

Федеральное агентство научных организаций РФ

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

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 01201050399

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН
член-корр. РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

24 января 2017 года



ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ,
ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, КОСМОЛОГИЯ
(промежуточный за 2016 год)
0031-2014-0065

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

М.В.Либанов
19 января 2017 года

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



М.В.Либанов (введение, заключение)
19.01.2017

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Красников Н.В. (раздел 1)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 2)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Рязская О.Г. (раздел 3)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Куденко Ю.Г. (раздел 4)
19.01.2017

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 145 с., 43 рис., 2 табл.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭНЕРГИИ, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, АДРОННЫЙ АКСИОН, ПЕНТАКВАРК.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год.

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.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ.

В области теоретической физики:

Получены новые решения модели кротовой норы, поддерживаемой духовым скалярным полем.

Продemonстрировано правильное применение метода фиксации масштаба сильных взаимодействий в выражениях для экспериментально измеряемых величин.

Предложен новый способ пересуммирования поправок теории возмущений в КХД для двух извлекаемых из экспериментальных данных характеристик КХД.

Исследована зависимость результатов для «полюсных» и «бегущих» масс тяжёлых кварков, вычисленных в четвёртом порядке теории возмущений, от числа ароматов кварков. Сделан вывод, что определение как полюсной, так и бегущей массы тяжёлого t -кварка из экспериментальных данных является непротиворечивым.

С учётом конформной симметрии, имеющей место в суперсимметричной квантовой электродинамике при некоторых допущениях, были получены явные трёх-петлевые поправки теории возмущений порядка $\alpha^4 N_f^2$ с помощью регуляризации посредством размерной редукции. Явно сформулирована выделенная схема конечных перенормировок, в котором НШВЗ-соотношение выполняется в третьем порядке теории возмущений.

Показано, что асимметричная тёмная материя может распадаться на фотоны с круговой поляризацией.

Был изучен вопрос о том, насколько перенормируемая теория гравитации с квадратом тензора Вейля в действии совместима с космологией. Найдено, что если потребовать время жизни духа больше возраста Вселенной, то эта степень свободы начинает доминировать в поздней Вселенной, что несовместимо с данными наблюдений.

Получены предсказания для индуцированного распада нуклонов в классе моделей с асимметричной тёмной материей, который носит название "хилогенезис". Одной из наиболее ярких сигнатур, присущих данной модели, является предсказание существования распадов протона и нейтрона, индуцированных столкновениями с частицами тёмной материи.

Показано, что избыток событий в экспериментах ATLAS и CMS в реакциях с двумя фотонами в конечном состоянии с инвариантной массой около 750 ГэВ можно объяснить

распадом сголдстино - частицы, возникающей в суперсимметричных теориях с низким масштабом нарушения суперсимметрии.

Проанализированы нейтринные данные Байкальского телескопа НТ-200, набранные за 1998-2003 год с целью поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц тёмной материи в центре Галактики. Получены верхние пределы на сечения аннигиляции частиц тёмной материи для нескольких каналов аннигиляции.

Изучено нарушение лептонного числа в суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии, содержащими лёгкую скалярную частицу — сголдстино. Показано, что смешивание сголдстино с легчайшим бозоном Хиггса приводит к изменению соответствующих констант связи и может приводить к распаду бозона Хиггса на $\mu\mu$, $\tau\tau$, нарушающему лептонный флейвор. Изучены феноменологические следствия такого сценария.

Изучена феноменология расширения минимального сценария с расщеплённой суперсимметрией, в котором имеется дополнительное синглетное суперполе и его компоненты остаются лёгкими после нарушения суперсимметрии. Исследована возможность генерации барионной асимметрии Вселенной в результате механизма электрослабого бариогенезиса в рамках данной модели.

Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий.

Проведено сравнение предсказаний модели с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ.

Изучена возможность объяснения наблюдаемого в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий свыше 30 ТэВ, потока нейтрино взаимодействиями космических лучей с газом в гало Млечного Пути и других галактик.

Получены новые ограничения на ширины распада частиц сверхтяжёлой тёмной материи путем сравнения сопутствующих потоков фотонов ультравысоких и сверхвысоких энергий с современными ограничениями.

Найдено решение нелинейных уравнений поля, описывающее провал плотности заряда в однородном устойчивом конденсате.

Изучено влияние дополнительных полей на существование и стабильность классических решений теории поля.

Разработан феноменологический подход описания рождения частиц в сильных гравитационных полях.

Рассмотрен сценарий с распадающейся холодной тёмной материей. Показано, что в рамках такого сценария можно ослабить имеющееся расхождение между прямыми измерениями постоянной Хаббла, а также данными, полученными миссией Planck.

Получены ограничения на параметры модели распределения горячего газа в гало Млечного пути при помощи меры дисперсии пульсаров.

Представлен новый аналитический подход для описания крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме, сформулирована пертурбативная техника для вычисления нелинейных поправок к космологическим корреляторам, с помощью которой были учтены инфракрасные эффекты, влияющие на барионные акустические (сахаровские) осцилляции.

Получено ограничение на скорость распространения гравитационных волн из временной задержки между детектированием сигналов лаборатории LIGO в Ханфорде и Ливингстоне от события GW150914.

Исследована гипотеза о том, что источником космических лучей являются новорожденные пульсары. Показано, что в этом случае они должны иметь диффузные гамма-гало, созданные взаимодействием космических лучей с межзвёздным газом. Поставлены ограничения на светимости гамма-гало, которые свидетельствует, что вклад пульсаров в полную энергию космических лучей подавлен в диапазоне энергий ГэВ-ТэВ.

Произведено вычисление критических индексов, соответствующих пороговым сингулярностям в различных корреляторах одномерных моделей многих частиц.

В теории гравитации, в которой кручение пространства-времени выступает в роли динамической переменной, получены самоускоряющиеся решения. Исследован спектр малых скалярных возмущений на фоне данного решения.

Показано, что в оригинальной модели генезиса с галилеонами в некоторый момент появляются градиентные неустойчивости. Предложен сценарий обобщенного генезиса, в котором не возникает патологических степеней свободы на протяжении всей эволюции Вселенной.

Доказано обобщение теоремы о несуществовании отскока и кротовой норы на лагранжианы галилеона, взаимодействующего с обычным скалярным полем. Показано, что в моделях с отскоком присутствуют градиентные неустойчивости или сингулярности, а в моделях с кротовыми норами всегда появляются духи.

Проделана существенная работа по полному Монте-Карло моделированию установки детектирования широких атмосферных ливней ШАЛ-МГУ, необходимая для обработки архивных данных (1982-1990 гг.) эксперимента.

Рассмотрены модели тёмной материи, состоящей из частиц с массой $10^7 - 10^{16}$ GeV, временем жизни существенно превышающем возраст Вселенной и распадающейся путем адронных взаимодействий. Предсказанные потоки фотонов и нейтрино, достигающие Земли, были сопоставлены с пределами на потоки фотонов, полученными в экспериментах Pierre Auger, Telescope Array, KASCADE, KASCADE-Grande, CASA-MIA и Yakutsk, а также с данными экспериментов IceCube и Pierre Auger по детектированию нейтрино сверхвысоких энергий.

Разработаны методы расчёта сечений взаимодействия нейтрино с ядрами при промежуточных ($E \sim 1$ ГэВ) и высоких энергиях ($E \gg 1$ ГэВ). Были вычислены полные сечения рассеяния нейтрино для энергий $5 \text{ GeV} < E < 1 \text{ TeV}$ для ядер дейтерия, углерода и железа.

Исследован коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксионоподобных частиц.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

В эксперименте Троицк-нью-масс: получено разрешение на приобретение и работу с радиоактивным тритием; модернизировано программное обеспечение сбора данных и отдельных элементов медленного контроля; проведено два полноценных сеанса измерений с радиоактивным тритием; выполнены калибровочные измерения с электронной пушкой по прецизионному исследованию функции пропускания электростатического спектрометра; получены спектры бета-электронов в распадах трития в интервале энергий 13-19 кэВ. На основании полученных данных даны предварительные оценки на верхний предел примеси тяжёлых нейтрино.

По проекту КАТРИН: рассчитаны спектры потерь энергии электронов в газовом источнике при упругом рассеянии на молекулярном водороде с учетом внутреннего движения атомов в молекуле трития; построены специальные статистические критерии для поиска примеси тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития; предложен эксперимент по исследованию зависимости от энергии налетающих электронов сечения возбуждения электронных состояний молекул трития; разработана оболочка на языке Python для управления аппаратными средствами работающими под управлением ПО на языках C++/Qt; проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления.

В эксперименте мю2е проведено новое измерение энергетическое разрешение кристалла, с помощью современных электронных блоков по оцифровке формы сигналов с APDs (CAEN WDT 5742) которое позволяет улучшить на 38% энергетическое разрешение кристалла ($\sigma_E/E = 0.13\%/\sqrt{E}$) по сравнению с ранними измерениями с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) LeCroy ADC 2249A.

В теоретическом исследовании свойств ядерно-подобных систем с необычными свойствами, имеющими квантовые числа очарование или прелесть впервые проведена классификация и расчёты статических характеристик скирмионов в зависимости от их свойств при масштабном преобразовании.

Сделан вывод о несправедливости широко распространенного мнения о том, что диффузный гамма-фон в области энергий 100 ГэВ описывается вкладом неразрешённых блазаров, которые дают лишь до трети фона. Остальное может быть вкладом, каскада, индуцированного рождением пар протонами с энергией выше 10^{19} эВ.

При исследовании нанографитовых плёнок обнаружен эффект переключения проводимости при токах до 1А, обнаружен обратный эффект Джозефсона, предполагающий существование сверхпроводящей фазы; установлено, что если СП фаза есть, то она представляет собой вкрапления в несверхпроводящей матрице.

Построена электродинамическая модель фононного резонатора, которая обосновала реальность его конструкции и функциональных свойств. Экспериментально удалось освоить производство ультрадисперсных порошков различных металлов, что является первым шагом к экспериментальной реализации прототипа фононного резонатора.

Разработанная программа, моделирующая элементарный акт антинуклон-нуклонного взаимодействия при низких энергиях, передана разработчикам программного комплекса QGSM (Quark-Gluon String Model) для компиляции, что даст возможность прямого моделирования рождения "странности" адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях; подготовлена программа для моделирования аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах углерода, которая используется коллаборацией при проектировании детектора

Найдена устойчивая долготная структура магнитного поля Солнца, определена скорость и глубина зоны, где она генерируется, доказан неслучайный характер её существования.

Выполнены работы, предусмотренные очередным этапом участия сотрудников в эксперименте CMS, связанные с модернизацией адронного калориметра, фотоприемников, анализом набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий.

С участием сотрудников Института в эксперименте LHCb получены важные результаты: неподтверждение кандидата в тетракварки $X(5568)$ в спектре инвариантных масс $B^0, \pi^\pm$; наиболее точное измерение СКМ угла γ из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов.

Исследование кинематики частиц тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр малых масс, а также вокруг сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик позволило найти профиль плотности пиков тёмной матери и массу в пределах того или иного радиуса. В этих пиках плотности должна происходить аннигиляция частиц тёмной материи, поэтому данный эффект

может представлять большой интерес для экспериментов по не прямой регистрации частиц тёмной материи посредством регистрации их продуктов аннигиляции (гамма-излучения и потоков заряженных частиц).

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	11
Основные результаты	13
1 Отдел теоретической физики	13
2 Отдел экспериментальной физики	38
3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики	104
4 Отдел физики высоких энергий	114
Заключение	140

ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

развитие квантовой теории поля и теории суперструн, в том числе направлений, связанных с исследованием режима сильной связи, прецизионным теоретическим анализом процессов в физике элементарных частиц, описанием сверхплотной кварк-глюонной среды, изучением физических процессов в ранней и современной Вселенной;

развитие теории сильных взаимодействий - квантовой хромодинамики - в применении к новым типам процессов, в том числе при высоких энергиях;

развитие подходов к созданию квантовой теории гравитации, исследование фундаментальных свойств физического пространства-времени на предельно малых и предельно больших расстояниях, поиск пределов справедливости теории относительности и проявлений возможного существования дополнительных измерений пространства;

развитие теории полей высших спинов и теории чёрных дыр;

развитие конформной теории поля и теории интегрируемых систем;

теоретические исследования проблемы происхождения «тёмной энергии» и ускоренного расширения поздней Вселенной, проблемы барионной асимметрии Вселенной и механизмов её генерации в процессе эволюции, проблемы природы тёмной материи во Вселенной;

поиск и исследование новых физических явлений в области энергий до нескольких ТэВ, новых элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в экспериментах на Большом адронном коллайдере;

построение на этой основе теории, существенно расширяющей современную теорию элементарных частиц;

исследование свойств адронов и механизмов реакций с их участием при промежуточных (до нескольких ГэВ) энергиях, поиски экзотических состояний, в том числе дибарионов, пентакварков и других;

в области физики нейтрино и астрофизики:

поиск частиц тёмной материи в неускорительных и коллайдерных экспериментах;

разработка методов регистрации тёмной материи;

прецизионное измерение параметров нейтринных осцилляций, поиск в них эффектов СР-нарушения;

прямой поиск массы нейтрино в диапазоне 0,1 - 0,3 эВ;

поиск нарушения закона сохранения лептонных чисел в процессах с мюонами на новом уровне чувствительности, поиск безнейтринного двойного бета-распада на уровне, предсказываемом осцилляционными экспериментами в предположении майорановской природы нейтрино;

поиск стерильных нейтрино в нейтринных осцилляциях, создание с этой целью галлиевого нейтринного детектора для экспериментов с высокоинтенсивными искусственными источниками нейтрино, а также подготовка и проведение экспериментов на исследовательских и промышленных атомных реакторах;

в области физики космических лучей:

измерение состава и энергетического спектра всех компонентов космического излучения (ядер, электронов, позитронов, фотонов) во всем диапазоне измеряемых энергий;

выяснение природы космических лучей сверхвысоких энергий, обнаружение их источников, исследование механизмов их генерации;

поиск и исследование антиматерии в составе космического излучения;

исследование астрофизических источников гамма-квантов высоких энергий, обнаружение новых типов таких источников, исследование механизмов генерации гамма-квантов;

мониторинг галактических и солнечных космических лучей, их состава, временных вариаций;

исследование влияния космических лучей на атмосферные процессы в натурных и лабораторных экспериментах;

геофизические эффекты космических лучей и их влияние на климат;

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Отдел теоретической физики

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

Нейтринная астрофизика, нейтринная и гамма-астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.

Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

Исследования в области космологии и астрофизики. Руководитель работ ак.
В.А.Рубаков.

Расчёты и разработка новых методов вычислений для проверки Стандартной модели.
Руководитель работ д.ф.-м.н. А.Л.Катаев.

Разработка и исследование моделей физики вне рамок Стандартной модели.
Руководитель работ д.ф.-м.н. Д.С.Горбунов.

Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей. Руководитель работ д.ф.-м.н. С.В.Троицкий.

1.1 РЕФЕРАТ

РАСШИРЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИЯ, АСТРОФИЗИКА, ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ, МОДЕЛИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ, ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ИНФЛЯЦИЯ, ИНТЕГРИРУЕМЫЕ МОДЕЛИ.

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 2016г.:

- 1) Получены новые решения модели кротовой норы, поддерживаемой духовым скалярным полем.
- 2) Продемонстрировано правильное применение метода фиксации масштаба сильных взаимодействий в выражениях для экспериментально измеряемых величин.
- 3) Предложен новый способ пересуммирования поправок теории возмущений в КХД для двух извлекаемых из экспериментальных данных характеристик КХД.
- 4) Исследована зависимость результатов для «полюсных» и «бегущих» масс тяжёлых кварков, вычисленных в четвёртом порядке теории возмущений, от числа ароматов кварков. Сделан вывод, что определение как полюсной так и бегущей массы тяжёлого t -кварка из экспериментальных данных является непротиворечивым.
- 5) С учётом конформной симметрии, имеющей место в суперсимметричной квантовой электродинамике при некоторых допущениях, были получены явные трёх-петлевые поправки теории возмущений порядка $\alpha^4 N_f^2$ с помощью регуляризации посредством размерной редукции. Явно сформулирована выделенная схема конечных перенормировок, в котором НШВЗ-соотношение выполняется в третьем порядке теории возмущений.
- 6) Показано, что асимметричная тёмная материя может распадаться на фотоны с круговой поляризацией.
- 7) Был изучен вопрос о том, насколько перенормируемая теория гравитации с квадратом тензора Вейля в действии совместима с космологией. Найдено, что если потребовать время жизни духа больше возраста Вселенной, то эта степень свободы начинает доминировать в поздней Вселенной, что несовместимо с данными наблюдений.
- 8) Получены предсказания для индуцированного распада нуклонов в классе моделей с асимметричной тёмной материей, который носит название "хилогенезис". Одной из наиболее ярких сигнатур, присущих данной модели, является предсказание существования распадов протона и нейтрона индуцированных столкновениями с частицами тёмной материи.
- 9) Показано, что избыток событий в экспериментах ATLAS и CMS в реакциях с двумя фотонами в конечном состоянии с инвариантной массой около 750 ГэВ можно объяснить распадом сголдстино - частицы, возникающей в суперсимметричных теориях с низким масштабом нарушения суперсимметрии.
- 10) Проанализированы нейтринные данные Байкальского телескопа НТ-200, набранные за 1998-2003 год с целью поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц тёмной материи в центре Галактики. Получены верхние пределы на сечения аннигиляции частиц тёмной материи для нескольких каналов аннигиляции.

- 11) Изучено нарушение лептонного числа в суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии, содержащими лёгкую скалярную частицу — сголдстино. Показано, что смешивание сголдстино с легчайшим бозоном Хиггса приводит к изменению соответствующих констант связи и может приводить к распаду бозона Хиггса $h \rightarrow \mu \tau$, нарушающему лептонный флейвор. Изучены феноменологические следствия такого сценария.
- 12) Изучена феноменология расширения минимального сценария с расщеплённой суперсимметрией, в котором имеется дополнительное синглетное суперполе и его компоненты остаются лёгкими после нарушения суперсимметрии. Исследована возможность генерации барионной асимметрии Вселенной в результате механизма электрослабого бариогенезиса в рамках данной модели.
- 13) Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий.
- 14) Проведено сравнение предсказаний модели с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ.
- 15) Изучена возможность объяснения наблюдаемого в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий свыше 30 ТэВ, потока нейтрино взаимодействиями космических лучей с газом в гало Млечного Пути и других галактик.
- 16) Получены новые ограничения на ширины распада частиц сверхтяжёлой тёмной материи путем сравнения сопутствующих потоков фотонов ультравысоких и сверхвысоких энергий с современными ограничениями.
- 17) Найдено решение нелинейных уравнений поля, описывающее провал плотности заряда в однородном устойчивом конденсате.
- 18) Изучено влияние дополнительных полей на существование и стабильность классических решений теории поля.
- 19) Разработан феноменологический подход описания рождения частиц в сильных гравитационных полях.
- 20) Рассмотрен сценарий с распадающейся холодной тёмной материей. Показано, что в рамках такого сценария можно ослабить имеющееся расхождение между прямыми измерениями постоянной Хаббла, а также данными, полученными миссией Planck.
- 21) Получены ограничения на параметры модели распределения горячего газа в гало Млечного пути при помощи меры дисперсии пульсаров.
- 22) Представлен новый аналитический подход для описания крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме, сформулирована пертурбативная техника для

вычисления нелинейных поправок к космологическим корреляторам, с помощью которой были учтены инфракрасные эффекты, влияющие на барионные акустические (сахаровские) осцилляции.

- 23) Получено ограничение на скорость распространения гравитационных волн из временной задержки между детектированием сигналов лаборатории LIGO в Ханфорде и Ливингстоне от события GW150914.
- 24) Исследована гипотеза о том, что источником космических лучей являются новорожденные пульсары. Показано, что в этом случае они должны иметь диффузные гамма-гало, созданные взаимодействием космических лучей с межзвёздным газом. Поставлены ограничения на светимости гамма-гало, которые свидетельствуют, что вклад пульсаров в полную энергию космических лучей подавлен в диапазоне энергий ГэВ-ТэВ.
- 25) Произведено вычисление критических индексов, соответствующих пороговым сингулярностям в различных корреляторах одномерных моделей многих частиц.
- 26) В теории гравитации, в которой кручение пространства-времени выступает в роли динамической переменной, получены самоускоряющиеся решения. Исследован спектр малых скалярных возмущений на фоне данного решения.
- 27) Показано, что в оригинальной модели генезиса с галилеонами в некоторый момент появляются градиентные неустойчивости. Предложен сценарий обобщенного генезиса, в котором не возникает патологических степеней свободы на протяжении всей эволюции Вселенной.
- 28) Доказано обобщение теоремы о несуществовании отскока и кротовой норы на лагранжианы галилеона, взаимодействующего с обычным скалярным полем. Показано, что в моделях с отскоком присутствуют градиентные неустойчивости или сингулярности, а в моделях с кротовыми норами всегда появляются духи.
- 29) Прделана существенная работа по полному Монте-Карло моделированию установки детектирования широких атмосферных ливней ШАЛ-МГУ, необходимая для обработки архивных данных (1982-1990 гг.) эксперимента.
- 30) Рассмотрены модели тёмной материи, состоящей из частиц с массой $10^7 - 10^{16}$ GeV, временем жизни существенно превышающем возраст Вселенной и распадающейся путем адронных взаимодействий. Предсказанные потоки фотонов и нейтрино, достигающие Земли, были сопоставлены с пределами на потоки фотонов, полученными в экспериментах Pierre Auger, Telescope Array, KASCADE, KASCADE-Grande, CASA-MIA и Yakutsk, а также с данными экспериментов IceCube и Pierre Auger по детектированию нейтрино сверхвысоких энергий.

- 31) Разработаны методы расчёта сечений взаимодействия нейтрино с ядрами при промежуточных ($E \sim 1$ ГэВ) и высоких энергиях ($E \gg 1$ ГэВ). Были вычислены полные сечения рассеяния нейтрино для энергий $5 \text{ GeV} < E < 1 \text{ TeV}$ для ядер дейтерия, углерода и железа.
- 32) Исследован коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксионоподобных частиц.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

1.2 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).

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.

1.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Существует огромное количество моделей сферически-симметричных или аксиально-симметричных кротовых нор. По построению такие кротовые норы описывают горловину, соединяющую две различные вселенные. Однако, наибольший интерес представляют кротовые норы, соединяющие два региона одной и той же вселенной. При этом эти регионы могут быть причинно связаны не только через горловину кротовой норы, но и вдоль причинных кривых, не проходящих через горловину. Типичная диаграмма погружения для такой кротовой норы может быть описана как плоскость с ручкой. Из-за нетривиальной топологии нахождение точных решений, описывающих такие кротовые норы, является чрезвычайно сложной задачей. Одним из упрощений является использование так называемой «хирургии», когда две метрики сшиваются вдоль тонкой оболочки. В частности, такой подход был использован Айхелбургом и Шайном в работе [1]. Эта модель является отправной точкой для построения решений, которые являются результатом работы коллектива ОТФ. Тот факт, что в кротовая нора Айхельбурга-Шайна строится с использованием метрики Маджумдара-Папапетру, позволяет расширить модель на космологический случай. Именно, внешняя метрика становится метрикой Кастора-Трашен описывающей внешнее гравитационное поле двух сфер в расширяющейся вселенной, а внутренняя — метрикой Райснера-Нордстрема-де Ситтера. В данной модели также не исключено появление замкнутых времени-подобных кривых, однако космологическое расширение должно неизбежно выключить образовавшуюся «машину времени». Уравнения Израэля требуют в случае космологической кротовой норы, чтобы тонкие оболочки вдоль которых сшиваются метрики, состояли из заряженной пыли. При этом можно подобрать параметры модели таким образом, что энергетические условия будут выполняться аналогично исходной модели Айхельбурга-Шайна. Однако, исследование причинных свойств космологической кротовой норы требует гораздо более нетривиального анализа чем в статическом случае. Это связано с необходимостью исследовать свойства метрики Кастора-Трашен, которая описывает внешнее расширяющееся пространство-время двух заряженных сфер. Подход, который позволил описать причинную структуру такого пространства-времени, состоит в исследовании световых геодезических на оси и плоскости симметрии. Уравнения геодезических могут быть сведены к изучению единственного обыкновенного дифференциального уравнения. Причинная структура тогда может быть выявлена с помощью исследования нулей этого уравнения. Сделанный в работе [2] анализ показывает, что существуют причинные кривые, соединяющие две оболочки во внешнем пространстве-времени Кастора-Трашен. Однако из-за космологического расширения такие кривые существуют лишь ограниченное время. Решение кротовой норы с топологией ручки, которая поддерживается духовым скалярным полем, по построению является многосвязным пространством-временем с группой гомотопии изоморфной группе целых чисел по сложению. Это означает, что для его описания необходимо использовать универсальное накрытие. Так как для построения используются решения Бронникова-Элиса и БФСЗ, искомое универсальное накрытие строится как бесконечное последовательное соединение копий этих решений, сшитых на оболочках. Требование непрерывности духового поля на оболочках ведёт к появлению топологического заряда — числа наматываний («winding number»).

Коллективом ОТФ было показано, что в модельной теории сильных взаимодействий $SU(N_c)$ с дополненными степенями свободы из Минимальной Суперсимметричной Модели (мультиплетом глюино), применяемый в литературе метод фиксации масштаба сильных взаимодействий в выражениях для экспериментально измеряемых величин, полученных в высоких порядках теории возмущений, содержит неточности. Данные неточности влияют на окончательные результаты сравнения теоретических предсказаний с существующими экспериментальными данными. Правильное применение метода продемонстрировано в работе [3].

Было показано, что в 4-ом порядке теории возмущений в теории сильных взаимодействий с цветовой группой $SU(N_c)$ при изучении следствий конформной симметрии и её нарушения нет необходимости вводить дополнительные элементы суперсимметрии. Предложен новый способ пересуммирования поправок теории возмущений в КХД для двух извлекаемых из экспериментальных данных характеристик КХД. Отмечено, что использование данного метода должно привести к более детальной оценке теоретических неопределенностей энергетической зависимости константы сильных взаимодействий, извлекаемой из сравнения предсказаний КХД с имеющимися экспериментальными данными [4].

Исследована зависимость результатов для «полюсных» и «бегущих» масс тяжёлых кварков, вычисленных в четвёртом порядке теории возмущений, от числа ароматов кварков [5]. Отмечено, что в отличие от случая очарованного с-кварка и прелестного b-кварка, для которых асимптотический характер теории возмущений проявляется в изучаемом соотношении на уровне 3-го и 4-го приближения теории возмущений, для t-кварка рост поправок теории возмущений должен проявиться при больших энергиях. Данное теоретическое следствие позволяет сделать вывод, что определение как полюсной, так и бегущей массы тяжёлого t-кварка из экспериментальных данных является непротиворечивым, в отличие от случаев с- и b-кварков, в которых обработку экспериментальных данных следует проводить в терминах изменяющихся с энергией бегущих масс [6].

С учётом конформной симметрии, имеющей место в суперсимметричной квантовой электродинамике при некоторых допущениях, были получены явные трёх-петлевые поправки теории возмущений порядка $\alpha^4 N_f^2$ с помощью регуляризации посредством размерной редукции. Найдено, что в этой регуляризации соотношения Новикова-Шифмана-Вайнштейна и Захарова (НШВЗ) для ренорм-групповых функций, определенных в неперенормированной теории, не выполняется. Явно сформулирована выделенная схема конечных перенормировок, в котором НШВЗ-соотношение выполняется в третьем порядке теории возмущений. Поставлен вопрос об однозначности выбора выделенной конкретной НШВЗ схемы перенормировок в третьем порядке теории возмущений, в котором размерная редукция не нарушает

суперсимметричные тождества Уорда. Данный результат имеет важное теоретическое значение [7].

Произведено вычисление критических индексов соответствующих пороговым сингулярностям в различных корреляторах одномерных моделей многих частиц. В отличие от других работ использован метод разложения по формфакторам, которые известны точно, что позволяет найти не только величины критических индексов, но и величину префактора сингулярности без всяких дополнительных предположений. Данное вычисление справедливо при импульсах много меньше импульса Ферми и представляет собой строгий вывод универсальных критических индексов [47].

Для квантовых интегрируемых систем, связанных с квантовой алгеброй петель $U_q(L(\mathfrak{sl}_2))$, выведены все функциональные соотношения в универсальном, т.е. модельно-независимом, виде. Для определения универсальных объектов интегрируемости мы использовали конечномерное произвольного спина и бесконечномерное q -осцилляторное представления квантовой группы. Универсальные функциональные соотношения конкретизированы далее на такие частные случаи, как спиновая цепочка XXZ и модель Фатеева-Замолотчикова. Впервые получены явные формулы для операторов монодромии для спина 1 представления квантовой группы.

Проведён исчерпывающий анализ конечномерных и бесконечномерных представлений квантовых алгебр петель $U_q(L(\mathfrak{sl}_2))$ и $U_q(L(\mathfrak{sl}_3))$, построенных с помощью вычислительного гомоморфизма Джимбо. Мы также провели сравнительный анализ двух различных бесконечномерных представлений соответствующих подалгебр Бореля, используемых для построения Q -операторов. Это так называемые q -осцилляторное и префундаментальное представления. Мы установили явные взаимосвязи между этими представлениями [48, 49].

Изучен вопрос о том, можно ли получить информацию о тёмной материи, измеряя состояние поляризации фотонов, предположительно рождающихся в результате распада частиц тёмной материи. Было показано, что асимметричная тёмная материя может распадаться на фотоны с круговой поляризацией. Такого рода особенность излучения можно исследовать в будущих экспериментах. В частности, если наличие линии излучения 3.5 кэВ будет подтверждено, то измерение её круговой поляризации может помочь выяснить природу её источника [8].

Был изучен вопрос о том, насколько перенормируемая теория гравитации с квадратом тензора Вейля в действии совместима с космологией. Найдено, что если потребовать время жизни духа больше возраста Вселенной, то эта степень свободы начинает доминировать в поздней Вселенной, что несовместимо с данными наблюдений [9].

Получены предсказания для индуцированного распада нуклонов в классе моделей с асимметричной тёмной материей, который носит название "хилогенезис". В рамках этих моделей предполагается, что тёмная материя состоит из двух компонент, скаляра и фермиона с массами порядка 1-3 ГэВ. Их взаимодействие с кварками первого поколения осуществляется через так называемый "нейтронный" портал. Одной из наиболее ярких сигнатур, присущих данной модели, является предсказание существования распадов протона и нейтрона индуцированных столкновениями с частицами тёмной материи.

В нашей работе рассмотрены варианты индуцированных распадов с разными вариантами конечных состояний: фотоном, электрон-позитронной парой или двумя пионами. Показано, что с учетом ограничений, накладываемых на эту модель поисками частиц тёмной материи на LHC, соответствующие времена жизни нуклонов могут достигать значений доступных для поиска в таких экспериментах как HyperKamioKande и DUNE. По результатам работы опубликована статья [10].

В конце 2015 года коллаборации ATLAS и CMS объявили о наблюдении небольшого избытка событий с двухфотонным конечным состоянием с инвариантной массой около 750 ГэВ. Несмотря на то, что статистическая значимость этого наблюдения была невелика, интерес представлял тот факт, что этот избыток событий обнаружен независимо в обоих экспериментах при одном и том же значении инвариантной массы. Коллективом ОТФ была исследована возможность того, что данный резонанс представляет собой сголдстино - частицу, возникающую в суперсимметричных теориях с низким масштабом нарушения суперсимметрии. Показано, что в рамках такой интерпретации избытка событий в экспериментах ATLAS и CMS должен быть виден сигнал с конечным состоянием из двух массивных векторных бозонов. Полученные предсказания могут быть проверены при большем количестве экспериментальных данных. Результаты работы опубликованы в статье [11]. В более поздних данных ATLAS и CMS за 2016 год наличие избытка двухфотонных событий с инвариантной массой около 750 ГэВ не подтвердилось. Тем не менее работа [11] представляет интерес для поисков аналогичных резонансов при других массах.

Проанализированы нейтринные данные Байкальского телескопа НТ-200, набранные за 1998-2003 год с целью поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц тёмной материи в центре Галактики. Анализ был выполнен с использованием двух разных методов: выбор оптимального конуса вокруг направления на центр Галактики и метод максимального правдоподобия. Оба метода дали согласующиеся в пределах ошибок результаты. Получены верхние пределы на сечения аннигиляции частиц тёмной материи для нескольких каналов аннигиляции: $b\bar{b}$, W^+W^- , $\tau^+\tau^-$, $\mu^+\mu^-$ и $\nu\bar{\nu}$. По результатам работы опубликована статья [12].

Изучено нарушение лептонного числа в суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии, содержащими лёгкую скалярную частицу -- сголдстино. Константы связи этой частицы с фермионами Стандартной модели определяются постоянными, мягко нарушающими суперсимметрию, которые в общем случае нарушают флейвор в лептонном секторе. В работе показано,

что смешивание с голдстоуном с легчайшим бозоном Хиггса приводит к изменению соответствующих констант связи и может приводить к распаду бозона Хиггса $H \rightarrow \mu^+ \mu^-$, нарушающему лептонный флейвор. Изучены феноменологические следствия такого сценария. Результаты работы опубликованы в статье [13] и в трудах конференции Кварки-2016 [14].

Одним из привлекательных сценариев новой физики является класс моделей с расщепленной суперсимметрией. В таких моделях большая часть суперпартнеров (все скаляры, за исключением легчайшего бозона Хиггса) имеют массы, значительно превышающие электрослабый масштаб. Низкоэнергетическая теория содержит помимо частиц Стандартной модели также дополнительные фермионы - суперпартнеры калибровочных и хиггсовских бозонов. Коллективом ОТФ была изучена феноменология расширения минимального сценария с расщепленной суперсимметрией, в котором имеется дополнительное синглетное суперполе и его компоненты остаются лёгкими после нарушения суперсимметрии. Эта модель была предложена ранее в работах коллектива ОТФ. Было проведено сканирование по пространству параметров модели и исследован вопрос о возможной величине масштаба расщепления. Оказалось, что наиболее предпочтительным с феноменологической точки зрения является вариант, в котором масштаб расщепления оказывается не больше нескольких десятков ТэВ. Далее в работе была исследована возможность генерации барионной асимметрии Вселенной в результате механизма электрослабого бариогенезиса. Было показано, что это возможно в некоторой разрешенной области пространства параметров. Изучен ряд феноменологических следствий данного сценария: предсказания для электрического дипольного момента нейтрона и электрона, а также проявления новых фермионов в коллайдерных экспериментах. Результаты работы опубликованы в [15].

В 2016 году велась работа по нескольким задачам, имеющим прямое отношение к проблеме происхождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ). Проблема происхождения КЛУВЭ является одной из наиболее актуальных и сложных задач современной астрофизики частиц. Экспериментальные исследования в данной области сильно осложнены из-за малости потока частиц указанных энергий, порядка 1 частицы на квадратный километр на стерадиан в год при энергии 10 ЭэВ. По этой причине во всех существующих экспериментах свойства частиц ультравысоких энергий определяются косвенным образом по характеристикам широких атмосферных ливней, инициированных космическими лучами в атмосфере Земли.

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 удастся достоверно измерить, а интерпретация направлений прихода неочевидна, 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 получил развитие в работах [16]-[20], опубликованных в 2016 году, что позволило получить независимые ограничения на массовый состав и указать на вероятные источники КЛУВЭ, а также ограничить возможный вклад в поток КЛУВЭ от распада сверхтяжёлой тёмной материи.

В работе [16] изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий. Отдельно рассмотрен аналитический подход к вычислению спектра каскадного излучения и обсуждены границы его применимости. С помощью данных орбитального эксперимента Ферми, получено универсальное модельно-независимое ограничение на максимальную плотность энергии каскадного излучения. В работах [17], [18] в ускорительных сценариях образования КЛУВЭ, предполагающих преимущественно протонный первичный состав, вычислен поток вторичного гамма-излучения и нейтрино от взаимодействия космических лучей с межгалактическим фотонным фоном. Проведено сравнение предсказаний с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ. В результате исключены сценарии с сильной эволюцией и жёстким первичным спектром. В работе [19] изучена возможность объяснения, наблюдаемого в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий свыше 30 ТэВ, потока нейтрино взаимодействиями космических лучей с газом в гало Млечного Пути и других галактик. В работе [20] получены новые ограничения на ширины распада частиц сверхтяжёлой тёмной материи путем сравнения сопутствующих потоков фотонов ультравысоких и сверхвысоких энергий с современными ограничениями.

Нетопологические солитоны появляются в определённом классе нелинейных теорий с $U(1)$ -инвариантностью. В последнее время внимание исследователей привлекла возможная роль этих объектов в различных космологических аспектах. Во-первых, изучается их проявление в послеинфляционную эпоху и влияние на возможный гравитационно-волновой сигнал. Во-вторых, недавно возник определенный интерес к таким объектам при изучении кластеров тёмной материи, состоящей из очень лёгких гипотетических частиц. В этой связи возникает задача об описании рождения нетопологических солитонов из однородного конденсата. В работе [21] найдено решение нелинейных уравнений поля, описывающее провал плотности заряда в однородном устойчивом конденсате. Солитон является нетопологическим, но, в отличие

от Q-шаров, имеется решение с одним определённым зарядом. В работах [22]-[23] изучается влияние дополнительных полей на существование и стабильность классических решений.

Коллектив продолжил исследование феноменологического описания рождения частиц в сильных гравитационных полях. Важность именно такого подхода обусловлена тем, что подробное описание таких квантовых процессов требует знания граничных условий, а сами эти условия могут быть заданы лишь если известна глобальная геометрия, т.е., полное решение задачи с учётом обратного влияния квантовых полей на метрику пространства-времени. Но в сильных гравитационных полях рождение частиц столь бурное, что его можно описать неким классическим распределением материи. Предлагаемый нами метод позволяет, в принципе, учитывать обратное влияние на геометрию пространства-времени не только тензора энергии-импульса уже рождённых частиц, но и энергетических свойств самого процесса рождения, что вселяет надежду на решение проблемы сингулярности за счёт квантового (но описываемого классически) нарушения условия энергодоминантности [24], [25]. Помимо этого, мы автоматически оказываемся в русле идеи А.Д.Сахарова о гравитационном поле как проявления натяжений вакуума всех других квантовых полей.

Исследована модель с распадающейся холодной тёмной материи, которая способна ослабить имеющиеся противоречия между некоторыми космологическими и астрофизическими измерениями. В результате было выявлено, что в рамках настоящей модели действительно удаётся добиться лучшего соответствия экспериментальным данным на доверительном уровне $1.5-3\sigma$ по сравнению со стандартной космологической моделью за счёт большего значения постоянной Хаббла. Таким образом, в рамках настоящего рассмотрения удаётся ослабить имеющееся расхождение прямых измерений постоянной Хаббла и крупномасштабной структуры Вселенной посредством изучения скоплений галактик с соответствующими косвенными ограничениями, полученными миссией Planck, и привести различные ограничения на космологические параметры в большее соответствие с экспериментом. Результаты опубликованы в работах [26], [27].

Получены ограничения на параметры модели распределения горячего газа в гало Млечного пути при помощи меры дисперсии пульсаров. Для нескольких моделей распределения газа с параметрами, при которых объём горячего газа решает проблему "недостающих барионов", для популяции пульсаров Млечного пути в шаровых скоплениях и пульсаров с параллаксами была рассчитана мера дисперсии, и полученные значения сравнивались с экспериментальными. Было получено, что ни одна модель не противоречит экспериментальным данным, и наличие такого объёма горячего газа в гало Млечного пути возможно как решение проблемы "недостающих барионов". Результаты опубликованы в работе [28].

Представлен новый аналитический подход для описания крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме, названный "теория возмущений на выделенных временных расслоениях". Центральным объектом данного метода является

зависящая от времени функция распределения вероятности, производящая корреляторы космологических наблюдаемых в фиксированные моменты времени. Разлагая функцию распределения возле гауссова статистического веса, была сформулирована пертурбативная техника для вычисления нелинейных поправок к космологическим корреляторам, аналогичная диаграммному представлению в трёхмерной евклидовой квантовой теории поля, причем время играет роль внешнего параметра. Для физически интересного случая тёмной материи в пространстве Эйнштейна-де Ситтера зависимость функции распределения от времени может быть найдена точно, и она заключена в зависящей от времени константе связи, которая контролирует пертурбативное разложение. Было показано, что все базовые элементы этого разложения не содержат нефизических инфракрасных расходимостей, которые являются общим местом в стандартной теории космологических возмущений. Это обстоятельство намечает путь к систематическому пересуммированию инфракрасных эффектов в формировании структур на больших масштабах. Было также аргументировано, что предложенный метод предоставляет естественный путь для учёта эффектов короткомасштабной динамики на больших масштабах в рамках эффективной теории поля. По результатам работы опубликована статья [29].

Разработанная ранее теория возмущений на выделенных временных расслоениях (TBVBP) была использована для аккуратного описания инфракрасных эффектов, влияющих на барионные акустические (сахаровские) осцилляции, которые присутствуют в распределении материи на больших масштабах. В TBVBP это осуществляется посредством систематического пересуммирования, которое имеет простое диаграммное представление и не вовлекает неконтролируемых приближений. Были описаны правила выделения усиленных вкладов и выведены явные выражения для пересуммированного спектра мощности и биспектра материи в лидирующем и пост-лидирующем приближениях. Было показано, что двухточечная корреляционная функция хорошо согласуется с данными N-точечных симуляций на масштабах сахаровских осцилляций. Развитый в работе систематический метод также позволяет надежно оценить сдвиг барионного акустического пика, вызванного нелинейными эффектами. По результатам работы опубликована статья [30], [31].

Было предложено, что наблюдаемая временная задержка между детектированием сигналов лаборатории LIGO в Ханфорде и Ливингстоне от события GW150914 позволяет поставить ограничения на скорость распространения гравитационных волн, $c_{\text{GW}} \lesssim 1.7$ в терминах скорости света. В дополнение к нижнему пределу из-за отсутствия гравитационного черенковского излучения космическими лучами, это позволило поставить модельно-независимое ограничение с двух сторон $1 \lesssim c_{\text{GW}} \lesssim 1.7$. По результатам работы опубликована статья [32].

Одними из возможных источников космических лучей являются новорожденные пульсары. Если это действительно так, то они-то должны иметь диффузные гамма-гало, созданные взаимодействием космических лучей с межзвёздным газом. Была предпринята попытка обнаружить такие гало вокруг молодых пульсаров, используя данные 7 лет наблюдений Fermi-LAT. Был отобран и проанализирован набор из 8 пульсаров, которые с наибольшей вероятностью должны были иметь детектируемое протяжённое гамма-излучение. Протяженная эмиссия, которую можно было бы интерпретировать как гамма-гало, была найдена только вокруг пульсара PSR J0007+7303. Светимость этого источника согласуется с полной энергии излученных космических лучей 10^{50} эрг, хотя другие интерпретации этого источника не исключены. Вне зависимости от природы этого источника, были поставлены ограничения на светимости гамма-гало, которые свидетельствуют что вклад пульсаров в полную энергию космических лучей подавлен в диапазоне энергий ГэВ-ТэВ. По результатам работы опубликована статья [33].

Произведено вычисление критических индексов, соответствующих пороговым сингулярностям в различных корреляторах одномерных моделей многих частиц. В отличие от других работ использован метод разложения по формфакторам, которые известны точно, что позволяет найти не только величины критических индексов, но и величину префактора сингулярности без всяких дополнительных предположений. Данное вычисление справедливо при импульсах много меньше импульса Ферми и представляет собой строгий вывод универсальных критических индексов. Результаты исследования опубликованы в работе [34].

Ускоренное расширение Вселенной до сих пор остается не вполне объясненным явлением. Наиболее общепринятое на данный момент объяснение – наличие космологической постоянной. С другой стороны, остается возможность объяснить ускоренное расширение Вселенной, модифицируя Общую Теорию Относительности (ОТО) на космологических масштабах (так называемые ИК-модификации). В последнее время предлагалось множество ИК-модификаций гравитации. Большинство из них сталкиваются с проблемой неустойчивости линейных возмущений: спектр возмущений в таких теориях часто содержит духовые, тахионные или градиентные неустойчивости.

Перспективными с точки зрения ИК-модификаций выглядят теории гравитации, в которых кручение пространства-времени выступает в роли динамической переменной. Ранее в работах коллектива ОТФ было показано, что эта модель стабильна относительно малых линейных возмущений на фоне пространств Минковского, (анти) де Ситтера, а также на фоне пространств Эйнштейна достаточно малой кривизны. Найдено самоускоряющееся решение в отсутствие космологической постоянной в Лагранжиане. Показано, что простым подбором параметров (без тонкой подстройки) можно сделать эффективную космологическую постоянную в этой модели малой [35]. Исследован спектр малых скалярных возмущений на фоне данного решения [36].

Показано [37], что в оригинальной модели генезиса с галилеонами в некоторый момент появляются градиентные неустойчивости. Предложен сценарий обобщенного генезиса, в котором не возникает патологических степеней свободы на протяжении всей эволюции Вселенной. В теории Хорндески с лагранжианом до третьего порядка включительно доказана теорема о несуществовании отскока (no-go теорема), то есть доказано, что независимо от формы лагранжиана галилеона и наличия какой-либо ещё материи в моделях с отскоком присутствуют градиентные нестабильности или сингулярности.

Доказано обобщение теоремы о несуществовании отскока и кротовой норы на лагранжианы галилеона, взаимодействующего с обычным скалярным полем [38]. Показано, что в моделях с отскоком присутствуют градиентные нестабильности или сингулярности, а в моделях с кротовыми норами всегда появляются духи.

Написан и отлажен численный код [39], позволяющий проводить численные симуляции гравитации со скалярным полем. Изучено влияние гравитации на динамику скалярных доменных стенок. В частности, найдена зависимость радиуса статического пузыря от параметров потенциала. Показано, что при всех рассматриваемых параметрах статические пузыри неустойчивы.

Проделана существенная работа по полному Монте-Карло моделированию установки детектирования широких атмосферных ливней ШАЛ-МГУ, необходимая для обработки архивных данных (1982-1990 гг.) эксперимента. Работа включала в себя генерацию Монте-Карло ливней с помощью пакета CORSIKA и моделирование их детектирования установкой таким образом, что Монте-Карло набор и экспериментальные данные обрабатывались одной и той же программой реконструкции. Было показано, что полученный Монте-Карло набор успешно воспроизводит экспериментальных данные в смысле совпадения распределений основных наблюдаемых. По итогам этой работы была опубликована статья [40]. Далее, с использованием этого Монте-Карло набора и данных мюонного детектора ШАЛ-МГУ были исследованы модели высокоэнергичных адронных взаимодействий: QGSJet I, QGSJet II, EPOS, Sybill в диапазоне энергий первичной частицы ливня 100-500 PeV. Было показано, что все данные модели адекватно описывают экспериментальные данные в смысле совпадения распределений плотности числа мюонов. Этот результат является особенно актуальным в свете данных экспериментов Pierre Auger и Yakutsk, где при более высоких энергиях первичной частицы было найдено существенное расхождение экспериментальных данных и предсказаний адронных моделей. По результатам подготовлена работа [41], статья находится на рецензии в журнале Astroparticle Physics.

Были рассмотрены модели тёмной материи, состоящей из частиц с массой $10^7 - 10^{16}$ GeV, временем жизни существенно превышающем возраст Вселенной и распадающейся путём адронных взаимодействий. Потоки фотонов и нейтрино, генерируемые в распадах галактической и экстрагалактической тёмной материи были получены численно. При этом были

учтены эффекты поглощения и каскадного излучения фотонов и осцилляций нейтрино при распространении в космической среде. Предсказанные потоки фотонов и нейтрино, достигающие Земли, были сопоставлены с пределами на потоки фотонов полученными в экспериментах Pierre Auger, Telescope Array, KASCADE, KASCADE-Grande, CASA-MIA и Yakutsk а также с данными экспериментов IceCube и Pierre Auger по детектированию нейтрино сверхвысоких энергий. На основании этого сопоставления были получены ограничения на времена жизни частиц тёмной материи. Фотонные ограничения оказываются сильнее нейтринных и являются наиболее сильными на данный момент ограничениями на время жизни сверхтяжёлой тёмной материи. Результаты опубликованы в работах [42], [43].

Продолжена работа по разработке методов расчёта сечений взаимодействия нейтрино с ядрами при промежуточных ($E \sim 1$ ГэВ) и высоких энергиях ($E \gg 1$ ГэВ). Были вычислены полные сечения рассеяния нейтрино для энергий $5 \text{ GeV} < E < 1 \text{ TeV}$ для ядер дейтерия, углерода и железа. Изучены поправки к полным нейтринным сечениям по константе сильного взаимодействия α_s до второго порядка. Изучены ядерные эффекты в полных нейтринных сечениях. Предварительные результаты доложены на конференциях NEP2016 и ACAT2016 и опубликованы в [44].

Параллельно с работой над нейтринным рассеянием развивались методы расчёта партонных распределений ядер. Результаты этой работы применены для расчёта структурных функций ядер и соответствующих нейтринных сечений при высоких энергиях, сечений процесса Дрелла-Яна в столкновениях протонов с ядрами, а также сечений W и Z бозонов в $p+A$ столкновениях. Показано отличное согласие результатов предсказаний с данными экспериментов CMS и ATLAS по рождению W и Z в $p + Pb$ столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ на LHC [45].

Поставлена и частично решена задача по исследованию модели NMCCM - Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели с включённым в неё дополнительным скалярным полем в контексте оценки возможности эксперимента LHC по поиску тёмной материи дать наиболее строгие ограничения на параметры частиц тёмной материи в сравнении с экспериментами по прямому и непрямоу поиску тёмной материи (CRESST, CDMS, Xenon, GoGeNT и др.). Было необходимо получить набор диаграмм, отражающих зависимость верхних пределов спин-зависимых и спин-независимых сечений рассеяния частиц тёмной материи на нуклонах от массы этих частиц. Результат данной работы позволит ответить на актуальный вопрос о перспективности дальнейших поисков тёмной материи с помощью нейтринных детекторов. Для получения необходимых результатов использовались программные пакеты CheckMate, Mathgraph, NMSSMTools а также несколько скриптов, написанных на языках Perl и Python.

В связи с усиливающимися ограничениями на модели низкоэнергетической суперсимметрии, все больший интерес в последнее время вызывает возможность формирования тёмной материи из лёгких скалярных (аксионоподобных) 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 [46] мы впервые полностью исследовали коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксионоподобных частиц. Во-первых, аксионоподобные 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 её первоначальной массы. Оставшаяся часть аксионов после этого конденсируется в Бозе-звезду подкритической массы. Данное явление может существенно изменить предсказание ряда космологических моделей с аксионоподобной 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.

1.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приведём наиболее важные результаты, полученные коллективом Отдела теоретической физики в 2016г.:

- 1) Получены новые решения модели кротовой норы, поддерживаемой духовым скалярным полем.
- 2) Продемонстрировано правильное применение метода фиксации масштаба сильных взаимодействий в выражениях для экспериментально измеряемых величин.
- 3) Предложен новый способ пересуммирования поправок теории возмущений в КХД для двух извлекаемых из экспериментальных данных характеристик КХД.
- 4) Исследована зависимость результатов для «полюсных» и «бегущих» масс тяжёлых кварков, вычисленных в четвёртом порядке теории возмущений, от числа ароматов кварков. Сделан вывод, что определение как полюсной так и бегущей массы тяжёлого t -кварка из экспериментальных данных является непротиворечивым.

- 5) С учётом конформной симметрии, имеющей место в суперсимметричной квантовой электродинамике при некоторых допущениях, были получены явные трёх-петлевые поправки теории возмущений порядка $\alpha^4 N_f^2$ с помощью регуляризации посредством размерной редукции. Явно сформулирована выделенная схема конечных перенормировок, в котором НШВЗ-соотношение выполняется в третьем порядке теории возмущений.
- 6) Показано, что асимметричная тёмная материя может распадаться на фотоны с круговой поляризацией.
- 7) Был изучен вопрос о том, насколько перенормируемая теория гравитации с квадратом тензора Вейля в действии совместима с космологией. Найдено, что если потребовать время жизни духа больше возраста Вселенной, то эта степень свободы начинает доминировать в поздней Вселенной, что несовместимо с данными наблюдений.
- 8) Получены предсказания для индуцированного распада нуклонов в классе моделей с асимметричной тёмной материей, который носит название "хилогенезис". Одной из наиболее ярких сигнатур, присущих данной модели, является предсказание существования распадов протона и нейтрона индуцированных столкновениями с частицами тёмной материи.
- 9) Показано, что избыток событий в экспериментах ATLAS и CMS в реакциях с двумя фотонами в конечном состоянии с инвариантной массой около 750 ГэВ можно объяснить распадом сголдстино - частицы, возникающей в суперсимметричных теориях с низким масштабом нарушения суперсимметрии.
- 10) Проанализированы нейтринные данные Байкальского телескопа НТ-200, набранные за 1998-2003 год с целью поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц тёмной материи в центре Галактики. Получены верхние пределы на сечения аннигиляции частиц тёмной материи для нескольких каналов аннигиляции.
- 11) Изучено нарушение лептонного числа в суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии, содержащими лёгкую скалярную частицу — сголдстино. Показано, что смешивание сголдстино с легчайшим бозоном Хиггса приводит к изменению соответствующих констант связи и может приводить к распаду бозона Хиггса $h \rightarrow \mu^+ \mu^-$, нарушающему лептонный флейвор. Изучены феноменологические следствия такого сценария.
- 12) Изучена феноменология расширения минимального сценария с расщеплённой суперсимметрией, в котором имеется дополнительное синглетное суперполе и его компоненты остаются лёгкими после нарушения суперсимметрии. Исследована

возможность генерации барионной асимметрии Вселенной в результате механизма электрослабого бариогенезиса в рамках данной модели.

- 13) Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий.
- 14) Проведено сравнение предсказаний модели с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ.
- 15) Изучена возможность объяснения наблюдаемого в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий свыше 30 ТэВ, потока нейтрино взаимодействиями космических лучей с газом в гало Млечного Пути и других галактик.
- 16) Получены новые ограничения на ширины распада частиц сверхтяжёлой тёмной материи путем сравнения сопутствующих потоков фотонов ультравысоких и сверхвысоких энергий с современными ограничениями.
- 17) Найдено решение нелинейных уравнений поля, описывающее провал плотности заряда в однородном устойчивом конденсате.
- 18) Изучено влияние дополнительных полей на существование и стабильность классических решений теории поля.
- 19) Разработан феноменологический подход описания рождения частиц в сильных гравитационных полях.
- 20) Рассмотрен сценарий с распадающейся холодной тёмной материей. Показано, что в рамках такого сценария можно ослабить имеющееся расхождение между прямыми измерениями постоянной Хаббла, а также данными, полученными миссией Planck.
- 21) Получены ограничения на параметры модели распределения горячего газа в гало Млечного пути при помощи меры дисперсии пульсаров.
- 22) Представлен новый аналитический подход для описания крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме, сформулирована пертурбативная техника для вычисления нелинейных поправок к космологическим корреляторам, с помощью которой были учтены инфракрасные эффекты, влияющие на барионные акустические (сахаровские) осцилляции.
- 23) Получено ограничение на скорость распространения гравитационных волн из временной задержки между детектированием сигналов лаборатории LIGO в Ханфорде и Ливингстоне от события GW150914.
- 24) Исследована гипотеза о том, что источником космических лучей являются новорожденные пульсары. Показано, что в этом случае они должны иметь диффузные гамма-гало, созданные взаимодействием космических лучей с межзвёздным газом. Поставлены ограничения на

светимости гамма-гало, которые свидетельствует, что вклад пульсаров в полную энергию космических лучей подавлен в диапазоне энергий ГэВ-ТэВ.

- 25) Произведено вычисление критических индексов, соответствующих пороговым сингулярностям в различных корреляторах одномерных моделей многих частиц.
- 26) В теории гравитации, в которой кручение пространства-времени выступает в роли динамической переменной, получены самоускоряющиеся решения. Исследован спектр малых скалярных возмущений на фоне данного решения.
- 27) Показано, что в оригинальной модели генезиса с галилеонами в некоторый момент появляются градиентные неустойчивости. Предложен сценарий обобщенного генезиса, в котором не возникает патологических степеней свободы на протяжении всей эволюции Вселенной.
- 28) Доказано обобщение теоремы о несуществовании отскока и кротовой норы на лагранжианы галилеона, взаимодействующего с обычным скалярным полем. Показано, что в моделях с отскоком присутствуют градиентные неустойчивости или сингулярности, а в моделях с кротовыми норами всегда появляются духи.
- 29) Прделана существенная работа по полному Монте-Карло моделированию установки детектирования широких атмосферных ливней ШАЛ-МГУ, необходимая для обработки архивных данных (1982-1990 гг.) эксперимента.
- 30) Рассмотрены модели тёмной материи, состоящей из частиц с массой $10^7 - 10^{16}$ GeV, временем жизни существенно превышающем возраст Вселенной и распадающейся путем адронных взаимодействий. Предсказанные потоки фотонов и нейтрино, достигающие Земли, были сопоставлены с пределами на потоки фотонов, полученными в экспериментах Pierre Auger, Telescope Array, KASCADE, KASCADE-Grande, CASA-MIA и Yakutsk, а также с данными экспериментов IceCube и Pierre Auger по детектированию нейтрино сверхвысоких энергий.
- 31) Разработаны методы расчёта сечений взаимодействия нейтрино с ядрами при промежуточных ($E \sim 1$ ГэВ) и высоких энергиях ($E \gg 1$ ГэВ). Были вычислены полные сечения рассеяния нейтрино для энергий $5 \text{ GeV} < E < 1 \text{ TeV}$ для ядер дейтерия, углерода и железа.
- 32) Исследован коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксионоподобных частиц.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

1.5 ПУБЛИКАЦИИ

- [1] F. Schein, P. C. Aichelburg, «Traversable Wormholes in Geometries of Charged Shells», Phys. Rev. Lett. 77, 4130-4133 (1996)
- [2] A.L. Smirnov, «Traversable intra-Universe wormholes and timeholes in General Relativity: two new solutions», Class.Quant.Grav. 33 225005 (2016)
- [3] A.L. Kataev and S.V. Mikhailov, “The beta-expansion formalism in perturbative QCD and its extension”, JHEP 1611 (2016) 079 [arXiv:1607.08698 [hep-th]].
- [4] G. Cvetič and A.L. Kataev “Adler function and Bjorken polarized sum rule: Perturbation expansions in powers of the $SU(N_c)$ conformal anomaly and studies of the conformal symmetry limit,” Phys. Rev. D 94 (2016) no.1, 014006 [arXiv:1604.00509 [hep-ph]].
- [5] A.L. Kataev and V.S. Molokoedov, “From perturbative calculations of the QCD static potential towards four-loop pole-running heavy quarks masses relation,” [arXiv:1604.03485 [hep-ph]]- J. Phys. Conf. Ser. 762 (2016) no. 1, 012078
- [6] A.L. Kataev and V.S. Molokoedov, “On the flavour dependence of the $\mathcal{O}(\alpha_s^4)$ correction to the relation between running and pole heavy quark masses,” Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) no.8, 271
- [7] S.S. Aleshin, I.O. Goriachuk, A.L. Kataev and K.V. Stepanyantz, “The NSVZ scheme for $N=1$ SQED with N_f flavors, regularized by the dimensional reduction, in the three-loop approximation,” arXiv:1610.08034, Phys.Lett, B764 (2017) 222-217
- [8] W. Bonivento, D. Gorbunov, M. Shaposhnikov and A. Tokareva, «Polarization of photons emitted by decaying dark matter,» Phys. Lett. B 765, 127 (2017) [arXiv:1610.04532 [hep-ph]].
- [9] M.M. Ivanov and A.A. Tokareva, «Cosmology with a light ghost,» JCAP 1612, no. 12, 018 (2016) [arXiv:1610.05330 [hep-th]].
- [10] S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, «Nucleon-decay like signatures of Hylogenesis», Phys.Rev. D93 (2016) no.3, 035009
- [11] S.V.Demidov, D.S.Gorbunov, «On sgoldstino interpretation of the diphoton excess» Письма в ЖЭТФ, vol. 103, p. 241
- [12] BAIKAL Collaboration (A.D. Avrorin (Moscow, INR) et al.) «A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200», Astropart.Phys. 81 (2016) 12-20
- [13] S.V. Demidov, I.V. Sobolev, «Lepton flavor-violating decays of the Higgs boson from sgoldstino mixing», JHEP 1608 (2016) 030
- [14] Sergei Demidov, Ivan Sobolev, «Sgoldstino physics and flavor-violating Higgs boson decays», EPJ Web Conf. 125 (2016) 02017
- [15] S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov, «Split NMSSM with electroweak baryogenesis», JHEP 1611 (2016) 148
- [16] V. Berezhinsky, O. Kalashev, «High energy electromagnetic cascades in extragalactic space: physics and features», Phys.Rev. D94 (2016) no.2, 023007

- [17] V. Berezhinsky, A. Gazizov (Gran Sasso), O. Kalashev, «Cascade photons as test of protons in UHECR», *Astropart.Phys.* 84 (2016) 52-61
- [18] Oleg Kalashev, «Constraining Dark Matter and Ultra-High Energy Cosmic Ray Sources with Fermi-LAT Diffuse Gamma Ray Background», *EPJ Web Conf.* 125 (2016) 02012
- [19] Oleg Kalashev, Sergey Troitsky, «Fluxes of diffuse gamma rays and neutrinos from cosmic-ray interactions with the circumgalactic gas», *Phys.Rev. D* 94 (2016) no.6, 063013
- [20] O.K. Kalashev, M. Yu. Kuznetsov, «Constraining heavy decaying dark matter with the high energy gamma-ray limits», *Phys.Rev. D* 94 (2016) no.6, 063535
- [21] E. Nugaev, A. Shkerin and M.Smolyakov, «Q-holes», *JHEP* 1612 (2016) 032, arXiv:1609.05568
- [22] E.Y. Nugaev and M.N. Smolyakov, «Q-balls in the Wick-Cutkosky model», arXiv:1605.02056
- [23] A.V. Kovtun and E.Y. Nugaev, «Radiative corrections and instability of large Q-Balls», arXiv:1612.00700
- [24] Victor Berezhin, Vyacheslav Dokuchaev, Yury Eroshenko, «Cosmological particle creation in conformal gravity», *EPJ Web Conf.* 125 (2016) 03003
- [25] Victor Berezhin, Vyacheslav Dokuchaev, Yury Eroshenko, «Particle creation phenomenology, Dirac sea and the induced Weyl and Einstein-dilaton gravity», e-Print: arXiv:1604.07753
- [26] Chudaykin, A. and Gorbunov, D. and Tkachev, I., «Dark matter component decaying after recombination: Lensing constraints with Planck data,» *Phys.Rev. D* 94 (2016) 023528, arXiv:1602.08121 [astro-ph.CO].
- [27] Chudaykin, Anton and Gorbunov, Dmitry and Tkachev, Igor, «A dark matter component decaying after recombination: lensing constraints with Planck data,» *EPJ Web Conf.* 125 (2016) 03004.
- [28] E.Ya. Nugaev, G.I. Rubtsov, Ya.V.Zhezher "Probing Milky Way's hot gas halo density distribution using the dispersion measure of pulsars" *Astron. Lett.*, vol.42, 173-181, 2016 [arXiv:1509:05451 [astro-ph]]
- [29] D. Blas, M. Garny, M. M. Ivanov and S. Sibiryakov, "Time-sliced perturbation theory for large scale structure I: general formalism", *JCAP* 1607, 052 (2016) [arXiv:1512.05807]
- [30] D. Blas, M. Garny, M. M. Ivanov and S. Sibiryakov, "Time-Sliced Perturbation Theory II: Baryon Acoustic Oscillations and Infrared Resummation", *JCAP* 1607, 028 (2016)[arXiv:1605.02149]
- [31] M. M. Ivanov, "Systematic treatment of non-linear effects in Baryon Acoustic Oscillations", *EPJ Web of Conferences* 125, 03006 (2016), [arXiv:1607.05329]
- [32] D. Blas, M. M. Ivanov, I. Sawicki, S. Sibiryakov, "On constraining the speed of gravitational waves following GW150914", *Pis'ma v ZhETF*, vol. 103, iss. 10, pp. 708–710, *JETP Letters*, 2016, Vol. 103, No. 10, pp. 624–626, [arXiv:1605.04168]
- [33] M. M. Ivanov, M. P. Pshirkov, G. I. Rubtsov, "Constraining the production of cosmic rays by pulsars", *Phys. Rev. D* 94, 063004 (2016) [arXiv:1606.01480]
- [34] A.A.Ovchinnikov "Threshold singularities in the correlators of the one-dimensional models." *J.Stat.Mech.* (2016) 063108

- [35] V. Nikiforova, S. Randjbar-Daemi, V. Rubakov, «Self-accelerating universe in modified gravity with dynamical torsion», arXiv:1606.02565
- [36] V. Nikiforova, «One model of modified gravity with dynamical torsion and its cosmological consequences», EPJ Web Conf. 125 (2016) 03014
- [37] M. Libanov, S. Mironov, V. Rubakov, «Generalized Galileons: instabilities of bouncing and Genesis cosmologies and modified Genesis» JCAP 1608 (2016) no.08, 037
- [38] R. Kolevatonov, S. Mironov, «On cosmological bounces and Lorentzian wormholes in Galileon theories with extra scalar field», Phys.Rev. D94 (2016) no.12, 123516
- [39] S. Mironov, «Numerical relativity and the early Universe» EPJ Web of Conferences 125, 03015 (2016)
- [40] Y.A. Fomin, N.N. Kalmykov, I.S. Karpikov, G.V. Kulikov, M.Y. Kuznetsov, G.I. Rubtsov, V.P. Sulakov and S.V. Troitsky, «Full Monte-Carlo description of the Moscow State University Extensive Air Shower experiment», JINST 11, T08005 (2016)
- [41] Y.A. Fomin, N.N. Kalmykov, I.S. Karpikov, G.V. Kulikov, M.Y. Kuznetsov, G.I. Rubtsov, V.P. Sulakov and S.V. Troitsky, «No muon excess in extensive air showers at 100-500 PeV primary energy: EAS-MSU results», arXiv:1609.05764 [astro-ph.HE]
- [42] [O.E. Kalashev and M.Y. Kuznetsov, «Constraining heavy decaying dark matter with the high energy gamma-ray limits», Phys.Rev. D94, 063535 (2016)
- [43] M.Y. Kuznetsov, «Hadronically decaying heavy dark matter and high-energy neutrino limits», arXiv:1611.08684 [astro-ph.HE]
- [44] S.A. Kulagin, «Modelling the nuclear parton distributions», J.Phys.Conf.Ser. 762 (2016) no.1, 012072.
- [45] Peng Ru, S.A. Kulagin, R. Petti, Ben-Wei Zhang, «Study of $W^\pm$ and Z boson production in proton-lead collisions at the LHC with Kulagin-Petti nuclear parton distributions», Phys.Rev. D94 (2016) no.11, 113013.
- [46] D.G. Levkov, A.G. Panin, I.I. Tkachev "Relativistic axions from collapsing Bose stars", arXiv:1609.03611, Phys.Rev.Lett. 118 (2017) 011301.
- [47] A.A.Ovchinnikov / Threshold singularities in the correlators of the one-dimensional models // J.Stat.Mech. (2016) 063108.
- [48] Kh. S. Nirov and A. V. Razumov, "Quantum groups and functional relations for lower rank"// J. Geom. Phys. 112 (2017) 1-28 (available online since 04.11.2016);
- [49] H. Boos, F. Gohmann, A. Kliimper, Kh. S. Nirov, A. V. Razumov, "Oscillator versus prefundamental representations"// J. Math. Phys. 57 (2016) 111702 (23 стр.)

2 Отдел экспериментальной физики

2.1 Светосильная спектрометрия электронов, ядерные реакции при низких и средних энергия и перспективные разработки

2.1.1 Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководители темы: доктор физико-математических наук В.С. Пантуев

Заведующий лабораторией: кфмн Н.А. Титов

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник кфмн Е.В. Гераскин

Старший научный сотрудник кфмн С.В.Задорожный

Старший научный сотрудник кфмн А.А. Голубев

Научный сотрудник кфмн А.А. Нозик

Веущий инженер В.И. Парфёнов

Ведущий инженер А.И. Белесев

Научный сотрудник А.К. Скасырская

2.1.1.1 РЕФЕРАТ

Отчет 9 с., 4 рис.

МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК.

Задача исследования состоит в поиске проявления стерильных нейтрино в бета-распаде газообразного трития в области масс от десятков электронвольт до нескольких кэВ. Эта область значений масс недоступна в осцилляционных экспериментах. В случае существования дополнительных массовых состояний нейтрино, в энергетическом спектре электронов должен наблюдаться излом, отстоящий от максимальной энергии на величину массы нейтрино. Проект является расширением проводимой ранее программы по измерению массы электронного нейтрино на установке «Троицк ню-масс» в ИЯИ РАН. В 2016 году были существенно модернизировано большинство из имеющихся элементов оборудования, включая криогенную и вакуумную часть, безоконный газовый тритиевый источник, программное обеспечение системы медленного контроля, высоковольтной системы, программ считывания информации. Были спроектированы и изготовлены два вакуумных стенда для испытания отдельных элементов вакуумного оборудования, новых предусилителей, безоконных детекторов электронов на основе лавинных фотодиодов. Выполнен целый ряд вычислений и моделирования магнитной системы, детально проведен расчет влияния рассеяния электронов в диапазоне ниже 18 кэВ на

регистрирующем детекторе. Это расчёты указали, что модернизацию установки нецелесообразно проводить в направлении ускорения регистрирующей электроники, поскольку возникает эффект возврата рассеянных электронов обратно на детектор с характерными временами запаздывания до 2-3 микросекунд. Проведены измерения рассеяния на изотопах водорода при разных энергиях с энергетическим разрешением лучше 1.5 эВ. Эти данные необходимы для коррекции на систематический эффект рассеяния электронов внутри газового источника. На основании все совокупности проделанной работы был подготовлен и опубликован проект проводимого эксперимента. В результате больших административных и технических мероприятий было получению разрешения для работы с тритием. Как результат, в 2016 году начаты измерения бета спектра трития в широком диапазоне от граничной энергии 18.5 кэВ до 14 кэВ. Параллельно выполнены калибровочные измерения функции пропускания спектрометра, оценен эффект рассеяния электронов на детекторе, прокалиброваны параметры мёртвого времени системы регистрации. На основании накопленных данных проведён предварительный анализ спектров с целью поиска сигналов стерильных нейтрино и дана верхняя оценка на параметр элемента матрицы смешивания между электронным и стерильным нейтрино. Анализ части статистики уже показал, что достигнут уровень чувствительности в несколько раз лучше, чем имеющиеся данные. Набор статистики будет продолжен. Определены пути дальнейшего улучшения эксперимента.

2.1.1.2 Введение

Определение абсолютных масс и числа массовых состояний нейтрино является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизики. 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 существовании одного очень лёгкого состояния нейтрино в дополнение к трём активным состояниям кажется спорным в стандартной космологии, но может быть совместимо с современными космологическими данными. Стерильные нейтрино в диапазоне масс нескольких кэВ могут являться естественным кандидатом на роль тёмной материи.

Открытие стерильных нейтрино может дать ответ на ряд фундаментальных вопросов в области физики элементарных частиц (объяснение природы нейтрино, структура масс нейтрино, несохранение лептонного числа), астрофизики и космологии (тёмная материя). Верхние пределы для матрицы смешивания со стерильным нейтрино дало бы ограничения на параметры возможных расширений Стандартной модели.

Значительные усилия международного научного сообщества направлены на исследования осцилляции нейтрино. Однако, информация, полученная в экспериментах с осцилляциями, даёт только разность масс квадратов частиц и не даёт абсолютных значений массы. Только прямые методы могут позволить исследовать область более высоких масс. В кэВ-ном диапазоне масс информацию о возможном существовании стерильных нейтрино получают в точных измерениях спектров бета-распада различных радиоактивных элементов или при измерении ядерной отдачи в К-захвате.

Нейтринные состояния, такие как ν_e , ν_μ , ν_τ и стерильные нейтрино ν_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 $S(E) = \sum U_{ei}^2 * S(E, m_i^2)$, где $S(E, m_i^2)$ 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 и записать как

$$S(E) = (1 - U_{e4}^2) * S(E, 0) + U_{e4}^2 * S(E, m_4^2).$$

Существующие лучшие ограничения на U_{e4}^2 , полученные в прямых экспериментах, показаны на рисунке 1. В диапазоне масс $m_N < 0.1$ кэВ лучшие пределы были получены нашей группой в Троицке [1,2] и в Mainz [3].

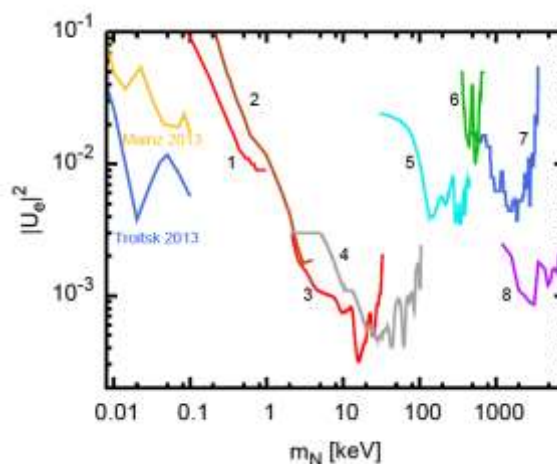


Рисунок 2.1.1.1 Существующие экспериментальные ограничения (95% CL) на примесь тяжёлого нейтрино в электронном нейтрино в зависимости от массы. Кривая с подписью “Troitsk 2013” соответствует результатам нашей обработки старых данных [1,2].

2.1.1.3 Полученные в 2016 году результаты

2.1.1.3.1 Модернизация установки «Троицк ню-масс»

Продолжалась модернизация отдельных узлов установки. Выполнено обновление высоковольтной системы с целью прецизионного контроля необходимых потенциалов до 30 кВ с точностью ± 0.1 В. В частности, написана программа удалённого управления и контроля высоковольтным напряжением.

Разработан, изготовлен и испытан вакуумный стенд с использованием электронной пушки с катодом из золотой фольги, работающий в отражённом свете. Использование фольги, а не полупрозрачной напылённой плёнки, существенно повышает устойчивость к парам ртути, которые проникают из ртутных диффузионных насосов.

Проведены испытания электронной пушки с источником света от дейтериевой лампы и кварцевого волновода. Использование волновода полностью устранило проблему пространственной юстировки источника света, входного окна пушки и катодного наконечника.

В ходе реализации проекта были измерены спектры потерь электронов на изотопах водорода - протии и дейтерии - при энергиях 14 кэВ, 17 кэВ, 19 кэВ и 25 кэВ. Из полученных спектров восстановлены функции возбуждения и ионизации молекул водорода. По результатам измерений подготовлена (<http://arxiv.org/abs/arXiv:1603.04243>) [3] и послана в редакцию (Письма в ЭЧАЯ) статья с описанием полученных функций, а также их энергетическая зависимость. Показана независимость функций возбуждения для изотопов H₂ и D₂.

Велась работа по расчётам необходимых параметров установки, возможных вкладов систематических эффектов при исследовании спектра бета-электронов вдали от граничной энергии. Продолжены расчёты транспортировки пучка от электронной пушки в заднюю часть газового источника.

Основным результатом проведенной работы является практическое завершение подготовки и начало планируемых измерений. Это было достигнуто в результате существенного обновления и модернизации вакуумного и криогенного оборудования, а также как следствие больших административных и технических мероприятий по получению разрешения для работы с тритием. Полностью обновлены программы сбора и анализа данных. Заменена часть регистрирующей аппаратуры в системе сбора данных. Обновлены программы управления блоков питания сверхпроводящих магнитов, высоковольтных блоков, газового масс-анализатора.

2.1.1.3.2 Проведение сеанса измерений

В 2016 году успешно проведено два полноценных сеанса измерений. Ряд выполненных организационных и технических мероприятий позволил получить разрешение для работы с тритием. Закуплено некоторое количество трития, которое позволило начать набор статистики.

Первый сеанс был проведен в апреле. В мае-июле 2016 года пришлось вскрывать спектрометр и устранить потерю контакта на землю одного из электродов в области детектора. Эта проблема возникла в конце сеанса в апреле. Разборка и длительная откачка спектрометра с прогревом корпуса отняли несколько месяцев работы. В результате полные измерения пришлось продолжить только в ноябре и декабре месяце.

Во время второго сеанса спектр электронов измерялся в интервале от граничной энергии 18.5 кэВ до 14 кэВ с разными интенсивностями источника.

На основании накопленных данных проведён предварительный анализ спектров с целью поиска сигналов стерильных нейтрино и дана верхняя оценка на параметр элемента матрицы смешивания между электронным и стерильным нейтрино. Анализ части статистики уже показал, что достигнут уровень чувствительности в несколько раз лучше, чем имеющиеся данные, рисунок 2.1.1.2. Анализ будет завершён в ближайшее время и опубликован. Набор статистики будет продолжен. Определены пути дальнейшего улучшения эксперимента.

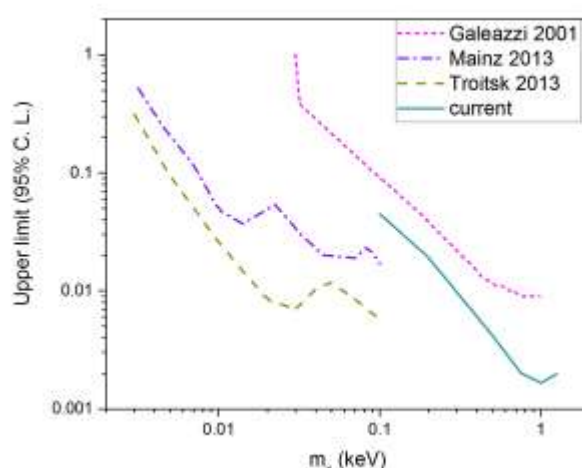


Рисунок 2.1.1.2. Предварительные результаты верхней оценки параметра элемента матрицы смешивания между электронным и стерильным нейтрино на основе данных, собранных в 2016 году. Сплошная линия – результат предварительной обработки части набранной статистики.

Как уже отмечалось, на основании измеренных спектров потерь электронов на изотопах водорода - протии и дейтерии - при энергиях 14 кэВ, 17 кэВ, 19 кэВ и 25 кэВ, подготовлена (<http://arxiv.org/abs/arXiv:1603.04243>) [3] и послана в редакцию (Письма в ЭЧАЯ) статья с описанием полученных функций возбуждения молекул водорода электронами, а также приводится относительная энергетическая зависимость полных сечений.

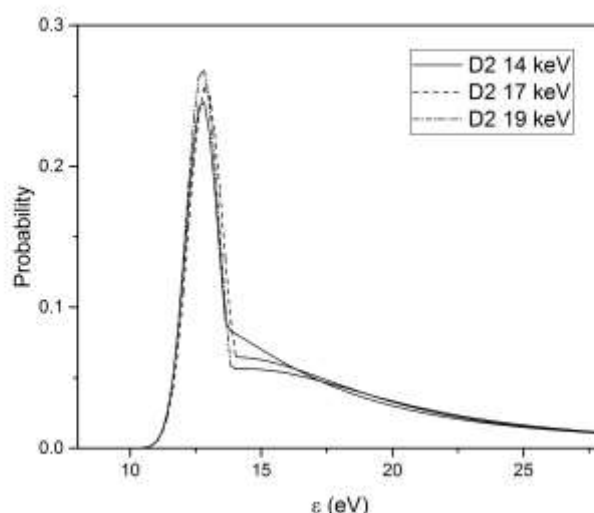


Рисунок 2.1.1.3 Восстановленные функции возбуждения и ионизации молекул водорода D_2 , полученные методом рассеяния электронов с разными энергиями [3]. Пик слева соответствует возбуждению молекул, а хвост слева – ионизации и возбуждению.

Подготовлена и опубликована статья [4], в которой посредством расчётов удалось объяснить, до конца не понятный на тот момент, эффект слабого "заваливания" функции пропускания в электромагнитных спектрометрах, так называемого, МАС-Е типа. Этот тип спектрометра используется в данном эксперименте, а также в планируемом эксперименте KATRIN, Германия. Искажение функции пропускания при понижении напряжения связано с обратным рассеянием регистрируемых электронов на детекторе и их последующем отражении на электростатическом и магнитном зеркалах. Особенностью отражения таких электронов является существенное запаздывание времени возврата на детектор. Показано, что влияние эффекта в значительной степени зависит от скорости регистрации используемой электроники, рисунок 2.1.1.4. Оценочные расчёты были полностью подтверждены на проведенном сеансе измерений с электронной пушкой.

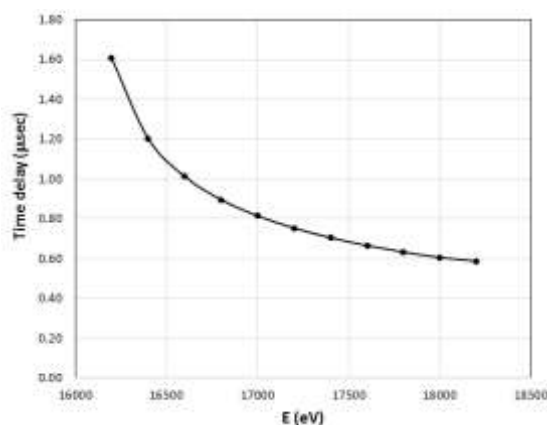


Рисунок 2.1.1.4. Время возврата рассеянного и отраженного на магнитном зеркале электрона в зависимости от энергии электрона при потенциале 16 кВ на спектрометре [4].

На основании полученных в 2016 году данных готовится статья с новыми результатами на ограничение матричного элемента в матрице смешивания U^2_{e4} в матрице смешивания.

2.1.1.3.3 Участие в 2016 году в научных мероприятиях по тематике Проекта

1. А.А. Нозик, доклад «Status and prospects of "Troitsk nu-mass" experiment» на международной конференции “The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics”, 10-14 октября, 2016, Москва.

2. В.С. Пантуев, доклад «Direct search of keV sterile neutrino in tritium beta decay by “Troitsk nu-mass” experiment» на международной конференции « NEW TRENDS IN HIGH ENERGY PHYSICS », 2-6 October 2016, Budva, Montenegro

3. В.С. Пантуев, доклад «Current status of Troitsk nu-mass experiment for search of sterile neutrino in tritium beta decay» на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" – 2016, 12-15 апреля, Дубна

2.1.1 Заключение. Наиболее важные достижения в 2016 году

- Выполнен ряд организационно-технических мероприятий, позволивший получить официальное разрешение на приобретение и работу с радиоактивным тритием. Необходимое для работы количество трития приобретено.

- Осуществлена модернизация программного обеспечения сбора данных и отдельных элементов медленного контроля.

- На установке проведено два полноценных сеанса измерений с радиоактивным тритием. Основной целью являлся набор статистики.

- Выполнены калибровочные измерения с электронной пушкой по прецизионному исследованию функции пропускания электростатического спектрометра.

- Получены спектры бета-электронов в распадах трития в интервале энергий 13-19 кэВ.

- На основании полученных данных даны предварительные оценки на верхний предел примеси тяжёлых нейтрино. Видно, что результаты измерений в только 2016 году по крайней мере в 3-5 лучше существующих ограничений. Статья готовится к печати.

- Посланы в печать результаты измерения рассеяния электронов на изотопах водорода H2 и D2 с энергией 14-25 кэВ.

- Опубликована статья о влиянии обратного рассеяния электронов на регистрирующем детекторе на функцию пропускания для спектрометров по типу MAC-E фильтров.

- Готовятся предложения по видоизменению конфигурации детектирующей части и электроники с целью увеличить скорость набора в 10-15 раз.

2.1.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. D.A. Abdurashitov et al., Electron scattering on hydrogen and deuterium molecules at 14-25 keV by the "Troitsk nu-mass" experiment, <http://arxiv.org/abs/arXiv:1603.04243>.

2. P.V. Grigorieva, A.A. Nozik, V.S. Pantuev, A.K. Skasyrskaya, "The role of electron scattering from registration detector in a MAC-E type spectrometer", Nucl.Instrum.Meth. A832 (2016) 15-20.

2.1.1.2 Библиография

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. A.I. Belesev et al., The search for an additional neutrino mass eigenstate in the 2–100 eV region from 'Troitsk nu-mass' data: a detailed analysis, J. Phys. G 41 (2014) 015001 [arXiv:1307.5687].

3. D.A. Abdurashitov et al., Electron scattering on hydrogen and deuterium molecules at 14-25 keV by the "Troitsk nu-mass" experiment, <http://arxiv.org/abs/arXiv:1603.04243>.

4. P.V. Grigorieva et al., The role of electron scattering from registration detector in the "Troitsk nu-mass" MAC-E type spectrometer. Nucl.Instrum.Meth. A832 (2016) 15-20.

2.1.2 Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов

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

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник к.ф.-м.н. С.В.Задорожный

Научный сотрудник к.ф.-м.н. А.В. Лохов

Старший научный сотрудник, к.ф.-м.н. А.А.Голубев

Ведущий инженер А.И.Берлев

Аспирант В.Г.Чернов

2.1.2.1 Реферат

Кол-во стр. – 10, рисунков – 6, таблиц – 1, список литературы – 13 наименований.

МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, НЕУПРУГИЕ ПОТЕРИ, ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск эффективной массы электронного нейтрино в бета- распаде трития в эксперименте КАТРИН. 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 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. Разрабатывается проект модернизации стенда тестирования детекторов.

2.1.2.2 Введение.

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.

При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0,1 эВ, все типы нейтрино имеют одинаковую массу (см. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

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 (Майорановские и Дираковские нейтрино).

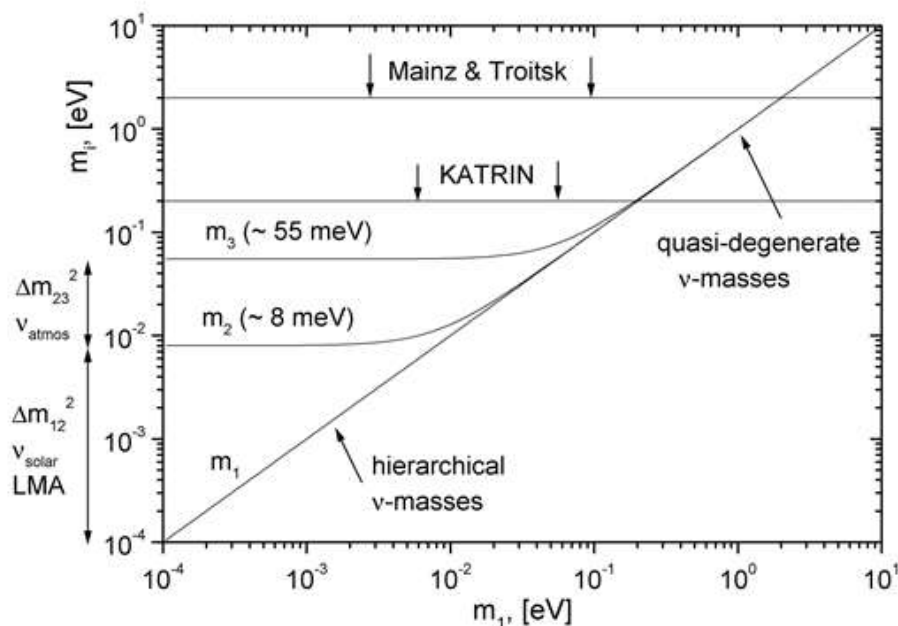


Рис. 2.1.1. Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия).

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. 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 $0,2 \text{ эВ}/c^2$ [1].

В течение длительного времени, в качестве альтернативного источника данных о массе нейтрино рассматривались болометрические эксперименты по бета-распаду в рении-187 и К-захвату в гольмии-163. Следует отметить, что на сегодняшний день по разным причинам в проектах остаются трудности, которые не удастся преодолеть.

В тоже время появились новые предложения по поиску сигнала массы нейтрино в бета-распаде трития. К ним относятся проекты Project8 [2]. В Project8 предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путём измерения частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. В рамках Project8 получен важный результат: удалось зарегистрировать одиночные электроны в ловушке и измерить их энергию [3].

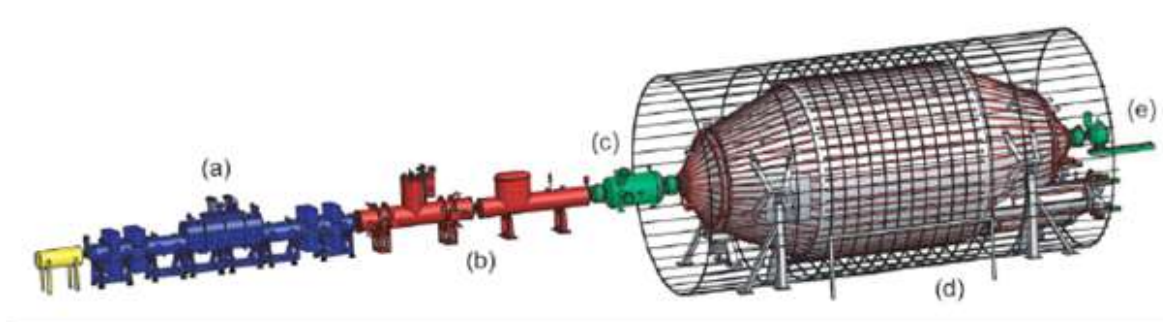


Рис. 2.1.2 Установка КАТРИН. а – безоконный газовый источник трития, b – канал транспортировки электронов с дифференциальной и криогенной откачками, с – предварительный спектрометр, d – основной спектрометр, e – сегментированный детектор.

В проекте PTOLEMY [4] используется широкий набор существующих и предложенных в Project8 экспериментальных методик в сочетании с источником большой площади на основе атомарного трития адсорбированного на поверхности графена. Руководитель проекта сделал заявление о готовности завершить измерения в 2017-м году [5]. Тем не менее, существуют сомнения в возможности его реализации из-за видимого противоречия с принципом сохранения фазового объёма.

Из изложенного выше следует, что в обозримом будущем в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино только проект КАТРИН может дать лучшее ограничение на массу электронного антинейтрино.

В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трёх состояний с определенной массой. Есть основания предполагать существование дополнительных стерильных состояний, т.е. не участвующих в взаимодействиях в рамках Стандартной модели, и состоящих из отличных от упомянутых выше массовых состояний. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси таких состояний в активных нейтрино. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния, спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из этих трёх состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады. Так, примесь массового состояния должна проявляться в изломе β -спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния [6].

Следующей большой программой, обсуждаемой для установки КАТРИН, является поиск сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно $1\text{эВ}/c^2$ до нескольких $\text{кэВ}/c^2$

[7]. При наборе данных в течение трёх лет КАТРИН имеет возможность искать вклад стерильных нейтрино с массой несколько кэВ в области параметров, не исключённых существующим астрофизическим наблюдениями.

2.1.2.3 Проект КАТРИН

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 [8].

Проект КАТРИН, стоимостью более 80 млн. Евро, является полигоном для применения самых передовых экспериментальных технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей и т.д. Многие параметры новой установки являются рекордными: общая длина 70м, диаметр спектрометра 10м и вакуум на уровне $1 \cdot 10^{-11}$ мбар [9]. Безоконый 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. 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.

В 2016 году основные узлы установки КАТРИН: торцевая секция (RS), безоконый газовый источник (WGTS), фронтальная транспортная секция (DPS-2F), криогенная откачная секция (CPS), предварительный спектрометр (PS), основной спектрометр (MS) и детектор (D) (см. рис.2) были смонтированы и опробованы по отдельности. В течение шести месяцев проводились интенсивные исследования характеристик систем STS (Source-Transport-System) и SDS (Spectrometer-Detector-System).

14-го октября начался запуск установки. Впервые электроны, излученные с «задней стенки» установки, были зарегистрированы детектором, расположенным на её противоположном конце, на расстоянии 70м (рис.3). Первый полученный результат, - хорошая юстировка канала транспортировки обеспечила отсутствие «теней» от элементов конструкции в канале транспортировки электронов. Исследуются фоновые условия, возможность регистрации и удаления положительных ионов и т.д.



Рисунок 2.1.2.3. Слева: Кнопку «Пуск» нажимают (слева направо): вице-президент Института технологий Карлсруэ Оливер Крафт, со-спонсор проекта Гвидо Дрехлин, председатель совета проекта в течение 15 лет Йоханнес Блюмер, руководитель проекта «Нейтрино-Майнц» Эрнст Оттен, руководитель эксперимента по поиску массы нейтрино в Лос-Аламосской национальной лаборатории Р.Г.Х.Робертсон
Справа: - скорость счета электронов, равномерно эмитируемых с "задней стенки" установки и регистрируемая многопиксельным детектором расположенным в её противоположном конце на расстоянии 70м.

2.1.2.4 Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН

2.1.2.4.1 Влияние упругого рассеяния электронов на потерю энергии в газовом источнике с учётом внутреннего движения атомов в молекуле трития.

Упругое рассеяние электронов на атоме трития при низких температурах приводит к пренебрежимо малым потерям энергии. Существование «нулевых» колебаний атомов в молекуле трития существенно изменяет спектр потерь (см. рис. 4). Рассмотрен вклад внутренних степеней свободы (движения атомов в молекуле трития) на процессы упругого рассеяния электронов в источнике эксперимента КАТРИН. Оценена соответствующая поправка в функцию потерь энергии при упругом рассеянии электронов на большие углы.

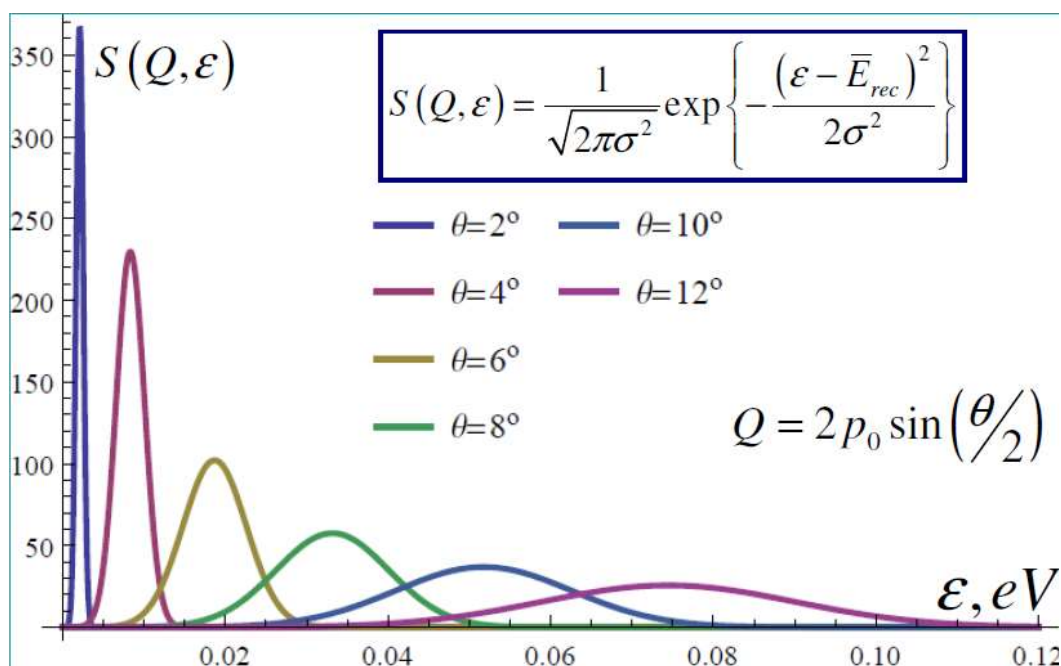


Рисунок 2.1.2.4. Спектры потерь энергии электронами при упругом рассеянии на молекуле трития с учетом движения атомов внутри молекулы. Без учёта внутреннего движения соответствующие спектры представляли бы собой монолинии.

По теме были сделаны два доклада на совещаниях коллаборации, первый из которых опубликован [10], а второй предполагается направить в печать в 2017 году.

2.1.2.4.2 Анализ экспериментального спектра на присутствие примеси тяжёлых стерильных нейтрино.

Построены специальные статистические критерии для поиска примеси тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития. С помощью стандартного инструмента функций мощности изучена чувствительность и устойчивость полученных критериев по отношению к систематическим неопределённостям [11].

2.1.2.4.3 Измерение спектра неупругих потерь электронов при рассеянии на молекуле трития.

Измерения спектра неупругих потерь при рассеянии электронов на молекулах газообразного трития были выполнены ранее на установке «Троицк ню-масс» [12]. 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 (рис. 2.1.2.5).

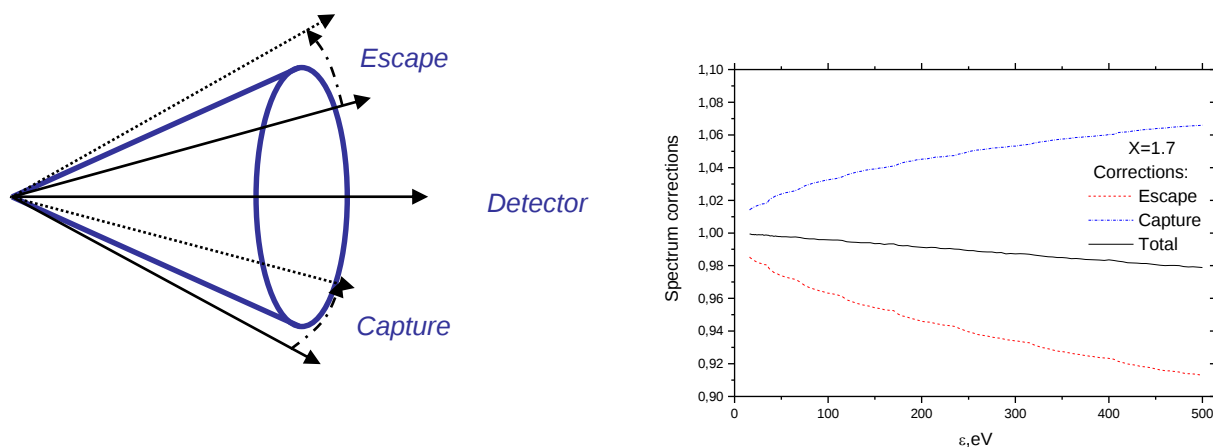


Рисунок 2.1.2.5. Слева: Изменение числа электронов попадающих детектор за счёт процессов вылета(escape) и захвата (capture).

Справа поправки к числу регистрируемых электронов в зависимости от величины потери энергии (ϵ) при толщине источника $X=\sigma\mu l=1.7$

2.1.2.4.4 Зависимость сечения возбуждения электронных состояний молекулы трития от энергии налетающих электронов.

Определение спектра потерь энергии электронами при неупругом рассеянии на молекулах трития (см. пункт 3.3) 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.

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 $\sim 1/T \ln T$	53,4/46,6

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.

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.

Вопрос о выделении времени на эксперимент находится на рассмотрении.

2.1.2.4.5 Разработка программного обеспечения.

Для проведения современного эксперимента необходима настройка и обслуживание большого количества электронных приборов. Чаще всего, главному алгоритму набора совершенно необязательно знать подробности работы прибора, ему необходимо только иметь интерфейс взаимодействия высокого уровня. В таких случаях можно инкапсулировать работу, связанную с получением и преобразованием данных в самом приборе. Это существенно ограничивает рост сложности ПО эксперимента и экономит время. Также облегчается работа по модификации компонентов системы, т.к. становится возможным настраивать каждый модуль отдельно.

Нашими партнерами из Institute of Data Processing and Electronics KIT создано стандартное программное обеспечение для управления электроникой, имеющей PCI интерфейс “Advanced Linux PCI Services” ALPS. ПО написано на языке C и основанное на xml нотациях, дающих доступ к чтению и записи в регистры PCI устройств. Такой формат позволяет быстро подстраивать драйвера при изменении адресов регистров. В тоже время он имеет тот недостаток, что он негибок к изменению логики работы устройства.

Программный комплекс по управлению набором экспериментальных данных на установке «Троицк ню масс» написан на C++/Qt. Выбор языка, в частности, связан с

аппаратными драйверами: некоторые из них существуют только для C++. Однако реализация остального функционала на выбранном языке не оптимальна.

Для устранения указанного недостатка было предложено дополнить ПО возможностью вставки скриптов, написанных на языке высокого уровня (Python, Javascript). Python - высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода. Язык имеет много библиотек по математической обработке данных и лучше всего подходит для написания небольших фрагментов кода, выполняющих частные задачи. Обработка сырых данных и преобразование их в стандартный вид является наиболее частым случаем такой задачи. Язык Python имеет как множество готовых библиотек, выполняющих такой функционал как: создание сервера, обработка и визуализация данных, связь с базой данных и т.д, так и множество заготовок для проектов на репозиториях типа github. В то же время язык Python имеет слабую аппаратную поддержку, особенно в отношении старых устройств.

Разработка Python оболочки для программного обеспечения на языке C++ была выполнена совместно с сотрудниками Institute of Data Processing and Electronics KIT. Результаты были использованы при коренной модернизации программного обеспечения сбора информации на установке «Троицк ню-масс».

2.1.2.4.6 Исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления.

Одной из основных проблем проведения эксперимента по поиску тяжёлых 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 её решения исследовалась возможность применяя 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%.

Параметры детекторов приведены в публикации З. Садыгов и др. [13]:

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

толщины первого и второго эпитаксиального слоя *p*-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 (SiO_2) = $0.5\text{ }\mu\text{m}$.

время восстановления не более 30 нс

Преимуществом данного прибора является возможность работы при комнатной температуре и возможность выноса предусилителя из вакуумного объёма. Возможно построение мозаики из рассматриваемых фотодиодов, разрабатывались соответствующие конструкторско-технологические решения для сборок 3×3 и 4×4 .

В связи с высоким быстродействием МЛФД возникает проблема подбора предусилителя более быстрого чем стандартный, используемый для PIN диодов. В числе других испытывался предусилитель, собранный по схеме, представленной на рис.6. В результате сигнал МЛФД стало возможно оцифровывать без дополнительного усиления и применять кодировщики DRS и CAEN.

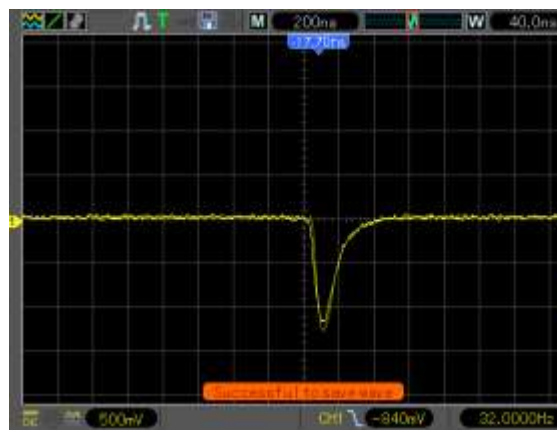
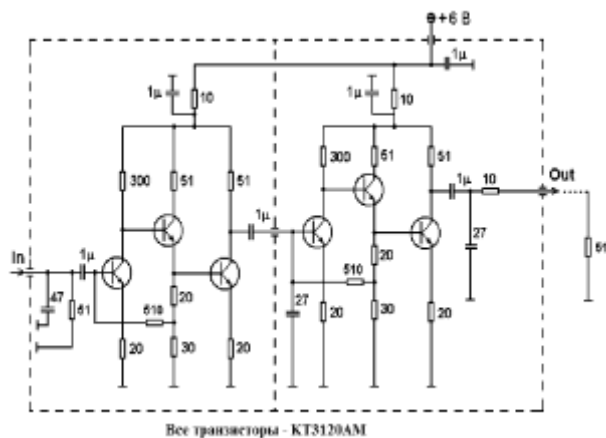


Рис.6. Слева: схема предварительного усилителя.

Справа: осциллограмма выходного сигнала при регистрации альфа-частиц.

В процессе исследований было установлено, что помимо основного тестового потока электронов, связанного с их выбиванием за счёт фотоэффекта, присутствует значительный темновой ток, по-видимому, связанный с выбиванием электронов за счёт бомбардировки положительными ионами. Проводились работы по проектированию нового тестового источника электронов с пониженным темновым током и размером пятна на исследуемом детекторе менее 1.5 мм .

2.1.2.4 Заключение:

В 2016 году получены следующие результаты:

- Рассчитаны спектры потерь энергии электронов в газовом источнике при упругом рассеянии на молекулярном водороде с учетом внутреннего движения атомов в молекуле трития.
- Построены специальные статистические критерии для поиска примеси тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития.
- Рассматривались систематические поправки при измерении спектра неупругих потерь электронов при рассеянии на молекуле трития.
- Предложен эксперимент по исследованию зависимости от энергии налетающих электронов сечения возбуждения электронных состояний молекул трития.
- Разработана оболочка на языке Python для управления аппаратными средствами работающими под управлением ПО на языках C++/Qt.
- Проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления, подбор оптимального предусилителя.
- Разрабатывался проект модернизации стенда тестирования детекторов.

В 2017 году работы по проекту КАТРИН предполагается продолжить по следующим направлениям:

1. Расчет систематических эффектов, связанных с экспериментальным определением функции потерь энергии электронов в источнике.
2. Исследование вклада систематических эффектов в точность определения вклада стерильных нейтрино спектр бета-распада трития.
3. Исследование детектора на базе микропиксельного лавинного фотодиода.

2.1.2.4 Литература

1. <http://www.katrin.kit.edu/>
2. <http://www.project8.org/>
3. D.M. Asner et al., PRL, 114, 162501.
4. <http://web.ornl.gov/info/news/pulse/no430/story1.shtml>
5. <https://www.princeton.edu/main/news/archive/S45/75/52Q77/index.xml?section=science>
6. <http://arxiv.org/abs/1204.5379>
7. <http://arxiv.org/abs/1409.0920>
8. [arXiv:hep-ex /0109033v1](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0109033v1)
9. M.Arenz et. al. Commissioning of the vacuum system of the KATRIN Main Spectrometer Journal of Instrumentation 11 P04011- April 2016

10. Alexey V. Lokhov, Nikita A. Titov. Anharmonicity of internal atomic oscillation and effective antineutrino mass evaluation from gaseous molecular tritium β –decay J. Phys. G 43(7) (2016) 075102

11. Alexey V. Lokhov, Fyodor V. Tkachov. Statistical criteria for search of heavy neutrino in tritium spectrum J. Phys. Conf. Ser. 718(6) (2016) 062039

12. V.N.Aseev et.al.. European Physical Journal D10 (2000) ,39-52

13. 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

2.1.2.4 Выступления на конференциях, рабочих совещаниях

Доклад на конференции - 1

N.Titov, INR RAS for the KATRIN Collaboration

KATRIN-2016: Status and perspectives, systematic studies

International Session - Conference of SNP PSD RAS "Physics of Fundamental Interactions".

April 15, 2016 JINR, Dubna

2.1.2.4 Выступления на рабочих совещаниях - 4

XXX совещание по проекту КАТРИН:

1. Alexey Lokhov. Internal movement of tritium molecule and electron elastic scattering

2. N.A. Titov Electron energy loss spectrum measurement systematic.

XXXI совещание по проекту КАТРИН:

3. Alexey Lokhov. Large angle elastic scattering in the source

4. Nikita Titov. Systematic monitoring, unbiased analysis and blinding.

2.1.2.4 Список публикаций

1. Alexey V. Lokhov, Nikita A. Titov. Anharmonicity of internal atomic oscillation and effective antineutrino mass evaluation from gaseous molecular tritium β –decay // J. Phys. G 43(7) (2016) 075102
2. M. Arenz et al. Commissioning of the vacuum system of the KATRIN Main Spectrometer // JINST 11 (2016) P04011
3. Alexey V. Lokhov, Fyodor V. Tkachov. Statistical criteria for search of heavy neutrino in tritium spectrum // J. Phys. Conf. Ser. 718(6) (2016) 062039

2.1.3 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e»

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

Исполнители темы:

старший научный сотрудник В.Л.Матушко

научный сотрудник Д.В.Хлюстин

2.1.3 Реферат

Отчет 8 с., 7 рис.

МЮОН. РЕДКИЕ РАСПАДЫ МЮОНА. НАРУШЕНИЕ ЛЕПТОННЫХ ЧИСЕЛ

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 ($Br - 10^{-17}$), превышающим 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 тяжёлыми частицами с массами ≈ 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 фото детектором APD (Avalanche Photodiode) большой площади и разработке новой концепции эксперимента (3in1), позволяющей поиск трёх редких распадов $\mu \rightarrow e$ конверсии, $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$ на одной установке.

2.1.3 Введение

Поиск явлений и процессов, выходящих за пределы Стандартной модели, представляет собой одну из главных задач современной физики. Поиск возможен как в экспериментах на коллайдерах с максимально доступной энергией (LHC, Tevatron), так и в прецизионных экспериментах, осуществляемых при относительно низких энергиях. При этом два указанных класса экспериментов дают взаимно дополняющую информацию. Важнейшей проблемой, стоящей перед прецизионными экспериментами, является обнаружение процессов, идущих с нарушением закона сохранения лептонных квантовых чисел. В то время, как Стандартная модель не содержит в себе механизмов нарушения электронного, мюонного и тау лептонного чисел, они естественным образом возникают практически во всех теориях, расширяющих

Стандартную модель. Наибольший прогресс достигнут в экспериментальном исследовании редких мюонных процессов, идущих нарушением электронного и мюонного квантовых чисел.

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 (рис. 1) по поиску процесса конверсии мюона на ядре был принят DOE (Department of Energy, US) 11 ноября 2009.

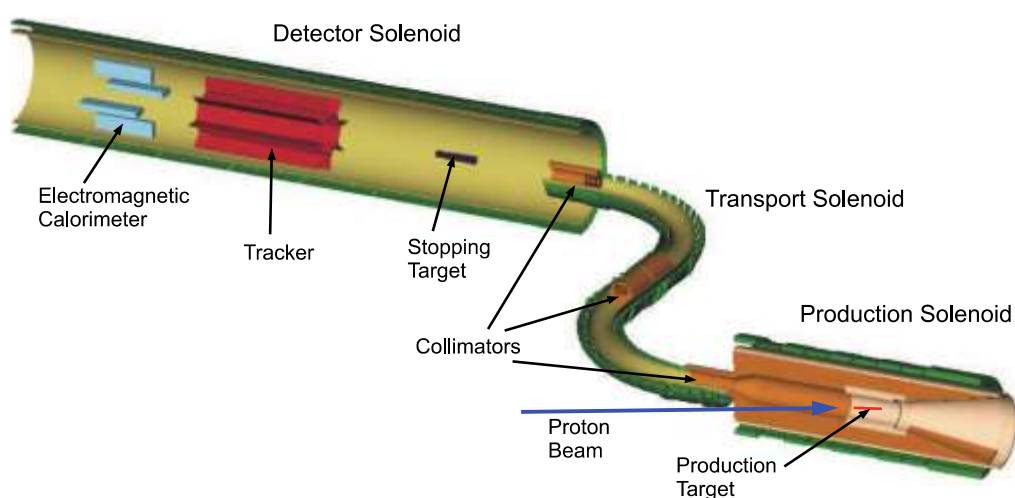


Рисунок 1. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре.

2.1.3.1 Состояние эксперимента «Mu2e» в 2016 году

В 2015 г. завершена стадия CD-1 эксперимента : разработка концепции, оценка стоимости эксперимента. Подготовлен TDR (Technical Design Report), который завершает эту работу. Одобрен и утверждён бюджет следующей стадии CD-2/3 эксперимента комитетом DOE США в 2016 г. Планируется завершить стадию CD-2/3 в 2017 г. и переход к стадии CD-3 завершающей создание установки.

2.1.3.2 Исследования основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO

В 2016 г. проводились работы по анализу калибровочных измерений с помощью космических мюонов и радиоактивного источника Co60 ячейки калориметра, состоящей из кристалла LYSO (30x30x50 mm²) с двумя лавинными фотодиодами (APD 10x10мм² Hamamatsu). Кристалл LYSO состоит из следующих химических элементов LuY₂SiO₅:Ce. Измерения проводились с новым электронным блоком (WDT 5742 CAEN) по оцифровки и обработке сигналов APDs для калориметра эксперимента Mu2e.

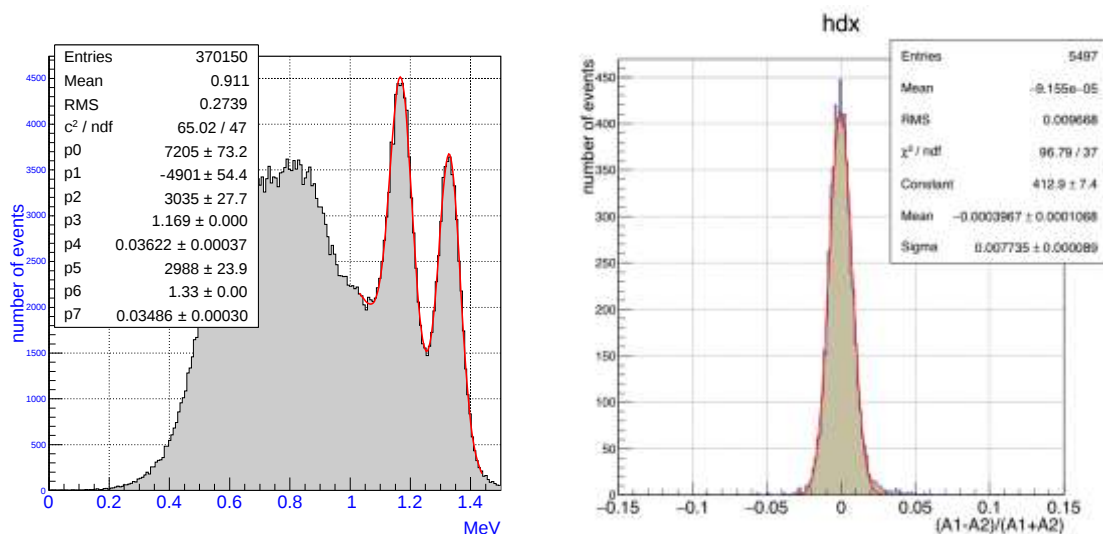


Рис. 2а. Спектр суммы сигналов APD1 и APD2 от источника Co^{60} в кристалле и результат фитирования измеренного спектра суммой двух распределений Гаусса и линейной функции (слева).

Рис. 2б. Спектр относительной разности сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле LYSO с помощью (справа).

Повышение точности измерения амплитуды с помощью блока WDT по сравнению с ADC связано с использованием более точного метода определения амплитуды сигнала. На рис. 2 (а) показан спектр суммы сигналов APD1 и APD2 от источника Co^{60} и результат фитирования измеренного спектра суммой двух распределений Гаусса и линейной функции. Линейная функция необходима для описания части спектра от фонового излучения кристалла. Результат фита двух пиков спектра в области 1.05 – 1.45 МэВ даёт оценку энергетического разрешения кристалла σ_E/E равную 3.1% и 2.6% для энергий 1.17 и 1.33 МэВ, соответственно. Относительная разрешающая способность кристалла LYSO (σ_E/E) может быть оценена из спектра $(A1-A2)/(A1+A2)$ (рис. 2б) с учётом шумов электроники и составляет величину равную $\sigma_E/E = 0.115\%/\sqrt{E}$, где E – наиболее вероятная энергия, выделенная в кристалле мюоном, равная 0.028 ГэВ, $A1$ и $A2$ амплитуды сигналов с APD1 и APD2, соответственно. Используя соотношение $s_x/E = \sqrt{F/N_{pe}}$, связывающее число первичных фото-электронов N_{pe} APD с энергетическим разрешением кристалла (σ_E/E), измеренным для энергий 1.17 и 1.33 МэВ, получим оценку для N_{pe} , равную 1900 и 2300 ф.э./МэВ соответственно. Усредненная оценка N_{pe} составляет величину, равную 2100 ф.э./МэВ. Оценка N_{pe} , полученная из спектра с космическими мюонами с наиболее вероятным энерговыделением 28 МэВ, даёт величину, равную 1600 ф.э./МэВ, и находится в хорошем согласии (30%) с измерениями с радиоактивным источником Co^{60} .

2.1.3 Заключение. Наиболее важные достижения в 2016 году

Проведено новое измерение энергетическое разрешение кристалла, с помощью современных электронных блоков по оцифровке формы сигналов с APDs (CAEN WDT 5742) которое позволяет улучшить на 38% энергетическое разрешение кристалла ($\sigma_E/E = 0.13\%/\sqrt{E}$) по сравнению с ранними измерениями с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) LeCroy ADC 2249A.

2.1.3 Публикации в 2016 году

Р.М.Джилкибаев “Исследования кристалла LYSO для калориметра в области низких энергий”, Приборы и Техника Эксперимента, принято к публикации в ноябре 2016г.

Адрес web-страницы проекта: mu2e.fnal.gov

2.1.3 План Российской группы в 2017 г.

Разработка электроники усиления и формирования сигналов с парафазным входом/выходом передачи на линию UTP. Измерение эффективности регистрации заряженных частиц для базового элемента годоскопа, сцинтилляционного волокна с новым кремниевым фото-умножителем (SiPM) SensL MicroFC-30035_SMT с пониженным уровнем шумов.

Запрашиваемые деньги на 2017 год: разработка, изготовление плат электроники APD – 300 т. руб.

2.1.4 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX

Руководитель темы, дфмн В.С. Пантуев

2.1.4 Реферат

ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КВАРК ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА

Исследования направлены на решение проблемы создания и изучение свойств плотной и горячей ядерной материи в релятивистских ядро-ядерных столкновениях. Поставленная задача связана с исследованием КХД вещества при экстремальной температуре и плотности, которая затрагивает многие фундаментальные проблемы физики, такие как: природа конфайнмента и восстановление киральной симметрии, космология ранней вселенной, астрофизика компактных объектов. Работа выполняется в рамках соглашения о сотрудничестве ИЯИ РАН с Брукхэвенской национальной лабораторией, США. Эксперимент PHENIX продолжается уже 16 лет. Основная цель группы из ИЯИ РАН являлось обеспечение экспертной поддержки для работы дрейфовых камер центрального плеча установки, участие в проводимом с января по июнь 2016 года сеансе измерений, а также в написании статей, готовящихся к печати.

2.1.4 Введение

Построение квантовой хромодинамики (КХД) явилось поворотным пунктом в понимании природы сильного взаимодействия между элементарными частицами. КХД стала фундаментальной теорией сильного взаимодействия. Вскоре на стыке нескольких областей физики - ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой хромодинамики и в некоторой степени астрофизики- стало развиваться новое направление: исследование КХД вещества при экстремальной температуре и плотности. Это направление привлекает все большее внимание экспериментаторов и теоретиков последние 30 лет. Важным этапом в этом направлении был запуск в 2000 году ускорителя на встречных пучках, Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC, в Брукхэвенской Национальной Лаборатории США. Он был разработан и построен преимущественно под программу изучения столкновений ядер с массой вплоть до золота и энергией 200 ГэВ в системе центра масс двух нуклонов. В течение 16-ти лет на ускорительном комплексе проводились измерения на установке PHENIX. 2016 год явился завешающим для набора статистики ведёт измерения эксперимент PHENIX. В ближайшее время начнётся набор статистики в 2016 году. Основной проблемой для столь длительного эксперимента является поддержание и функционирование всех элементов установки, в частности, дрейфовых камер центрального плеча. В.С. Пантуев является ответственным экспертом, следящим за работоспособностью этих детекторов. Набор статистики, безусловно связан с обеспечением круглосуточной работы в течение полугодового периода измерений.

Помимо экспериментальных работ, проводившихся на установке «PHENIX», ведётся подготовка к публикации научных статей. В.С. Пантуев в 2016 г. участвовал во внутри коллаборационных обсуждениях подготавливаемых статей.

2.1.4 Работы, проведённые на установке «PHENIX» в 2016 году

На установке успешно завершён очередной ремонт одной из дрейфовых камер. Камера, размер которой 2 на 4.5 метра, была вскрыта. Произведён визуальный осмотр проволок. Все порванные нити были удалены по специально разработанной технологии. Камеры проверены как по высокому напряжению, так и по системе считывания и были подготовлены к началу новых измерений в феврале-июне 2016 года.

Как член комитета по детекторам В.С. Пантуев участвует в ежемесячных совещаниях комитета.

2.1.4 Заключение. Наиболее важные достижения в 2016 году

Успешно выполнен ремонт дрейфовых камер. Принято участие в сменах завершающего полугодового сеанса по набору статистики.

2.1.4 Публикации

1. Angular decay coefficients of J/ψ mesons at forward rapidity from $p+p$ collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV. PHENIX Collaboration (A. Adare (Colorado U.) *et al.*). Dec 20, 2016. 11 pp. e-Print: arXiv:1612.06807 [hep-ex]
2. Measurement of the relative yields of $\psi(2S)$ to $\psi(1S)$ mesons produced at forward and backward rapidity in $p+p$, $p+Al$, $p+Au$, and ^3He+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. PHENIX Collaboration (A. Adare (Colorado U.) *et al.*). Sep 21, 2016. 9 pp. e-Print: arXiv:1609.06550 [nucl-ex]
3. Nonperturbative-transverse-momentum effects and evolution in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in $p+p$ collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV. PHENIX Collaboration (A. Adare (Colorado U.) *et al.*). Sep 15, 2016. 19 pp. Published in Submitted to: Phys.Rev.D e-Print: arXiv:1609.04769 [hep-ex]
4. Measurement of long-range angular correlations and azimuthal anisotropies in high-multiplicity $p+Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. C. Aidala *et al.*. Sep 9, 2016. 10 pp. e-Print: arXiv:1609.02894 [nucl-ex]
5. Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized $p+p$ collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV. PHENIX Collaboration (A. Adare (Yale U.) *et al.*). Jun 6, 2016. 10 pp. Published in Phys.Rev.D, Phys.Rev. D94 (2016) 112008 DOI: 10.1103/PhysRevD.94.112008 e-Print: arXiv:1606.01815 [hep-ex]
6. Measurement of the higher-order anisotropic flow coefficients for identified hadrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. PHENIX Collaboration (A. Adare (Colorado U.) *et al.*). Dec 2, 2014. 8 pp. Published in Phys.Rev. C93 (2016) no.5, 051902 DOI: 10.1103/PhysRevC.93.051902 e-Print: arXiv:1412.1038 [nucl-ex]

2.1.4 План группы ИЯИ в 2017 г.

Участие в подготовке и обсуждении статей с экспериментальными данными, полученными на PHENIX.

2.1.5 Поиск тёмной материи Вселенной

Научный руководитель: д.ф-мат. наук Овчинников Б.М.

2.1.5 Реферат

Объект исследования – тёмная материя Вселенной.

Цель работы – поиск тёмной материи Вселенной.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования методики поиска WIMP малой массы (< 10 ГэВ)

В результате создана методика поиска WIMP малой масс с помощью камеры, заполненной $\text{Ne}+\text{H}_2$ и H_2+TMAE .

Эффективность методики определяется водородным наполнением камеры в качестве мишени для частиц WIMP и высоким коэффициентом размножения электронов в системе МГЭУ + острие – анод

2.1.5 Введение

Факт существования тёмной материи Вселенной следует из астрономических наблюдений. Поскольку частицы тёмной материи с массой порядка нескольких десятков ГэВ не были обнаружены, необходимо искать частицы тёмной материи малой массы (< 10 ГэВ). Созданная нами камера позволяет осуществлять поиск WIMP с рекордной чувствительностью $\leq 0,5$ ГэВ.

2.1.5 Основная часть

Необходимость проведения исследований обусловлена отсутствием положительных результатов поиска WIMP в области ядер отдачи с энергией в несколько десятков ГэВ, а также использованием в нашем методе высоконадёжных МГЭУ (GEM) вместо малонадёжных тонкоплёночных GEM, используемых в зарубежных экспериментах.

Процесс исследований включает в себя разработку методики поиска WIMP, изготовление измерительной камеры, системы электродов, детектирующей системы, системы съёма и регистрации информации.

Итоговым результатом работы должно стать размещение камеры по поиску WIMP в низкофоновой подземной лаборатории в низкофоновой защите и поиск годовых либо суточных модуляций сигналов.

2.1.5 Заключение

Разработанная методика поиска WIMP позволяет во всей полноте решить поставленную задачу поиска частиц тёмной материи и значительно превосходит по всем параметрам лучшие достижения в западных экспериментах.

2.1.5 Список использованных источников:

1. Патент РФ № 2417384 от 11.03.2010 г. «Многоканальный газовый умножитель»
2. B.M. Ovchinnikov, V.V. Parusov, “Search for Low Mass WIMP and axions, Emitted from the San, “Universal Journal of Physics and Application 10(2): 58-59, 2016
3. B.M. Ovchinnikov, I.I. Tkachev, V.V. Parusov, “The Methods for Direct Detection of WIMP with Mass < 0.5 GeV”, “Universal Journal of Physics and Application 9(4): 173-174, 2015

2.1.6 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ

Руководитель темы: внс, дфмн Ю.В. Рябов,

исполнители: Ю.В.Григорьев, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, А.В.Новиков–Бородин, Е.В.Хаустов, Д.В. Хлюстин

В соответствии с планом на 2016 г. по исследованию нейтрон–ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП–ТРОНС ОЭФ ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР–2М ЛНФ ОИЯИ группа ТРОНС ЛИРП ОЭФ проводила подготовку спектрометрической аппаратуры, детекторов нейтронов и гамма-лучей, оборудования обработки и автоматизации измерений. Проведены работы по созданию многосекционного спектрометра на основе 8 кристаллов NaI на нейтронном пучке 50 м пролётной базе импульсного нейтронного источника РАДЭКС, что позволит использовать спектрометрию множественности излучений в экспериментах по радиационному захвату и делению. Были проведены работы по созданию нового быстродействующего жидкостного шестисекционного (n,γ)-детектора на основе растворителя ЛАБ с гадолиниевым поглотителем нейтронов.

Модернизация оборудования времяпролётного спектрометра РАДЭКС, быстродействующего дефлектора сильноточного линейного ускорителя и каналов транспортировки пучка протонов экспериментального комплекса ИЯИ РАН позволила обеспечить запуск и стабильную работу спектрометра РАДЭКС на экспериментальном комплексе ИЯИ РАН в рамках выполнения государственного задания Института по проведению фундаментальных и прикладных исследований.

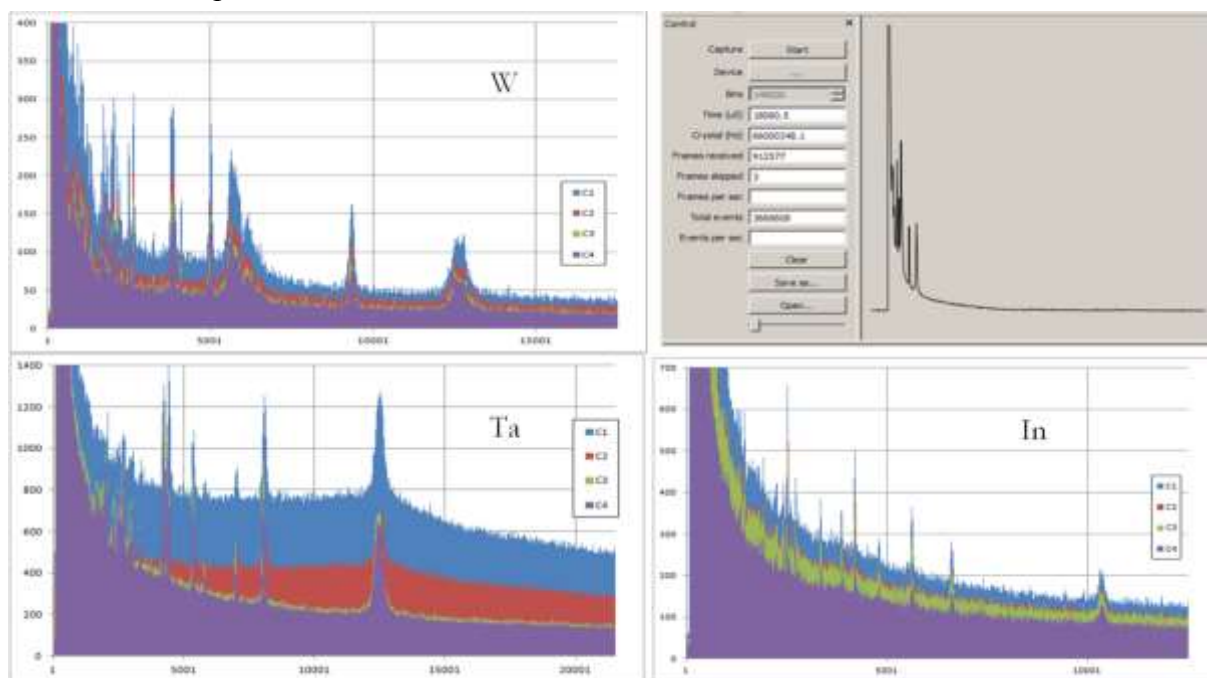


Рисунок 2.1.6 .1 Графики сечений взаимодействия нейтронов с мишенями из Вольфрама (W), Тантала (Ta) и Индия (In) в независимых сериях измерений и вид монитора программы для сбора данных.

Проведены тестовые измерения сечений взаимодействий нейтронов с мишенями из Вольфрама (W), Тантала (Ta) и Индия (In) по времяпролётной методике во время сеанса работы ускорителя на спектрометр РАДЭКС в апреле 2016 года. Ток пучка протонов с энергией 209 МэВ в импульсе длительностью 1 мкс составлял 5-7 мА, частота 50 Гц. Общее число каналов диагностического оборудования РАДЭКС составляет 149000 с разрешением 120 нс/канал. Сбор данных осуществлялся сериями независимых измерений с разной длительностью в пределах нескольких часов на каждой из мишеней. Впервые получены спектры нейтронных взаимодействий с хорошим разрешением при импульсе пучка нейтронов ~1 мкс. Графики соответствующих сечений и вид монитора для сбора данных представлены на Рис. 1.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что смещение пучка по времени в различных сериях экспериментов составляла порядка 600-750 нс (Рис.2), что, возможно, обусловлено сбоями в синхронизации оборудования на ускорительном и экспериментальном комплексах. Эффективная длительность тока пучка с учётом смещения составляла 1.5-2 мкс, что ухудшило разрешающую способность спектрометра примерно в 3 раза. Длительность короткого импульса пучка на полувысоте составляла 450-500 нс, передний фронт 150 нс, задний 360-600 нс, амплитуда менялась на 30%.

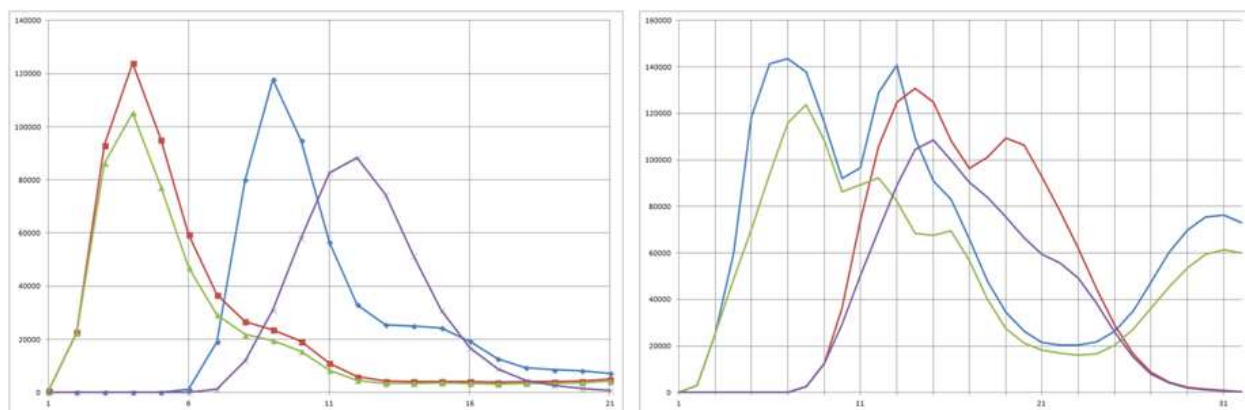


Рисунок 2.1.6 2. Профили тока пучка протонов, поступающих на мишень РАДЭКС

На рис. 2.1.6.2 видно искажение заднего фронта сигнала, которое привело не только к затягиванию заднего фронта импульса пучка, но и к появлению послеимпульсов пучка протонов. Наличие послеимпульсов тока пучка является причиной ложных пиков в экспериментальных спектрах или ухудшения разрешающей способности спектрометра. В большинстве случаев послеимпульс приходит через 3 мкс после первичного импульса, но в одной из серий наблюдался приход послеимпульса через 6 мкс. Соответствующие графики представлены на рисунке 3.

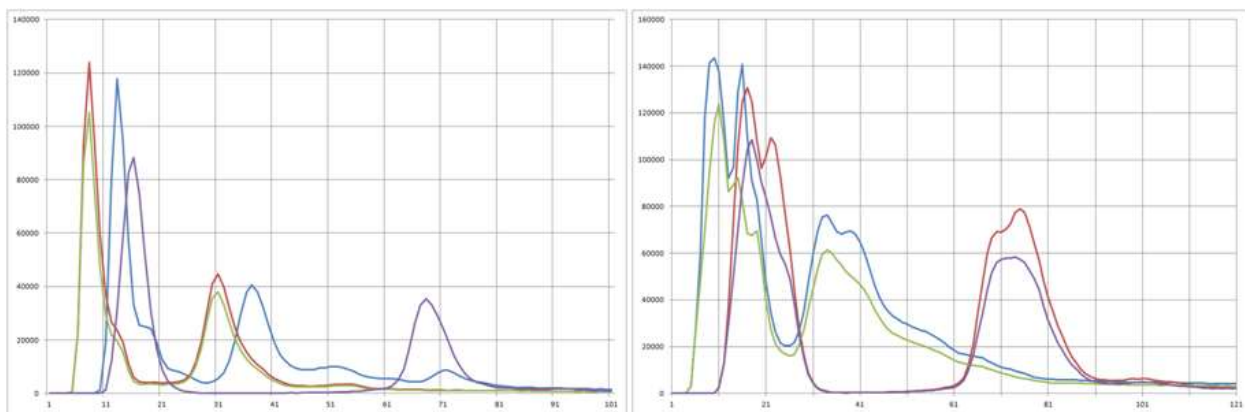


Рисунок 2.1.6.3 Послеимпульсы тока пучка протонов, поступающие на мишень РАДЭКС.

Перечисленные проблемы с синхронизацией и формой импульса можно частично устранить с помощью статистической обработки данных. Однако наличие послеимпульсов с большой вероятностью свидетельствует о рассогласовании высоковольтного высокочастотного тракта быстродействующего дефлектора.

Таким образом, первоочередными задачами для обеспечения работы спектрометра РАДЭКС являются: обеспечение единой синхронизации быстродействующего дефлектора и системы АРФП (автоматическая регулировка фазы) (необходимо для обеспечения стабильной работы ускорителя на коротком (~ 1 мкс) импульсе тока пучка) и разработка системы автоматизации измерений и управления РАДЭКС, частично интегрированной с системой АСУ ОУК.

Нейтронный времяпролётный спектрометр РАДЭКС предназначен для работы с короткими импульсами менее 2 мкс, поэтому использование его для экспериментов с большей длительностью пучка неэффективно.

Для того чтобы улучшить основные характеристики установки РАДЭКС по энергетическому разрешению и фоновым условиям в измеряемых спектрах, необходимо осуществить проект удлинения двух пролетных баз установки РАДЭКС и строительства павильона для детекторов и накопителей информации.

Изготовлены образцы-радиаторы из марганца, железа и никеля для изучения резонансной структуры нейтронных сечений радиационного захвата для этих материалов. Проведена работа по созданию экспериментальной установки на вертикальном канале РАДЭКС для исследования (n-n)-рассеяния и (n,e)-взаимодействия. Изготовлен нейтроновод в виде стальной вакуумной трубы длиной 4 м и внутренним диаметром 10 см для вертикального канала импульсного нейтронного источника РАДЭКС. Создана необходимая спектрометрическая и накопительная электронные системы с детекторами нейтронов и гамма-лучей на основе He-3 и Zn-S. Проводились исследования с пропорциональным счетчиком, наполненным дейтериевым газом до давления 2 атм для поиска бинейтрона, тринейтрона и

других возможных мультинейтронных нейтральных ядер. Проводилась работа по восстановлению установки для изучения сильно возбужденных ядер-изомеров, разрабатывался стенд в виде призм из Pb, U-238, Th-232 для моделирования различных вариантов мишеней нейтронных источников и решения вопросов АДС, трансмутации радиоактивных отходов атомной промышленности и наработки ядерного топлива электроядерным методом.

Совместно с ЛРИК были начаты работы по изучению механизма деления ядер Th-232, инициированного протонами в области энергий от 20 до 200 МэВ. Увеличение энергии частиц, взаимодействующих с тяжелыми делящимися ядрами, вызывает изменение массового распределения продуктов деления, наблюдается переход от асимметричной формы распределения к симметричной.

Моделирование взаимодействия протонов с ядрами проводилось с помощью каскадно-испарительно-делительной программы CEF. В этой программе для описания деления ядер с энергиями возбуждения до ~50 МэВ используются полуэмпирические аппроксимации, основанные на разрозненных экспериментальных данных. Сравнение расчётов с подробными (по энергии протонов) экспериментальными данными позволит существенно уточнить параметры, используемые в модели деления.

Получение экспериментальных сечений включает облучение ториевых мишеней протонами с энергией до 160 МэВ на линейном ускорителе ИЯИ РАН и последующее гамма-спектрометрическое определение радионуклидов в облученных мишенях. Идентификацию радионуклидов и расчёт их активностей в образцах выполняли вручную.

Была проведена обработка гамма-спектров облучённых ториевых фольг с выдержкой около года после окончания облучения. Некоторые результаты расчёта сечений в сборке фольг, облученной протонами с начальной энергией 20-200 МэВ, представлены на Рис. 4. Также на графики нанесены точки, доступные в литературе и результаты расчётов по CEF.

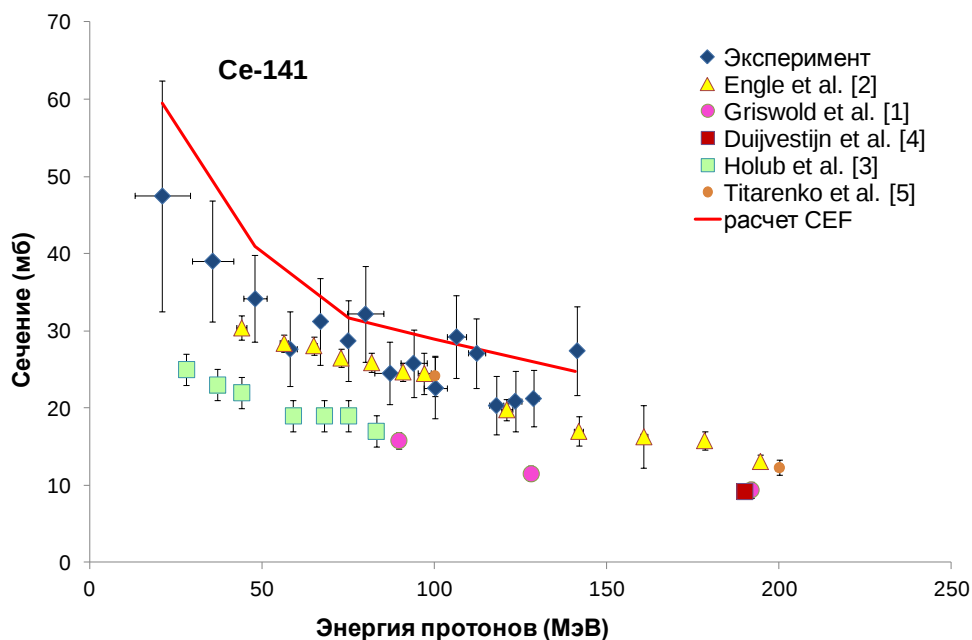
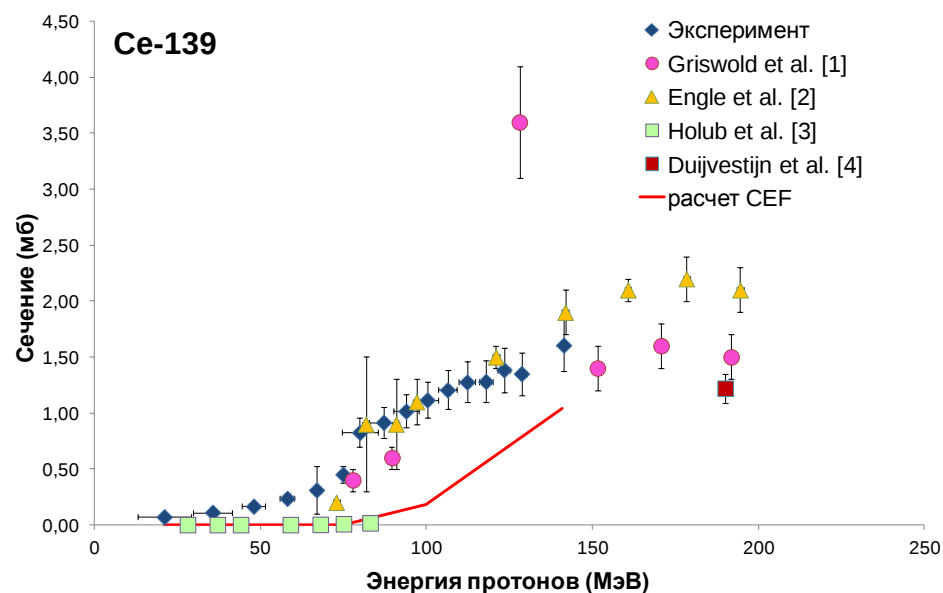


Рисунок 2.1.6.4. Экспериментальные сечения $^{232}\text{Th}[p, f]^{139,141}\text{Ce}$ реакции при облучении протонами 20-200 МэВ.

Видно, что экспериментальные сечения образования представленных радионуклидов, определенные в данной работе, удовлетворительно согласуются с данными, доступными из литературы и расчётами по теоретической модели.

На основании расчета, выполненного по модели CEF, было построено массовое распределение продуктов деления тория, на которое нанесены данные, полученные в работе и литературе ([1] J.R. Griswold et al. Large Scale Accelerator Production of ^{225}Ac : Effective Cross Sections for 78-192 MeV Protons Incident on ^{232}Th Targets. Appl. Radiat. and Isot., (2016), [2] J.W. Engle et al. Ac, La, and Ce Radioimpurities in ^{225}Ac Produced in 40-200 MeV Proton Irradiations of Thorium. Radiochim. Acta, 102, N 7, 569, (2014); [3] R. Holub, L. Yaffe. Charge dispersion studies of

heavy-mass elements in the fission of Th-232 by protons of medium energy. J. Inorg. and Nucl. Chem. 35, 3991 (1973), [4] M. C. Duijvestijn and A. J. Koning: Proton-induced fission at 190 MeV of nat W, 197 Au, nat Pb, 208 Pb, and 232 Th. Phys. Rev. C 59, 776 (1999), [5] Y. E. Titarenko et al. Final Project Technical Report of ISTC 83B-99, International Nuclear Data Committee of the International Atomic Energy Agency Report INDC(CCP)-434, Vienna, February, (2003)) (Рис.5).

Сейчас проводится обработка гамма-спектров, полученных для других времён выдержки образцов, что позволит получить более полные экспериментальные массовые распределения продуктов деления тория и проследить эволюцию симметричного и асимметричного деления в исследуемом диапазоне энергий протонов.

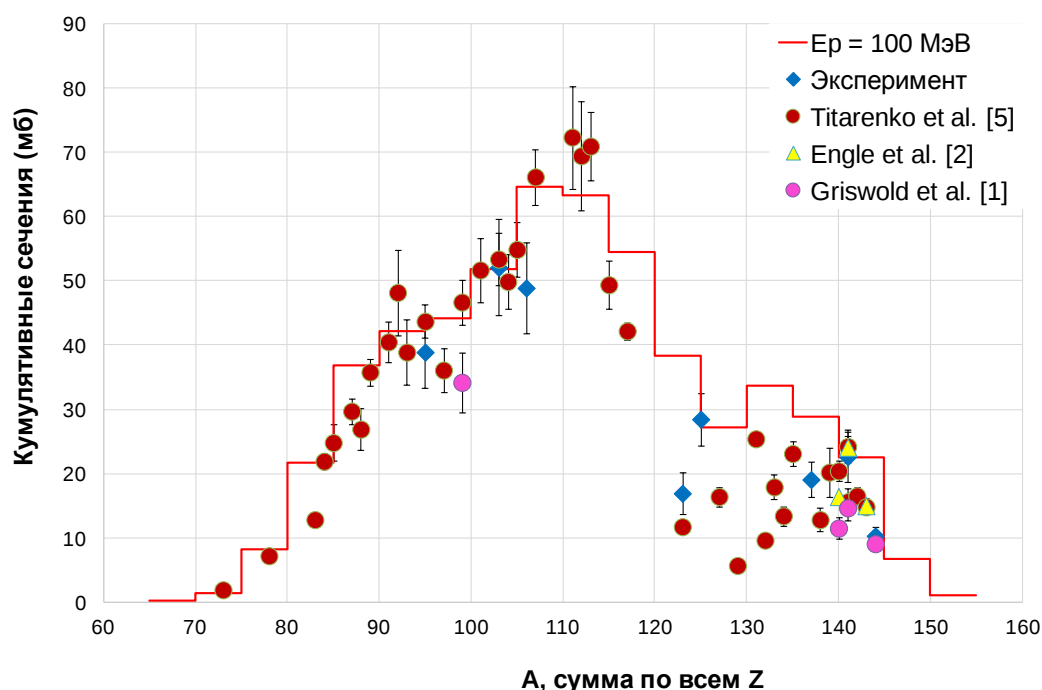


Рисунок 2.1.6.5. Массовое распределение продуктов деления тория при облучении протонами с энергией 100 МэВ

Проводились исследовательские работы: по разработке спектрометра по исследованию неупругого рассеяния в конденсированных средах и по измерению дважды дифференциальных сечений в тепловой области энергий на основе механического прерывателя нейтронов или гравитационного монохроматора нейтронов; по исследованию нейтрон-нейтронного взаимодействия с использованием методики догоняющих нейтронов, нейтрон-электронного взаимодействия, по взаимодействию нейтронов с гравитационным и электрическим полями, по поиску нейтральных нейтронных ядер типа бинейтронов, тринейтронов и с большим содержанием нейтронов; по разработке методики измерения сечения неупругого рассеяния и сечения радиационного захвата с использованием прямой и обратной сферической геометрии; по исследованию влияния плазмы, созданной импульсным генератором, работающим по

принципу магнитоплазменного компрессора, на жидкие среды при различных условиях на макетах и устройствах; по созданию радиоактивных образцов из осколочных материалов для решения вопросов трансмутации.

Проведены работы по созданию двух быстродействующих многосекционных детекторов гамма-лучей объемом 250 л и 400 л на основе растворителя ЛАП и гадолиниевого поглотителя нейтронов, которые будут использоваться для проведения отмеченных выше исследований на пролётных базах импульсных нейтронных источников РАДЭКС в г. Троицке и ИРЕН (ИБР) в г. Дубна.

Подготовлено 10 секций на основе пропорциональных He-3 счетчиков для регистрации нейтронов. Каждая секция состоит из 5 счётчиков типа СНМ-33 в виде пластины с габаритами 50х3х 15 см³, что позволяет формировать различные конфигурацией нейтронных детекторов либо с большой толщиной для достижения высокой эффективности регистрации быстрых нейтронов, либо с большой поверхностью для охвата максимального телесного угла рассеяния тепловых нейтронов. Предполагается такие пластины использовать при исследовании процесса рассеяния нейтронов в ядерной физике и физике конденсированных сред.

Составлено техническое задание и достигнута договоренность на изготовление 2-х быстродействующих временных и амплитудных кодировщиков на малом предприятии ОАО ПАРСЕК. Кодировщики изготовлены, испытаны и используются в спектрометрических установках нейтронного импульсного источника РАДЭКС ИЯИ РАН.

Достигнута договоренность о сотрудничестве между ИЯИ и ФЭИ по проведению измерений сечений деления и захвата минорных актинидов на нейтронных источниках РАДЭКС и СВЗ-100 с помощью уникальных новых быстродействующих камер деления ФЭИ, подготовлен протокол о сотрудничестве ИЯИ и ФЭИ.

Разработано предложение о создании нейтронного спектрометра по времени пролёта на базе СВЗ-100 для исследования сечений и интегральных характеристик делящихся и конструкционных реакторных материалов.

2.1.6 Публикации и доклады

1. Alekseev A.A., Grigoriev Yu.V., Dulin V.A., Libanova O.N., Novikov-Borodin A.V., Matushko V.L., Mezentseva Zh.V., Ryabov Yu.V. The TOF method for the LSDS-100 spectrometer. – Proc. Int. Seminar ISINN-23, Dubna, JINR, 2016.

2. Alekseev A.A., Grigoriev Yu.V., Dulin V.A., Libanova O.N., Matushko V.L., Mezentseva Zh.V., Novikov-Borodin A.V., Ryabov Yu.V. XXIII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics), Dubna, May 25-29, 2015, JINR, E3-2016-12 (Dubna, 2016)

3. Grigoriev Yu.V., Libanova O.N., Hliustin D.V. Measurements of transition and self-indication functions on samples of structural materials. Proc. Int. Seminar ISINN-23, Dubna, JINR, 2016.
4. Grigoriev Yu.V., Koptelov E.A., Libanova O.N., Mezentseva Zh.V., Novikov-Borodin A.V., Sinitsa V.V. Determination of Group Neutron Cross-Sections and their Integral Characteristics for Minor Actinides by GRUCON Code based on Estimated Data of ENDFB, JENDL, JEFF, BNAB. - ISINN-24, май 2016.
5. О.Н. Либанова, Е.С. Голубева, С.В. Ермолаев, В.Л. Матушко, А.С. Ботвина. Экспериментальные сечения образования продуктов деления тория-232 при облучении протонами средних энергий. Препринт ИЯИ РАН, 1430/2016, декабрь 2016, Москва 2016.
6. Grigoriev Yu.V., Novikov-Borodin A.V. Power Installations based on Activated Nuclear Reactions of Fission and Synthesis - ISINN-24, май 2016.
7. Grigoriev Yu.V., Novikov-Borodin A.V. Power Installations based on Activated Nuclear Reactions of Fission and Synthesis - ISINN-24, май 2016. - EPrint arXiv: <http://arxiv.org/abs/1606.04389>, 3 Jun. 2016.
8. Григорьев Ю.В., Новиков-Бородин А.В. Активируемые ядерные реакции в литий-или бор-бериллиевой смеси и гибридные энергетические системы на их основе - препринт ИЯИ 1425/2016, ноябрь 2016.

2.1.7 Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях

Руководитель темы В.Б.Копелиович

Целью проекта является решение задач и проблем на стыке физики элементарных частиц и ядерной физики, которое возможно благодаря изучению свойств соответствующих ядерно-подобных систем или ядер.

Исследовался современный статус теории и возможности экспериментов по поиску осцилляций нейтрон-антинейтрон, которые предсказываются в некоторых вариантах теории великого объединения (GUT), в том числе, проблема интерпретации данных о нестабильности ядер в терминах параметров, описывающих возможный переход нейтрон-антинейтрон в вакууме. Статья Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects D.G.Phillips, W.M.Snow, K.Babu ... V.B.Kopeliovich... (63 authors) находится в базе данных HEP (INSPIRE) опубликована в журнале Physics Reports в 2016 г. [1].

В связи с открытием коллаборацией LHCb пентакварков со скрытым очарованием и кварковым составом $c\bar{c}uud$ были сделаны оценки масс пентакварков со скрытой «прелестью» и составом $b\bar{b}uud$ или $b\bar{b}udd$: 10.6 – 10.8 GeV. Это предсказание массы новой частицы должно быть проверено экспериментально. Статья помещена в электронный архив: arXiv:1510.05958 [hep-ph], и опубликована в журнале Phys. Rev. D, 93 (2016) 074012 [2]. Доклады по этой теме представлены на Международной Сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН 12 - 15 апреля, 2016, ОИЯИ Дубна [3] и Международной конференция Hadron Structure and Quantum Chromodynamics (HSQCD), 27 июня – 1 июля 2016г., Гатчина, ПИЯФ [4].

Впервые доказано, что угловая зависимость сечений рождения кумулятивных частиц вблизи от 180 градусов определяется полиномами Чебышёва 2-го рода (полиномами Золотарёва, Коркина, Чебышёва), описанными впервые Санкт-Петербургскими математиками в середине 19-го века. Соответствующий доклад представлен на 2-й Международной конференции ICPPA (Москва, МИФИ, 10-14 Октября 2016 г.) [6], статья помещена в электронный архив INSPIRE [5].

Совместно с Д.Е.Ланским (НИИЯФ МГУ) и И.К.Поташниковой (Санта Мария Унив., Вальпараисо) продолжено изучение свойств ядерно-подобных систем с необычными свойствами, имеющими квантовые числа очарование или прелесть. Впервые проведена классификация и расчёты статических характеристик скирмионов в зависимости от их свойств при масштабном преобразовании. Рассчитывается спектр барионных систем с различными значениями очарования и прелести, в рамках киральной (топологической) модели. Получен ряд отрицательных результатов — изменение масштаба солитона в некоторых случаях приводит к уменьшению энергии связи системы. Готовится к публикации статья «Charmed and beautiful baryonic systems (hypernuclei) in chiral soliton models”.

Совместно с Г.К.Матушко (ИЯИ РАН) начат анализ данных и теоретических результатов по подпороговому рождению антипротонов и каонов на ядрах. Подпороговое рождение указанных частиц представляет собой один из видов рождения частиц в так называемых «кинематически запрещённых областях». Совместное рассмотрение и анализ таких реакций и процессов кумулятивного рождения представляет определённый интерес.

2.1.7 Публикации

1. Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects D.G.Phillips, W.M.Snow, K.Babu ... V.B.Kopeliovich.... (63 authors) Phys.Reports 612 (2016) 1-45.; e-print arxiv: 1410.1100 [hep-ex]

2. Simple estimates of the hidden beauty pentaquarks masses. Vladimir Kopeliovich, Irina Potashnikova. ArXiv: 1510.05958 [hep-ph] Phys.Rev. D 93,074012 (2016)

3. Simple estimates of the masses of pentaquarks with hidden beauty or strangeness. Vladimir Kopeliovich (Moscow, MIPT and Moscow, INR), Irina Potashnikova (CCTVal, Valparaiso and Santa Maria U., Valparaiso). Международная Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН 12 - 15 апреля, 2016, ОИЯИ Дубна http://icssnp.jinr.ru/Flavors_Program.pdf

4. Estimates of the masses of pentaquarks with hidden beauty or strangeness Vladimir Kopeliovich (Moscow, MIPT and Moscow, INR), Irina Potashnikova (CCTVal, Valparaiso and Santa Maria U., Valparaiso). Международная конференция Hadron Structure and Quantum Chromodynamics (HSQCD), 27 июня – 1 июля 2016г., Гатчина, ПИЯФ. <https://indico.cern.ch/event/544849/sessions/201657/#20160630>

5. 'Mathematical aspects of the nuclear glory phenomenon; from backward focusing to Chebyshev polynomials. Vladimir B. Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT) E-print arxiv: 1610.09776 [nucl-th]

6. Mathematical aspects of the nuclear glory phenomenon: from backward focusing to Chebyshev polynomials Vladimir Kopeliovich (Moscow, MIPT & Moscow, INR), 2 –я Международная конференция Particle Physics and Astrophysics (ICPPA), 10 -14 October 2016, Moscow, МЕРФИ. <http://indico.cfr.mephi.ru/event/4/session/34/contribution/94>
<http://indico.cfr.mephi.ru/event/4/timetable/#20161014>

2.1.8 Изучение релятивистских потоков в астрофизике

Руководитель темы, дфмн Б.Е. Штерн

Сделана оценка вклада блазаров в диффузный гамма-фон высоких энергий.

Происхождение диффузного фона гамма-квантов высоких энергий – предмет дискуссий с начала 90-х годов. Наиболее распространенная гипотеза заключается в том, что основной вклад дают слабые блазары, не разрешённые, как дискретные источники. Вполне возможно, что в области энергий порядка 10 ГэВ и ниже так и есть. Вопрос: что составляет диффузный гамма-фон в более жёсткой области – десятки и сотни ГэВ?

В 2015 году вышла статья команды «Ферми», где утверждается, что весь гамма-фон в области 100 ГэВ объясняется излучением лацертид – их спектр наиболее жёсткий из всех типов блазаров и в принципе, мог бы доминировать на этих энергиях. Но если это так, то возникает парадоксальная ситуация, поскольку есть еще один источник диффузного фона в области больших энергий. Это космические лучи энергий $10^{19} - 10^{20}$ эВ. Взаимодействуя с реликтовым излучением, протоны рожают электрон-позитронные пары, те в свою очередь дают комптоновский каскад. Спектр гамма-квантов от этого каскада получается еще более жёстким, чем спектр лацертид, и его вклад в диффузный гамма-фон в 100 ГэВ-ной области должен быть значительным. Это явно противоречит результату Maugé et al. (2016), поскольку будь он правилен, места для вклада от космических лучей просто не остается.

Чтобы проверить это, была сделана оценка вклада лацертид на основании исходных данных «Ферми». Какой вклад они должны давать в диффузный фон при энергии выше 30 ГэВ.

Оценка диффузного фона сделана по наименее «ярким» участкам неба. Область галактических широт $l < 10^\circ$ была исключена из анализа. Небо было разбито на трапеции площадью около одного градуса. Все ячейки, со вкладом не более четырёх фотонов шли в зачёт. Все достаточно яркие источники таким образом вырезались. Число фотонов в «тусклых» ячейках в нормировке на всё небо дает около 40000 фотонов – это с хорошей точностью и есть диффузный фон.

За светимость источника принято число фотонов энергии выше 30 ГэВ в кружке радиусом 0.3 градуса, зарегистрированных «Ферми» за 7.5 лет наблюдений. При этом средний фон в таком кружке – 0.3 фотона.

Число в единице объёма и функция светимости лацертид оценивалась по каталогу источников «Ферми» с известными красными смещениями. Отбирались близкие источники с красным смещением меньше 0.1 0.2 и 0.3. Каждая выборка подгонялась модельной функцией светимости источников: логнормальным и степенным распределением.

Дополнительное ограничение было поставлено по выборке близких ($z < 0.033$) активных ядер по каталогу Veron & Veron. Ее составили в основном сейфертовские галактики, всего 1300 объектов. Близкие объекты дают верхнюю оценку вклада слабых AGN, которые не разрешаются «Ферми». Использовалась интегральная методика – суммарное число фотонов, попавших в кружки заданного размера (0.3, 0.2, 0.3 градуса), сравнивалось с оценкой фона. Результат: число гамма-квантов, испущенных сейфертовскими галактиками каталога Veron-Veron с красными смещениями $z < 0.33$, не идентифицированные «Ферми», как источники, не

превосходит 30 штук. Это ограничение использовалось при подгонке модельных распределений и оказалось довольно сильным фактором, зажимающим функцию светимости источников на слабом конце.

Функция светимости параметризовалась двумя способами: как логнормальное распределение и степенное с экспоненциальным завалом при большой яркости. Оказалось, что наблюдаемое распределение источников хорошо подгоняется степенным распределением, причем для источников ближе $z = 0.3$ не требуется завал на ярком конце распределения. Степенное распределение было использовано, как основное. Результат подгонки: $dN / dL \sim L^{-1.8 \pm 0.1}$.

Функция светимости, полученная подгонкой распределения близких объектов, была свёрнута с космологическим распределением источников без учёта эволюции и поглощения за счёт рождения пар на инфракрасном межгалактическом фоне. Результат показан на рис.2. Число фотонов от слабых неразрешенных источников в смоделированном распределении составляет 12000, что надо сравнивать с 40000 наблюдаемого фона.

Вывод: широко распространенное мнение, что диффузный гамма-фон в области энергий 100 ГэВ описывается вкладом неразрешённых блазаров, неверно. Блазары дают лишь до трети фона. Остальное может быть вкладом, каскада, индуцированного рождением пар протонами с энергией выше 10^{19} эВ. Это примерно совпадает с оценками данного вклада.

Хотя результат в целом ясен, работа не закончена: требуются более аккуратные оценки полноты каталогов, учёт эволюции и поглощения гамма-квантов на космологических расстояниях.

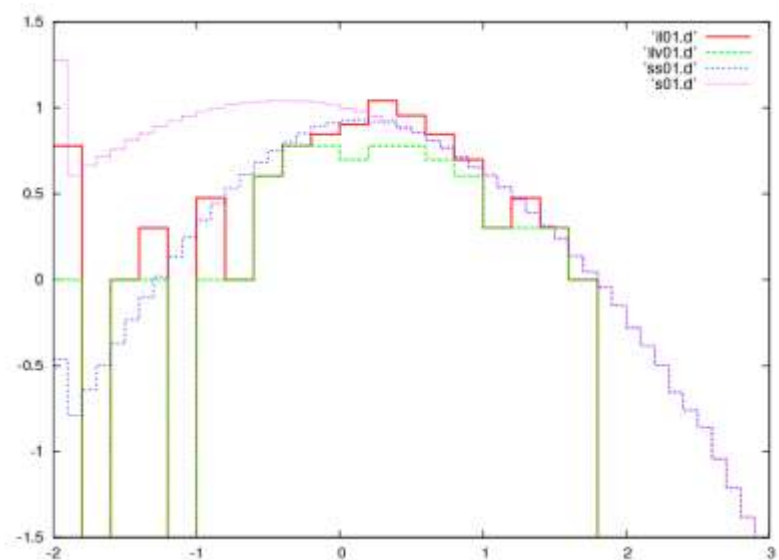


Рисунок 2.1.8.1 Распределение близких лацертид по абсолютной светимости. По горизонтали – логарифм числа фотонов с энергией выше 30 ГэВ от источника в нормировке на расстояние $z = 0.1$. По вертикальной оси – логарифм числа источников в бине. Красная гистограмма – источники Ферми с известным z . Зеленая гистограмма – лацертиды из каталога Veron & Veron.

Сиреневая гистограмма – подгоночное лог-нормальное распределение по светимости, синяя – оно же, но помноженное на вероятность зарегистрировать сигнал от источника.

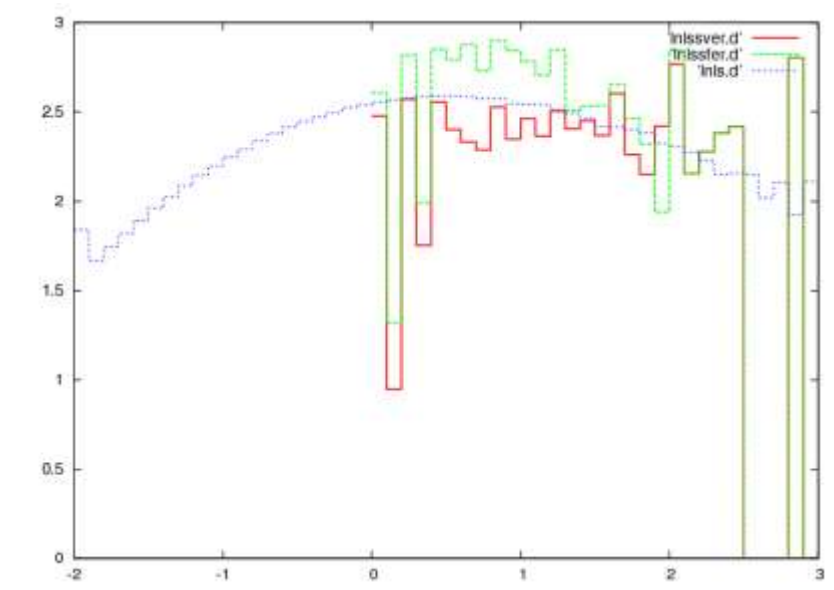


Рис. 2.1.8.2 Распределение всех источников «Ферми» (зеленая гистограмма) и всех Лацертид из каталога Veron & Veron (красная гистограмма) по наблюдаемой яркости. Распределение помножено на количество испущенных фотонов. Синяя гистограмма – подгонка близких источников степенным законом. Левая часть гистограммы описывает вклад диффузного фона от неразрешенных источников. Он составляет около четверти наблюдаемого фона.

2.1.9 Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях

Руководитель темы, дфмн, внс СМОЭ Э.Я. Парьев

2.1.9 Реферат

В рамках нового 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) η' - мезонов и Λ гиперонов в ядерной среде при обычной ядерной плотности. Получены предсказания для абсолютных сечений рождения этих частиц в данных реакциях в различных сценариях ренормализации их масс в ядерной материи, часть из которых сравнена с имеющимися экспериментальными данными. В частности, из этого сравнения извлечена величина реальной части η' -ядерного оптического потенциала (или сдвига массы η') при импульсе η' мезона порядка 1.0 ГэВ/с. Сделан важный вывод о возможности получения надежной информации о импульсной зависимости Λ гиперон-ядерного потенциала из анализа новых данных по рождению $\Lambda K(+)$ пар в pA-реакциях при энергии 2.83 ГэВ.

Наконец показано, что использование ядерных мишеней не дает особых преимуществ (что касается величины сечения фоторождения пентакварка $P_c(4450)$) по сравнению с использованием жидководородной мишени ввиду “размытия” формы резонанса Ферми-движением нуклонов ядра-мишени. Данный факт представляется важным для выбора стратегии поиска этого резонанса в фотоядерных реакциях вблизи порога.

2.1.9 Введение

Изучение рождения псевдоскалярных мезонов (заряженных каонов, η и η' мезонов), лёгких векторных мезонов (ρ , ω , ϕ), 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 интерес 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 её 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 во всех ведущих физических центрах мира.

2.1.9 Основные результаты исследований:

2.1.9.1 Свойства η' - мезонов в ядерной среде

Завершено теоретическое и экспериментальное изучение инклюзивной реакции (γ, η') на ядре ниобия при энергии первичных фотонов 1.2-2.6 ГэВ в рамках разработанной нами современной физической модели данной реакции. Для контроля правильности определения аксептанса детекторной системы “Crystal Barrel and Mini-TAPS”, установленной на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), были выполнены расчёты импульсных спектров η' мезонов, образованных в данной реакции, в кинематических условиях соответствующего эксперимента, проведенного коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на этом ускорителе в различных сценариях модификации свойств (массы) эта-штрих мезонов в ядерной среде и в различных энергетических интервалах падающего потока фотонов. Проведенное сравнение результатов этих расчётов с полученными экспериментальными данными для ядра ниобия (см. прилагаемые ниже рисунки) говорит в пользу сделанного в предыдущей работе коллаборации (M. Nanova, V. Metag, E. Ya. Paryev et al., Phys. Lett. B 727 (2013) 417) вывода о величине сдвига массы η' мезонов в ядерной среде, представляющего в настоящее время большой интерес для понимания частичного восстановления киральной симметрии в ядерной среде уже при обычных ядерных плотностях. Результаты этого исследования опубликованы в работах 1 и 2, указанных в прилагаемом ниже списке публикаций.

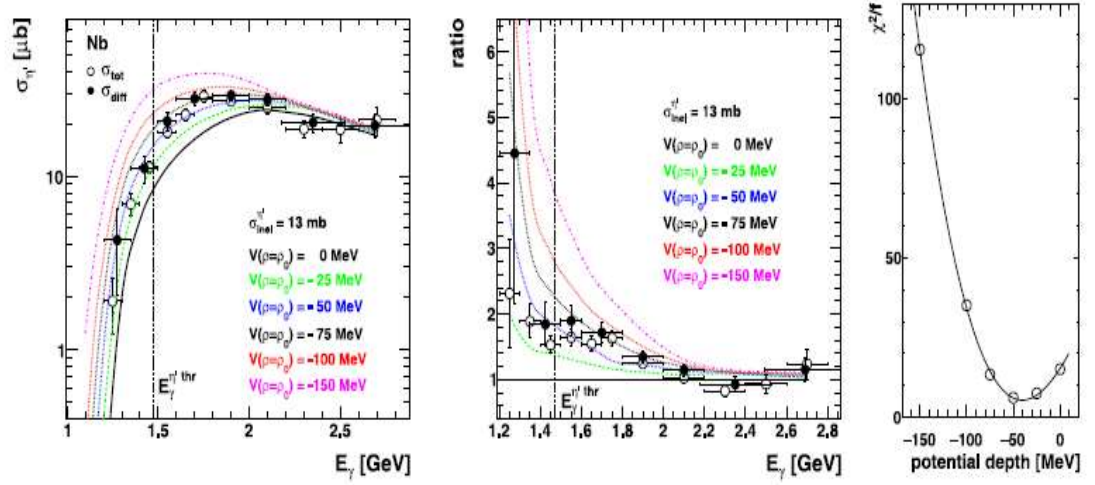


FIG. 4. Left: Total cross section for η' photoproduction off Nb obtained by integrating the differential cross sections (full circles) and by direct measurement of the η' yield in different incident photon energy bins (open circles). The data are compared to calculations for an inelastic η' -nucleon cross section $\sigma_{\text{inel}}^{\eta'} = 13 \text{ mb}$ [21,46] and for potential depths $V = 0 \text{ MeV}$ (black line), -25 MeV (green), -50 MeV (blue), -75 MeV (black dashed), -100 MeV (red), and -150 MeV (magenta) at normal nuclear density, respectively, and using the full nucleon spectral function. All calculated cross sections have been multiplied by a factor 0.91 to match the experimentally observed cross section above $E_\gamma > 2.2 \text{ GeV}$ (see text). This normalization is within the systematic error quoted for the experimental cross section. Middle: The experimental data and the predicted curves for $V = -25, -50, -75, -100$, and -150 MeV divided by the calculation for the scenario $V = 0 \text{ MeV}$ and presented on a linear scale. Right: χ^2 fit of the data with the excitation functions calculated for the different scenarios over the full incident photon energy range.

M. NANOVA *et al.*

PHYSICAL REVIEW C 94, 025205 (2016)

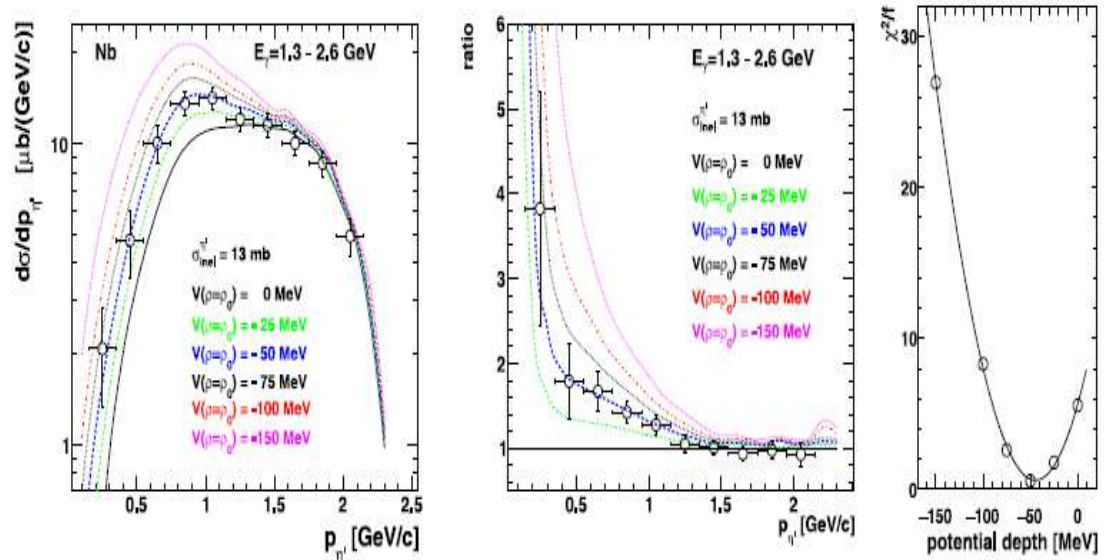


FIG. 5. Left: Momentum distribution for η' photoproduction off Nb for the incident photon energy range $1.3\text{--}2.6 \text{ GeV}$. The calculations are for $\sigma_{\text{inel}}^{\eta'} = 13 \text{ mb}$ and for potential depths $V = 0, -25, -50, -75, -100$, and -150 MeV at normal nuclear density, respectively. All calculated cross sections have been multiplied by a factor 0.83 (see text). The color code is identical to the one in Fig. 4. Middle: The experimental data and the predicted momentum distributions for $V = -25, -50, -75, -100$, and -150 MeV divided by the calculation for the scenario $V = 0 \text{ MeV}$ and presented on a linear scale. Right: χ^2 fit of the data with the momentum distributions calculated for the different scenarios.

Проведено дальнейшее теоретическое изучение эксклюзивной реакции (γ , η' p) на ядре углерода при энергии первичных фотонов 1.3-2.6 ГэВ в рамках разработанной нами современной физической и математической моделей данной реакции (см. публикацию 3 в прилагаемом ниже списке публикаций).

Выполнены новые расчёты сечения данной реакции в кинематических условиях эксперимента, выполненного коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на ускорителе ELSA (соответствующих рождению η' мезонов в заднюю полусферу в фотон-нуклонной системе центра масс при условии вылета детектируемого протона в интервале углов 1-11 градусов в лаб системе) и в различных сценариях ренормализации свойств (массы) η' мезонов в ядерной среде.

Прямое сравнение результатов этих расчётов с получаемыми в настоящее время данными эксперимента CBELSA/TAPS позволит получить надёжный вывод о величине сдвига массы η' мезонов в ядерной среде (или о величине реальной части η' A потенциала) при импульсах η' мезонов порядка 0.5 ГэВ/с. Знание этого сдвига важно, как для понимания механизма генерации масс псевдоскалярных мезонов в QCD, так для понимания различных аспектов “in-medium” адронной физики.

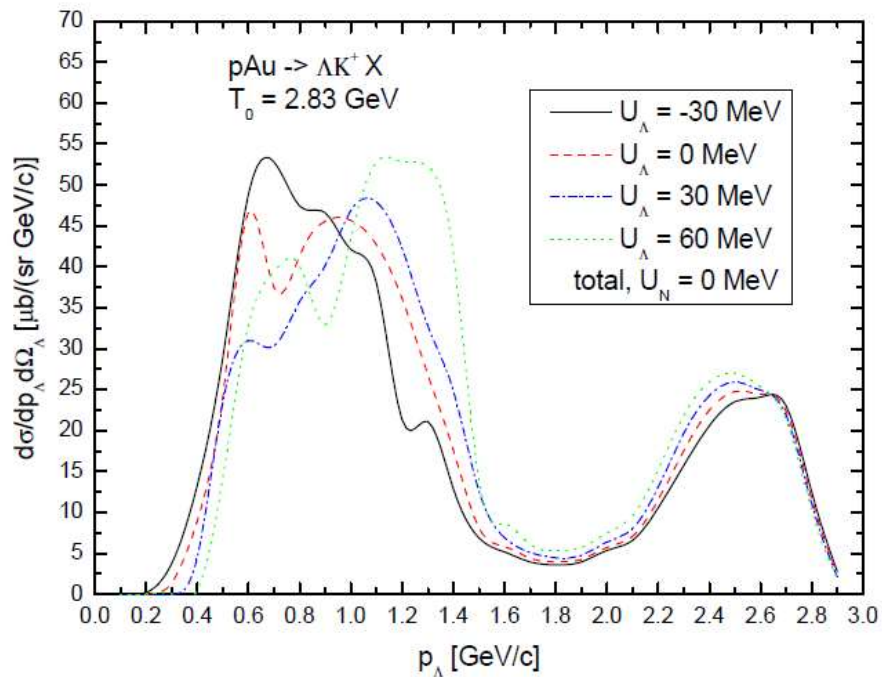
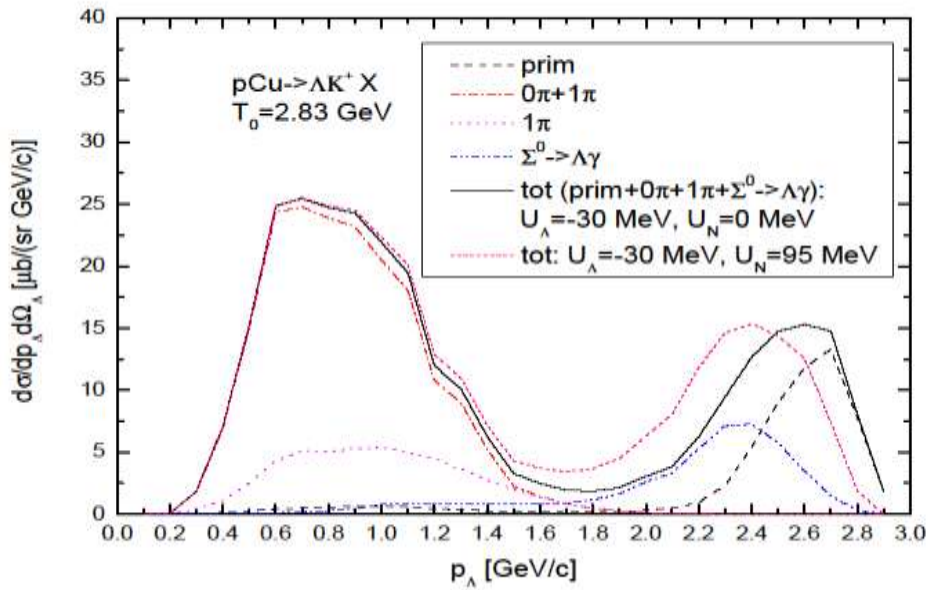
Результаты этого исследования планируется опубликовать в ближайшее время, а также доложить на Международной конференции по адронной физике (Бормио, Италия, 2017) и на заседании Немецкого Физического Общества (март, 2017).

2.1.9.2 Изучение Λ гиперон-ядерного оптического потенциала

Завершена разработка соответствующей модели протон-ядерного взаимодействия, предназначенной для анализа новых экспериментальных данных по эксклюзивному рождению Λ гиперонов совместно с $K(+)$ мезонами в pA столкновениях при энергии пучка 2.83 ГэВ, полученных в эксперименте на ускорителе COSY Коллаборацией ANKE, Юлих, Германия в рамках российско-германского научного сотрудничества. Цель этой работы - определение импульсной зависимости лямбда-ядерного оптического потенциала (его вещественной части) при импульсах порядка 0.5--1 ГэВ/с. 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 ΥN 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 Λ -N взаимодействия при конечных импульсах, так и для проверки предсказаний соответствующих теоретических подходов. На основе данной модели был написан ряд вычислительных программ, позволяющих рассчитать сечение изучаемой реакции

на ядрах C, Cu, Ag, Au с учетом различных эффектов среды. Примеры расчётов по этим программам показаны на прилагаемых ниже рисунках.



Результаты проделанной работы опубликованы в статье 4, указанной в прилагаемом ниже списке публикаций.

2.1.9.3 Изучение рождения пентаварка со скрытым чармом $P_c(4450)$ в фотоядерных реакциях

Для нужд планируемого эксперимента в Hall C на ускорительном комплексе CEBAF (USA) оценено сечение фоторождения недавно открытого коллаборацией LHCb пентакварка со скрытым чармом $P_c(4450)$ на легких и тяжелых ядрах вблизи порога, применяя в качестве элементарного сечения предсказания работы V. Kubarovsky and M.B.Voloshin, Search for Hidden-Charm Pentaquark with CLAS12. ArXiv:1609.00050 [hep-ph]. Показано, что использование ядерных мишеней не даёт особых преимуществ (что касается величины сечения фоторождения) по сравнению с использованием в предлагаемом и одобренном эксперименте – Z.-E. Meziani et al. A Search for the LHCb Charmed ‘Pentaquark’ using Photo-Production of J/ψ at Threshold in Hall C at Jefferson Lab. ArXiv:1609.00676 [hep-ex] - жидководородной мишени ввиду “размытия” формы резонанса Ферми-движением нуклонов ядра.

2.1.9 Заключение

Прямое сравнение эксклюзивных данных по фоторождению η/η' -мезонов, получаемых в настоящее время коллаборацией CBELSA/TAPS на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), с результатами выполненных нами теоретических исследований позволит извлечь величину сдвига массы этих мезонов в ядерной материи при импульсах порядка 0.5-1.0 ГэВ/с и тем самым проверить предсказания на этот счёт современных адронных моделей. Полученные результаты представляют также большой интерес для понимания в рамках КХД происхождения существенно большей массы η/η' мезонов по сравнению с массами других членов псевдоскалярного мезонного нонета.

Применение результатов проведенных теоретических исследований к анализу данных по рождению гиперон-каонных пар в pA реакциях при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ, впервые полученных коллаборацией ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента на ускорителе COSY, позволит извлечь величину Λ гиперон-ядерного скалярного оптического потенциала (или сдвига массы Λ гиперона в ядерной материи) при конечных импульсах, имеющую большое значение для современной ядерной и адронной физики.

Наконец показано, что использование ядерных мишеней не даёт особых преимуществ (что касается величины сечения фоторождения пентакварка $P_c(4450)$) по сравнению с использованием жидководородной мишени ввиду “размытия” формы резонанса Ферми-движением нуклонов ядра-мишени. Данный факт представляется важным для выбора стратегии поиска этого резонанса в фотоядерных реакциях вблизи порога.

2.1.9 Публикации

1. M. Nanova, S. Friedrich, V. Metag, E. Ya. Paryev et al. (yet 50 co-authors). Determination of the real part of the η prime-Nb optical potential. ArXiv: 1607.07228 [nucl-ex] (2016).
2. M. Nanova, S. Friedrich, V. Metag, E. Ya. Paryev et al. (yet 50 co-authors). Determination of the real part of the η prime-Nb optical potential. Phys. Rev. C 94, 025205 (2016).

3. E. Ya. Paryev, Study of in-medium eta/prime properties in the (γ , eta/prime p) reaction on nuclei. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 43 (2016) 015106 (20 pages).

4. E. Ya. Paryev, M. Hartmann, Yu. T. Kiselev, Medium effects in the $\Lambda K(+)$ pair production by 2.83 GeV protons on nuclei. ArXiv: 1612.02767 [nucl-th] (2016); submitted to J. Phys. G.

5. 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 <http://relnp.jinr.ru/ishepp/>. 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. To be published in Proc.of Science (PoS).

2.1.10 Осцилляции частиц в поглощающей среде. Исследование переходов нейтрон-antineйтрон. Регенерация каонов

Руководитель темы, кфмн ОЭФ В.И. Назарук

2.1.10 Реферат

Целью работы является разработка принципиально новой модели переходов нейтрон-antineйтрон в поглощающей среде и её обобщение на случай ab -переходов, а также модели регенерации каонов.

2.1.10 Введение

Регенерация короткоживущей компоненты K -мезонов одно из самых интересных и важных явлений. Оно прямо связано с CP -, T - и CPT -инвариантностью и описано в учебниках с конца 50-х годов прошлого века.

2.1.10 Основные результаты

Предыдущие расчёты, основанные на старой модели процесса, содержат диагонализацию массовой матрицы с многочисленной сменой базиса. При этом, как показано в работах [1-4], исходной является система несвязных уравнений движения, что является принципиальной ошибкой.

Нами предложен принципиально новый подход. В работах [2,3] используется теория возмущений. Работы [1,4] основаны на точном решении системы связанных уравнений движения.

2.1.10 Список публикаций

1. V.I. Nazaruk, Kaon regeneration. Int.J.Mod.Phys.E Vol. 25, No.12 (2016) 1650104.
2. V.I. Nazaruk, Kaon regeneration in perturbation theory. Int.J.Mod.Phys.E принята в печать.
3. V.I. Nazaruk, arXiv:1510.01629v7 [hep-ph] (2016). Kaon regeneration in perturbation theory.
4. V.I. Nazaruk, arXiv:1604.04547v3 [hep-ph] (2016). Kaon regeneration.

2.1.11 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах

Руководитель темы канд. физ.-мат. наук, с.н.с С.Г.Лебедев.

Ответственный исполнитель н.с. В.Э.Янц,

Исполнители: н.с. А.А.Алексеев, инж. Г.С.Лебедева

2.1.11 Реферат

Отчет, 12 страниц, 8 рисунков.

НАНОГРАФИТОВЫЕ ПЛЕНКИ, СКАЧОК СОПРОТИВЛЕНИЯ, ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СВЧ, ОСЦИЛЛЯЦИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Целью работы является исследование обнаруженных ранее в нанографитовых углеродных пленках эффектов скачка сопротивления на несколько порядков величины при критических токах до 1А, детектирования СВЧ – излучения, осцилляции намагниченности в магнитных полях 1-5 Т, генерации оптического излучения во временной окрестности скачка сопротивления. При исследовании указанных эффектов использовались методы СКВИД-магнитометрии, рамановской спектроскопии, оптической, магнитной и сканирующей туннельной микроскопии. Доступ к соответствующему высокотехнологичному оборудованию в России, а также в Германии и США осуществлялся на основе личных контактов. Исследованные эффекты можно объяснить на основе предположения о существовании вкрапления высокотемпературной сверхпроводящей фазы в несверхпроводящей матрице.

2.1.11 Введение

Графитоподобные гранулярные плёнки вот уже 40 лет привлекают к себе внимание своими аномальными электромагнитными свойствами, такими как скачок сопротивления [1-3] на несколько порядков величины при критических токах 10 - 1000 мА, детектирование СВЧ – излучения, осцилляции намагниченности в магнитных полях 1-5 Т, генерацией оптического излучения во временной окрестности скачка сопротивления. Указанные эффекты объясняются существованием в плёнках среды джозефсоновских контактов [3], в роли которых могут выступать графитоподобные гранулы, помещённые в матрицу из аморфного углерода [4-5]. Оптимизация структуры гранулярных графитоподобных плёнок с целью усиления указанных выше эффектов позволит разработать новый чрезвычайно перспективный функциональный материал для создания устройств некриогенной джозефсоновской электроники. Разработка подобного материала может оказаться настоящим прорывом России в области нанoeлектроники. Работы по исследованию наноструктурированных углеродных плёнок, а также графена находятся на переднем крае современной нанoeлектроники во всем мире [6-8]. Однако, внимание исследователей в настоящее время, в значительной мере, отвлекается на изучение фуллеренов и нанотрубок. Тем не менее, работы, особенно теоретические, по графитоподобным гранулярным системам, графену, идут полным ходом. Так, многие авторы серьезно рассматривают возможность высокотемпературной (даже горячей) сверхпроводимости в таких системах с критической температурой до 650К [3,9-10]. Органические транзисторы на основе фуллеренов в течение длительного времени разрабатываются в США [11]. Для работы указанных устройств необходимо криогенное охлаждение жидким гелием. Использование обнаруженного нами эффекта переключения позволит реализовать органический транзистор при комнатной температуре.

2.1.11 Основная часть

Для изучения природы и особенностей аномального электромагнетизма углеродных конденсатов были предприняты комплексные и дорогостоящие исследования в Лаборатории сверхпроводимости Университета г. Лейпцига (Германия) и Хьюстонском Центре сверхпроводимости (США) с использованием СКВИД – магнитометрии, электронной микроскопии, магнитной силовой микроскопии, измерений температурных зависимостей электросопротивления и джозефсоновских сигналов. Интеллектуальная собственность разработки защищена патентами РФ №№ 2212735 и 2420831. Работа поддерживалась грантами Немецкого Научного Общества в 2001 г. и РФФИ № 05-08-17909-а.

По итогам работы была написана научно-популярная статья «Поиски высокотемпературной сверхпроводимости в гранулярных углеродных плёнках», вышедшая в число победителей конкурса среди держателей грантов РФФИ. Статья была премирована грантом РФФИ № 06-08-99003-с. По результатам исследований по тематике проекта были опубликованы: статья в журнале «Краткие сообщения по физике ФИАН», две статьи в журнале Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, обзор в журнале “International Review of Physics”, статья в международном сборнике “Superconducting Thin Films: New Research” Editor: Arnold H. Burness, Nova Science Publishing, 2008., две научно-популярных статьи в журналах «Природа» и «Химия и жизнь», монография “Unconventional Electromagnetics in Carbonaceous Materials” Nova Science Publishing, 2010.

Исследование химической структуры нанографитовых пленок производилось методом рамановской спектроскопии на установке Института микроэлектроники РАН. Рамановский спектр является «характеристическим отпечатком» внутренней электронной структуры, определяющим степень её упорядоченности, а также соотношение углеродных атомов с различной гибридизацией. Рамановский спектр нанографитовой пленки представлен на Рис.1.

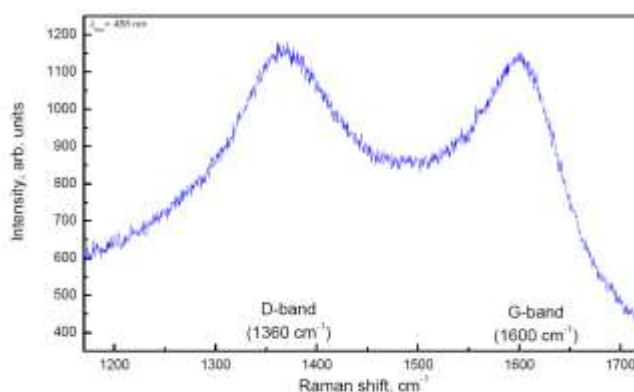


Рисунок 2.1.11.1. Рамановский спектр нанографитовой пленки.

В Рамановском спектре D – пик (1360 cm^{-1}) и G – пик (1600 cm^{-1}) соответствуют разупорядоченному углероду в sp^3 – координации и микрокристаллическому графиту в sp^2 – координации соответственно. Отношение D и G пиков связано с размером кристаллитов согласно соотношению [12] $I_D/I_G = 44\text{\AA}/L_a$, где L_a – размер кристаллита в плоскости a . Поскольку, как следует из Рис.2, $I_D/I_G \approx 1$, то размер кристаллитов в исследуемых пленках составляет 30-50 $\text{\AA}$. Таким образом, можно считать, что структура плёнок представляет собой нанографитовые гранулы, внедрённые в аморфную матрицу.

В результате работы по теме был подтвержден эффект переключения проводимости при токах до 1А. На Рис. 2.1.11.2 ясно видно, что переключение происходит именно из-за превышения тока, т.к. сначала падает до нуля ток, и лишь затем – напряжение. Практическое применение переключателей на основе исследованного эффекта осложняется деградацией, уменьшающей кратность переключений. Над преодолением этой проблемы необходимо работать в дальнейшем.

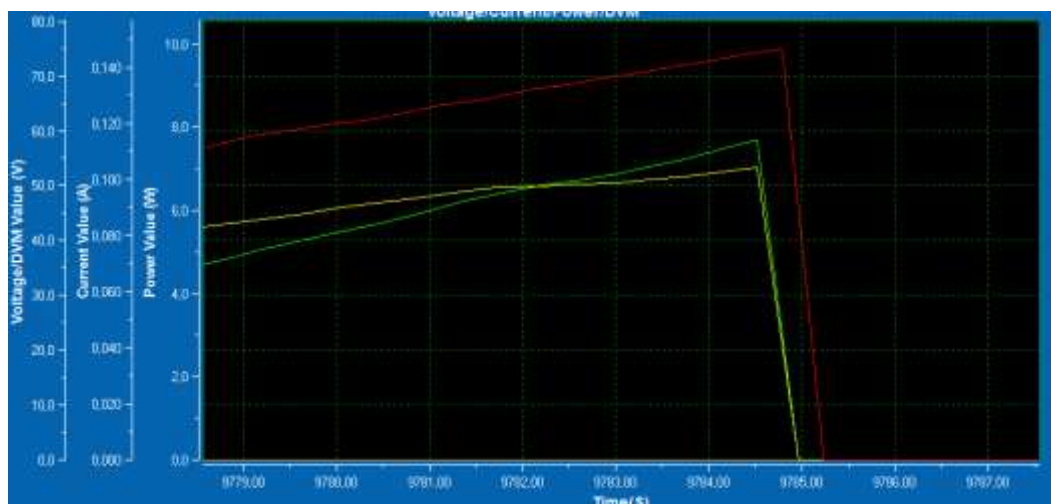


Рисунок 2.1.11.2. Процесс переключения в нанографитовых пленках. Красным показано изменение напряжения, желтым – изменение тока.

В качестве механизма переключения был предложен [13] сценарий коллапса волновой функции горячих электронов, что ведет к локализации носителей. Это связано с тем, что электронная и ионная подсистемы развязаны по времени, а длина пробега носителей очень чувствительна к мгновенной температуре, вызванной повышением электрического напряжения.

Второй важный результат работы – обнаружение в нанографитовых пленках обратного эффекта Джозефсона (ОЭД) [14], т.е. наведение постоянного напряжения при воздействии СВЧ. ОЭД является индикатором сверхпроводимости, либо чего-то очень её напоминающего. До сих пор кандидатов на замещение сверхпроводимости нет. Зависимость от температуры амплитуды наведенного постоянного напряжения часто используется для оценки критической температуры. Из приведенной на Рис.3. зависимости этот параметр можно оценить величиной 620K.

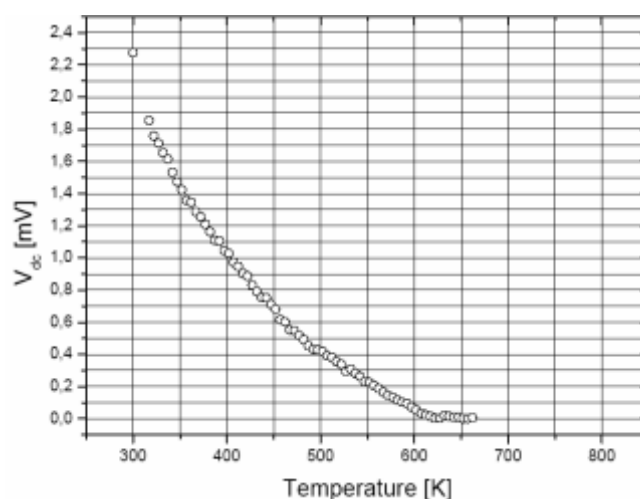


Рисунок 2.1.11.3. Зависимость амплитуды наведённого под действием СВЧ постоянного напряжения от температуры

Вопрос существования сверхпроводимости в графитовых плёнках является ключевым и для его прояснения были использовано самое современное оборудование, которого нет в ИЯИ и даже в России. В Лейпцигском университете Германии была исследована топографическая и магнитная микроструктура плёнок. Топография представлена на Рис.4 и представляет собой колоновидную структуру. В магнитном силовом микроскопе Рис.5 в некоторых частях пленки наблюдались токовые структуры вокруг топографических колонн, причем токи появлялись при воздействии постоянного магнита, что напоминает по характеру Мейснеровские токи. Области с указанной магнитной структурой отделены довольно протяженными областями без особенностей, либо с особенностями, обусловленными примесями окислов железа. Таким образом, СП области, если они есть, представляют собой редкие вкрапления.

Данный вывод был подтвержден при изучении графитовых плёнок в сканирующем туннельном микроскопе Института радиотехники и электроники РАН, при котором были обнаружены отдельные редкие области со сверхпроводящим типом ВАХ (см. Рис. 2.1.11.6).

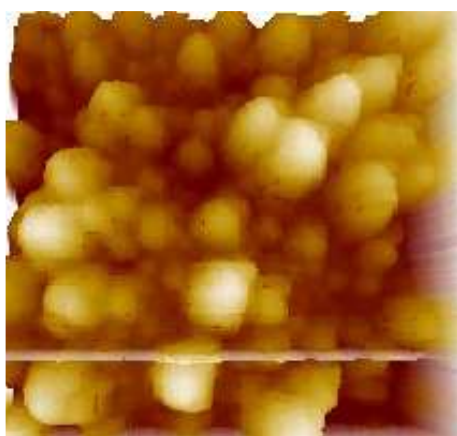


Рис. 2.1.11.4. Топография графитовых структура наноплёнок в электронном силовом микроскопе в МСМ

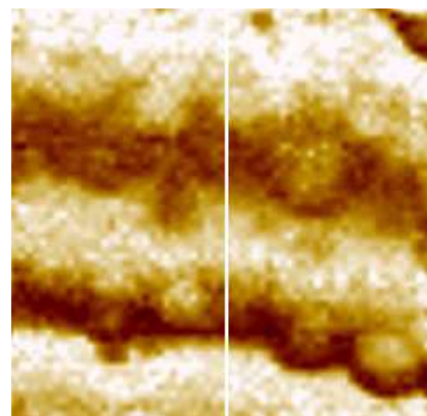


Рис. 2.1.11.5. Магнитная графитовых плёнок

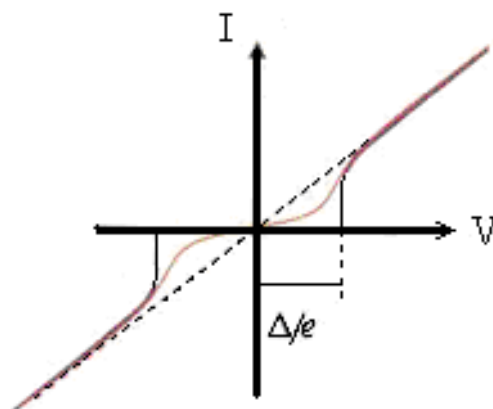
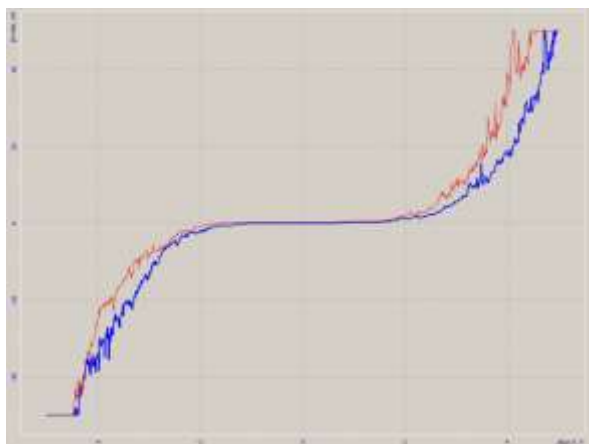


Рисунок 2.1.11.6. СП – подобная (при нулевом токе напряжение отлично от нуля) ВАХ углеродной пленки в одном из мест на её поверхности. Величина «СП щели» достигает 2 эВ. На обратном ходе сенсора «щель» слегка уменьшается, что может быть связано с нагревом при протекании тока (хоть и небольшого – 40 нА). Для сравнения справа представлена ВАХ сверхпроводника, которая круто идет вверх и вниз от оси абсцисс при напряжении, соответствующем величине сверхпроводящей щели при нулевой температуре. При ненулевой температуре щель размывается (показано коричневым цветом).

Среди результатов, полученных в ходе реализации проекта, стоит отметить также регистрацию теплового ИК излучения в момент переключения проводимости, проиллюстрированную на Рис. 2.1.11.7.

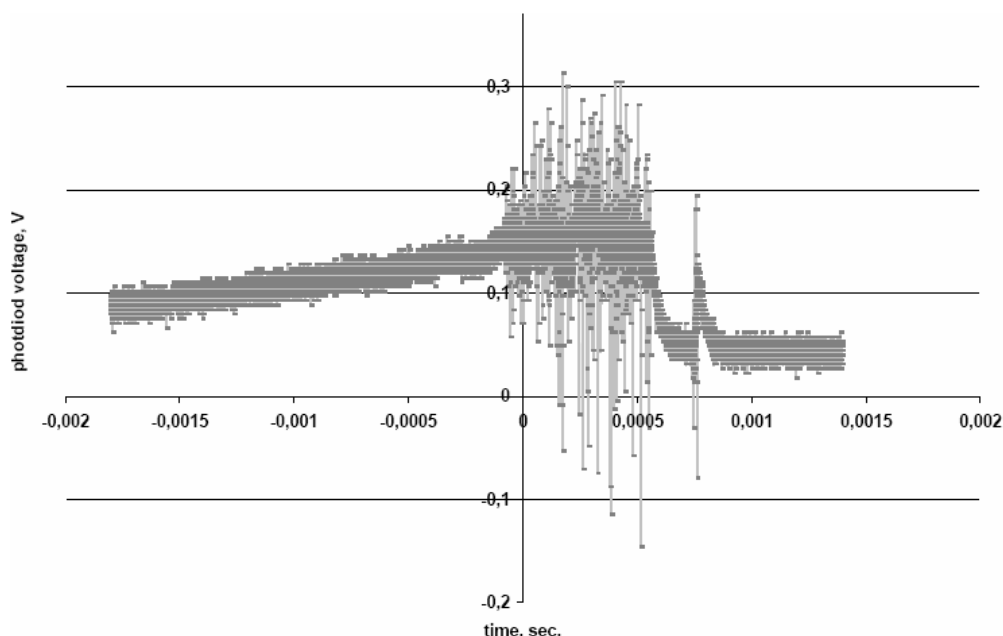


Рисунок 2.1.11.7 ИК – излучение, выходящее из нанографитовой плёнки после переключения.

Характерной особенностью спектров излучения, видной при анализе узкого участка спектра, снятого с помощью многопиксельного фотодиода, являются ярко выраженные строго эквидистантные уровни (см. Рис. 2.1.11.8). Расстояние между уровнями везде одинаковые (как

будто квантованные) и выдерживается с точностью 8 знаков после запятой. Это свидетельствует о сложных электромагнитных процессах, происходящих в нанографитовых плёнках в процессе переключения.

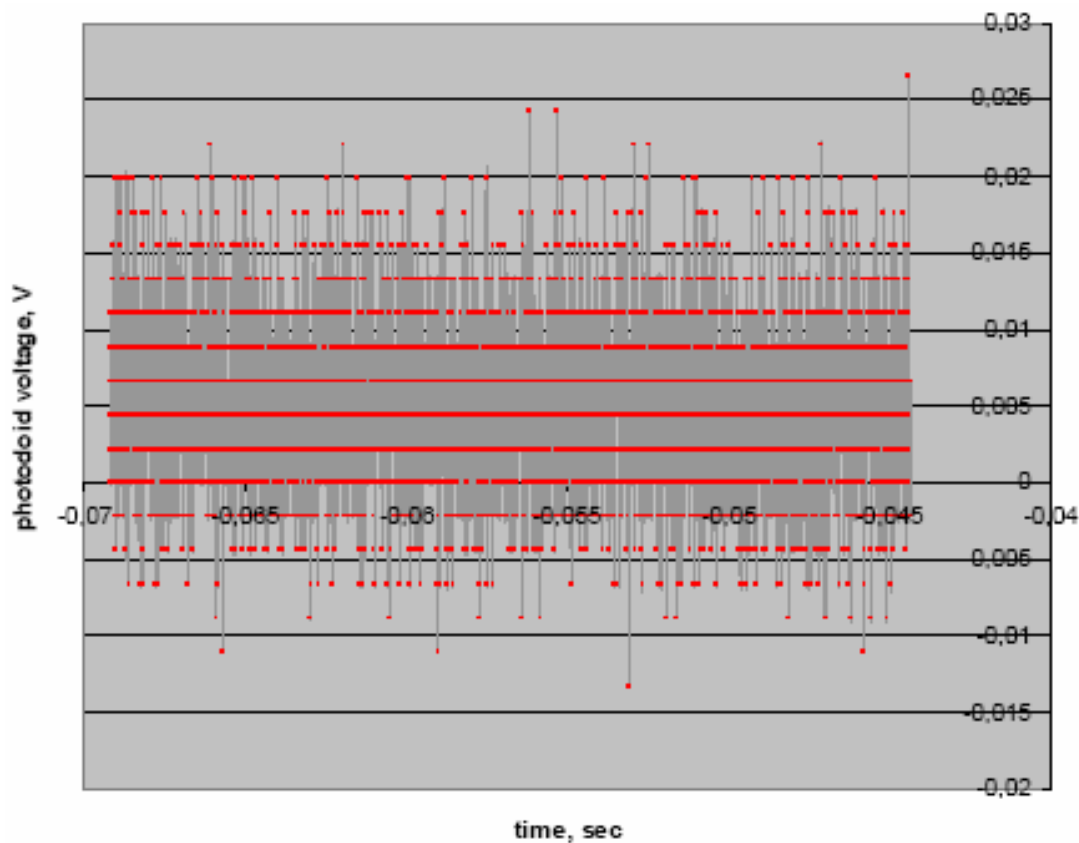


Рисунок 2.1.11.8. Эквидистантные уровни энергии в нанографитовых плёнках, образующиеся в процессе переключения проводимости.

2.1.11 Заключение

В результате выполнения проекта получены следующие результаты. Обнаружен эффект переключения проводимости в нанографитовых пленках при токах до 1 А.

Обнаружен обратный эффект Джозефсона, предполагающий существование СП фазы.

При проведении измерений с помощью магнитной и сканирующей микроскопии установлено, что если СП фаза есть, то она представляет собой вкрапления в несверхпроводящей матрице.

2.1.11 Цитированная литература

1. Antonowicz K. et al. // Carbon. 1972. V.10. P.81-86.
2. Antonowicz K. et al. // Carbon. 1973. V.11. P.1-5.
3. Antonowicz K. // Nature. 1974. V.247. P.358-360.

4. Lebedev S.G. // Nucl. Instr. Meth. 2004. V.A521. P.22-29.
5. S.G.Lebedev, A.S.Lebedev “Exploration of Josephson-Like Behavior of Thin Granular Carbon Films” Edited Collection “Superconducting Thin Films: New Research”, Editor: Arnold H.Barness, Nova Science Publishers, Inc.,2008. ISBN: 978-1-60456-307-8.
6. Novoselov, K. S., *et. al.*, *Science* (2004) 306, 666.
7. Y. Zhang, Y.W. Tan, H.L. Stormer, P. Kim. *Nature* 438, 201 (2005).
8. Novoselov K. S. *et. al.* Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene *Science* 315, 1379 (2007)
9. Breda N., Broglia R.A., Colo G., Onida G., Provasi D., and Vigezzi E. // *Phys.Rev.B*62(2000)130-133.
10. G.M.Zhao, Y.S.Wang.// ArXiv: [cond-mat/0111268v2](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0111268v2)
- 11.Schön J.H., Kloc Ch., Haddon R.C., Batlogg B. // *Science*. 2000.V.288. P.656-659.
12. P. K. Chu, L. Li, *Materials Chemistry and Physics* 96, 253 (2006).
13. S.G.Lebedev, “Field Effect Switching in Nano-Graphite Films” *Journal Physics and Chemistry of Solids* [Volume 75, Issue 9](#), September 2014, Pages 1029–1032, 2014.
14. Lebedev S. G., Topalov S. V. Observation of Weak Superconductivity in Carbon Films //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 1994. – №. 12. – С. 14-20.

2.1.11 Список публикаций и объектов интеллектуальной собственности, полученных в ходе выполнения темы

1. S.G.Lebedev, “Search for the Reasons of Josephson Like Behavior of Thin Granular Carbon Films” eprint arXiv:0802.4197, 2008
2. С.Г.Лебедев, Поиски высокотемпературной сверхпроводимости в гранулярных углеродных пленках, Сборник статей победителей Конкурса научно- популярных статей среди держателей грантов РФФИ, 2006 г.
3. S.G.Lebedev, V.E.Yants and A.S.Lebedev, Correlations Between Switching of Conductivity and Optical Radiation Observed in Thin Graphite-Like Films, arXiv: cond-mat/0612451.
4. S.G.Lebedev- Editor, “Unconventional Electromagnetics in Carbonaceous Materials” Nova Science Publihers, Inc., ISBN-13: 9781616681746, 2010.
5. С.Г.Лебедев «Горячая сверхпроводимость углерода?» *Химия и Жизнь* №2, 2007, стр.24-27.
6. С.Г.Лебедев «По следам углеродной сверхпроводимости» *Природа* №8 , стр.38-44, 2007.

7. S.G.Lebedev, V.E.Yants, A.S.Lebedev, Correlations Between Switching of Conductivity and Optical Radiation Observed in Thin Graphite-Like Films. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A590(2008)227-233.
8. S.G.Lebedev, “Josephson-Like Behaviour of Granular Carbon Films” eprint arXiv: 0706.3310, 2007.
9. S.G.Lebedev, A.S.Lebedev “Exploration of Josephson-Like Behavior of Thin Granular Carbon Films” Edited Collection “Superconducting Thin Films: New Research”, Editor: Arnold H.Barnes, Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-60456-307-8, 2008.
10. S.G.Lebedev, “Nano-Graphite Films for Solid State Applications” Advances in High Energy Physics, ID 612582, 2013.
11. S.G.Lebedev, “Evidence of Josephson-Like Behavior of Granular Carbon Films” International Review of Physics, v.2, N5 p.312-328, 2008.
12. С.Г.Лебедев, «По следам углеродной сверхпроводимости» Изобретательство, т.Х №3, стр.13, 2010.
13. С.Г.Лебедев «СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА И УСТРОЙСТВО СОГЛАСНО ЭТОМУ СПОСОБУ» патент РФ № 2420831, 2001.
14. С.Г.Лебедев. «Квантовое переключение в электрическом поле» блог журнала Экология и жизнь <http://ecolife.ru/blogs/?p=1085> 2012.
15. С.Г.Лебедев. «В поисках сверхпроводящего Грааля», Экология и жизнь №4, 2012, стр.52-55.
16. С.Г.Лебедев, «Токоограничители в интеллектуальных энергетических сетях», ISBN-13: 9783659779978, LAP Lambert Academic Publishing, 2015.
17. С.Г.Лебедев, Н.И.Андрианов, С.В.Генералова «Перспективные средства энергоэффективного управления электрическими сетями объектов ЖКХ и их безопасной эксплуатации» журнал ЖКХ, N12, стр. 54, 2015 г.
18. С.Г.Лебедев, Н.И.Андрианов, С.П.Юркевичус. «Бесконтактный углеродный переключатель – ограничитель тока как элемент системы управления электрическими сетями и их защиты в технологии SMART GRID» статья в сборнике “Инноватика и экспертиза” ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2015 г.
19. С.Г.Лебедев, «Способ изготовления джозефсоновского переключателя-ограничителя тока и устройство согласно этому способу», патент РФ №2420831, 2009.
20. S.G.Lebedev, “Field Effect Switching in Nano-Graphite Films” Journal Physics and Chemistry of Solids [Volume 75, Issue 9](#), September 2014, Pages 1029–1032, 2014.
21. Lebedev S. G. Anomalous electromagnetics of carbon condensates in the light of ideas of a high-temperature superconductivity //arXiv preprint cond-mat/0510304. – 2005.
22. Lebedev S. G., Topalov S. V. Observation of Weak Superconductivity in Carbon Films //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 1994. – №. 12. – С. 14-20

2.1.12 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР)

Руководитель группы С.Г.Лебедев

Исполнители: н.с А.А.Алексеев, инж. Г.С.Лебедева

2.1.12 Реферат

Отчёт 5 рисунков.

ФОНОННЫЙ РЕЗОНАТОР, ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, НАНОКОМПОЗИТ, РЕЗОНАНСНЫЕ МОДЫ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ.

Проект направлен на разработку технологии получения опытных образцов и исследование особенностей электродинамики, в особенности, сверхпроводимости, нанокристаллических металлических композитов – фононных резонаторов. Фононные резонаторы (*ФР*) представляют собой нанокристаллы, покрытые нанооболочкой, толщиной в несколько атомных слоёв из элемента с более высокой атомной массой. Покрытие нанокристалла нанооболочкой материала с более высоким атомным весом будет приводить к отражению звуковых волн от покрытия и их интерференции с падающими волнами. В результате можно создать наноразмерный фононный резонатор, все моды которого будут представлять собой стоячие волны и, соответственно будут резонансным образом усиливаться. Если полученные резонансные моды совпадают с основными модами электрон - фононного взаимодействия, то в композите, составленном из фононных резонаторов, все фонономодулированные процессы будут также резонансным образом усилены. Интенсификация электрон – фононного взаимодействия в композитах фононных резонаторов может усилить Бозе - конденсацию электронных пар, что может привести к повышению температуры сверхпроводящего перехода, улучшению тепловых и оптических свойств, уменьшению теплового расширения из-за отсутствия взаимодействия между различными модами.

В результате реализации проекта была построена электродинамическая модель фононного резонатора, которая обосновала реальность его конструкции и функциональных свойств.

Экспериментально удалось освоить производство ультрадисперсных порошков различных металлов, что является главным шагом к экспериментальной реализации прототипа фононного резонатора. К сожалению, отсутствие финансирования не позволило сделать второй важный шаг – нанесение нанооболочек.

2.1.12 Введение

Свойства поликристаллических материалов в значительной степени зависят от размера кристаллитов. Схематическая модель фононных резонаторов и нанокompозита на их основе представлена на Рис. 2.1.12.1.

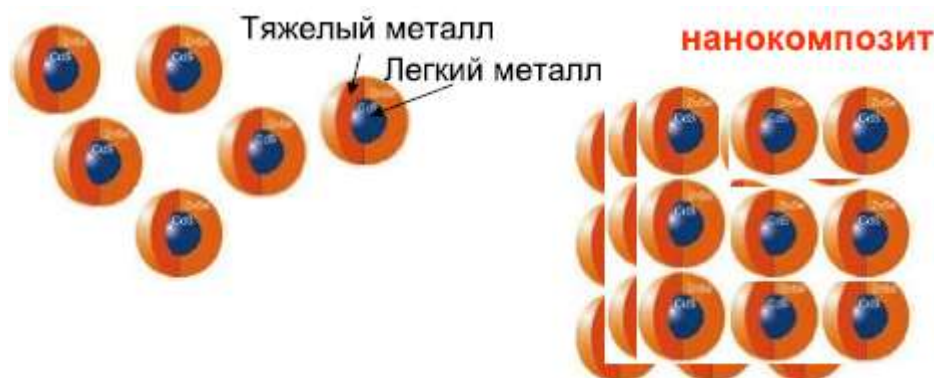


Рис. 2.1.12.1 Схематическая модель фононных резонаторов и нанокompозита на их основе.

Как показано на Рис.2, с уменьшением размера кристаллитов сверхпроводимость усиливается. Поэтому в нашем проекте нанотехнологическая составляющая проекта – нанокристаллиты и нанопокpытия играют ключевую роль. До сего времени исследователи работали лишь с нанокompозитами, любезно предоставленными им природой, свойства которых, зачастую случайны и не регулируемы. В результате выполнения проекта мы можем получить первый по-настоящему рукотворный нанокompозит с контролируемыми свойствами: размером зерен и толщиной прослоек, которые можно будет менять контролируемым образом с целью оптимизации сверхпроводящих, магнитных и прочностных свойств электрических проводов – продуктов.

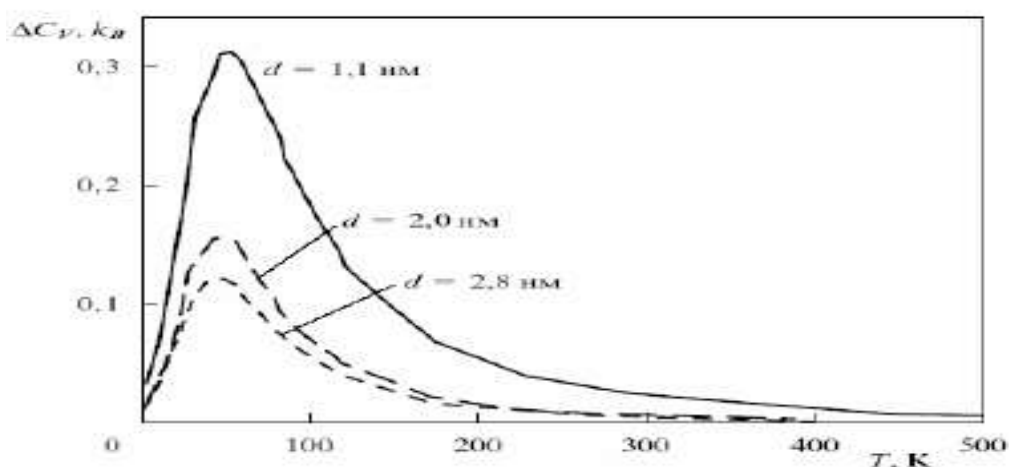


Рис. 2.1.12.2. Зависимость избыточной теплоёмкости ΔC_V от температуры и размера зерна модельного нанокристалла.

Проектом предусматривается разработка технологии получения нанопорошков фоновых резонаторов с заранее заданной структурой, обеспечивающей усиление вполне определенных фоновых мод, ответственных за электрон - фоновое взаимодействие в нанокластерах фоновых резонаторов, что может привести к усилению их сверхпроводящих, оптических и тепловых свойств. В данном проекте усилия будут сосредоточены на использовании технологических наработок проекта РФФИ № 07-08-13516- офи-ц по получению фоновых резонаторов для управления и оптимизации их электромагнитных, тепловых и оптических свойств. Имеющиеся наработки и know-how защищены патентом РФ № 2425793.

2.1.12 Результаты

Для реализации проекта создан межведомственный рабочий коллектив высококвалифицированных специалистов из научно-образовательных учреждений и институтов РАН: Института ядерных исследований, Института металлургии и материаловедения им А.А.Байкова, Российского химико-технологического университета, Института земного магнетизма и распространения радиоволн, РНЦ "Курчатовский институт" и Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова. В 2007 г. на реализацию проекта был получен грант РФФИ № 07-08-13516- офи-ц и через год коллектив освоил производство ультрадисперсных нанопорошков различных металлов. Распределение по размерам ультрадисперсных частиц меди представлено на Рис.3.

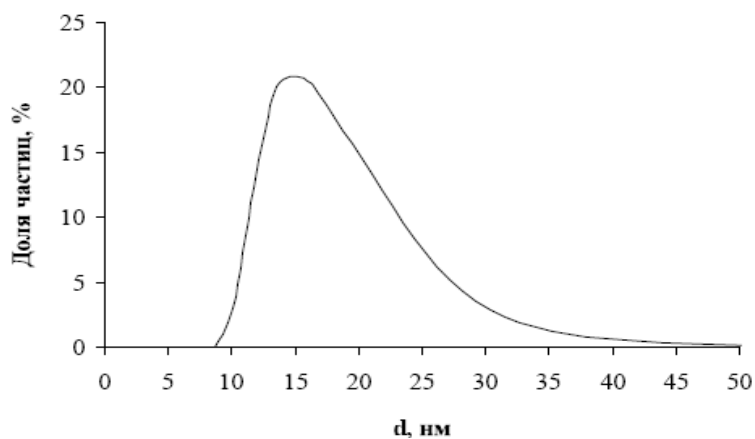


Рис. 2.1.12.3. Распределение по размерам наночастиц меди в водной среде, полученное методом динамического светорассеяния

На Рис.4. Представлен снимок в сканирующем электронном микроскопе ультрадисперсного медного порошка со средним размером 50 нм.

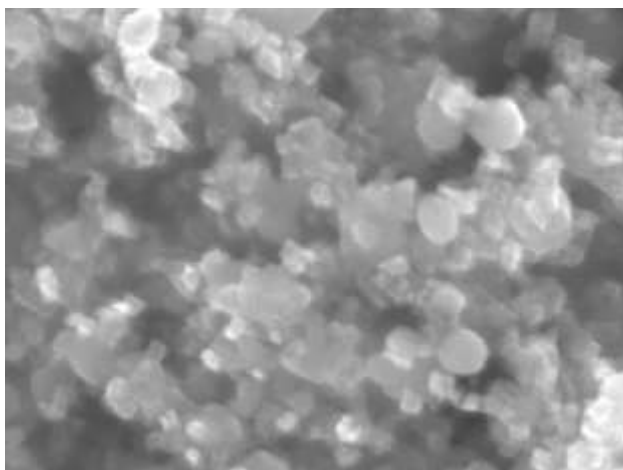


Рис. 2.1.12.4 Сканирующая микроскопия (SEM) медного порошка.

Полученный результат оказался весьма позитивным, и следующим этапом должно было стать покрытие мелкодисперсных медных наночастиц нанооболочками других материалов. К сожалению, грант не продлили и работы были свернуты. В дальнейшем в условиях отсутствия финансирования экспериментальных работ упор был сделан на моделирование.

Поиски подходящего материала для оболочки фононного резонатора можно производить различными способами. Мы решили ограничиться электродинамическим моделированием процессов в фононном резонаторе, проиллюстрированным на Рис.5. Для этой цели кристалл фононного резонатора представляют в виде двумерного набора связанных четвертьволновых резонаторов 2, смонтированных на проводящей пластине 1, каждый из которых моделирует поведение атома в кристаллической решетке (см. чертеж). Этот набор резонаторов окружают по периферии проводящими стержнями 3 для предотвращения потерь электромагнитного излучения. Каждый стержень 3 имеет длину, в 1,5 раз большую, чем резонатор 2. На микроуровне эти стержни будут аналогом атомов экрана-оболочки с массой, большей, чем масса атомов нанокристалла. Если используется медный нанокристалл фононного резонатора, то более дюжины металлов могут быть использованы в качестве оболочки-экрана. Этот список включает как обычные металлы, широко использующиеся в промышленности, такие как: свинец, олово, серебро, золото, платина, вольфрам, индий. Можно также использовать и менее распространенные металлы, такие как: цезий, барий, гафний, тантал, рений, осмий, иридий, таллий, лантан, церий и самарий. При выборе материала экрана следующие факторы могут оказаться важными: технологичность, совместимость процесса формирования экрана-оболочки поверх нанокристаллита с дальнейшими технологическими процессами создания

приборов на базе фононных резонаторов, достижимость требуемой прочности материалов, экологический аспект и др.

Электродинамическое моделирование показало также, что дефекты в форме вакансий (т.е. отсутствие одного или нескольких чередующихся атомов) или смещение атома из узла решетки в междоузельное положение почти не влияют на взаимодействие фононных мод соседних резонаторов. Это благоприятно для возможных практических применений фононных резонаторов.

Верхняя граничная частота фононного резонатора определяется массой атомов кристаллической решетки, тогда как нижняя граничная частота зависит от массы атомов экрана-оболочки. Экран является прозрачным для частот в диапазоне между нижней и верхней граничной частотами колебаний атомов экрана. Следовательно, стоячие волны не могут возбуждаться в фононном резонаторе в этом диапазоне частот. Стоячие волны могут возбуждаться в нанокристаллах в диапазоне частот с шириной, зависящей от отношения атомных масс составляющих атомов кристаллической решетки и экрана.

Верхняя граничная частота $f_{\max}$ составляет 7,58 ТГц и 2,18 ТГц для меди и свинца соответственно. Приблизительная начальная величина полосы частот будет равна $\Delta F_0 = f_{\text{Cu}} - f_{\text{Pb max}} = (7,58 - 2,18) \text{ ТГц} = 5,4 \text{ ТГц}$.

Электродинамическое моделирование показало, что нанесение свинцового экрана на поверхность медного нанокристаллита вызывает сложное изменение дисперсионных спектров. Например, нижняя граничная частота f_l превысит $f_{\text{Pb max}}$. Разница будет больше в случае более сильного сцепления (т.к. в этом случае атомы на границе раздела взаимно диффундируют) между двумя системами, одна из которых - набор трехмерных медных нанокристаллитов, а другая - трехмерный слой атомов свинца. Верхняя граничная частота f_u также изменится, но незначительно, и с хорошей точностью можно считать ее равной $f_{\text{Cu max}}$.

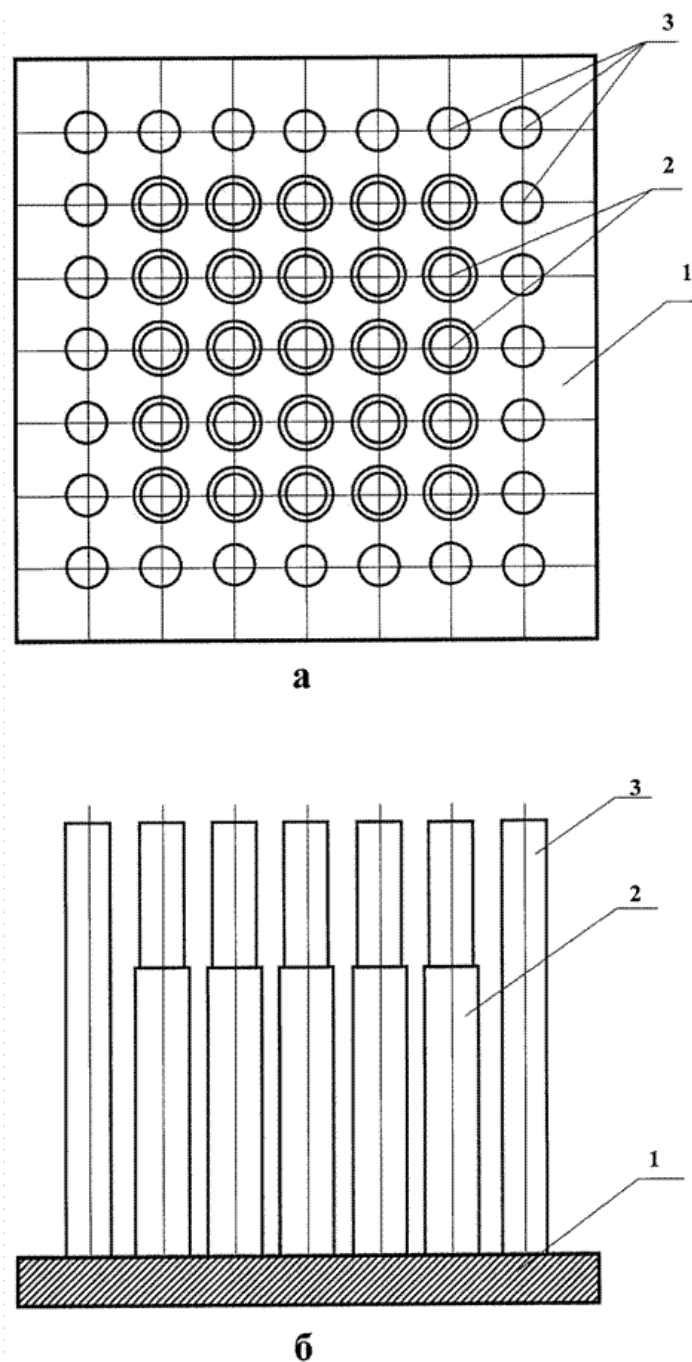


Рис. 2.1.12.5. Электродинамическое моделирование фононного резонатора.

Таким образом, полоса частот $\Delta F_1 = f_u - f_l$ будет менее широкой, чем начальная величина ΔF_0 . На основе результатов электродинамического моделирования полоса частот получается в пределах 4,7-5 ТГц (вместо 5,4 ТГц). Тем не менее, полоса частот будет достаточно широкой и в первом приближении превысит полосу частот бегущей волны фононной моды в два раза, что подтверждает возможность расширения спектра усиливаемых фононов и достижение заявленного технического результата. Также следует отметить, что фононы внутри полосы частот будут более сильно влиять на свойства

металла, чем фононы с частотами ниже нижней граничной частоты, поскольку имеет место резонансное усиление.

Данный пример демонстрирует возможность использования фононных резонаторов нанометровых размеров для создания на их основе нанокомпозита.

Таким образом, использование настоящего изобретения обеспечивает увеличение эффекта резонансного усиления электрон-фононного взаимодействия, расширение спектра усиливаемых фононов и переход к трехмерной структуре. Переход к трехмерной наноструктуре позволяет получить конечное число гармонических мод колебаний кристаллической решетки, уменьшающееся пропорционально кубу характерного размера. При этом спектр колебаний становится дискретным, а отдельные моды колебаний не взаимодействуют друг с другом, что значительно усиливает все фономодулированные процессы в кристалле. Покрытие нанокристалла нанооболочкой материала с более высоким атомным весом позволяет создать фононный резонатор, все моды которого будут представлять собой стоячие волны и, соответственно, будут резонансным образом усиливаться. Создание композитов из фононных резонаторов позволяет получить перспективный функциональный материал для электроники с регулируемой структурой и свойствами.

2.1.12 Заключение

При выполнении проекта получены следующие результаты.

Построена электродинамическая модель фононного резонатора, которая обосновала реальность его конструкции и функциональных свойств.

Экспериментально удалось освоить производство ультрадисперсных порошков различных металлов, что является первым шагом к экспериментальной реализации прототипа фононного резонатора. К сожалению, отсутствие финансирования не позволило сделать второй важный шаг – нанесение нанооболочек.

2.1.12 Список публикаций и объектов интеллектуальной собственности, полученных в ходе выполнения темы

1. Н.В.Алексеев, В.Г.Андреев, Л.В.Кравчук, С.Г.Лебедев, А.В.Самохин "Проблема диагностирования электромагнитных свойств нанопорошка фононных резонаторов" доклад на 1 -ой Всероссийской научной конференции "Методы исследования состава и структуры функциональных материалов" 11-16 октября 2009 г. Новосибирск.

2. Л.В.Кравчук, С.Г.Лебедев, «Разработка технологии получения сверхпроводников на основе нанокомпозита фононных резонаторов» в буклете ИЯИ РАН «Инновационные разработки и проекты Института ядерных исследований РАН», Москва, 2009.

3. В.Г.Андреев, Л.В.Кравчук, С.Г.Лебедев, «Наноккомпозит на основе фононных резонаторов и способ его получения» патент РФ № 2425793.
4. V.G. Andreev, L.V. Kravchuk, S.G. Lebedev, “Phonon Resonators: The Building Blocks of Nanocomposite Adjusting the Electron - Phonon Interaction” eprint arXiv: 1012.4286, 2010.
5. L.V.Kravchuk, S.G.Lebedev, “Nanocomposite of Phonon Resonators” International Review of Physics, v.6, N6, 2012.
6. S.G.Lebedev, Phonon resonators – new perspective nanocomposite for ruling out of electron-phonon interaction. Труды X111 Российско – Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии», стр.374, Казань, 20-26 Сентября 2015 г.
7. A.V.Feschenko, L.V.Kravchuk, E.A. Koptelov, S.G. Lebedev, M.V.Libanov, N.M. Sobolevsky, I.I.Tkachev “Experimental and computer modeling of new materials behavior under irradiation on Institute for nuclear research RAS facilities and software”, Труды X111 Российско–Китайского симпозиума «Новые материалы и технологии», стр. 378, Казань, 20-26 Сентября 2015 г.

2.1.13. Статистическая модель образования каонов, гиперонов и гиперядер в аннигиляции антипротона на ядрах

Руководитель темы кфмн снс СМОЭ Голубева Е.С.

1. Завершена работа над программой, моделирующей рождение "странности" в элементарном антинуклон-нуклонном взаимодействии в области энергий $T \leq 3$ ГэВ. Для прямого моделирования элементарного акта антинуклон-нуклонного взаимодействия в программе используются параметризации энергетической зависимости сечений основных его каналов (аннигиляции, упругого взаимодействия, перезарядки, неупругого пионообразования и неупругих каналов с рождением "странности"), полученные из анализа существующих на настоящий момент экспериментальных данных.

Из сравнения независимых экспериментальных данных следует, что сечения $\bar{p}p$ превышают $\bar{n}p$ – сечения в области импульсов $\lesssim 200$ МэВ/с ($T_0 = 20$ МэВ), что связано с влиянием кулоновского взаимодействия при малых энергиях. Энергетическая зависимость сечений в этой области крайне важна для задач, связанных с поиском нейтрон-антинейтронных осцилляций при моделировании процессов аннигиляции остановившихся антинейтронов в ядре. В данной программе учитывается асимптотическое поведение сечений аннигиляции:

$$\sigma_{ann}(T < T_0) = 1/\beta^2 * \sigma_{ann}(T = T_0) \quad \text{для } \bar{p}p \text{ – аннигиляции и}$$

$$\sigma_{ann}(T < T_0) = 1/\beta * \sigma_{ann}(T = T_0) \quad \text{для } \bar{p}n \text{ –}, \bar{n}p \text{ –}, \bar{n}n \text{ – аннигиляции.}$$

Энергетическая зависимость упругого сечения и сечения перезарядки при малых энергиях ($T < T_0$) так же зависит от типа взаимодействующих частиц и определяется как

$$\sigma_{el,ex}(T < T_0) = 1/\beta^2 * \sigma_{el,ex}(T = T_0) \quad \text{для упругого } \bar{p}p \text{ - взаимодействия и}$$

$$\sigma_{el,ex}(T < T_0) = \sigma_{el,ex}(T = T_0) \quad \text{для } \bar{p}n \text{ –}, \bar{n}p \text{ –}, \bar{n}n \text{ – взаимодействия.}$$

Разработанный и реализованный в вычислительной программе подход подробно описан в опубликованном препринте[1]. В настоящее время программа, моделирующая элементарный акт антинуклон-нуклонного взаимодействия при низких энергиях, передана разработчикам программного комплекса QGSM (Quark-Gluon String Model) для компиляции, что даст возможность прямого моделирования рождения "странности" адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий.

2. В рамках участия в новой международной коллаборации по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций на ESS подготовлена программа для моделирования аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах углерода. При помощи данной программы был подготовлен файл с событиями аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах ^{12}C (100000 событий), который используется коллаборацией при проектировании

детектора На основе проведенной работы был написан раздел Modeling of Annihilation Events для обзорной статьи Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects [2]. Работа опубликована в Physics Reports.

2.1.13 Публикации

1. Голубева Е.С. Моделирование элементарного акта антинуклон-нуклонного взаимодействия при $T < 3$ ГэВ. Препринт ИЯИ РАН 1412/2015.

2. Neutron-Antineutron Oscillations: Theoretical Status and Experimental Prospects. D. G. Phillips II, W. M. Snow, K. Babu, S. Banerjee, D. V. Baxter, Z. Berezhiani, M. Bergevin, S. Bhattacharya, G. Brooijmans, L. Castellanos, M-C. Chen, C. E. Coppola, R. Cowsik, J. A. Crabtree, P. Das, E. B. Dees, A. Dolgov, P. D. Ferguson, M. Frost, T. Gabriel, A. Gal, F. Gallmeier, K. Ganezer, E. Golubeva, G. Greene, B. Hartfiel, A. Hawari, L. Heilbronn, C. Johnson, Y. Kamyshev, B. Kerbikov, M. Kitaguchi, B. Z. Kopeliovich, V. B. Kopeliovich, V. A. Kuzmin, C-Y. Liu, P. McGaughey, M. Mocko, R. Mohapatra, N. Mokhov, G. Muhrer, H. P. Mumm, L. Okun, R. W. Pattie Jr., C. Quigg, E. Ramberg, A. Ray, A. Roy, A. Ruggles, U. Sarkar, A. Saunders, A. P. Serebrov, H. M. Shimizu, R. Shrock, A. K. Sikdar, S. Sjue, S. Striganov, L. W. Townsend, R. Tschirhart, A. Vainshtein, R. Van Kooten, Z. Wang, A. R. Young. arXiv:1410.1100 Phys.Rep.612(2016), 1-45

3 Отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики

3.3 Новые свойства атомных ядер и нейтрино и их роль в формировании новых явлений в физике и астрофизике

Научный руководитель темы с.н.с. к.ф.-м.н. Ю. С. Копысов

3.3 РЕФЕРАТ

Предложена модель структуры солнечных недр. Она согласуется с результатами многолетних измерений в ИЯИ РАН потоков солнечных нейтрино и с многолетними наблюдениями солнечных 160-минутных атмосферных осцилляций в Крымской астрофизической обсерватории. Эта модель основывается на трёх предположениях:

1. Под сверхадиабатической конвективной зоной существует слабо-субадиабатическая солнечная тропосфера, служащая резонатором для g -мод 160-минутных осцилляций.

2. Помимо тепловой ветви pp -реакции водородной цепи, дающей главный вклад в солнечную светимость, существует побочная ядерно-молекулярная каталитическая ветвь pp -реакции, дающая малый вклад в солнечную светимость, но управляющая солнечной активностью и поставляющая энергию процессам динамической самоорганизации Солнца, ответственным за интенсивную солнечную активность.

3. Постулируется возможность фазового перехода водородно-гелиевой плазмы Солнца с образованием ядерно-молекулярных кристаллических структур, состоящих из ядер ${}^4\text{He}$, расположенных вне кулоновского барьера, связанных между собой протонами, объединёнными в куперовские пары, представляющие собой сверхтекучий конденсат.

3.3 ВВЕДЕНИЕ

Исследования 2016 года по настоящей тематике посвящены 100-летию юбилею со дня рождения академика Г. Т. Зацепина. Зарубежные коллеги называли его учёным масштаба Ферми. По нашему мнению, следует добавить, что Г. Т. Зацепин — это учёный-естествоиспытатель, который заложил в СССР и в России основы современной физики космических лучей, нейтринной астрономии и нейтринной астрофизики. Благодаря его научному авторитету и организационной активности в созданной им и А. Е. Чудаковым Баксанской нейтринной обсерватории стало возможным не только проверить существующие представления о строении Солнца, но и заложить основы новой науки о солнечной активности.

Действительно, с помощью созданного под руководством Г. Т. Зацепина галлий-германиевого нейтринного телескопа удалось получить с $\sim 10\%$ точностью поток солнечных нейтрино, генерируемых в протон-протонной реакции, и доказать его постоянство в ходе 11-летней активности [1]. Последний результат очень важен для солнечной астрофизики. Оказалось, что измерения основного потока нейтрино ничего нам не говорят о природе солнечной активности. Более благоприятная ситуация с точки зрения исследования природы солнечной активности сложилась с наблюдением глобальных колебаний Солнца, начатых в КраО под руководством А. Б. Северного в 1974 г. и продолжающихся в течение десятилетий. Доплеровские измерения 2011–2014 гг. подтвердили загадочное для астрономии явление – пульсацию фотосферы с периодом 9597.929(15) с, сохранявшую начальную фазу на протяжении 41 года. Природа пульсации не установлена. Отмечено, однако, что её биения с космологическим колебанием 9600.606(12) с происходят с периодом 398.4(2.9) сут, совпадающим в пределах ошибки с синодическим периодом Юпитера 398.9 сут. Выдвинута гипотеза, что биения Солнца индуцированы полем тяжести Юпитера, обращающегося в привилегированной системе отсчёта «Солнце–Земля». (По данным В. А. Котова, В. И. Ханейчука (май 2016 г.).)

Уже после первых публикаций результатов наблюдений в КраО нами была опубликована гипотеза о существовании внутри Солнца резонатора внутренних гравитационных колебаний, настроенного на наблюдаемый период [2,3]. Предлагаемая модель динамической самоорганизации солнечных недр в форме резонирующей солнечной тропосферы является дальнейшим развитием этих работ. Предлагаются новые каталитические источники ядерной энергии, которые могли бы питать низкоэнтропийной энергией солнечную тропосферу и, в перспективе, быть реализованы в лабораторных условиях.

3.3 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве дальнейшего развития стандартной эволюционной модели Солнца предложена концепция динамической самоорганизации солнечных недр (КДССН). Физический смысл этой концепции состоит в возможности «мягкой» модификации стандартной эволюционной модели в духе работ [2,3]. В предлагаемом варианте КДССН предполагается существование под конвективной зоной Солнца другой зоны конечной высоты со слабым субадиабатическим градиентом температуры, получившей название солнечной тропосферы [4]. Предполагается, что эта зона является резонатором для внутренних гравитационных колебаний, подстраивающимся под космологический период. Под действием периодических приливных гравитационных сил Земли и Юпитера, возмущающих «мягкую» солнечную тропосферу в эпохи соединения Солнце–Земля–

Юпитер, происходит модуляция собственной гравитационной g -моды тропосферы с периодом, равным синодическому периоду Юпитера (398,42 сут).

Необходимым условием устойчивости солнечной тропосферы является её подпитка низкоэнтропийной энергией в форме восходящих вихревых потоков газа. Источниками таких потоков могли бы служить тепловые зародыши с вмороженными магнитными полями, теория которых обсуждается в работе [5]. Таким образом, под тропосферой следует ожидать области вулканической активности.

Ключевым моментом в проблеме формирования в недрах Солнца глобальной диссипативной структуры является представление о ядерно-молекулярном катализе в цепи ядерных реакций превращения протонов в ядра гелия и других более тяжёлых элементов. Впервые такая возможность обсуждалась в работе [6], в которой в качестве катализатора ускорения pp -реакции рассматривалась третья сильновзаимодействующая частица, например, ядро ${}^4\text{He}$. Итогом исследований последних двух лет явилась следующая картина ядерно-молекулярного катализа. Предполагается, что в веществе солнечных недр, состоящем в основном из ионизованных атомов водорода и гелия, могут происходить фазовые переходы второго рода с образованием ядерно-молекулярных кристаллических структур, также состоящих из ядер ${}^4\text{He}$ и протонов. В [7] были приведены аргументы в пользу возможности существования рыхлой ядерной материи, состоящей из ядер ${}^4\text{He}$ и вырожденного газа протонов, объединённых в куперовские пары и находящихся в состоянии сверхтекучести и сверхпроводимости. Из приведённых там расчётов следует, что если расстояние между куперовскими парами протонов составляет несколько десятков ферми, то энергетическая щель, обеспечивающая существование сверхтекучести, значительно больше окружающей температуры солнечной плазмы, т. е. в недрах Солнца существуют области, где возможны фазовые переходы с образованием квазистационарных сверхтекучих ядерно-молекулярных структур. Важным указанием в пользу существования таких ядерно-молекулярных состояний является экспериментальное обнаружение тетранейтрона [8].

3.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведённых исследованиях была поставлена задача усовершенствования стандартной эволюционной модели Солнца. Таким образом, чтобы не нарушить достигнутого согласия результатов измерения потоков солнечных нейтрино с теоретическими расчётами по моделям Солнца. Анализ показывает, что можно говорить о большой энергетике Солнца, которая ответственна за глобальную структуру звезды, и о малой энергетике, которая может управлять солнечной активностью, не меняя существенным образом структуру Солнца. С малой энергетикой могут быть связаны

новые источники ядерной энергии, поиски и исследования которых могут дать ценную информацию о возможности существования новых рыхлых форм ядерной материи и возможности использования этих форм в земных условиях. С точки зрения ядерной астрофизики новые источники ядерной энергии могут оказаться очень полезными для исследования структуры и эволюции других звёзд Главной последовательности и особенно её нижней части — красных карликов, гораздо более активных, чем наше Солнце. Наиболее перспективны в настоящее время — изучение ядерно-молекулярных кристаллических структур, состоящих из водорода и гелия.

3.3 ЛИТЕРАТУРА

1. Abdurashitov J. N. et al. (SAGE Collaboration) / Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III. Results for the 2002–2007 data-taking period / *Phys. Rev. C* **80**, 015807 (2009).
2. Зацепин Г. Т., Гаврюсева Е. А., Копысов Ю. С. / Солнечные нейтрино и нерадиальные колебания Солнца. / *ДАН СССР*, 1980, т. **251**, №26, с. 1342–1346.
3. Gavryuseva E. A., Kopysov Yu. S., and Zatsepin G. T. / 160-min oscillations of the Sun as the mean of the study of its internal structure. / In: *Proc. of the IAU Coll. No. 66 on Problems of Solar and Stellar Oscillations*. Ed. by D. O. Gough. Crimea, 1981.
Gavryuseva E. A., Kopysov Yu. S., and Zatsepin G. T. / *Solar Phys.* **82** 209 (1983).
4. Yu. S. Kopysov / Neutrino charge with its gauge field as a new physical base for new models of solar activity and all totality of phenomena associated with supernovae explosions, forming of pulsars and their following evolution / *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. "Mathematics. Information Sciences. Physics."* 2013, No. 4, pp. 170–180.
5. Ю. С. Копысов / Нейтринная гелиосейсмология / Частицы и космология. Материалы III Всесоюзной школы, апрель 1985. Москва, ИЯИ АН СССР, 1987.
6. Yu. S. Kopysov / Solar neutrinos and the catalytic role of a third particle in hydrogen burning / *AIP Conference Proceedings*, No. 52. New York, 1979.
7. Yu. S. Kopysov / Nuclear-Molecular Version of Processes of Dynamical Self-organization of Solar Interiors and their Possible Role in Formation of Solar Activity / Report on the 2nd International conference on particle physics and astrophysics. Moscow, MPhI, October 11, 2016.
8. Kisamori K. et al. / Candidate Resonant Tetraneutron State Populated by the $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Be})$ Reaction / *Phys. Rev. Lett.* (2016) **116**, 052501.

3.4 Топология магнитного поля и динамика Солнца

Руководитель темы: ст. н. с. к.ф.-м.н. Е.А. Гаврюсева

3.4 Реферат

Отчет на 4-х страницах включает три рисунка.

СОЛНЦЕ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ВРАЩЕНИЕ, ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА, ДИНАМИКА, ДОЛГОТНАЯ СТРУКТУРА, СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, ЦИКЛИЧНОСТЬ

3.4 Введение

Для адекватного понимания условий генерации ядерной энергии, потоков нейтрино и их прохождения через толщу Солнца необходимо исследовать широкий спектр проблем, начиная с изучения его глубоких недр и кончая солнечно-земными связями. Структура и динамика Солнца определяется химическим составом, его распределением, вращением солнечной плазмы, зависящим от широты, глубины и времени, а также от топологии крупномасштабных магнитных полей.

Комплексный подход к указанной проблематике последовательно реализуется, и в 2016 году основное внимание было уделено изучению долготной структуры магнитного поля. Априори неизвестно, существует ли устойчивая долготная структура, и, если существует, насколько долго живущей она является, на какой глубине генерируется и с какой скоростью вращается.

3.4 Результаты

Получена очень важная информация о широтной и долготной структуре солнечного магнитного поля. Вращение Солнца имеет дифференциальный характер, изменяясь с глубиной и по широте, и во времени. Общепринятое мнение подразумевает, что характерным периодом вращения крупномасштабного фотосферного магнитного поля (МП) является Каррингтоновский период, соответствующий вращению активных широт Солнца.

Для исследования были использованы данные по измерению радиальной компоненты МП, полученные на протяжении трёх циклов солнечной активности 21, 22, 23 на Маунт Вилкоккс обсерватории в США.

1. Была произведена сверка МП за три цикла с Каррингтоновским периодом (КП) на различных широтах в северном и южном полушариях. Результат представлен на Рис. 3.4.1, где по оси X отложена долгота, а по оси Y — широта, красным цветом помечено положительное, а синим — отрицательное МП.

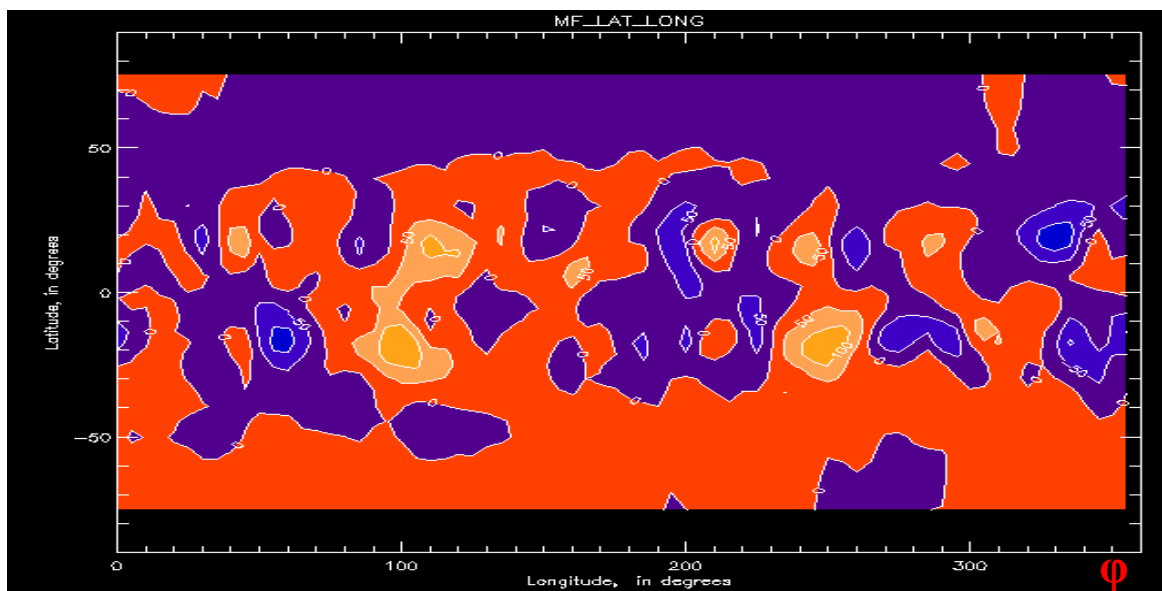


Рисунок 3.4.1

2. Произведено вычисление свертки МП на различных широтах в координатных системах, вращающихся с разными скоростями от 5 до 50 дней, а также в дифференциально вращающейся системе, то есть именно в такой, как в фотосфере вращается МП, причём с учетом наличия волн ускорения и замедления. Обнаружена именно та система, где присутствует устойчивая на протяжении 2-3 циклов долготная структура. Результат представлен на Рис. 3.4.2. Здесь на верхней панели изображена долготно-широтная свертка МП, на средней – МП, усредненное по северному (С), по южному (Ю) и по обоим полушариям, а на нижней панели – коэффициент автокорреляция между МП в северном и МП в южном полушариях, что явно демонстрирует присутствие периодичности в долготной структуре МП с характерным долготным периодом 40° .

3. Для сравнения была рассчитана модель случайного распределения МП и проведена свертка с КП. Из сопоставления результатов, представленных на Рис. 3.4.1, 2 и 3, явно следует реальность присутствия долготной структуры МП Солнца.

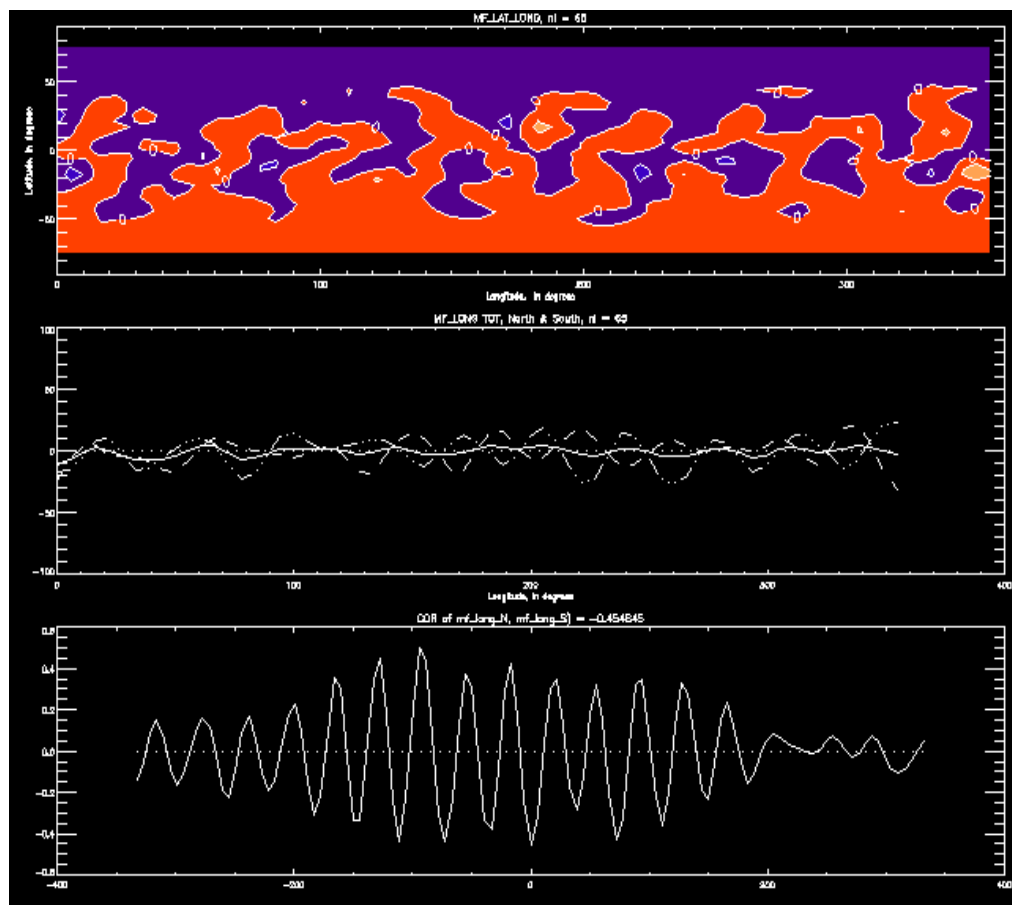


Рисунок 3.4.2

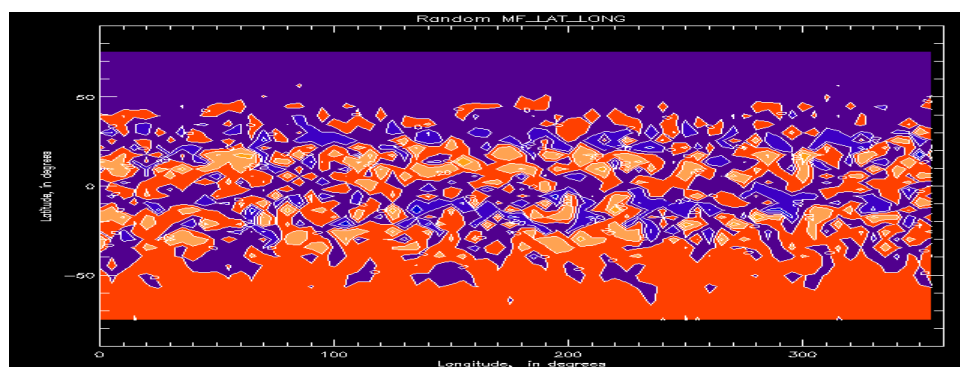


Рисунок 3.4.3

4. Из сопоставления скорости дифференциального вращения Солнца на разной глубине с долготной структурой была установлена глубина, на которой генерируются "активные долготы".

5. Изучена долготная структура фотосферного магнитного поля в период аномально низкой солнечной активности.

3.4 Заключение

Найдена устойчивая долготная структура МП Солнца, определена скорость и глубина зоны, где она генерируется, доказан неслучайный характер её существования.

3.5 Тёмная материя и тёмная энергия в астрофизике космических лучей

Научный руководитель Вячеслав Иванович Докучаев

Исполнитель Ю.Н.Ерошенко

3.5 Реферат

Теоретическое исследование возможных наблюдательных эффектов от кластеризованной тёмной материи в плотных сгустках вокруг первичных чёрных дыр. Формирование пиков плотности происходит на космологической стадии радиационного доминирования за счёт того, что в тепловом распределении частиц имеются частицы с малыми скоростями, которые остаются на финитных орбитах вокруг чёрных дыр. Сигнал в гамма-излучении от аннигиляции частиц тёмной материи в пиках ограничен данными гамма-телескопа Fermi-LAT, что дает ограничения на количество первичных чёрных дыр и на сечение аннигиляции.

3.5 Введение

Пока неизвестно, из чего состоит 27% плотности вещества во Вселенной, составляющей так называемую холодную тёмную материю. Возможными кандидатами являются новые слабовзаимодействующие частицы тёмной материи. Наряду с прямыми методами поиска частиц тёмной материи в низкофоновых детекторах и на существующих ускорителях, актуальными являются и косвенные методы регистрации частиц тёмной материи по гамма-излучению, которое, как предсказывается, может возникать при их аннигиляции. Первичные чёрные дыры могут служить гравитирующими центрами для образования сгустков тёмной материи, которые должны являться яркими источниками гамма-излучения. Сравнение рассчитанного сигнала от аннигиляции частиц с данными космического гамма-телескопа Fermi-LAT дает ограничения сверху на космологический параметр плотности первичных чёрных дыр.

3.5 Основные результаты

Первичные чёрные дыры [1], [2], помимо того, что они могут сами представлять тёмную материю, также могут служить и затравками для образования сгустков тёмной материи. Обычно при исследовании сгущений тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр рассматривается процесс вторичной аккреции холодной тёмной материи на чёрную дыру. В рамках данной темы Госзадания было показано, что плотность тёмной материи вокруг первичной чёрной дыры может достигать намного больших величин, чем получается по механизму вторичной аккреции за счёт того, что в тепловом распределении частиц по скоростям присутствуют частицы тёмной материи с малыми скоростями,

которые остаются на финитных (связанных) орбитах вокруг чёрной дыры. Постепенное накопление таких частиц вокруг чёрной дыры приводит к формированию плотного пика. Исследования кинематики частиц тёмной материи в поле первичной чёрной дыры на стадии радиационного доминирования показало, что пики имеют нестепенной профиль плотности. Это уточняет модели со степенным профилем, предполагавшиеся формально в работах [3], [4].

В центральных областях пиков плотность тёмной материи очень велика, поэтому к настоящему моменту времени частицы успели проаннигилировать (в предположении, что тёмную материю составляют Вимпы). Остающаяся тёмная материя продолжает аннигилировать в настоящее время, возможно, производя некоторые сигналы в наблюдаемом гамма-излучении. Сравнение рассчитанных сигналов с данными гамма-телескопа Fermi-LAT позволило получить новые ограничения на количество первичных чёрных дыр, которые показаны на Рис. 1.

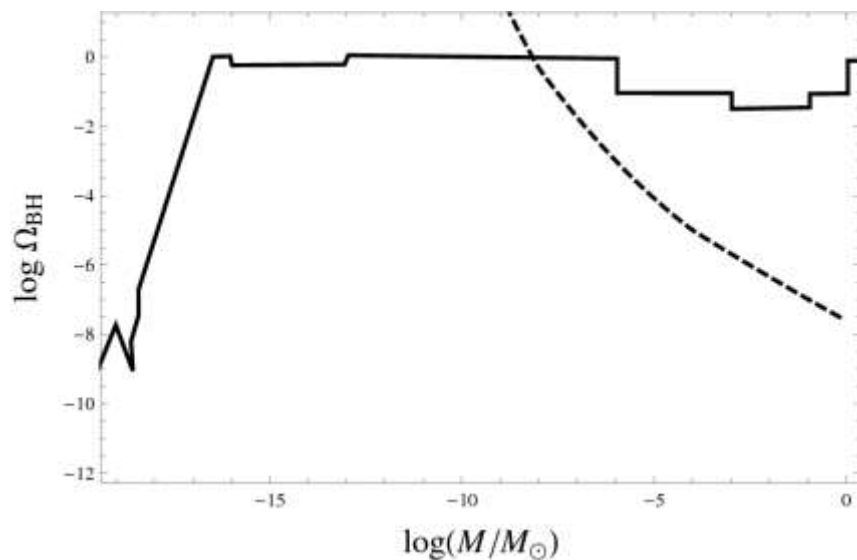


Рисунок 3.5.1 - Ограничения на космологический параметр плотности первичных чёрных дыр. Сплошная кривая показывает известные ранее ограничения. Штрихованная кривая обозначает новое ограничение, полученное на основе эффекта аннигиляции частиц тёмной материи.

Новое ограничение по аннигиляции даёт на несколько порядков более сильные ограничения на количество ПЧД, чем другие известные ограничения.

3.5 Заключение

Исследование кинематики частиц тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр

малых масс, а также вокруг сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик позволяет найти ожидаемый профиль плотности пиков тёмной материи и массу в пределах того или иного радиуса. В этих пиках плотности должна происходить аннигиляция частиц тёмной материи, поэтому данный эффект может представлять большой интерес для экспериментов по непрямой регистрации частиц тёмной материи посредством регистрации их продуктов аннигиляции (гамма-излучения и потоков заряженных частиц).

3.5 Публикации

1. Ю.Н. Ерошенко // Пики плотности темной материи вокруг первичных черных дыр. - 2016. - Письма в Астрон. ж. - Т. 42. - С. 389-398.

2. V.I. Dokuchaev, Yu N. Eroshenko // Dark matter distribution and annihilation at the Galactic center. - 2016. - J. Phys. Conf. Ser. - V. 675. - P. 012004.

3. V.I. Dokuchaev, Yu N. Eroshenko // Precession of stars in the Galactic center and dark matter annihilation limits. - 2016. - Proceedings of the Twelfth Asia-Pacific International Conference on Gravitation, Astrophysics, and Cosmology, Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. - P. 142-146. - doi: 10.1142/9789814759816_0020.

Доклады на конференциях:

4. Ерошенко Ю.Н. // Аннигиляция темной материи в пиках плотности вокруг первичных черных дыр. - 2016. - XXXIII конференция "АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ", Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пущино, 19 – 22 апреля 2016 г.

5. Eroshenko Yu. N. // Annihilation of dark matter in the density spikes around primordial black holes. - 2016. - DAWN – 2016. Dark Ages and White Nights (Spectroscopy of the CMB), 20- 24 June 2016 Saint Petersburg.

3.5 Список использованных источников

[1] Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков // Гипотеза задержавшихся в расширении ядер и горячая космологическая модель. - 1966. - Астрон. журн. - Т. 43. - С. 758-760.

[2] S. Hawking // Gravitationally collapsed objects of very low mass. - 1971. - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - V. 15. - P. 75-78.

[3] R. Saito and S. Shirai // Primordial black hole as a source of the boost factor. - 2011. - Physics Letters B. - V. 697. - P. 95.

[4] Z. Dong // Impact of primordial ultracompact minihaloes on the intergalactic medium and first structure formation. - 2011. - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - V. 418. - P. 1850.

4 Отдел физики высоких энергий

4.1 Лаборатории моделирования физических процессов при высоких энергиях

Изучение фундаментальных свойств материи на установке CMS в ЦЕРНе: поиск новой физики на Большом адронном коллайдере

4.1 СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, зав. лабораторией, д-р физ.-мат. наук Н.В. Красников

Исполнители темы

С.н.с., канд. физ.-мат. наук Ю.М. Андреев

В.н.с., канд. физ.-мат. наук С.Н. Гниненко

М.н.с. А.В. Дерменев

С.н.с., канд. физ.-мат. наук М.М. Кирсанов

М.н.с. А.Е. Корнеев

Н.с., канд. физ.-мат. наук Д.А. Тлисов

С.н.с., канд. физ.-мат. наук А.Н. Торопин

4.1 РЕФЕРАТ

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЕЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, ГЕНЕРАТОРЫ МОНТЕ-КАРЛО, АДРОННЫЕ СТРУИ, КАЛИБРОВКА АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ.

Проведена замена гибридных фотодиодов модулей HB, HE, HO адронного калориметра КМС на кремниевые фотоумножители. Приемочные испытания проводились на специально разработанных стендах

Поиск проявлений померона БФКЛ. Получено первое указание на возможное проявление эффектов асимптотического поведения КХД (БФКЛ-эффекты) в образовании адронных струй на БАК. Для более четкого наблюдения эффектов БФКЛ-эволюции нужны измерения тех же наблюдаемых при разных энергиях и кинематических условиях.

Эксперимент NA64. Получены новые рекордные ограничения на сечение рождения темного фотона, распадающегося на частицы легкой темной материи. Полученные результаты исключают возможность объяснения мюонной аномалии как следствие существования темного фотона с массой меньше 100 МэВ.

4.1 ВВЕДЕНИЕ

В 2016 г. сотрудники Лаборатории моделирования физических процессов в соответствии с планом научно-исследовательской работы выполняли работы по модернизации адронного калориметра детектора “Компактный мюонный соленоид”, по поиску проявлений померона БФКЛ, участвовали в эксперименте NA64.

4.1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

4.1.1 МОДЕРНИЗАЦИЯ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА ДЕТЕКТОРА CMS

Замена гибридных фотодиодов модулей HB, HE, HO адронного калориметра КМС на кремниевые фотоумножители. В рамках работ по замене гибридных фотодиодов модулей адронного калориметра было проведено тестирование кремниевых фотоумножителей (КФЭУ), а также их приёмочные испытания. Новые фотоприемники КФЭУ, устанавливаемые в рамках модернизации адронного калориметра детектора КМС, должны будут использоваться в течение достаточно продолжительного периода времени порядка 10 лет. Поэтому важно оценить скорость старения и изменения параметров КФЭУ с течением времени эксплуатации. Для этих целей был подготовлен измерительные стенды и программное обеспечение для автоматизации измерений.

Приёмочные испытания проводились на специально разработанных стендах:

- стенд для измерения вольт-амперных характеристик;
- стенд для измерения электрической ёмкости;
- стенд для контроля стабильности работы;
- стенд для измерения квантовой эффективности.

Все стенды были построены на базе измерительной техники фирмы KEITHLEY и PicoTech, а для автоматизации измерений было разработано программное обеспечение на базе пакета LabVIEW.

Приемочные испытания КФЭУ для первой фазы модернизации адронного калориметра детектора КМС проводились в течение 2016 года, дополнительно были проведены работы по оптимизации светосбора на КФЭУ. Всего было испытано 1400 линеек (11200 приборов КФЭУ). Для дальнейшего использования было отобрано 1004 линейки обычного типа с размером окна КФЭУ 2,8 мм (для модернизации адронного калориметра требуется 720 линеек, плюс 180 запасных) и 282 линейки смешанного типа с

размером окна КФЭУ 2,8 и 3,3 мм (для модернизации требуется 144 линейки плюс 36 запасных).

4.1.2 Поиск проявлений померона БФКЛ.

Как известно, адронные струи в рассеянии частиц при высоких энергиях отражают динамику рассеянных и образованных партонов: кварков и глюонов. Стандартная эволюция КХД Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) описывает динамику рассеяния партонов на большие углы (малые быстроты) с большими поперечными импульсами, сравнимыми по величине с начальными импульсами партонов. При этом конечные партоны имеют сильное упорядочение по поперечному импульсу: каждый последующий испущенный партон имеет поперечный импульс много меньше родительского. С ростом энергии соударения начинает играть всё более важную роль кинематический режим, при котором конечные партоны сильно упорядочены в широком интервале быстрот, имея при этом импульсы, сравнимые с друг другом. Такой кинематический режим, доминирующий при стремлении энергии соударения к бесконечности, описывается эволюционным уравнением Кураева-Липатова-Фадиной-Балицкого (БФКЛ).

Целью программы исследований группы в эксперименте CMS является поиск указаний на проявление новых эффектов асимптотической динамики КХД в данных CMS на БАК. Уточнение теоретического и экспериментального поведения асимптотической КХД в новом, ранее недостижимом, режиме позволит, в свою очередь, сильно расширить кинематическую область поисков новой физики за пределами Стандартной модели.

В августе 2016 г. опубликована статья коллаборации CMS по измерению коллективом ПИЯФ-ИТЭФ-ИЯИ азимутальных декорреляций двухструйных процессов как функции относительной быстроты между струями вплоть до $|\Delta y| = 9,4$ при энергии сталкивающихся пучков 7 ТэВ (Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Azimuthal decorrelation of jets widely separated in rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // JHEP. V.08. P.139. 2016).

Совокупность измеренных наблюдаемых: распределение по азимутальному углу, средние косинусы азимутального угла, средние косинусы двойного и тройного азимутального угла и их отношения хорошо согласуются с вычислениями БФКЛ с учётом следующих за ведущими вкладами (NLL BFKL). В то же время, ни один из монте-карловских генераторов событий, основанных на стандартном ГЛАПД-подходе, не описывает одновременно как эти наблюдаемые, так и ранее измеренные группой ПИЯФ-ИТЭФ-ИЯИ в эксперименте CMS отношения двухструйных сечений (Khachatryan V. et al.

(CMS Collaboration). Ratios of dijet production cross sections as a function of the absolute difference in rapidity between jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // Eur. Phys. J. C. V.72. P.2216. 2012).

Таким образом, получено первое указание на возможное проявление эффектов асимптотического поведения КХД (БФКЛ-эффекты) в образовании адронных струй на БАК. Для более чёткого наблюдения эффектов БФКЛ-эволюции нужны измерения тех же наблюдаемых при разных энергиях и кинематических условиях.

4.1.3 Эксперимент NA64

В 2016 году руководство ЦЕРН окончательно утвердило предложенный сотрудниками ИЯИ РАН и ряда других российских институтов эксперимент по поиску лёгкой тёмной материи — эксперимент NA64 (первоначальное название — P348). В 2016 году были проведены два сеанса по поиску лёгкой тёмной материи в реакции $eZ \rightarrow eZA'$ с последующим распадом лёгкого векторного бозона A' на невидимые моды. В июльском сеансе было обработано приблизительно 3 миллиарда событий. Получены новые рекордные ограничения на сечение рождения темного фотона, распадающегося на частицы лёгкой тёмной материи. Полученные результаты исключают возможность объяснения мюонной аномалии как следствие существования темного фотона с массой меньше 100 МэВ. Эти результаты опубликованы в престижном журнале Physical Review Letters (Banerjee D. et al. (NA64 Collaboration). Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS // arXiv:1610.02988 [hep-ex], 2016. Phys.Rev.Lett. V.118. No.1. P.011802. 2017. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.011802). Предложена модель с правой калибровочной группой $U_R(1)$, действующей на фермионы первого и второго поколений. Показано, что предложенная модель способна объяснить мюонную $(g-2)$ -аномалию и может быть проверена в эксперименте NA64 и других экспериментах.

4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы, предусмотренные очередным этапом участия сотрудников Лаборатории МФП в эксперименте CMS, выполнены. Этот этап в основном был связан с проведением работ по модернизации адронного калориметра детектора CMS, в частности, с деятельностью по модернизации фотоприемников, анализом набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, дальнейшим участием в сервисных работах на установке CMS, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий.

4.1 ПУБЛИКАЦИИ

1. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). A search for pair production of new light bosons decaying into muons // Phys.Lett.B752: 146-168, 2016. ПРНД = $4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
2. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for a massive resonance decaying into a Higgs boson and a W or Z boson in hadronic final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1602: 145, 2016. ПРНД = $6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
3. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for Resonant $\mathrm{t}\bar{\mathrm{t}}$ Production in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Rev.D93: 012001, 2016. ПРНД = $4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
4. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for exotic decays of a Higgs boson into undetectable particles and one or more photons // Phys.Lett.B753: 363-388, 2016. ПРНД = $4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
5. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for a Higgs boson decaying into $\gamma^* \gamma \rightarrow \ell \ell \gamma$ with low dilepton mass in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B753: 341-362, 2016. ПРНД = $4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
6. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Inclusive and differential measurements of the $\overline{\mathrm{t}}$ charge asymmetry in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B757: 154-179, 2016. ПРНД = $4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
7. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the $\sigma(\mathrm{W}^+ \mathrm{W}^-)$ cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV and limits on anomalous gauge couplings // Eur.Phys.J.C76: 401, 2016. ПРНД = $4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
8. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for pair-produced vectorlike B quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Rev.D93: 112009, 2016. ПРНД = $4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
9. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the CP-violating weak phase ϕ_s and the decay width difference $\Delta \Gamma_s$ using the $\mathrm{B}_s^0 \rightarrow \mathrm{J}/\psi \phi(1020)$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B757: 97-120, 2016. ПРНД = $4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$

10. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Angular analysis of the decay $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B753: 424-448, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
11. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in the single-lepton final state using the sum of masses of large-radius jets // JHEP 1608: 122, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
12. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the W boson helicity fractions in the decays of top quark pairs to lepton $+\gamma$ jets final states produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B762: 512-534, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
13. Aad G. et al. (ATLAS and CMS Collaborations). Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // JHEP 1608: 45, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
14. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Phenomenological MSSM interpretation of CMS searches in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // JHEP 1610: 129, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
15. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for Resonant Production of High-Mass Photon Pairs in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV // Phys.Rev.Lett. 117: 51802, 2016. $\text{IPHD} = 7,645 \cdot 30 \cdot 0,010 = 2,29$
16. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Searches for R -parity-violating supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in final states with 0-4 leptons // Phys.Rev.D94: 112009, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
17. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the differential cross sections for top quark pair production as a function of kinematic event variables in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // Phys.Rev.D94: 52006, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
18. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for new physics in final states with two opposite-sign, same-flavor leptons, jets, and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP 1612: 13, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
19. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for lepton flavour violating decays of the Higgs boson to $e \tau$ and $e \mu$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B763: 472-500, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
20. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for dark matter in proton-proton collisions at 8 TeV with missing transverse momentum and vector boson tagged jets // JHEP 1612: 83, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
21. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of electroweak production of a W boson and two forward jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1611: 147, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$

22. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the ZZ production cross section and Z $\rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$ branching fraction in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV // Phys.Lett.B763: 280-303, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
23. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the mass of the top quark in decays with a J/ψ meson in pp collisions at 8 TeV // JHEP 1612: 123, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
24. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Decomposing transverse momentum balance contributions for quenched jets in PbPb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.76$ TeV // JHEP 1611: 55, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
25. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Studies of inclusive four-jet production with two b-tagged jets in proton-proton collisions at 7 TeV // Phys.Rev.D94: 112005, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
26. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for long-lived charged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV // Phys.Rev.D94: 112004, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
27. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in events with a photon, a lepton, and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B757: 6-31, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
28. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to $\mu^+ \mu^-$ in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV // Phys.Lett.B752: 221-246, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
29. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the charge asymmetry in top quark pair production in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV using a template method // Phys.Rev.D93: 34014, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
30. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for W' decaying to tau lepton and neutrino in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B755: 196-216, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
31. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Study of B Meson Production in p+Pb Collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ TeV Using Exclusive Hadronic Decays // Phys.Rev.Lett. 116: 32301, 2016. $\text{IPHD} = 7,645 \cdot 30 \cdot 0,010 = 2,29$
32. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in the vector-boson fusion topology in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1511: 189, 2015. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
33. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for a charged Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1511: 18, 2015. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$

34. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of Differential Cross Sections for Higgs Boson Production in the Diphoton Decay Channel in pp Collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 1,13, 2015. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
35. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for pair production of first and second generation leptoquarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Rev.D93: 32004, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
36. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for single production of scalar leptoquarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Rev.D93: 32005, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
37. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the inelastic cross section in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys.Lett.B759: 641-662, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
38. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the top quark mass using proton-proton data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // Phys.Rev.D93: 72004, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
39. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for vector-like charge $2/3$ T quarks in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Rev.D93: 12003, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
40. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for $W' \rightarrow tb$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1602: 122, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
41. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the $\overline{t}t$ production cross section in the all-jets final state in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 128, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
42. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for the production of an excited bottom quark decaying to tW in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1601: 166, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
43. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for the associated production of a Higgs boson with a single top quark in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1606: 177, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
44. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of transverse momentum relative to dijet systems in PbPb and $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // JHEP 1601: 006, 2015. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
45. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Observation of top quark pairs produced in association with a vector boson in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1601: 96, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
46. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Searches for a heavy scalar boson H decaying to a pair of 125 GeV Higgs bosons hh or for a heavy pseudoscalar boson A decaying to Zh, in the

- final states with $h \rightarrow \tau \tau$ // Phys.Lett.B755: 217-244, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
47. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of long-range near-side two-particle angular correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys.Rev.Lett. 116: 172302, 2016. $\text{IPHD} = 7,645 \cdot 30 \cdot 0,010 = 2,29$
48. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of $t\bar{t}$ production with additional jet activity, including b quark jets, in the dilepton decay channel using pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 379, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
49. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Transverse momentum spectra of inclusive b jets in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Phys.Lett.B754: 59, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
50. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for a light charged Higgs boson decaying to $c\bar{s}$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1512: 178, 2015. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
51. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the top quark pair production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Phys.Rev.Lett. 116: 52002, 2016. $\text{IPHD} = 7,645 \cdot 30 \cdot 0,010 = 2,29$
52. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for a very light NMSSM Higgs boson produced in decays of the 125 GeV scalar boson and decaying into $\tau\tau$ leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1601: 79, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
53. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Reconstruction and identification of tau lepton decays to hadrons and τ_{had} at CMS // JINST 11: P01019, 2016. $\text{IPHD} = 1,310 \cdot 30 \cdot 0,010 = 0,39$
54. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for excited leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1603: 125, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
55. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of top quark polarisation in t-channel single top quark production // JHEP 1604: 73, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
56. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for a low-mass pseudoscalar Higgs boson produced in association with a $b\bar{b}$ pair in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B758: 296-320, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
57. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for anomalous single top quark production in association with a photon in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1604: 35, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
58. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of spin correlations in $t\bar{t}$ production using the matrix element method in the muon+jets final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B758: 321-346, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$

59. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for dark matter and unparticles produced in association with a Z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Rev.D93: 52011, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
60. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Event generator tunes obtained from underlying event and multiparton scattering measurements // Eur.Phys.J.C76: 155, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
61. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for narrow resonances decaying to dijets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV // Phys.Rev.Lett. 116: 71801, 2016. $\text{IPHD} = 7,645 \cdot 30 \cdot 0,010 = 2,29$
62. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the inclusive jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=2.76$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 265, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
63. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Study of Z boson production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV // Phys.Lett.B759: 36-57, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
64. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in events with soft leptons, low jet multiplicity, and missing transverse energy in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B759: 13028, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
65. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of differential and integrated fiducial cross sections for Higgs boson production in the four-lepton decay channel in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV // JHEP 1604: 5, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
66. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Correlations between jets and charged particles in PbPb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV // JHEP 1602: 156, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
67. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurements of t t-bar spin correlations and top quark polarization using dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Rev.D93: 52007, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
68. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of inclusive jet production and nuclear modifications in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 372, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
69. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Forward-backward asymmetry of Drell-Yan lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 325, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
70. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for massive WH resonances decaying into the $\nu \bar{b}$ final state at $\sqrt{s}=8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 237, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
71. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Azimuthal decorrelation of jets widely separated in rapidity in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV // JHEP 1608: 139, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$

72. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in final states with boosted W bosons and b jets using razor variables // Phys.Rev.D93: 92009, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
73. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for direct pair production of scalar top quarks in the single- and dilepton channels in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP 1607: 27, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
74. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Combined search for anomalous pseudoscalar HVV couplings in $VH(H \rightarrow b \bar{b})$ production and $H \rightarrow VV$ decay // Phys.Lett.B759: 672-696, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
75. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for R-parity violating decays of a top squark in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B760: 178-201, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
76. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of dijet azimuthal decorrelation in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 536, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
77. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in the multijet and missing transverse momentum final state in pp collisions at 13 TeV // Phys.Lett.B758: 152-180, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
78. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the $\text{Z} \rightarrow \nu \bar{\nu} \gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and limits on anomalous $\text{ZZ} \gamma$ and $\text{Z} \gamma \gamma$ trilinear gauge boson couplings // Phys.Lett.B760: 448-468, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
79. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for heavy resonances decaying to two Higgs bosons in final states containing four b quarks // Eur.Phys.J.C76: 371, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
80. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetry in electroweak production with photons and large missing transverse energy in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Lett.B759: 479-500, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
81. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for direct pair production of supersymmetric top quarks decaying to all-hadronic final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 460, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
82. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the differential cross section and charge asymmetry for inclusive $p \bar{p} \rightarrow W^{\pm} X$ production at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 469, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$

83. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for heavy Majorana neutrinos in $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ jets and $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ jets events in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // JHEP 1604: 169, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
84. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the $t\bar{t}$ production cross section in the $e\mu$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV // JHEP 1608: 29, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
85. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for s channel single top quark production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV // JHEP 1609: 27, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
86. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). $\Upsilon(\text{nS})$ polarizations versus particle multiplicity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // Phys.Lett.B761: 31-52, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
87. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for neutral resonances decaying into a Z boson and a pair of b jets or tau leptons // Phys.Lett.B759: 369-394, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
88. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for new physics with the M_{T2} variable in all-jets final states produced in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV // JHEP 1610: 6, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
89. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurements of $t\bar{t}$ charge asymmetry using dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Lett.B760: 365-386, 2016. $\text{IPHD} = 4,787 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,44$
90. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the top quark mass using charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys.Rev.D93: 92006, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
91. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for two Higgs bosons in final states containing two photons and two bottom quarks in proton-proton collisions at 8 TeV // Phys.Rev.D94: 52012, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
92. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for dark matter particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV using the razor variables // JHEP 1612: 88, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
93. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Evidence for exclusive $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ production and constraints on anomalous quartic gauge couplings in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV // JHEP 1608: 119, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
94. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for lepton flavour violating decays of heavy resonances and quantum black holes to an $e\mu$ pair in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Eur.Phys.J.C76: 317, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$

95. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for narrow resonances in dijet final states at $\sqrt{s}=8$ TeV with the novel CMS technique of data scouting // Phys.Rev.Lett. 117: 31802, 2016. $\text{IPHD} = 7,645 \cdot 30 \cdot 0,010 = 2,29$
96. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the integrated and differential $t\bar{t}$ production cross sections for high- p_{T} top quarks in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV // Phys.Rev.D94: 72002, 2016. $\text{IPHD} = 4,506 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,35$
97. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for Higgs boson off-shell production in proton-proton collisions at 7 and 8 TeV and derivation of constraints on its total decay width // JHEP 1609: 51, 2016. $\text{IPHD} = 6,023 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,81$
98. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for new physics in same-sign dilepton events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ // Eur.Phys.J.C76: 439, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$
99. Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Measurement of the double-differential inclusive jet cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ // Eur.Phys.J.C76: 451, 2016. $\text{IPHD} = 4,912 \cdot 30 \cdot 0,010 = 1,47$

4.2 Изучение редких распадов В-мезонов в эксперименте LHCb

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта, научный сотрудник Е.Н.Гущин

Исполнители темы:

Научный сотрудник С.Н.Филиппов

Заместитель директора, О.В.Каравичев

Научный сотрудник, А.А.Тихонов

Заведующий сектором, Л.Н.Голышкин

Ведущий инженер, З.Н.Шарифуллин

4.2 РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 13 с., 53 источника.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, РЕДКИЕ РАСПАДЫ В-МЕЗОНОВ, НАРУШЕНИЕ СР-ЧЕТНОСТИ, КАЛОРИМЕТРИЯ, СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН

Объектом исследования работы являются редкие распады В- мезонов и прецизионное измерение параметров СР-нарушения с целью проверки Стандартной модели и поиска эффектов Новой физики. Эксперимент LHCb сегодня является мировым лидером по изучению физики тяжелых кварков. В 2016 г. начат новый цикл по набору данных на увеличенной энергии пучков 6.5 ТэВ, было набрано 1.6/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 наиболее точное измерение СКМ угла γ из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов, наиболее точное измерение асимметрии a_{sl}^s , первое в мире наблюдение распада очарованного B_c^+ -мезона $B_c^+ \rightarrow D^0 K^+$ 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 2016 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 технической документации на изготовление экспериментальных образцов элементов калориметрической системы. По результатам работы составлен проект технического

задания на изготовление и испытания запасных модулей повышенной радиационной стойкости.

4.2 ВВЕДЕНИЕ

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 (СМ). За годы успешной работы уже получены ключевые результаты, особенно чувствительные к отклонениям от теории. Среди них такие, как измерение вероятности редкого распада $B_s \rightarrow \mu\mu$, измерение параметров осцилляций в системах B^0 мезона и B_s – мезона, угла γ унитарного треугольника матрицы смешивания. 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 (две плоскости 6×8 м², 12 000 каналов). 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 характеристик и операционном контроле 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 $2 \cdot 10^{33}$ /см²/сек. Для этого требуется модернизация приемной электроники всех подсистем и создание гибкого программируемого триггера, что позволит улучшить эффективность отбора конечных адронных состояний. Модернизированный детектор во второй фазе эксперимента будет способен за 10 лет набрать статистику около $50/\text{fb}^{-1}$ 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.

4.2 Основные результаты

Основная цель эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах B-мезонов. В 2016 году была набрана светимость $\sim 1.6/\text{fb}$, при временном интервале между сгустками протонов 25 нсек. Кроме набора новых данных эксперимент LHCb в 2016 г. продолжил работу в области обработки ранее набранных данных, получен целый ряд новых результатов, превосходящих или сравнимых по точности с лучшими мировыми измерениями.

4.2.1 Основные физические результаты, полученные LHCb в 2016 г.

Среди важнейших результатов, полученных LHCb в 2016 году можно выделить следующие:

Неподтверждение кандидата в тетракварки $X(5568)$ в спектре инвариантных масс $B_s^0, \pi^\pm$ [2]. Исследовалось утверждение коллаборации D0 [1] об обнаружении тетракваркового состояния $X(5568)$ в спектре инвариантных масс $B_s^0, \pi^\pm$. Наблюдаемое коллаборацией D0 со статистической достоверностью 5.1σ состояние $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ должно состоять из четырех валентных кварков (b, s, u, d). При этом в его массе доминирует вклад одного конституэнтного кварка. Будучи подтвержденным, этот результат возможно дал бы ценную информацию, каким образом связаны кварки в экзотических многокварковых состояниях – непосредственно плотно связаны, так называемые «тетра»- и «пентакварки», или более свободно, как например мезон-мезон молекулы. Проанализированы данные LHCb детектора, соответствующие светимости $3/\text{fb}$ при энергии в системе центра масс $\sqrt{s}=7$ и 8 TeV [2]. Количество изучавшихся распадов было в 20 раз больше, чем в анализе D0. При этом не обнаружено никакого сигнала в спектре инвариантных масс $B_s^0 \pi^\pm$, установлены верхние пределы на сечение рождения возможного состояния $X(5568)$.

Наиболее точное измерение СКМ угла γ из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов [3]. В LHCb выполнено измерение на древесном уровне СКМ угла γ из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов. Используя значение наилучшего фита и 68% доверительного интервала, результат измерения угла γ оказывается равен $\gamma = (70.9^{+7.1}_{-8.5})^\circ$. Полученный результат является наиболее точным единичным измерением в мире и дает важный вклад в глобальный фит параметров СКМ матрицы. На рисунке показаны моды распадов $B^\pm$ – мезонов, явно демонстрирующие разницу свойств материи и антиматерии.

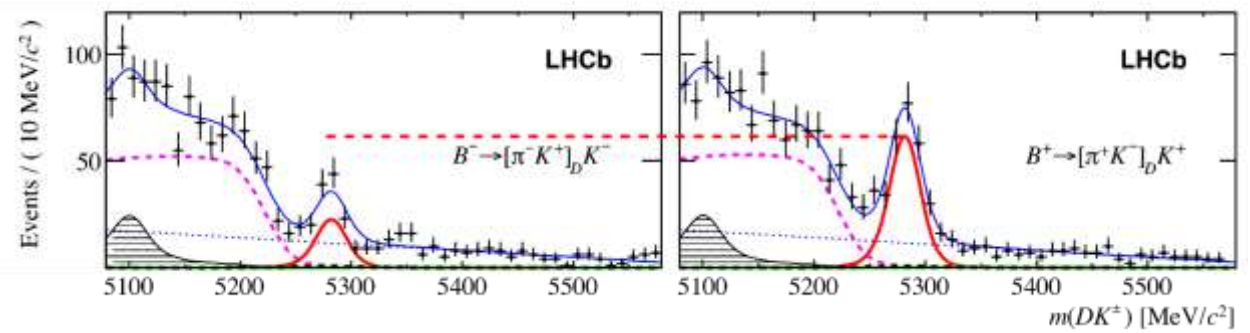


Рисунок 4.2.1 - Наиболее точное измерение нарушения CP-чётности в секторе c -кварка («чарма») из разницы времени распадов D^0 мезонов в комбинации K^+K^- и $\pi^+\pi^-$ пар [4-5].

До сих пор CP-нарушение, связанное с разницей свойств материи и антиматерии, не наблюдалось в секторе c -кварка. В Стандартной Модели SM предсказывается чрезвычайно малый уровень нарушения CP-чётности в секторе «чарма», для распадов $D^0 \rightarrow KK(\pi\pi)$ меньше 10^{-3} . Так как D^0 мезон составлен только из верхних кварков (u и c), его экспериментальные свойства особо чувствительны к эффектам за рамками SM . LHCb опубликовал результат наиболее точного измерения нарушения CP-четности в секторе c -кварка, согласующийся с отсутствием CP нарушения с точностью несколько единиц 10^{-4} .

Наблюдение наиболее редкого адронного распада B -мезона [6]. LHCb произвела первое в мире наблюдение распада $B^0 \rightarrow K^+K^-$ на уровне достоверности более 5 стандартных отклонений. Данная мода распада происходит с вероятностью менее 10^{-7} и является наиболее редким наблюдаемым адронным распадом B -мезона. Полученный результат поможет уточнить модельные расчеты с участием адронов с тяжелыми ароматами в рамках квантовой хромодинамики.

Наиболее точное измерение асимметрии a_{sl}^s [7-8]. LHCb коллаборация обновила результат измерений полулептонной асимметрии a_{sl}^s , отражающей разницу между вероятностью осцилляции B^0 -мезона в своего анти-партнера и обратного процесса. При этом среди продуктов распадов присутствуют лептоны (в данном случае - мюоны). Любая ненулевая разница будет свидетельствовать о несохранении CP-чётности, отражающей разницу между веществом и антивеществом. Результат LHCb хорошо согласуется с предсказаниями Стандартной Модели и не подтверждает удивительный результат D0 коллаборации [PRD 89 (2014) 012002], указывающий на аномальную ди-мюонную асимметрию.

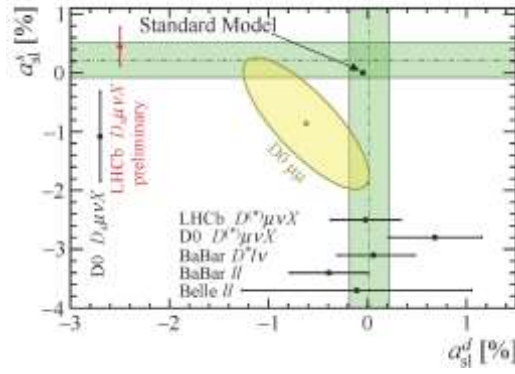


Рисунок 4.2.2 - Показаны результаты измерений асимметрий a_{sl}^s и a_{sl}^d разными коллаборациями и усредненное мировое среднее (зеленые полосы) с интервалом ошибок $\pm 1\sigma$.

Также показаны контуром 68%CL результаты коллаборации D0 в плоскости $a_{sl}^s - a_{sl}^d$.

Неожиданное первое в мире наблюдение распада очарованного B_c^+ -мезона [9]. В LHCb поиски ранее не наблюдавшегося распада $B_c^+ \rightarrow D^0 K^+$ увенчались наблюдением сигнала на уровне достоверности 5.1 стандартных отклонений. B_c^+ – это единственный мезон, составленный из двух тяжелых, а именно b - и c - кварков. В отличие от B - мезонов, распады B_c^+ -мезона определяются в основном не b - а c - кварками. На рисунке 4.2.3 отчётливо виден вклад распада $B_c^+ \rightarrow D^0 K^+$, показанный красным цветом.

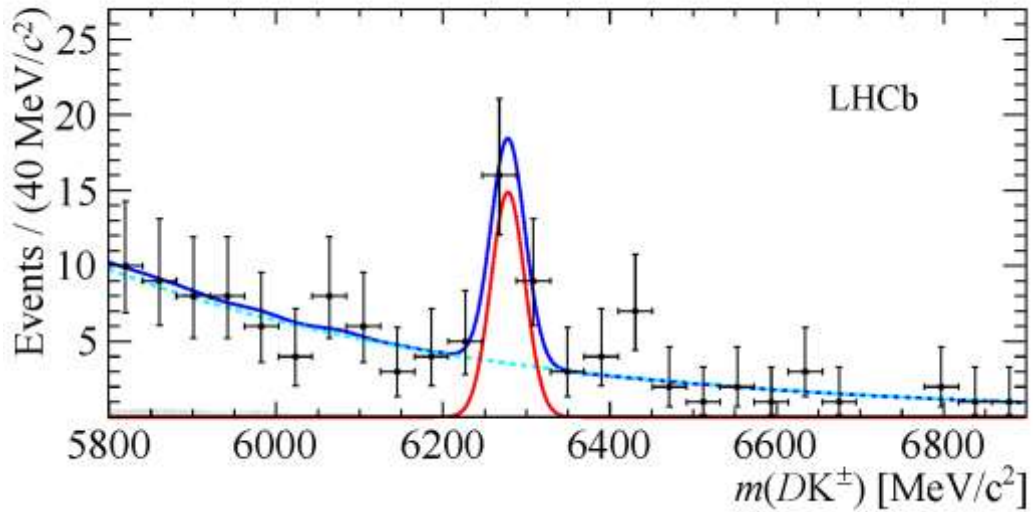


Рисунок 4.2.3

Полученный результат является поразительным, поскольку измеренная вероятность распада значительно (~ 3 раза) превышает предсказанную в теории, что требует объяснения. Кроме того, данный распад происходит через «пингвинную» и «аннигиляционную» диаграммы, и полученный результат является первым наблюдением распада B_c^+ -мезона посредством данного механизма.

4.2.2 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 10^{33} см⁻² 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 fb⁻¹ за год и 50 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.

4.2.3 Замена фотоумножителей в адронном и электромагнитном калориметрах.

Для адронного калориметра основной проблемой стало появление фотоумножителей, чей ток резко возрастал с ростом загрузки. Для замены таких фотоумножителей был собран измерительный стенд, на котором были измерены параметры около 250 фотоумножителей из запасной партии. Были выявлены характерные для некондиционных фотоумножителей зависимости анодного тока со временем. За исключением отбракованных (~15 штук) все они были использованы для замены вышедших из строя, в том числе около 50 – в начале 2016 г. По результатам измерений было принято решение о закупке в начале 2017 г. дополнительной партии фотоумножителей 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. Измерения параметров фотоумножителей будут проводиться со сменными делителями высокого напряжения. После распайки на постоянные делители и перед установкой на калориметр потребуются дополнительная проверка, хотя и не требующая длительных измерений. В совокупности подготовка 500 фотоумножителей к установке на калориметр может потребовать 3-4 месяца работы. Сотрудники ИЯИ РАН принимают активное участие в создании измерительного стенда, готовность которого ожидается в начале 2017 г. Составные части стенда: автоматизированная система сбора информации, блоки питания с электроникой регистрации сигналов и светоизолирующий ящик с посадочными местами для установки фотоумножителей.

4.2.4 Обеспечение работоспособности сцинтилляционно-падового и предливневого детектора в процессе набора данных в 2016 г.

Сотрудники ИЯИ РАН принимали непосредственное участие в поддержании работоспособности калориметрической системы супердетектора БАК-би как в качестве оперативного дежурного или дежурного по калориметрической системе, так и в другое время в случае необходимости замены аппаратных частей. Так, например, в феврале 2016 г. произошел отказ двух микросхем на входной карте PC0384P4B20D08 предливневого детектора, соответствующей модулю системы сбора PS2FEB18. В отсутствие пучка неисправность была обнаружена при помощи сигналов калибровочной системы, неисправная карта была заменена на запасную. В апреле этого года обнаружена нестабильность напряжений на регуляторе напряжения сцинтилляционно-падового детектора SPD_PS1_CB16_RB_5_LVR. Ввиду невозможности замены или ремонта электроники было принято решение отложить решение этой проблемы до остановки ускорителя на зимний период. Также произведена замена модуля PS7FEB07 в седьмом крейте, который провоцировал сбои в синхронизации данных.

4.2.5 Калибровка сцинтилляционно-падового детектора.

Ввиду того, что условия работы сцинтилляционно-падового детектора в эксперименте сопряжены с высокой загрузкой и радиационным облучением, многие элементы детектора подвергаются деградации основных характеристик. Так, например, ячейки сцинтиллятора и пластиковые оптические волокна теряют часть своей прозрачности и световыхода из-за радиационных повреждений. Используемые многоканальные фотоумножители подвержены уменьшению усиления вследствие аккумулярованного фототока. Это приводит к уменьшению амплитуд сигналов во время работы эксперимента. Для того, чтобы компенсировать эти потери, необходимо периодически проводить калибровку каналов электроники методом сканирования порогов дискриминаторов. Такая калибровка позволяет скорректировать уменьшения сигналов путем соответствующего уменьшения величины порогов. Результаты измерения эффективности в сцинтилляционно-падовом детекторе собраны в таб. 4.2.1.

	Inner	Middle	Outer	'average'
June 2011	91.9%	94.6%	95.7%	94%
April 2012	91.5%	94.3%	94.9%	94%
November 2012	83.9%	88.7%	91.6%	88%
October 2015	86.8%	92.4%	94.0%	91%
May 2016	92.1%	94.0%	95.3%	94%
August 2016	89.9%	91.1%	93.1%	92%

Таблица 4.2.1 - Измерения эффективности регистрации заряженных треков в сцинтилляционно-падовом детекторе за время работы эксперимента LHCb.

Периодическая подстройка величин порогов в регистрирующей электронике позволяет корректировать потери амплитуды сигналов, вызванных старением элементов детектора. Предыдущая подстройка порогов была выполнена в ноябре 2015 г. Следующая калибровка сцинтилляционно-падового детектора и корректировка величин порогов планируется в 2017 г.

4.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2016 г. группой ИЯИ РАН были полностью выполнены все поставленные задачи по участию в реализации экспериментальной программы LHCb. Эксперимент LHCb в 2016 г. продолжил работу по набору статистики после модернизации ускорителя ЛНС на повышенной 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 γ из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов, наиболее точное измерение асимметрии a_{sl}^s , первое в мире наблюдение распада очарованного B_c^+ -мезона $B_c^+ \rightarrow D^0 K^+$ 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 2016 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 экспериментальных образцов элементов калориметрической системы. По результатам работы составлен проект технического задания на изготовление и испытания запасных модулей повышенной радиационной стойкости. Разработанные компоненты и технологии изготовления соответствуют техническим требованиям на модернизацию элементов супердетектора БАК-би, необходимую для обеспечения возможности проведения экспериментальных исследований при интенсивности пучка ускорителя БАК, в десять раз превышающую нынешнюю.

4.2 Список основных публикаций LHCb в 2016 г.

- 1) Observation of the decay $B^0 \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$ and evidence for $B^0 \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$, LHCb collaboration, Phys. Rev. D95 (2017) 012006
- 2) First experimental study of photon polarization in radiative $B^0 \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^-$ decays, LHCb collaboration, Phys. Rev. Lett. 118, 021801
- 3) Measurement of CP violation in $B^0 \rightarrow D^+ D^-$ decays, LHCb collaboration, Phys.Rev.Lett 117, 261801
- 4) Measurement of the CKM angle γ from a combination of LHCb results, LHCb collaboration, JHEP 1612 (2016) 087
- 5) Search for the CP-violating strong decays $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^-$ and $\eta'(958) \rightarrow \pi^+ \pi^-$, LHCb collaboration, Phys. Lett. B764 (2016) 233
- 6) "Differential branching fraction and angular moments analysis of the decay $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ in the $K^{*0}(1430)$ region", LHCb collaboration, JHEP 12 (2016) 065
- 7) Search for Higgs-like bosons decaying into long-lived exotic particles, LHCb collaboration, Eur.Phys.J. C76 (2016) 664
- 8) First study of the CP -violating phase and decay-width difference in $B_s^0 \rightarrow \psi(2S) \phi$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.09.028. Phys.Lett. B762 (2016) 253-262.
- 9) Measurement of forward $W \rightarrow e \nu$ production in pp collisions at $\sqrt{s}=8$, TeV, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP10(2016)030., JHEP 1610 (2016) 030.
- 10) Search for the suppressed decays $B^+ \rightarrow K^+ K^+ \pi^-$ and $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ K^-$, LHCb collaboration, Phys.Lett. B765 (2017) 307-316
- 11) Amplitude analysis of $B^0 \rightarrow D^+ \pi^- \pi^-$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevD.94.072001., Phys.Rev. D94 (2016) no.7, 072001.
- 12) Search for Structure in the $B_s^0 \pi^0$ Invariant Mass Spectrum, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.117.152003., Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.15, 152003.
- 13) Measurement of the ratio of branching fractions $\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+) / \mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+)$, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP09(2016)153., JHEP 1609 (2016) 153.
- 14) Measurement of the forward Z boson production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP09(2016)136., JHEP 1609 (2016) 136.

- 15) Measurement of the $B_{\{s\}}^0 \rightarrow J/\psi \eta$ lifetime, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.10.006., Phys.Lett. B762 (2016) 484-492.
- 16) Study of B^{+}_c decays to the $K^{+}K^{-}\pi^{+}$ final state and evidence for the decay $B^{+}_c \rightarrow \chi_{c0} \pi^{+}$, LHCb collaboration, Phys.Rev. D94 (2016) no.9, 091102
- 17) Evidence for exotic hadron contributions to $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^{-}$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.117.082003, 10.1103/PhysRevLett.117.109902., Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.8, 082003, Addendum: Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.10, 109902.
- 18) Measurements of the S-wave fraction in $B^0 \rightarrow K^{+}\pi^{-}\mu^{+}\mu^{-}$ decays and the $B^0 \rightarrow K^{\ast}(892)^0 \mu^{+}\mu^{-}$ differential branching fraction, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP11(2016)047., JHEP 1611 (2016) 047.
- 19) Measurement of the CP asymmetry in $B_{s^0} \rightarrow \overline{B}^0$ mixing, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.117.061803, Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.6, 061803.
- 20) Measurement of the CKM angle γ using $B^0 \rightarrow D K^{\ast 0}$ with $D \rightarrow K^0_S \pi^{+} \pi^{-}$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). 10.1007/JHEP08(2016)137., JHEP 1608 (2016) 137.
- 21) Measurement of forward W and Z boson production in association with jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP05(2016)131., JHEP 1605 (2016) 131.
- 22) Model-independent evidence for $J/\psi p$ contributions to $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^{-}$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). 10.1103/PhysRevLett.117.082002., Phys.Rev.Lett. 117 (2016) no.8, 082002.
- 23) Measurement of the properties of the $\Xi_b^{\ast 0}$ baryon, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). 10.1007/JHEP05(2016)161, JHEP 1605 (2016) 161.
- 24) A precise measurement of the B^0 meson oscillation frequency, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1140/epjc/s10052-016-4250-2., Eur.Phys.J. C76 (2016) no.7, 412.
- 25) Model-independent measurement of the CKM angle γ using $B^0 \rightarrow D K^{\ast 0}$ decays with $D \rightarrow K_{\{S\}}^0 \pi^{+} \pi^{-}$ and $K_{\{S\}}^0 K^{+} K^{-}$, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP06(2016)131. JHEP 1606 (2016) 131.
- 26) Measurement of the mass and lifetime of the Ω_b^{-} baryon, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). 10.1103/PhysRevD.93.092007., Phys.Rev. D93 (2016) no.9, 092007.

- 27) Measurement of $C\!P$ observables in $B^{\pm} \rightarrow D K^{\pm}$ and $B^{\pm} \rightarrow D \pi^{\pm}$ with two- and four-body D decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.06.022, Phys.Lett. B760 (2016) 117-131.
- 28) Search for B_c^{+} decays to the $p\bar{p}\pi^{+}$ final state, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.05.074, Phys.Lett. B759 (2016) 313-321.
- 29) Observation of $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)pK^{-}$ and $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \pi^{+} \pi^{-} pK^{-}$ decays and a measurement of the Λ_b^0 baryon mass, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP05(2016)132, JHEP 1605 (2016) 132.
- 30) Search for violations of Lorentz invariance and CPT symmetry in $B_{(s)}^0$ mixing, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.116.241601, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.24, 241601.
- 31) Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \phi$ decay, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.05.077, Phys.Lett. B759 (2016) 282-292.
- 32) Observation of $B^0_s \rightarrow \bar{D}^0 K^0_S$ and evidence for $B^0_s \rightarrow \bar{D}^{*0} K^0_S$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.116.161802, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.16, 161802.
- 33) Observations of $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^{+} \pi^{-}$ and $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^{+} K^{-}$ decays and searches for other Λ_b^0 and Ξ_b^0 decays to $\Lambda h^{+} h^{\prime -}$ final states, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP05(2016)081, JHEP 1605 (2016) 081.
- 34) Measurement of the $B_{(s)}^0 \rightarrow D_{(s)}^{(*)+} D_{(s)}^{(*)-}$ branching fractions, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevD.93.092008, Phys.Rev. D93 (2016) no.9, 092008.
- 35) A new algorithm for identifying the flavour of B_s^0 mesons at LHCb, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1088/1748-0221/11/05/P05010, JINST 11 (2016) no.05, P05010.
- 36) First observation of $D^0 - \bar{D}^0$ oscillations in $D^0 \rightarrow K^{+} \pi^{-} \pi^{+} \pi^{-}$ decays and measurement of the associated coherence parameters, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.116.241801, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.24, 241801.
- 37) Constraints on the unitarity triangle angle γ from Dalitz plot analysis of $B^0 \rightarrow D K^{+} \pi^{-}$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevD.93.112018, 10.1103/PhysRevD.93.112018, 10.1103/PhysRevD.94.079902, 10.1103/PhysRevD.94.079902, Phys.Rev. D93 (2016) no.11, 112018, Erratum: Phys.Rev. D94 (2016) no.7, 079902.

- 38) Measurement of the difference of time-integrated CP asymmetries in $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevLett.116.191601, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.19, 191601.
- 39) Study of $\psi(2S)$ production and cold nuclear matter effects in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP03(2016)133, JHEP 1603 (2016) 133.
- 40) Observation of the $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ decay, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP03(2016)040, JHEP 1603 (2016) 040.
- 41) Study of $D_{sJ}^{(*)+}$ mesons decaying to $D^{*+} K_S^0$ and $D^{*0} K^+$ final states, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP02(2016)133, JHEP 1602 (2016) 133.
- 42) Angular analysis of the $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ decay using 3 fb⁻¹ of integrated luminosity, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP02(2016)104, JHEP 1602 (2016) 104.
- 43) First observation of the rare $B^+ \rightarrow D^+ K^+ \pi^-$ decay, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevD.93.051101, 10.1103/PhysRevD.93.119902, Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 051101, Erratum: Phys.Rev. D93 (2016) no.11, 119902.
- 44) Measurements of long-range near-side angular correlations in $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV proton-lead collisions in the forward region, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.09.064, Phys.Lett. B762 (2016) 473-483.
- 45) Search for the lepton-flavour violating decay $D^0 \rightarrow e^+ \mu^- \mu^+$, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.01.029, Phys.Lett. B754 (2016) 167-175.
- 46) Measurement of forward W and Z boson production in pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP01(2016)155, JHEP 1601 (2016) 155.
- 47) First observation of the decay $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ in the ρ^0 - ω region of the dimuon mass spectrum, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1016/j.physletb.2016.04.029, Phys.Lett. B757 (2016) 558-567.
- 48) Production of associated Y and open charm hadrons in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV via double parton scattering, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP07(2016)052, JHEP 1607 (2016) 052.
- 49) Measurements of prompt charm production cross-sections in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP03(2016)159,

10.1007/JHEP09(2016)013, 10.1007/JHEP09(2016)013, 10.1007/JHEP03(2016)159, JHEP 1603 (2016) 159, Erratum: JHEP 1609 (2016) 013.

50) Model-independent measurement of mixing parameters in $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP04(2016)033, JHEP 1604 (2016) 033.

51) Studies of the resonance structure in $D^0 \rightarrow K_S^0 K^{\pm} \pi^{\mp}$ decays, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1103/PhysRevD.93.052018, Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 052018.

52) Study of the production of Λ_b^0 and $\overline{\Lambda_b^0}$ hadrons in $p\bar{p}$ collisions and first measurement of the $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ branching fraction, By LHCb Collaboration (R. Aaij et al.), 10.1088/1674-1137/40/1/011001, Chin.Phys. C40 (2016) no.1, 011001.

53) First observation of the decay $B_{s^0}^0 \rightarrow K_S^0 K^{*0} (892)^0$ at LHCb, By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.), 10.1007/JHEP01(2016)012, JHEP 1601 (2016) 012.

4.2 Список источников

1) D0 collaboration, V. M. Abazov et al., “Observation of a new $B^0_s \pi^\pm$ state”, arXiv:1602.07588.

2) By LHCb Collaborations (Roel Aaij et al.) “Search for structure in the $B^0_s \pi^\pm$ invariant mass spectrum”, *LHCb-CONF-2016-004*.

3) By LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). “Measurement of the CKM angle γ from a combination of $B \rightarrow DK$ analyses”, *LHCb-CONF-2016-001*.

4) By LHCb Collaboration. “CP-violating asymmetries from the decay-time distribution of prompt $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays in the full LHCb Run-1 data sample. Measurement using yield asymmetries in bins of decay time.” *LHCb-CONF-2016-009*.

5) By LHCb Collaboration. “CP-violating asymmetries from the decay-time distribution of prompt $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ and $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ decays in the full LHCb Run 1 data sample. Measurement using unbinned, acceptance corrected decay-time.” *LHCb-CONF-2016-010*.

6) By LHCb Collaboration. ” Observation of the annihilation decay mode $B^0 \rightarrow K^+ K^-$ ” LHCb-PAPER-2016-036 (arXiv:1610.08288), submitted to PRL, presented to ICHEP-2016.

7) R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) “Measurement of the CP Asymmetry in $B^0 \rightarrow B^0$ Mixing”, Phys. Rev. Lett. 117, 061803 (2016)

8) R. Aaij et al. (LHCb Collaboration) “Measurement of the semileptonic CP asymmetry in B^0 - B^0 mixing” Phys. Rev. Lett. 114, 041601 (2015)

9) By LHCb Collaboration. Observation of $B_c^+ \rightarrow D^0 K^+$ decays, LHCb-PAPER-2016-058 (arXiv:1701.01856), submitted to PRL, presented to CKM-2016.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ.

В области теоретической физики:

Получены новые решения модели кротовой норы, поддерживаемой духовым скалярным полем.

Продемонстрировано правильное применение метода фиксации масштаба сильных взаимодействий в выражениях для экспериментально измеряемых величин.

Предложен новый способ пересуммирования поправок теории возмущений в КХД для двух извлекаемых из экспериментальных данных характеристик КХД.

Исследована зависимость результатов для «полюсных» и «бегущих» масс тяжёлых кварков, вычисленных в четвёртом порядке теории возмущений, от числа ароматов кварков. Сделан вывод, что определение как полюсной, так и бегущей массы тяжёлого t -кварка из экспериментальных данных является непротиворечивым.

С учётом конформной симметрии, имеющей место в суперсимметричной квантовой электродинамике при некоторых допущениях, были получены явные трёх-петлевые поправки теории возмущений порядка $\alpha^4 N_f^2$ с помощью регуляризации посредством размерной редукции. Явно сформулирована выделенная схема конечных перенормировок, в котором НШВЗ-соотношение выполняется в третьем порядке теории возмущений.

Показано, что асимметричная тёмная материя может распадаться на фотоны с круговой поляризацией.

Был изучен вопрос о том, насколько перенормируемая теория гравитации с квадратом тензора Вейля в действии совместима с космологией. Найдено, что если потребовать время жизни духа больше возраста Вселенной, то эта степень свободы начинает доминировать в поздней Вселенной, что несовместимо с данными наблюдений.

Получены предсказания для индуцированного распада нуклонов в классе моделей с асимметричной тёмной материей, который носит название "хилогенезис". Одной из наиболее ярких сигнатур, присущих данной модели, является предсказание существования распадов протона и нейтрона, индуцированных столкновениями с частицами тёмной материи.

Показано, что избыток событий в экспериментах ATLAS и CMS в реакциях с двумя фотонами в конечном состоянии с инвариантной массой около 750 ГэВ можно объяснить

распадом сголдстино - частицы, возникающей в суперсимметричных теориях с низким масштабом нарушения суперсимметрии.

Проанализированы нейтринные данные Байкальского телескопа НТ-200, набранные за 1998-2003 год с целью поиска нейтринного сигнала от аннигиляции частиц тёмной материи в центре Галактики. Получены верхние пределы на сечения аннигиляции частиц тёмной материи для нескольких каналов аннигиляции.

Изучено нарушение лептонного числа в суперсимметричных моделях с низким масштабом нарушения суперсимметрии, содержащими лёгкую скалярную частицу — сголдстино. Показано, что смешивание сголдстино с легчайшим бозоном Хиггса приводит к изменению соответствующих констант связи и может приводить к распаду бозона Хиггса на $\mu\mu$, $\tau\tau$, нарушающему лептонный флейвор. Изучены феноменологические следствия такого сценария.

Изучена феноменология расширения минимального сценария с расщеплённой суперсимметрией, в котором имеется дополнительное синглетное суперполе и его компоненты остаются лёгкими после нарушения суперсимметрии. Исследована возможность генерации барионной асимметрии Вселенной в результате механизма электрослабого бариогенезиса в рамках данной модели.

Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий.

Проведено сравнение предсказаний модели с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ.

Изучена возможность объяснения наблюдаемого в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий свыше 30 ТэВ, потока нейтрино взаимодействиями космических лучей с газом в гало Млечного Пути и других галактик.

Получены новые ограничения на ширины распада частиц сверхтяжёлой тёмной материи путем сравнения сопутствующих потоков фотонов ультравысоких и сверхвысоких энергий с современными ограничениями.

Найдено решение нелинейных уравнений поля, описывающее провал плотности заряда в однородном устойчивом конденсате.

Изучено влияние дополнительных полей на существование и стабильность классических решений теории поля.

Разработан феноменологический подход описания рождения частиц в сильных гравитационных полях.

Рассмотрен сценарий с распадающейся холодной тёмной материей. Показано, что в рамках такого сценария можно ослабить имеющееся расхождение между прямыми измерениями постоянной Хаббла, а также данными, полученными миссией Planck.

Получены ограничения на параметры модели распределения горячего газа в гало Млечного пути при помощи меры дисперсии пульсаров.

Представлен новый аналитический подход для описания крупномасштабной структуры Вселенной в слабо-нелинейном режиме, сформулирована пертурбативная техника для вычисления нелинейных поправок к космологическим корреляторам, с помощью которой были учтены инфракрасные эффекты, влияющие на барионные акустические (сахаровские) осцилляции.

Получено ограничение на скорость распространения гравитационных волн из временной задержки между детектированием сигналов лаборатории LIGO в Ханфорде и Ливингстоне от события GW150914.

Исследована гипотеза о том, что источником космических лучей являются новорожденные пульсары. Показано, что в этом случае они должны иметь диффузные гамма-гало, созданные взаимодействием космических лучей с межзвёздным газом. Поставлены ограничения на светимости гамма-гало, которые свидетельствуют, что вклад пульсаров в полную энергию космических лучей подавлен в диапазоне энергий ГэВ-ТэВ.

Произведено вычисление критических индексов, соответствующих пороговым сингулярностям в различных корреляторах одномерных моделей многих частиц.

В теории гравитации, в которой кручение пространства-времени выступает в роли динамической переменной, получены самоускоряющиеся решения. Исследован спектр малых скалярных возмущений на фоне данного решения.

Показано, что в оригинальной модели генезиса с галилеонами в некоторый момент появляются градиентные неустойчивости. Предложен сценарий обобщенного генезиса, в котором не возникает патологических степеней свободы на протяжении всей эволюции Вселенной.

Доказано обобщение теоремы о несуществовании отскока и кротовой норы на лагранжианы галилеона, взаимодействующего с обычным скалярным полем. Показано, что в моделях с отскоком присутствуют градиентные неустойчивости или сингулярности, а в моделях с кротовыми норами всегда появляются духи.

Проделана существенная работа по полному Монте-Карло моделированию установки детектирования широких атмосферных ливней ШАЛ-МГУ, необходимая для обработки архивных данных (1982-1990 гг.) эксперимента.

Рассмотрены модели тёмной материи, состоящей из частиц с массой $10^7 - 10^{16}$ GeV, временем жизни существенно превышающем возраст Вселенной и распадающейся путем адронных взаимодействий. Предсказанные потоки фотонов и нейтрино, достигающие Земли, были сопоставлены с пределами на потоки фотонов, полученными в экспериментах Pierre Auger, Telescope Array, KASCADE, KASCADE-Grande, CASA-MIA и Yakutsk, а также с данными экспериментов IceCube и Pierre Auger по детектированию нейтрино сверхвысоких энергий.

Разработаны методы расчёта сечений взаимодействия нейтрино с ядрами при промежуточных ($E \sim 1$ ГэВ) и высоких энергиях ($E \gg 1$ ГэВ). Были вычислены полные сечения рассеяния нейтрино для энергий $5 \text{ GeV} < E < 1 \text{ TeV}$ для ядер дейтерия, углерода и железа.

Исследован коллапс аксионных Бозе-звёзд сверхкритической массы, вызванный притяжением аксиноподобных частиц.

Данные результаты являются результатами мирового уровня в области теоретической физики.

В эксперименте Троицк-ню-масс: получено разрешение на приобретение и работу с радиоактивным тритием; модернизировано программное обеспечение сбора данных и отдельных элементов медленного контроля; проведено два полноценных сеанса измерений с радиоактивным тритием; выполнены калибровочные измерения с электронной пушкой по прецизионному исследованию функции пропускания электростатического спектрометра; получены спектры бета-электронов в распадах трития в интервале энергий 13-19 кэВ. На основании полученных данных даны предварительные оценки на верхний предел примеси тяжёлых нейтрино.

По проекту КАТРИН: рассчитаны спектры потерь энергии электронов в газовом источнике при упругом рассеянии на молекулярном водороде с учетом внутреннего движения атомов в молекуле трития; построены специальные статистические критерии для поиска примеси тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития; предложен эксперимент по исследованию зависимости от энергии налетающих электронов сечения возбуждения электронных состояний молекул трития; разработана оболочка на языке Python для управления аппаратными средствами работающими под управлением ПО на языках C++/Qt; проводилось исследование детектора на базе микроканального лавинного фотодиода с быстрым временем восстановления.

В эксперименте мю2е проведено новое измерение энергетическое разрешение кристалла, с помощью современных электронных блоков по оцифровке формы сигналов с APDs (CAEN WDT 5742) которое позволяет улучшить на 38% энергетическое

разрешение кристалла ($\sigma_E/E = 0.13\%/\sqrt{E}$) по сравнению с ранними измерениями с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) LeCroy ADC 2249A.

В теоретическом исследовании свойств ядерно-подобных систем с необычными свойствами, имеющими квантовые числа очарование или прелесть впервые проведена классификация и расчёты статических характеристик скирмионов в зависимости от их свойств при масштабном преобразовании.

Сделан вывод о несправедливости широко распространенного мнения о том, что диффузный гамма-фон в области энергий 100 ГэВ описывается вкладом неразрешённых блазаров, которые дают лишь до трети фона. Остальное может быть вкладом, каскада, индуцированного рождением пар протонами с энергией выше 10^{19} эВ.

При исследовании нанографитовых плёнок обнаружен эффект переключения проводимости при токах до 1А, обнаружен обратный эффект Джозефсона, предполагающий существование сверхпроводящей фазы; установлено, что если СП фаза есть, то она представляет собой вкрапления в несверхпроводящей матрице.

Построена электродинамическая модель фононного резонатора, которая обосновала реальность его конструкции и функциональных свойств. Экспериментально удалось освоить производство ультрадисперсных порошков различных металлов, что является первым шагом к экспериментальной реализации прототипа фононного резонатора.

Разработанная программа, моделирующая элементарный акт антинуклон-нуклонного взаимодействия при низких энергиях, передана разработчикам программного комплекса QGSM (Quark-Gluon String Model) для компиляции, что даст возможность прямого моделирования рождения "странности" адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях; подготовлена программа для моделирования аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах углерода, которая используется коллаборацией при проектировании детектора

Найдена устойчивая долготная структура магнитного поля Солнца, определена скорость и глубина зоны, где она генерируется, доказан неслучайный характер её существования.

Выполнены работы, предусмотренные очередным этапом участия сотрудников в эксперименте CMS, связанные с модернизацией адронного калориметра, фотоприемников, анализом набранных экспериментальных данных с целью поиска новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели, разработкой новых методов реконструкции и анализа событий.

С участием сотрудников Института в эксперименте LHCb получены важные результаты: неподтверждение кандидата в тетракварки $X(5568)$ в спектре инвариантных масс $B_s^0 \pi^\pm$; наиболее точное измерение СКМ угла γ из комбинации $B \rightarrow DK$ распадов.

Исследование кинематики частиц тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр малых масс, а также вокруг сверхмассивных чёрных дыр в ядрах галактик позволило найти профиль плотности пиков тёмной матери и массу в пределах того или иного радиуса. В этих пиках плотности должна происходить аннигиляция частиц тёмной материи, поэтому данный эффект может представлять большой интерес для экспериментов по непрямой регистрации частиц тёмной материи посредством регистрации их продуктов аннигиляции (гамма-излучения и потоков заряженных частиц).