proton collisions, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B774 (2017) 139-158.
31. Measurement of the  $B^0_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  branching fraction and effective lifetime and search for  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.19, 191801.
32. Observation of five new narrow  $\Omega_c^0$  states decaying to  $\Xi_c^+ K^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.18, 182001.
33. Search for the decays  $B_s^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$  and  $B^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.25, 251802.
34. Observation of the decay  $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \mu^+ \mu^-$  and a search for  $CP$  violation, LHCb Collaboration, JHEP 1706 (2017) 108.
35. Observation of the decay  $B_{(s)}^0 \rightarrow \eta_c \phi$  and evidence for  $B_{(s)}^0 \rightarrow \eta_c \pi^+ \pi^-$ , LHCb Collaboration, JHEP 1707 (2017) 021.
36. Measurement of the  $CP$  violation parameter  $A_{\Gamma}$  in  $D^0 \rightarrow K^+ K^-$  and  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.26, 261803.
37. Observation of the suppressed decay  $\Lambda_b^0 \rightarrow p \pi^- \mu^+ \mu^-$ , LHCb Collaboration, JHEP 1704 (2017) 029.
38. Study of the  $D^0 p$  amplitude in  $\Lambda_b^0 \rightarrow D^0 p \pi^-$  decays, LHCb Collaboration, JHEP 1705 (2017) 030.
39. Measurement of the  $B^{\{pm\}}$  production asymmetry and the  $CP$  asymmetry in  $B^{\{pm\}} \rightarrow J/\psi K^{\{pm\}}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev. D95 (2017) no.5, 052005.

40. Observation of the  $\Xi_{cb}^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$  decay, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B772 (2017) 265-273.
41. Study of  $J/\psi$  Production in Jets, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.19, 192001.
42. Measurement of  $CP$  asymmetries in  $D^{\pm} \rightarrow \eta' \pi^{\pm}$  and  $D_s^{\pm} \rightarrow \eta' \pi^{\pm}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B771 (2017) 21-30.
43. Observation of  $B_c^+ \rightarrow D^0 K^+$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.11, 111803.
44. Search for the  $B^0_s \rightarrow \eta' \phi$  decay, LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). JHEP 1705 (2017) 158.
45. Search for long-lived scalar particles in  $B^+ \rightarrow K^+ \chi (\mu^+ \mu^-)$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev. D95 (2017) no.7, 071101. 1
46. Measurement of the  $J/\psi$  pair production cross-section in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV, LHCb Collaboration, JHEP 1706 (2017) 047, Erratum: JHEP 1710 (2017) 068.
47. Observation of  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D^{(*)} K^{(*)}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev. D95 (2017) no.3, 032005.
48. Measurement of the phase difference between short- and long-distance amplitudes in the  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$  decay, LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.3, 161.
49. Measurement of the ratio of branching fractions and difference in  $CP$  asymmetries of the decays  $B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$  and  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ , LHCb Collaboration, JHEP 1703 (2017) 036.
50. Measurement of the  $b$ -quark production cross-section in 7 and 13 TeV  $pp$  collisions, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.5, 052002, Erratum: Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.16, 169901.
51. Search for  $CP$  violation in the phase space of  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B769 (2017) 345-356.
52. Observation of the decay  $\Xi_b^- \rightarrow p K^- K^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.7, 071801.
53. Search for massive long-lived particles decaying semileptonically in the LHCb detector, LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.4, 224.
54. Evidence for the two-body charmless baryonic decay  $\overline{B}^+ \rightarrow p \overline{\Lambda}$ , LHCb Collaboration, JHEP 1704 (2017) 162.
55. Search for decays of neutral beauty mesons into four muons, LHCb Collaboration, JHEP 1703 (2017) 001.

56. Measurements of charm mixing and  $C\!P$  violation using  $D^0 \rightarrow K^{\pm} \pi^{\mp}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev. D95 (2017) no.5, 052004, Erratum: Phys.Rev. D96 (2017) no.9, 099907.
57. Measurement of  $CP$  asymmetry in  $D^0 \rightarrow K^+ K^-$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B767 (2017) 177-187.
58. Observation of the annihilation decay mode  $B^0 \rightarrow K^+ K^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.8, 081801.
59. Measurement of forward  $t$ ,  $W+b$  and  $W+c$  production in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B767 (2017) 110-120.
60. New algorithms for identifying the flavour of  $\{\mathbf{B}\}^0$  mesons using pions and protons, LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.4, 238.
61. Observation of the decay  $B^0_s \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$  and evidence for  $B^0 \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 012006.
62. Search for the  $C\!P$ -violating strong decays  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^-$  and  $\eta'(958) \rightarrow \pi^+ \pi^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Lett. B764 (2017) 233-240.
63. Measurements of prompt charm production cross-sections in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s}=5$  TeV, LHCb Collaboration, JHEP 1706 (2017) 147.
64. Observation of  $B^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$  and  $B^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+ \pi^+ \pi^-$  decays, LHCb Collaboration, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.2, 72.
65. Measurement of matter-antimatter differences in beauty baryon decays, LHCb Collaboration, Nature Phys. 13 (2017) 391-396.
66. First experimental study of photon polarization in radiative  $B^0_{\{s\}}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.2, 021801, Addendum: Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.10, 109901.
67. Search for the suppressed decays  $B^+ \rightarrow K^+ K^+ \pi^-$  and  $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ K^-$ , LHCb Collaboration, Phys.Lett. B765 (2017) 307-316.
68. Observation of  $\eta_c(2S) \rightarrow p \bar{p}$  and search for  $X(3872) \rightarrow p \bar{p}$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Lett. B769 (2017) 305-313.
69. Amplitude analysis of  $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev. D95 (2017) no.1, 012002.
70. Observation of  $J/\psi \phi$  structures consistent with exotic states from amplitude analysis of  $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.2, 022003.

71. Evidence for exotic hadron contributions to  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^0$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.8, 082003, Addendum: Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.10, 109902, Addendum: Phys.Rev.Lett. 118 (2017) 119901.

72. Measurement of the CP asymmetry in  $B_s^0$  mixing, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.6, 061803, Addendum: Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.12, 129903.

73. Model-independent evidence for  $J/\psi$  contributions to  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^0$  decays, LHCb Collaboration, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.8, 082002.

74. By LHCb Collaboration. “Update of the LHCb combination of the CKM angle  $\gamma$  using  $B \rightarrow DK$  decays”. LHCb-CONF-2017-004. By LHCb Collaboration. “Measurement of CP observables in  $B^\pm \rightarrow D^{(*)} K^\pm$  and  $B^\pm \rightarrow D^{(*)} \pi^\pm$  decays”, LHCb-PAPER-2017-021 ; Physics Letters B 777 (2018) 16-30.

75. By LHCb Collaboration. “Measurement of the  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  branching fraction and effective lifetime and search for  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decays”, Phys. Rev. Lett. 118, 191801 (2017); arXiv:1703.05747

76. By LHCb Collaboration. “Measurement of the ratio of the  $B^0 \rightarrow D^{*+} \tau^+ \nu_\tau$  and  $B^0 \rightarrow D^{*+} \mu^+ \nu_\mu$  branching fractions using three-prong  $\tau$ -lepton decays.” LHCb-PAPER-2017-017; arXiv:1708.08856. Submitted to Phys. Rev. Lett.

77. By LHCb Collaboration. “Measurement of the ratio of branching fractions  $B(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau) / B(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu)$ ” LHCb-PAPER-2017-035, arXiv:1711.05623. Submitted to Phys. Rev. Lett.

78. By LHCb Collaboration. “Test of lepton universality with  $B^0 \rightarrow K^{*0} \ell^+ \ell^-$  decays” LHCb-PAPER-2017-013; arXiv:1705.05802; JHEP 08 (2017) 055

79. By LHCb Collaboration. “Precise measurement of the  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$  resonance parameters with the decays  $\chi_{c1,2} \rightarrow J/\psi \mu^+ \mu^-$ ”, LHCb-PAPER-2017-036; arXiv:1709.04247, Phys. Rev. Lett. 119, 221801 (2017)

80. By LHCb Collaboration. “First observation of the rare purely baryonic decay  $B^0 \rightarrow p p^-$ ”, LHCb-PAPER-2017-022 ; arXiv:1709.01156 ; Phys. Rev. Lett. 119, 232001 (2017)

#### 10. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Эксперимент CMS»

Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for heavy neutrinos or third-generation leptoquarks in final states with two hadronically decaying  $\tau$  leptons and two jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP. V.1703. P.077. 2017

Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for a heavy composite Majorana neutrino in the final state with two leptons and two quarks at  $\sqrt{s}=13$  TeV // Phys.Lett.B V.775. P.315-337. 2017

Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for third-generation scalar leptoquarks and heavy right-handed neutrino in final states with two tau leptons and two jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP. V.1707. P.121. 2017

#### 11. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «Эксперимент NA64»

NA64 Collaboration (Gninenko S.N. et al.). Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS // Phys. Rev. Lett. V.118. P.011802. 2017

NA64 Collaboration (Gninenko S.N. et al.). Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode // arXiv: 1710.00971 (to be published in Phys. Rev. D)