

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 116012210094
Инв.№



УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ
ФИЗИКА И ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
(промежуточный за 2015 год)
0031-2015-0003

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



М.В.Либанов
19 января 2016 года

Москва 2016

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 116012210094

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ
ФИЗИКА И ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
(промежуточный за 2015 год)
0031-2015-0003

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

М.В.Либанов
19 января 2016 года

Москва 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



М.В.Либанов (введение, заключение)
19.01.2016

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Красников Н.В. (раздел 1)
19.01.2016



д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (разделы 2-6)
19.01.2016



д.ф.-м.н. Недорезов В.Г. (раздел 7)
19.01.2016



к.ф.-м.н. Конобеевский Е.С. (раздел 8)
19.01.2016



д.ф.-м.н. Куденко Ю.Г. (раздел 9)
19.01.2016



д.ф.-м.н. Коптелов Э.А. (разделы 10-14)
19.01.2016

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 82 с., 30 рис., 3 табл.

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА, МОДИФИЦИРОВАННАЯ ГРАВИТАЦИЯ, СПЕКТРОМЕТРИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, МАССА НЕЙТРИНО, РЕДКИЕ МЮОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ФОТОЯДЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, МАЛОНУКЛОННЫЕ СИСТЕМЫ, НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ, НАРУШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СИММЕТРИЙ, СЦИНТИЛЛЯТОР, ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ, ЛАВИННЫЙ ФОТОДИОД, МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год.

Рассматривались проекты:

Теоретические исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях;

Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю;

Светосильная спектрометрия электронов, ядерные реакции при низких и средних энергиях и перспективные разработки;

Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов;

Поиск редких мюонных процессов в эксперименте « $\mu 2e$ »;

Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX;

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;

Исследования по физике фотоядерных взаимодействий;

Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики;

Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов;

Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце;

Проблемы физики трансмутации ядерных материалов и технология подкритических систем на пучках заряженных частиц;

Создание и приборное оснащение нейтронного комплекса ИЯИ РАН;

Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов;

Нейтронная радиография и др.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	5
Основные результаты	6
1 Теоретические исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях; Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств тёплой тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю	8
2 Светосильная спектрометрия электронов, ядерные реакции при низких и средних энергия и перспективные разработки	14
3 Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов	18
4 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте « $\mu 2e$ »	30
5 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX	37
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 01.2.00 305485	39
7 Исследования по физике фотоядерных взаимодействий	42
8 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики	52
9 Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов	59
10 Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце	67
11 Проблемы физики трансмутации ядерных материалов и технология подкритических систем на пучках заряженных частиц	69
12 Создание и приборное оснащение нейтронного комплекса ИЯИ РАН	70
13 Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов	72
14 Нейтронная радиография	73
Заключение	81

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.

Рассматривались проекты:

Теоретические исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях;

Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств тёплой тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю;

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

Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов;

Поиск редких мюонных процессов в эксперименте « $\mu 2e$ »;

Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX;

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;

Исследования по физике фотоядерных взаимодействий;

Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики;

Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов;

Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце;

Проблемы физики трансмутации ядерных материалов и технология подкритических систем на пучках заряженных частиц;

Создание и приборное оснащение нейтронного комплекса ИЯИ РАН;

Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов;

Нейтронная радиография и др.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год.

Работы велись по следующим проектам:

Исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях;

Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств тёплой тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю;

Экспериментальное исследование редких и запрещенных распадов заряженных и нейтральных каонов и пионов;

Исследование нарушения дискретных симметрий с использованием интенсивных пучков остановленных положительных каонов;

Поиск конверсии мюона в электрон на ядрах и проверка фундаментальных законов сохранения лептонных чисел;

Научно образовательный проект по теоретической и экспериментальной физике элементарных частиц;

Информационное обеспечение Программы;

Экспериментальные исследования по физике тяжёлых ионов в широком диапазоне энергий;

Поиск сверхузких дибарионных резонансов и измерение длины нейтрон-нейтронного рассеяния на Московской мезонной фабрике ИЯИ РАН;

Исследования по физике фотоядерных взаимодействий (изучение спиновых эффектов и ненуклонных степеней свободы атомных ядер);

Исследование взаимодействия нейтронов с ядрами на импульсных нейтронных пучках;

Измерение нейтронных сечений с использованием метода по времени замедления нейтронов в свинце;

Исследование трансмутации ядерных материалов и разработка технологии подкритических систем на пучках заряженных частиц;

Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов;

Времяпролётная спектрометрия неупругого рассеяния нейтронов с большим телесным углом на нейтронном комплексе ИЯИ РАН;

Разработка многодетекторных систем и нейтронного диффрактометра нейтронного комплекса ИЯИ РАН;

Исследование спектров быстрых нейтронов в подземных лабораториях;

Развитие ядерных технологий на протонных пучках Московской мезонной фабрики;

Исследование методов и разработка технологии получения медицинских изотопов на сильнооточных протонных пучках;

Исследование и разработка каналов транспортировки сильнооточных пучков протонов и отрицательных ионов водорода с минимальными потерями в экспериментальном комплексе ИЯИ РАН;

Разработка ускорительного проекта НИКА и подготовка экспериментов с пучками тяжёлых ионов низких энергий;

Разработка и создание сцинтилляционных детекторов заряженных частиц для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах.

Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

1 Теоретические исследования проблем квантовой хромодинамики и свойств элементарных частиц при высоких энергиях; Теоретические исследования модифицированной гравитации, свойств тёплой тёмной материи и поиск частиц – кандидатов в тёмную материю
Руководитель работ д.ф.-м.н. Н.В.Красников.

В 2015 г. коллективом ОТФ была построена модель конформной космологии, являющаяся альтернативной к моделям инфляции, основанная на представлении о распаде ложного вакуума в классе конформных теорий. Для построения модели использовались современные методы квантовой теории поля, основанные на adS/CFT соответствии. Линейный анализ возмущений показал, что все значимые для космологии свойства построенной модели буквально совпадают со свойствами возмущений, имеющимися в упрощенных моделях. В частности, модель не противоречит имеющимся наблюдательным данным и предсказывает специфическую форму негауссовости скалярных возмущений.

Подведен итог работе, посвященной изучению моделей ранней Вселенной с конформной симметрией, механизмам генерации и свойствам возмущений в этих моделях. Подробно рассмотрены спектр мощности, статистическая анизотропия и негауссовость скалярных возмущений, а также свойства первичных гравитационных волн. Описан механизм генерации первичных скалярных возмущений в модели с конформным скатыванием и в модели Генезис с галилеоном. Вычислена первичная негауссовость, которая является характерной особенностью данных моделей ранней Вселенной и потенциально позволит экспериментально различить их от инфляционных. Изучена псевдоконформная модель, в которой описан новый классический режим эволюции, соответствующий быстрому сжатию Вселенной. Вычислены спектр мощности скалярных и тензорных возмущений, а также негауссовость скалярных возмущений на уровне трехточечной корреляционной функции, генерируемые в быстром режиме. Поставлены ограничения на параметры модели. Результаты опубликованы в работе.

Коллективом ОТФ в 2015 г. был рассмотрен класс дилатационно-инвариантных теорий с галилеоном, представляющих интерес с точки зрения построения моделей ранней Вселенной альтернативных инфляции. Известно, что для пространства Минковского лагранжиан модели всегда может быть выбран таким образом, чтобы малые возмущения над любыми стабильными решениями уравнения поля распространялись со скоростями меньшими чем скорость света. Однако при рассмотрении модели в метрике Фридмана-Робертсона-Уокера, которая описывает расширяющуюся Вселенную, было показано, что существуют зависимости масштабного фактора от времени, такие, что возмущения над некоторыми фоновыми решениями распространяются со сверхсветовыми

скоростями. Таким образом, была сформулирована и доказана запрещающая теорема. Результаты опубликованы в работе.

Светимость сверхновых типа Ia после максимума блеска обеспечивается радиоактивными распадами никеля-56 и кобальта-56. Скорости этих распадов пропорциональны константе слабого взаимодействия Ферми, то есть определяются вакуумным средним хиггсовского поля. На основе публично доступных данных по кривым блеска сверхновых типа Ia, изначально предназначенным для задач космологии, получены ограничения на пространственно-временные вариации скорости распада никеля-56. Хотя эти ограничения не слишком строгие, они – единственные в мире, относящиеся к интервалу красных смещений вплоть до $z \sim 1$.

Завершено исследование возможного распределения барионного вещества около нашей Галактики при помощи меры дисперсии, измеряемой по сигналам от пульсаров в шаровых скоплениях и Магеллановых облаках. Было показано, что NFW-профиль не подходит для распределения плотности горячего газа, необходимого для объяснения проблемы потерянных барионов в Галактике.

Предложен квазиклассический метод вычисления S-матрицы для двух-стадийных гравитационных переходов, включающих в себя коллапс материи с образованием черной дыры и испарением последней. Метод учитывает обратное влияние коллапсирующих и хокинговских квантов на фоновую метрику. Метод был проиллюстрирован в нескольких простых моделях, описывающих сферические самогравитирующие оболочки в асимптотически плоском пространстве и в пространстве анти-Де-Ситтера. Они показывают, что электрически нейтральные оболочки отражаются за счет вышеприведенного процесса коллапса-отражения с вероятностью $\exp(-B)$, где B – бекенштейновская энтропия промежуточной черной дыры. Этот результат находится в согласии с интерпретацией $\exp(B)$ как числа микросостояний черной дыры. То же самое выражение для вероятности получается для заряженных оболочек только в том случае, если нестабильность горизонта Коши промежуточной черной дыры Рейсснера-Нордстрёма принята во внимание. Предложенный квазиклассический метод открывает новый систематический подход к информационному парадоксу в физике черных дыр.

Начато детальное исследование применения основывающегося на специфическом механизме нарушении конформной симметрии в КХД метода beta-разложения для фиксации масштабов предсказания теории возмущений для полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны и для правила сумм глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на нуклонах. Показано, что феноменологическая обработка

предполагает модификацию рассматриваемого варианта beta-разложения в связи с плохой сходимостью рядов теории возмущений в области низких и средних энергий. Предложен конкретный вариант такой модификации.

Разработан метод вычисления неупругих структурных функций дейтрона в области возбуждения нуклонных резонансов и переходной области к глубоко-неупругому рассеянию. Явно продемонстрировано, что при усреднении вкладов нуклонных резонансов в структурные функции протона и нейтрона по достаточно широкому интервалу инвариантного переданного импульса Q воспроизводятся результаты вычислений в глубоко-неупругой области в области больших бьеркеновских x с хорошей точностью (расхождение в пределах 5% во всей исследованной кинематической области). Исследованы отношения структурных функций дейтрона и для кинематики эксперимента BONUS (JLab). Результаты готовятся к публикации.

Проведены вычисления дифференциальных сечений неупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах ^{12}C , ^{56}Fe и ^{208}Pb в рамках ранее разработанного подхода для кинематики нейтринных экспериментов NuTeV (железная мишень), CHORUS (свинцовая мишень), MINERvA (ядерные мишени: ^{12}C , ^{56}Fe , ^{208}Pb). Проведено детальное сравнение с данными этих экспериментов. Результаты уточняются и готовятся к публикации.

Исследовались партонные распределения в тяжелых ядрах (^{56}Fe и ^{208}Pb) в области высоких инвариантных переданных импульсов Q . Рассчитаны отношения (анти)кварковых распределений разных ароматов для комбинаций с различными значениями C -четности. Анализировалось распределение глюонов в ядрах на основе импульсного правила сумм для партонных распределений. Результаты опубликованы в работе.

В 2015 г. коллективом гранта изучена феноменология моделей с асимметричной темной материей - хилогенезиса – в экспериментах на ускорителях (LHC). Из сравнения с ограничениями экспериментов ATLAS и CMS на сечения процессов с джетом и «потерянной» энергией, получены ограничения на пространство параметров этой модели. Предложены дополнительные способы поиска такой темной материи на ускорителях - в частности в событиях с одним топ-кварком а также в событиях с четырьмя джетами.

Изучена феноменология смешивания в хиггсовском секторе суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии. В таких моделях, помимо обычного суперсимметричного спектра на электрослабом масштабе присутствуют дополнительные скалярные степени свободы - сголдстино. Показано, что смешивание скалярного сголдстино с легчайшим бозоном Хиггса может быть значительным, особенно

в случае, когда его масса близка к массе скалярного сголдстино. Проведено сканирование по пространству параметров модели с учетом современных экспериментальных ограничений в том числе ограничений из экспериментов на LHC с целью поиска феноменологически приемлемых моделей. Изучено влияние смешивания на феноменологию легчайшего бозона Хиггса и распада скалярного сголдстино.

Коллаборацией “Байкал” при участии коллектива ОТФ исследована чувствительность нейтринного телескопа Байкал-ГВД к нейтринному сигналу от аннигиляции или распадов частиц темной материи в центре нашей Галактики. Для минимальной конфигурации из 12 кластеров за 1 год наблюдения получены ожидаемые ограничения на скорость аннигиляции частиц темной материи и ее время жизни для нескольких каналов аннигиляции/распада. Полученная чувствительность сравнима с существующими пределами других нейтринных телескопов.

Рассмотрена феноменология гипотетических нейтральных калибровочных бозонов с недиагональным по ароматам взаимодействием с фермионами. Такие частицы естественным образом появляются в моделях с дополнительными пространственными измерениями, объясняющими иерархию масс и смешиваний кварков, заряженных лептонов и нейтрино. Получено общее соотношение между массами новых калибровочных бозонов и их константами взаимодействия с фермионами; для конкретных реализаций модели даны количественные оценки. В рамках соответствующей эффективной модели получена связь между скоростями редких распадов мезонов и параметрами, характеризующими возможность наблюдения таких бозонов на Большом адроне коллайдере.

Построено самосогласованное квазиклассическое описание распада ложного вакуума индуцированного столкновениями частиц в (1+1)-мерной теории поля. Численно для конкретного потенциала показано, что вероятность такого процесса растет с ростом энергии сталкивающихся частиц, но остается экспоненциально подавленной при всех энергиях. При этом при энергии выше некоторого критического значения, зависящего от числа сталкивающихся частиц, экспонента подавления остается постоянной. При таких энергиях процесс описывается особым классом комплексных решений классических уравнений поля вдоль действительного времени. Предложены аргументы в пользу того, что теория возмущений для процессов распада ложного вакуума, индуцированного двухчастичными столкновениями, на фоне таких решений оказывается стабильной даже в пределе высоких энергий. В этом высокоэнергичном режиме процесс происходит путем испускания большого количества низкоэнергичных частиц, соответствующих энергии классического решения, а избыток уносится изначально сталкивающимися частицами.

1 ПУБЛИКАЦИИ

1. M. Libanov and V. Rubakov / Conformal Universe as false vacuum decay // *Phys. Rev. D* 91 (2015) 10, 103515, arXiv:1502.05897
2. S. Mironov / Properties of perturbations in conformal cosmology // *Phys.Part.Nucl.* 46 (2015) 6, 891-918
3. R.Kolevator / Superluminality in dilatationally-invariant generalized Galileon theories // *Phys.Rev. D* 92 (2015) 12, 123532
4. Ivan Karpikov, Maxim Piskunov, Sergey Troitsky / Constraining spacetime variations of nuclear decay rates from light curves of type Ia supernovae // *Phys.Rev. D* 91 (2015) 12, 127301
5. F. Bezrukov, D. Levkov and S. Sibiryakov / Semiclassical S-matrix for black holes // arXiv:1503.07181 [hep-th], *JHEP* 1512 (2015) 002
6. A. L.Kataev and S. V. Mikhailov / Generalization of the Brodsky-Lepage-Mackenzie optimization within the β -expansion and the principle of maximal conformality // *Phys. Rev. D* 91 (2015) 1, 014007
7. S.A.Kulagin and R.Petti / Nuclear Parton Distributions and the Drell-Yan Reaction// arXiv:1512.03291 [hep-ph]; Proceedings of 23rd International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2015), 27 Apr - 01 May 2015. Dallas, Texas, United States
8. S.V. Demidov, D.S. Gorbunov, D.V. Kirpichnikov / Collider signatures of Hylogenesis // *Phys.Rev. D* 91 (2015) 3, 035005
9. K.O. Astapov, S.V. Demidov / Sgoldstino-Higgs mixing in models with low-scale supersymmetry breaking // *JHEP* 1501 (2015) 136
10. A.D. Avrorin et al.. / Sensitivity of Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of Galactic dark matter halo // *JETP Lett.* 101 (2015) 5, 289-294
11. S.V. Demidov, O.V. Suvorova / Indirect searches for dark matter at Baksan and Baikal // *Phys.Part.Nucl.* 46 (2015) 2, 222-229
12. Sergei Demidov, Dmitry Levkov / High-energy limit of collision-induced false vacuum decay // *JHEP* 1506 (2015) 123
13. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, et al. Decrease of Atmospheric Neutron Counts Observed during Thunderstorms. // *Phys. Rev. Lett.* 114, 125003 (2015).
14. ALEKSEENKO, V., ARNEODO, F., BRUNO, G., DI GIOVANNI, A., FULGIONE, W., GROMUSHKIN, D., SHCHEGOLEV, O., STENKIN, Y., STEPANOV, V., SULAKOV, V. and YASHIN, I., 2015. Alekseenko et al. Reply. *Physical Review Letters*, 115(17), 179502.
15. Д. М. Громушкин, В. И. Волченко, А. А. Петрухин, Ю. В. Стенькин, В. И. Степанов, О. Б. Щеголев, И. И. Яшин / Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ // *ЯФ*, том 78, (2015), 379-382.
16. Д.М. Громушкин, В.И.Волченко и др. / Спектр энерговыделений в установке ПРИЗМА-32 // *Известия РАН, серия Физическая*, 2015, Vol. 79, No. 3, pp. 414–416
17. В.В. Алексеенко, Д.М. Громушкин и др. / Вариации нейтронного потока во время гроз // *Известия РАН, серия Физическая*, (2015), Vol. 79, No. 5, pp. 739–741.

18. S.W. Cui, X.W. Guo, D.M. Gromushkin, H.H. He, Y. Liu, X.H. Ma, O.B. Shchegolev, V.I. Stepanov, A.L. Tsyabuk, P. Vallania, C. Vigorito and J. Zhao / Seasonal thermal neutron flux variations at high altitude // Proc. 34th ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 343.
19. A.A. Petrukhin, D.M. Gromushkin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, I.I. Yashin / EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32 // Proc. 34th ICRC, Hague, 2015, PoS(ICRC2015) 427.
20. B. Bartoli, P. Bernardini, X.J. Bi et al. / Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment // ArXiv:1512.01326v1 [astro-ph.IM]
21. YU.V.STENKIN, D.M.GROMUSHKIN, A.A.PETRUKHIN, O.B.SHCHEGOLEV, V.I. STEPANOV, V.I.VOLCHENKO, I.I. YASHIN AND E.A. ZADEBA. /EAS thermal neutron lateral and temporal distributions // arXiv:1512.02042v1 [astro-ph.IM].
22. D. Gorbunov, I. Timiryasov / Testing vMSM with indirect searches // Phys.Lett. B745 (2015) 29
23. A.L. Kataev, V.S.Molokoedov / Fourth-order QCD renormalization group quantities in the V scheme and the relation of the β function to the Gell-Mann–Low function in QED // Phys. Rev. D92 (2015) 5, 054008
24. Я.В. Жежер, Э.Я. Нугаев, Г.И. Рубцов / Исследование распределения горячего газа в гало Млечного Пути при помощи меры дисперсии пульсаров // Письма в Астрономический журнал, т. 42, №3. стр 1-9 (2016)
25. S.V. Demidov, D.G. Levkov / Semiclassical description of soliton-antisoliton pair production in particle collisions», JHEP 1511 (2015) 066
26. E.Nugaev and A.Shkerin / Toward the correspondence between Q-clouds and sphalerons // Phys. Lett. B 747 (2015) 287
27. I.E.Gulamov, E.Y.Nugaev, A.G.Panin and M.N.Smolyakov / Some properties of U(1) gauged Q-balls // Phys. Rev. D 92 (2015) 4, 045011
28. Y. Zenkevich / Generalized Macdonald polynomials, spectral duality for conformal blocks and AGT correspondence in five dimensions // JHEP 1505 (2015) 131
29. D. Gorbunov, I. Timiryasov / Decaying light particles in the SHiP experiment. II. Signal rate estimates for light neutralinos // Phys.Rev. D92 (2015) 7, 075015

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

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

Заведующий лабораторией: кфмн Н.А. Титов

Проведена существенная модернизация криогенной и вакуумной частей установки. Произведён ремонт гидравлических клапанов отсечения жидкого азота в криогенных ловушках в парортутных насосах, выполнен ремонт и замена отдельных частей в сосуде-испарителе жидкого азота в системе вакуумной откачки контура, проведены испытания работоспособности двух высокопроизводительных магниторазрядных насосов с новыми источниками питания.

Модернизирован вакуумный стенд для испытания отдельных элементов установки. В частности, на нем проведено исследование возможности использования безоконных лавинных фотодетекторов в качестве регистраторов низкоэнергетичных электронов.

В июле 2015 года на установке успешно проведён отладочный сеанс с частичным включением вакуумной системы без запуска сверхпроводящих магнитов. Испытаны элементы вакуумной системы, а также патрон очистки от остаточных газов, проверены отдельные программные элементы контроля параметров установки.

Проведены дополнительные расчеты магнитного транспортного канала электронной пушки. На основании этих расчетов внесены некоторые изменения в систему пушки, в частности, установлен дополнительный коллиматор.

В целях повышения скорости системы регистрации и модернизации полностью заменена система накопления и передачи данных, установлены и проверены современные контроллеры считывания и управления сигналами. Полностью переписано программное обеспечение системы сбора данных. Кроме этого, создано программное обеспечение для высоковольтной системы, контроля токами сверхпроводящих магнитов, газового масс-анализатора. Близка к завершению программа медленного контроля за всеми вакуумными и температурными датчиками.

Успешно завершён ряд организационных и технических мероприятий по получению разрешения работы с тритием. Разрешение получено, закуплено некоторое количество трития в пределах минимально значимой активности.

Как результат, в декабре месяце проведён сеанс первых измерений с тритием и с проверкой работоспособности всех систем установки после значительной модернизации. Начат набор статистики бета-спектра электронов с целью поиска сигналов от вклада стерильных нейтрино, Рисунок 2. 1.

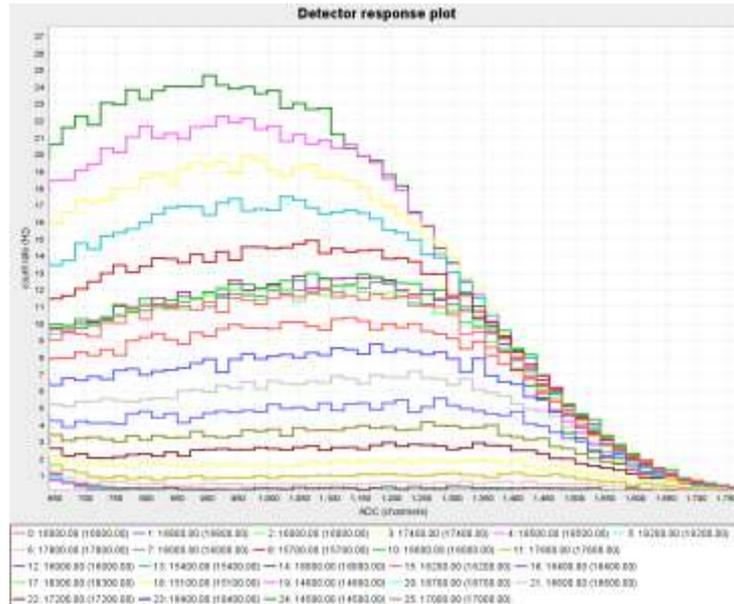


Рисунок 2.1 - Самые первые спектры амплитуды с кремниевого детектора при измерении с тритием для различных запирающих напряжений на спектрометре.

Подготовлен препринт и опубликована статья с детальным описанием планируемого эксперимента и ожидаемыми результатами, Рисунок 2.2

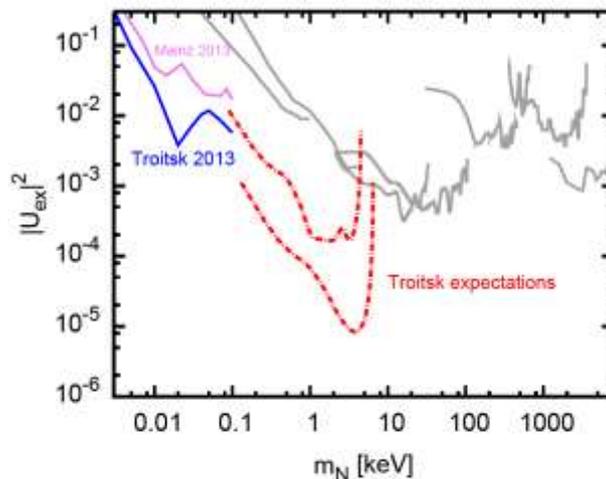


Рисунок 2. 2 - Ожидаемые оценки на верхний предел матрицы смешивания электронного и стерильного нейтрино (arXiv:1504.00544).

Проведён ряд новых расчетов рассеяния электронов назад на регистрирующем детекторе и влияние этого процесса на свойства спектрометров, подобных нашему. Доля таких электронов достигает 15-20% и отражается в свойствах функции пропускания спектрометра. Это становится особенно важным для подготавливаемого в Германии

другого эксперимента KATRIN с аналогичным спектрометром. Результаты расчетов объяснили ряд эффектов, наблюдавшихся ранее и остававшихся непонятыми. Написана и послана в печать статья с описанием полученных результатов. В декабрьском сеансе измерений с электронной пушкой еще раз была проверена и подтверждена правильность проведенных расчетов, Рисунок 2. 3.

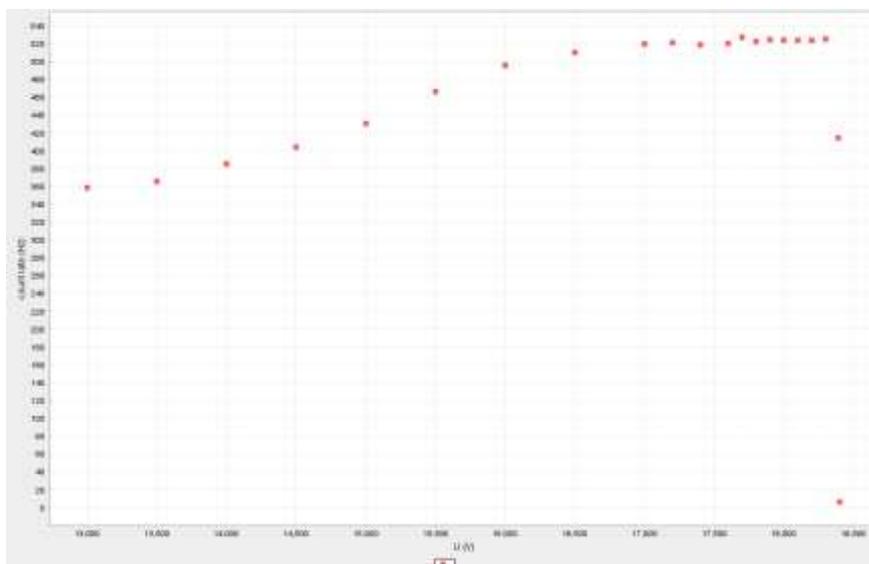


Рисунок 2. 3 - Пример одного из замеров искажения функции пропускания спектрометра для электронов от пушки с энергией 18400 эВ в зависимости от напряжения на спектрометре. В интервале напряжений от 18400 В до 16500 В наблюдается плавное падение интегрального спектра за счет рассеяния на детекторе. При еще меньших напряжениях происходит потеря адиабатичности в движении электронов и дальнейшее падение функции. <http://arxiv.org/abs/1511.06129>

Участие в 2015 году в научных мероприятиях по тематике Проекта

1. Нозик А.А. Доклад: "The DataForge framework for data acquisition and analysis", International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond September 6-10, 2015, Moscow, Russia. <http://csp2015.ac.ru/s9-2.html>
2. Коротеев Г.А. Доклад, "Status of "Troitsk nu-mass" experiment". Seventeenth Lomonosov conference on elementary particle physics. 20-26.08.2015. http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm
3. Нозик А.А. Постер: "The DataForge software framework for scientific data processing automation", Seventeenth Lomonosov conference on elementary particle physics. 20-26.08.2015. http://www.icas.ru/english/LomCon/17lomcon/17lomcon_programme.htm

3 ПУБЛИКАЦИИ

4. 1. D.N. Abdurashitov et al., "The current status of "Troitsk nu-mass" experiment in search for sterile neutrino", Journal of Instrumentation 10 (2015) 10, T10005, arxiv.org/abs/arXiv:1504.00544.

5. 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", <http://arxiv.org/abs/1511.06129>, направлено в Journal of Instrumentation.

3 Поиск массы электронного антинейтрино: исследование систематических эффектов

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

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. Рисунок 3.1) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

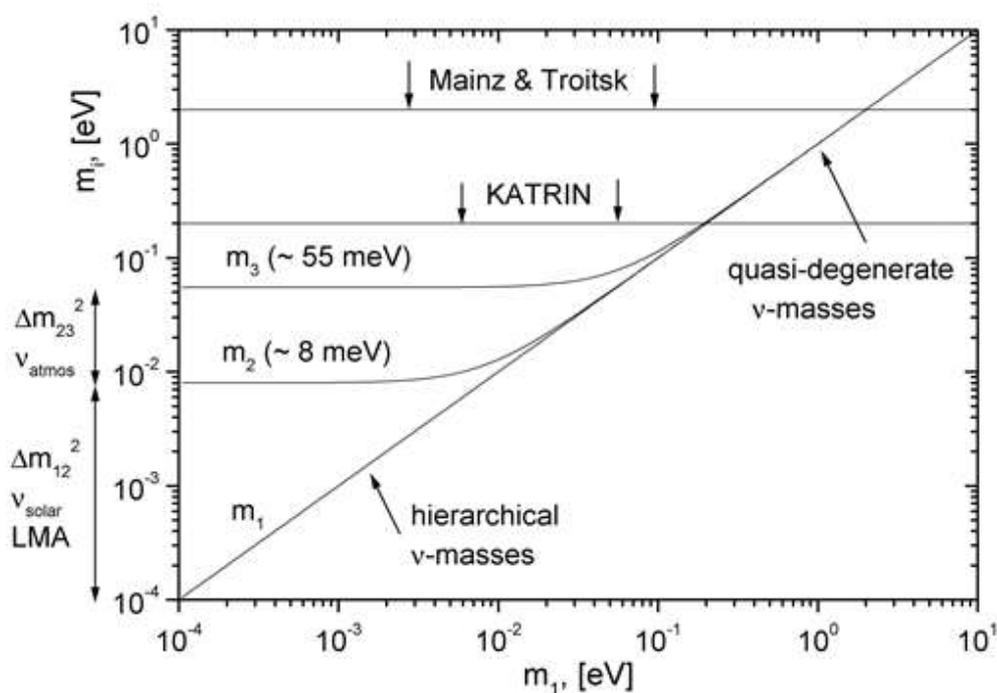


Рисунок 3.1 - Спектр «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия).

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада

(Майорановские нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (Майрановские и Дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ [1,2]. В 2016 году, в Технологическом институте в Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) будет запущена новая установка в рамках проекта КАТРИН, которая позволит поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне 0,2 эВ [3].

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. На сегодняшний день следует признать, что по разным причинам в реализации этих проектов возникли проблемы.

В тоже время появились новые предложения по поиску сигнала массы нейтрино в бета-распаде трития. К ним относятся проекты Project8 [4] и PTOLEMY [5]. В Project8 предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. В проекте PTOLEMY используется широкий набор существующих и предложенных в Project8 экспериментальных методик в сочетании с источником большой площади на основе атомарного трития адсорбированного на поверхности графена. Оба проекта находятся на стадии R&D, хотя в рамках Project8 уже получен важный результат, который может быть использован, в частности, в проекте КАТРИН.

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

Следующей большой программой, обсуждаемой для установки КАТРИН, является поиск сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно $1\text{эВ}/c^2$ до нескольких $\text{кэВ}/c^2$ [6] и [7]. В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино содержат три собственных состояния с определенной массой. Есть основания предполагать существование дополнительных состояний, преимущественно стерильных, т.е. не участвующих в взаимодействиях в рамках Стандартной модели. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси таких состояний в активных нейтрино. Как можно наблюдать сигнал стерильных нейтрино в бета-распаде? Общепринято, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое массовое состояние. Если в активных нейтрино

существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады и их можно попытаться выделить.

Проект КАТРИН является полигоном для применения самых передовых экспериментальных технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей, системах сбора данных и т.д. Следует отметить также применение последних достижений в области программного обеспечения, как сбора, так и обработки физических данных.

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.

Project8 получен важный результат, который может быть использован, в частности, в проекте КАТРИН. Создан специальный резонатор и схема регистрации сигнала, позволяющие детектировать прохождение единичного электрона с энергией масштаба десятка кэВ и приводящие к вариации энергии регистрируемого электрона не более 0,1 эВ. Применение созданного прибора в качестве источника стартового сигнала может позволить перевести работу спектрометра в режим по времени пролета и увеличить тем набора статистики. Повышение точности данных вблизи конца спектра сделает возможным получение данных о примеси правых токов в бета-распаде трития, а также обнаружить сигнал легкого (с массой около $1\text{эВ}/c^2$) стерильного нейтрино.

3.1 Проект КАТРИН

Из основных узлов установки КАТРИН: торцевая секция (RS), безоконный газовый источник (WGTS), фронтальная транспортная секция (DPS-2F), криогенная откачная секция (CPS), предварительный спектрометр (PS) находятся в разной степени готовности (см. Рисунок2). Предварительный спектрометр (PS) был изготовлен первым и его испытания завершены. На основном спектрометре (MS) и детекторе (D) проводятся многочисленные тесты. Ведется монтаж газового источника (WGTS) и торцевой секции (RS). В середине 2016-го года планируется завершить монтаж и наладку компонентов и приступить к запуску установки в целом.

В рамках Project8 получен важный результат, который может быть использован в проекте КАТРИН. В университете штата Вашингтон создан специальный резонатор и схема регистрации сигнала, позволяющие детектировать прохождение единичного электрона с энергией масштаба десятка кэВ. Вариация энергии регистрируемого электрона (ускорение/торможение) составляет не более 0,1 эВ. Версия разработанной аппаратуры смонтирована в промежутке между предварительным и основным

спектрометрами, где уже выделена наиболее важная часть спектра вблизи конечной точки с суммарным потоком электронов в несколько десятков Герц. При такой скорости счета применение созданного прибора в качестве источника стартового сигнала может позволить перевести работу спектрометра в режим по времени пролета и увеличить тем самым скорость набора статистики при поиске массы активного нейтрино. Повышение точности данных вблизи конца спектра сделает возможным получение данных о примеси правых токов в бета-распаде трития, а также обнаружить сигнал легкого (с массой около $1\text{эВ}/c^2$) стерильного нейтрино.

Выявленная ранее проблема, состоящая в эманации Радона-219 из материала геттера откачивающего основной спектрометр, решена. В промежутке, отделяющем объем геттерного насоса от основного спектрометра, установлена охлаждаемая жидким азотом ловушка, позволяющая перехватывать поток радона на необходимом уровне.

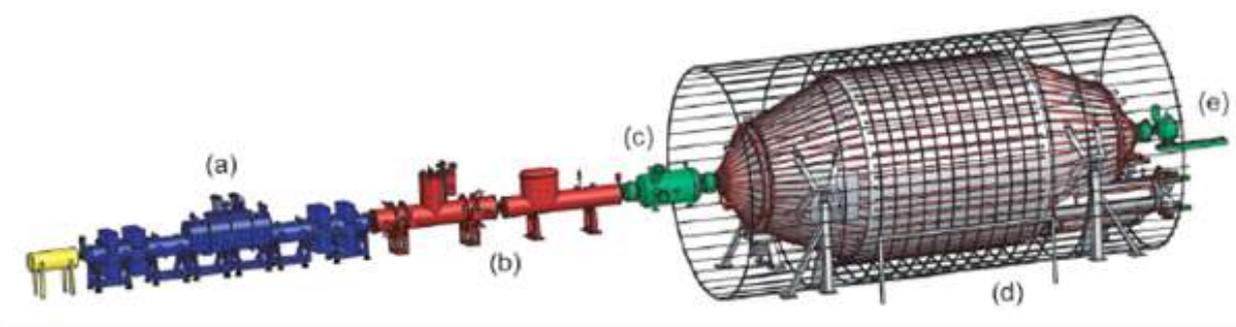


Рисунок 3.2 - Установка КАТРИН. а – безоконный газовый источник трития, б – канал транспортировки электронов с дифференциальной и криогенной откачками, с – предварительный спектрометр, d – основной спектрометр, e – сегментированный детектор.

Собственный фон спектрометра находится сейчас на уровне 400 мГц и ведется интенсивное исследование его природы.

3.3 Работы по проекту КАТРИН и ИЯИ РАН

3.3.1 Влияние упругого рассеяния электронов на потерю энергии в газовом источнике.

Упругое рассеяние электронов на атоме трития при низких температурах приводит к пренебрежимо малым потерям ими энергии. Существование «нулевых» колебаний атомов в молекуле трития существенно увеличивает величину потерь.

На XXIX-м совещании коллаборации КАТРИН (5-8 октября 2015 года, Карлсруэ, Германия) был представлен доклад «Влияние упругого рассеяния электронов на функцию отклика в эксперименте КАТРИН». В докладе представлены результаты исследования

систематических эффектов, а именно потерь энергии электроном в тритиевом газе за счёт упругого рассеяния. Такое исследование необходимо для оценки возможного вклада упругого рассеяния при моделировании эксперимента КАТРИН и дальнейшем при анализе экспериментальных данных. Одним из ранее неучтённых эффектов является вращательное и колебательное движение атомов в молекуле трития. Вращательные и колебательные энергетические уровни заполнены даже при низких температурах (~30К), это может вносить дополнительное размытие спектра в процессе упругого рассеяния электронов бета-распада на ядрах в молекулах. Такие эффекты были измерены в экспериментах [8] по рассеянию электронов на молекулах водорода и дейтерия с большой передачей импульса.

В нашей работе была выбрана модель молекулы трития на основе потенциала Морса, построена функция, связывающая переданный при рассеянии импульс и переданную энергию с распределением рассеивающих атомов по импульсам. С помощью этой функции с использованием дифференциального сечения упругого рассеяния электронов на молекулах трития строится функция потерь энергии, отражающая вероятность потери электроном данного количества энергии при однократном упругом рассеянии (Рисунок3).

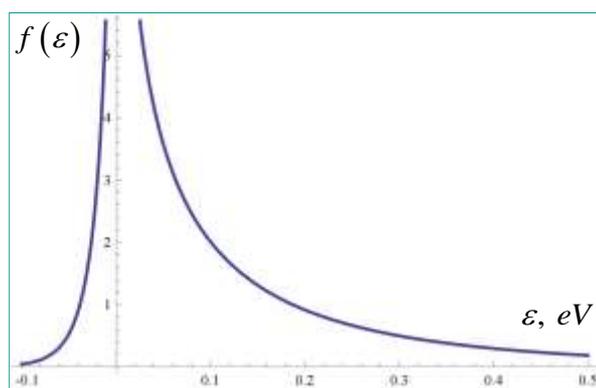


Рисунок 3.3 - Функция потерь энергии электрона при упругом рассеянии на молекуле трития

Наличие у данной функции значений в отрицательной области свидетельствует о том, что часть электронов приобретает дополнительную энергию при рассеянии. Затем вычислением свёртки функции потерь энергии с геометрическим разрешением спектрометра эксперимента КАТРИН получена функция отклика, выделенная красным на Рисунке 3.4.

Таким образом, в данной работе в рамках модели Морса движения рассеивающих ядер получена функция потерь энергии электронов при упругом рассеянии в тритиевом газе. Показано, что часть электронов может приобретать дополнительную энергию при упругом рассеянии. В то же время колебательное и вращательное движение ядер в молекулах не

оказывает существенного влияния на функцию отклика в эксперименте КАТРИН

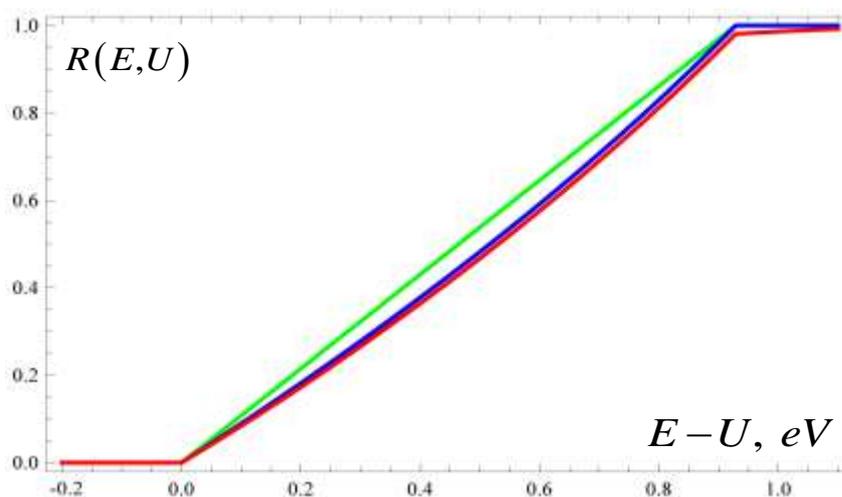


Рисунок 3.4 - Модельная функция отклика эксперимента КАТРИН без учета упругого рассеяния (зеленый, синий) и с учетом упругого рассеяния (красный)

3.3.2. Анализ экспериментального спектра на присутствие примеси тяжелых стерильных нейтрино

Диапазон масс такого нейтрино предсказывается астрофизическими и космологическими оценками и лежит в области начиная от нескольких кэВ, что допускает поиск этого состояния нейтрино в спектре бета-распада трития в экспериментах КАТРИН и Троицк-ню-масс. Для поиска вклада дополнительного состояния нейтрино с массой порядка нескольких кэВ в спектре бета-распада трития можно использовать различные подходы.

Первый подход состоит в непосредственном фитировании экспериментальных данных с добавлением двух свободных параметров, соответствующих массе тяжёлого нейтрино и углу смешивания. Такой подход является наиболее чувствительным, но в то же время требует хорошего знания теоретического спектра. Любые неучтенные поправки к теоретическому спектру снижают чувствительность данного подхода.

Другим способом поиска дополнительного нейтрино в спектре бета-распада является построение статистических критериев, чувствительных к конкретному виду добавки к спектру от такого тяжёлого нейтрино. В рамках этого подхода ранее были предложены поиски характерного для тяжелого нейтрино вклада (типа «кинк») с помощью фильтров [9] и с применением вейвлет-анализа [10].

На 14-й Международной конференции по физике частиц и физике подземных экспериментов (7-11 сентября 2015 года, Турин, Италия) был представлен доклад по теме «Статистические критерии для поиска тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития». В докладе представлены предварительные результаты работы по разработке

статистических методов поиска аномальных вкладов в экспериментальных спектрах, в частности для актуального в настоящее время поиска «тяжёлого» массового состояния нейтрино.

В нашей работе предложен новый систематический подход к построению специальных статистических критериев, основанный на фундаментальном методе оценивания – методе квазиоптимальных моментов [11]. Построены квазиоптимальный (quasi-optimal) критерий для поиска «кинка», а также критерий попарных корреляций соседей (pairwise neighbours'), чувствительный к различным аномальным вкладам в спектры. Для сравнения чувствительности данных критериев к вкладу тяжёлого нейтрино в спектр построены так называемые функции мощности критериев. Для сравнения добавлен стандартный критерий хи-квадрат.

На Рисунке 2.2.2.5 показаны функции мощности для трёх критериев и трёх значений моделированной массы тяжёлого нейтрино (10 кэВ, 7 кэВ, 5 кэВ).

Из построенных функций мощности видно, что квазиоптимальный критерий оказывается наиболее чувствительным (критерий тем эффективнее и чувствительнее, чем выше лежит его функция мощности). Кроме того, специальные критерии (квазиоптимальный и критерий попарных корреляций соседей) оказываются устойчивыми по отношению к одному из параметров (массе тяжёлого нейтрино). Именно эти два критерия сохраняют чувствительность при изменении реальной (моделированной) массы тяжёлого нейтрино. Таким образом, построенные критерии являются эффективными инструментами для поиска дополнительного тяжёлого нейтрино, не требуют точного знания теоретического спектра и могут быть использованы в эксперименте КАТРИН.

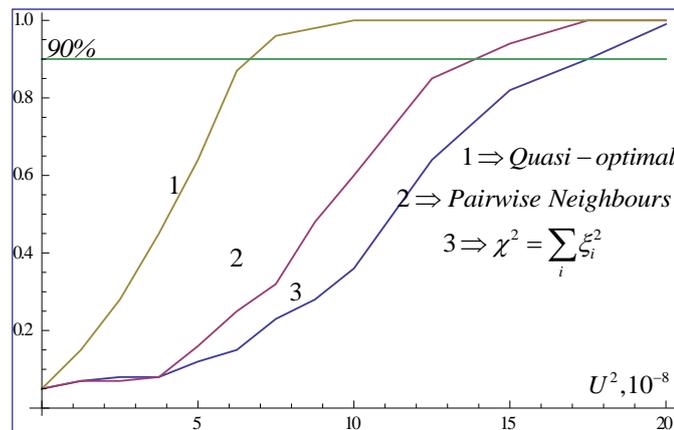
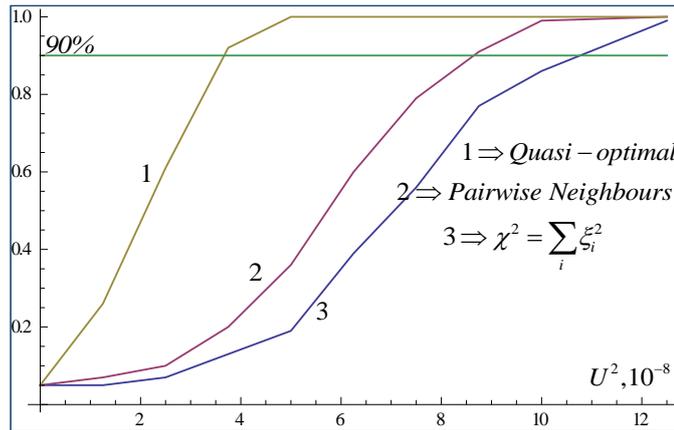
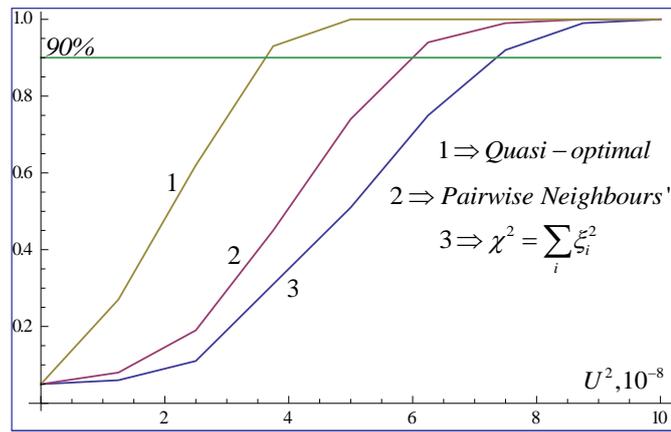


Рисунок 3.5 - Функции мощности критериев для поиска тяжёлого нейтрино с массой 10 кэВ (внизу), 7 кэВ (в центре) и 5 кэВ (вверху)

3.3.3. Сдвиг оценки массы нейтрино и представление спектра конечных состояний

В ряде экспериментов по измерению эффективной массы нейтрино в бета-распаде трития наблюдался эффект большого отрицательного квадрата массы (см. Таблица 2.2.3.1)

Таблица 3.1

Laboratory	m_ν^2, eV^2	Fit range, eV
LANL	$-147 \pm 68 \pm 41$	825
LLNL	$-130 \pm 20 \pm 15$	1100
Troitsk	≈ -20 each run	275

В работе [12] предложено решение проблемы для экспериментов в Лос-Аламосе (*LANL*) и Ливерморе (*LLNL*), связанное с тем фактом, что при анализе данных этих экспериментов использовался спектр возбуждения конечных состояний из работы [13]. Аналогичный спектр в более продвинутых расчетах [14] имеет значение дисперсии на 83 эВ^2 больше. Неучтенное размытие спектра приводит к появлению отрицательного сдвига квадрата массы:

$$\Delta m_\nu^2 = -2 \Delta(\sigma_{\text{FSD}}^2) \quad (1)$$

Таблица 3.2 (Из работы [12])

	LANL [15]	LLNL [16]	
As published. Theory: Fackler <i>et al.</i> [59]			
Δ_{00}	18570.5(20)	18568.5(20)	eV
Q_A	18588.6(20)	18586.6(25)	eV
m_ν^2	-147(79)	-130(25)	eV^2
Re-evaluated. Theory: Saenz <i>et al.</i> [8]			
Δ_{00}	18571.2(20)	18569.2(20)	eV
Q_A	18589.3(20)	18587.3(25)	eV
m_ν^2	20(79)	37(25)	eV^2

Экспериментальные данные для обсуждаемых экспериментов более не доступны и коррекция результатов проводилась с помощью соотношения (1). Результаты приведены в таблице 3.2.

Следует отметить, что с самого начала при анализе данных «Троицк ню-масс» использовался спектр из работы [15], который отличается от спектра [13] включением непрерывного хвоста. Несмотря на то, что суммарный вклад хвоста составляет менее

0.5%, он дает существенный вклад в дисперсию распределения (см. Рисунок 3.6)

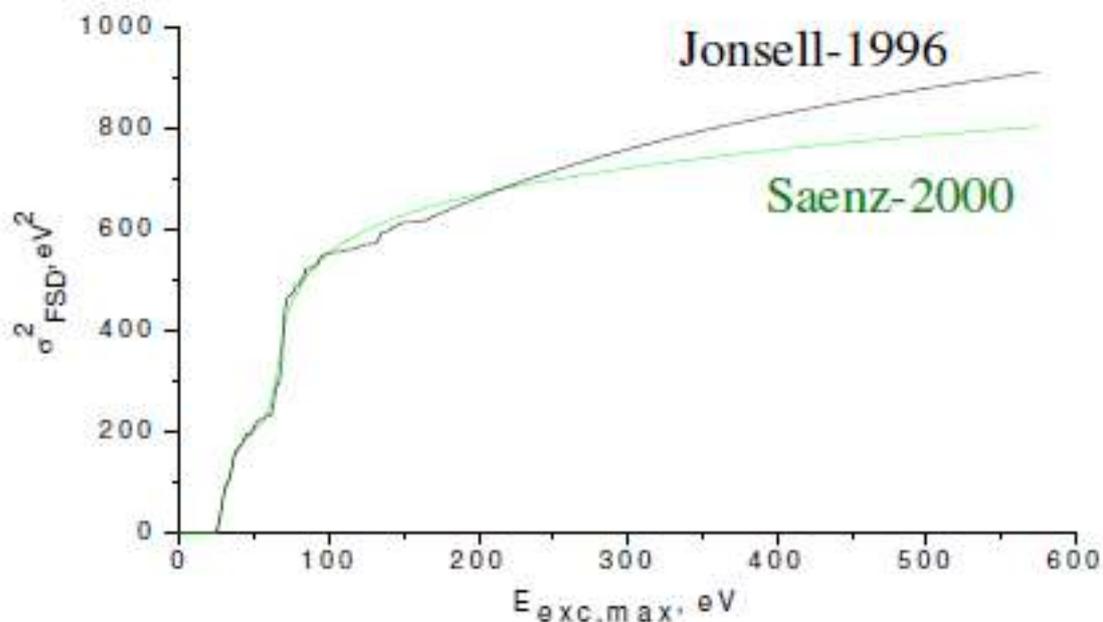


Рисунок 3.6 - Дисперсия распределения конечных состояний молекулярного иона из работ [14] и [15] в зависимости от верхнего предела интегрирования (анализа).

Для экспериментальных данных в Троицке были проведены расчеты с реальными данными. Сдвиг квадрата массы приведен в зависимости от нижнего предела анализа, который приведен в абсолютных цифрах (граничная энергия спектра 18575 эВ). Как видно из Рисунок7, отличие в результатах много меньше типичного значения отрицательного квадрата массы в эксперименте и не следует за абсолютной величиной и знаком разницы дисперсий двух представлений.

Из приведенного рассмотрения следует два вывода:

- отрицательный квадрат массы в эксперименте «Троицк ню-масс» не связан с представлением спектра возбуждений конечного молекулярного иона;
- наблюдается значительное отклонение от оценки по формуле (1), причины которого необходимо исследовать.

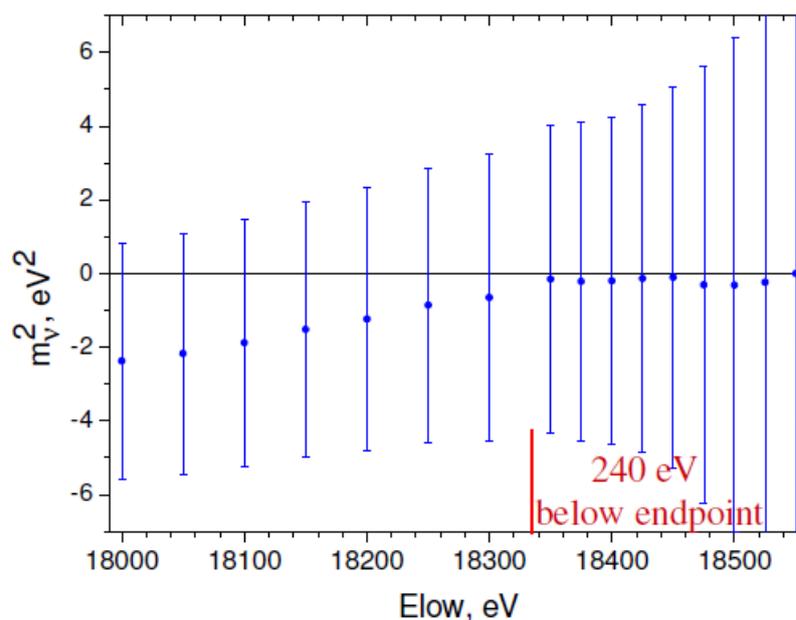


Рисунок 3.7 - Сдвиг измеренной величины квадрата массы нейтрино в эксперименте «Троицк ню-масс» при переходе от спектра конечных состояний из работы [14] к аналогичному спектру из работы [15].

3 Результаты:

- рассчитаны поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике КАТРИН с учетом внутреннего движения атомов в молекуле;
- разработаны оптимальные критерии выделения сигнала стерильного нейтрино в спектре бета-распада трития;
- исследовался вклад различного представления спектра конечных состояний в измеряемую величину массы нейтрино.

3 Литература

1. C. Kraus et al. Eur. Phys. J. C **40**, 447–468 (2005)
2. V.M.Lobashev. Nuclear Physics A, Volume 719, 19 May 2003, pp. 153-160.
3. arXiv: hep-ex 0109033, 21 Sept 2001.
4. <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7090.pdf>
5. <http://www.project8.org/>
6. <http://web.ornl.gov/info/news/pulse/no430/story1.shtml>
7. <http://arxiv.org/abs/1204.5379>
8. <http://arxiv.org/abs/1409.0920>
9. Vos, Went, J. Phys. B 42 (2009) 065204
10. S. Mertens et al., JCAP02 (2015) 020
11. S. Mertens et al., Phys. Rev. D 91, 042005 (2015)
12. F.V. Tkachov, arXiv:physics/0604127

13. L. I. Bodine, D. S. Parno, and R. G. H. Robertson Phys. Rev. C 91, 035505

14. O. Fackler, B. Jeziorski, W. Kołos, H. J. Monkhorst, and K. Szalewicz,
Phys. Rev. Lett. 55, 1388 (1985)

15. A. Saenz, S. Jonsell, and P. Froelich, Phys. Rev. Lett. 84, 242 (2000).

16. S. Jonsell, H. J. Monkhorst Phys. Rev. Lett. 76, (1996), 4476

Выступления на конференциях, рабочих совещаниях и подготовка публикаций

Доклад на научной конференции

1. А.В. Лохов «Статистические критерии для поиска тяжёлого нейтрино в спектре бета-распада трития». 14-я Международная конференция по физике частиц и физике подземных экспериментов (ТАУР- 7-11 сентября 2015 года, Турин, Италия)

Выступления на рабочих совещаниях

XXVIII совещание по проекту КАТРИН:

2. С.В. Задорожный Status of Troitsk nu-mass setup

3. А.В. Лохов Statistical criteria for indications of heavy neutrinos XXIX совещание по проекту КАТРИН:

4. А.В. Лохов Influence on the response function from the elastic electron scattering in the source.

5. Н.А. Титов Final states distribution version and negative neutrino mass puzzle

4 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e»

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

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 (ЛНС, 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. На рисунке 1 представлены результаты экспериментов по измерению верхнего предела на относительную вероятность процессов идущих с нарушением лептонного квантового числа.

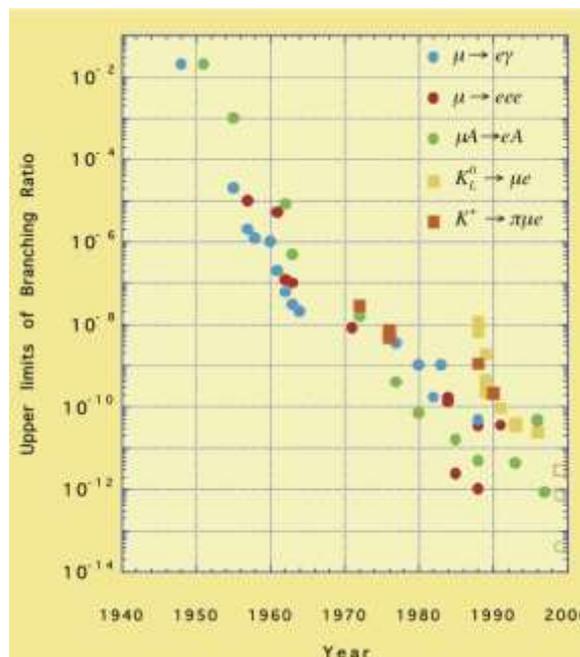


Рисунок 4.1 - Результаты экспериментов по измерению верхних ограничений трех мюонных и двух каонных процессов, идущих с нарушением лептонных чисел.

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

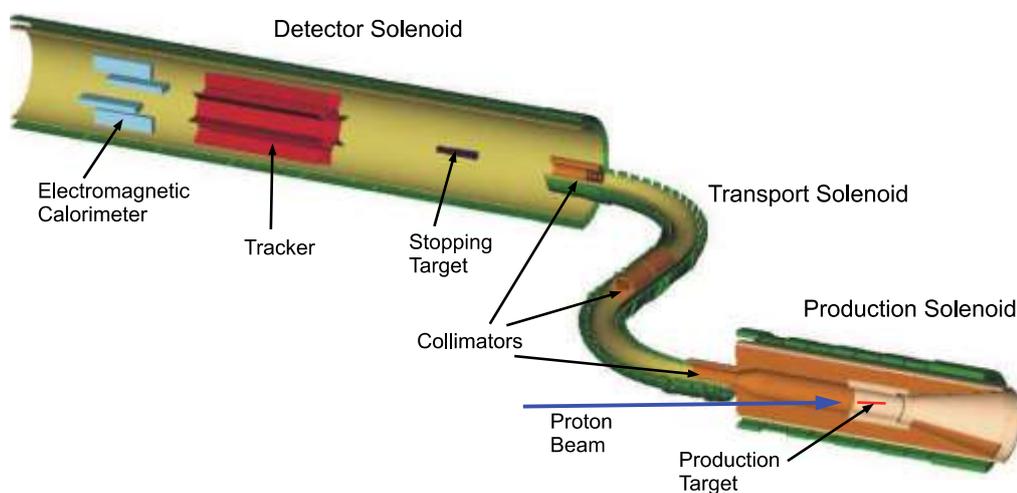


Рисунок 4.2 - Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре.

Состояние эксперимента «Mu2e» в 2015 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 утвержден бюджет следующей стадии CD-2/3 эксперимента комитетом DOE США в 2015 г. Планируется завершить стадию CD-2 в 2016 г. и переход к стадии CD-3 завершающей создание установки.

Разработка новой концепции (3in1) эксперимента Mu2e

Разработка новой концепции эксперимента (3in1) позволит вести поиск трех редких процессов ($\mu \rightarrow e$ конверсии, $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$) на одной установке с одним общим набором модулей детекторов. Переход от одного из трех экспериментов к другому осуществляется простой перестановкой модулей. Велись работы по разработке нового метод поиска редких мюонных процессов, основанного на использовании пульсирующего протонного пучка и объединении источника мюонов, системы формирования пучка и детектирующей части установки в одну магнитную систему с неоднородным полем. Результаты детального моделирования искомых процессов и основных фонов процессов показывает, что разработанный метод повышает чувствительность эксперимента по поиску процессов ($\mu \rightarrow e$ конверсии, $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$) по сравнению с существующим уровнем в 10^5 , 300 и 100 раз соответственно.

Исследования основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO

В рамках темы создана установка для исследования основных характеристик кристаллов LYSO, необходимых для прототипа калориметра эксперимента Mu2e. Кристалл LYSO состоит из следующих химических элементов $\text{LuY}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$. Экспериментальная установка с системой съема информации на основе КАМАК, показана на Рисунок 3. Установка создавалась с помощью отделов КОРЭ (О. Каравичев, В. Постоев), ОЭФ (Ю. Рябов) и лаборатории ЛФЯР (В. Недорезов, А. Русаков).

Использование двух фотоприемников для регистрации света в кристалле LYSO, позволяет провести измерения основного вклада в энергетическое разрешение с помощью радиоактивного источника. Измерение разницы $A_1 - A_2$ и суммы $A_1 + A_2$ амплитуд сигналов APD позволяет оценить стохастический вклад в разрешение калориметра, обусловленный флуктуациями фото статистики и шумами электроники, в области низких энергий. Измерение основных характеристик кристаллов LYSO сопряжено с трудностями, связанными с собственным свечением в кристалле от радиоактивных примесей редко земельного элемента Lu. Интенсивность собственных сцинтилляций составляет величину равную 500 Hz/cm^3 . Для исследуемого кристалла LYSO:Ce (95% Lu/ 5% Y) размером $3 \times 3 \times 5 \text{ cm}^3$, производства PROTEUS (USA), частота собственных сцинтилляций составляет величину - 18 kHz. Энергетический спектр этих сцинтилляций лежит в области до 1 МэВ.

Основную характеристику кристалла - энергетическое разрешение можно измерить при помощи радиоактивных гамма-источников с интенсивностью превышающих в несколько раз частоту собственных сцинтилляций или с помощью космических мюонов.

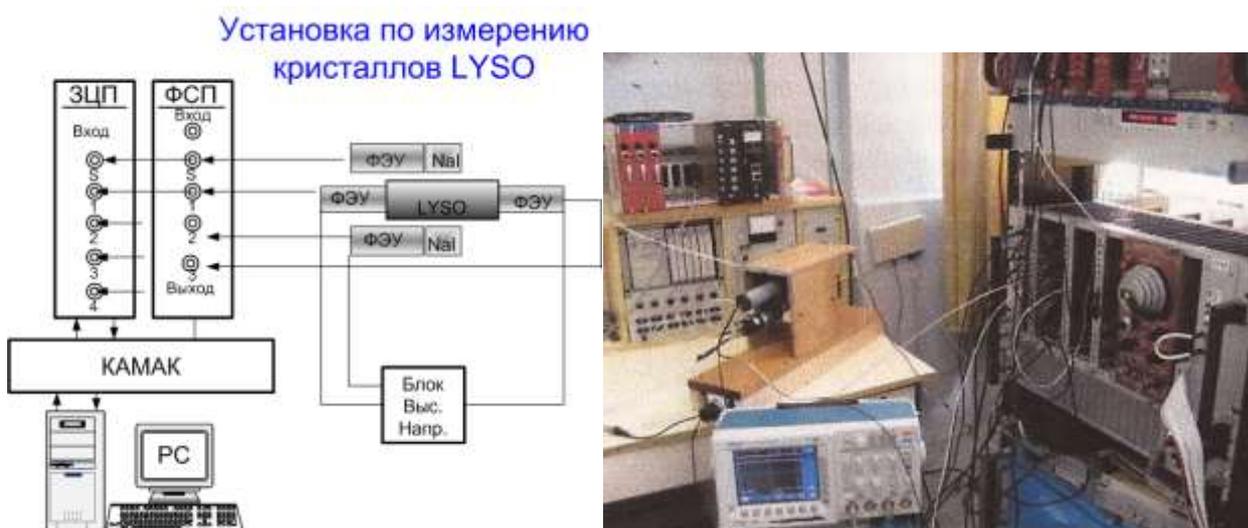


Рисунок 4.3 - Схема установки (слева) и внешний вид установки (справа) для исследования свойств кристаллов LYSO.

Использование APD позволит улучшить энергетическое разрешение калориметра практически в два раза, по сравнению с ФЭУ, за счет увеличения квантовой эффективности фотодетектора. Квантовая эффективность APD больше, чем фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в 3-3.5 раза и составляет величину равную 70-80%. Для работы с APD необходим быстрый малошумящий зарядо-чувствительного предусилитель-формирователь. На Рисунок 4 показана схема предусилителя и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.

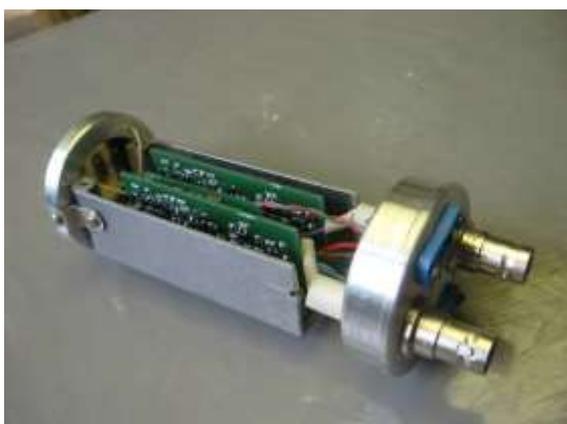
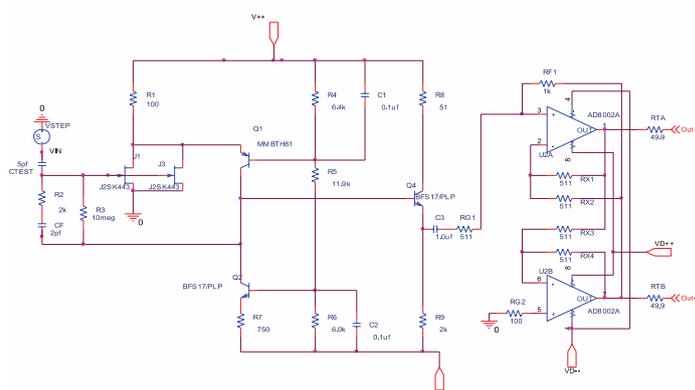


Рисунок 4.4 Схема предусилителя (слева) и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.

Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле, смоделированное с помощью GEANT4, хорошо описывается распределением Ландау с максимумом потерь равным 28 МэВ (Рисунок 4.5).

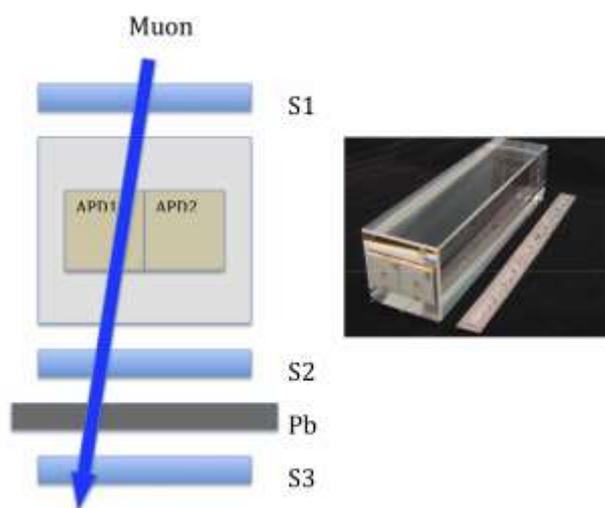
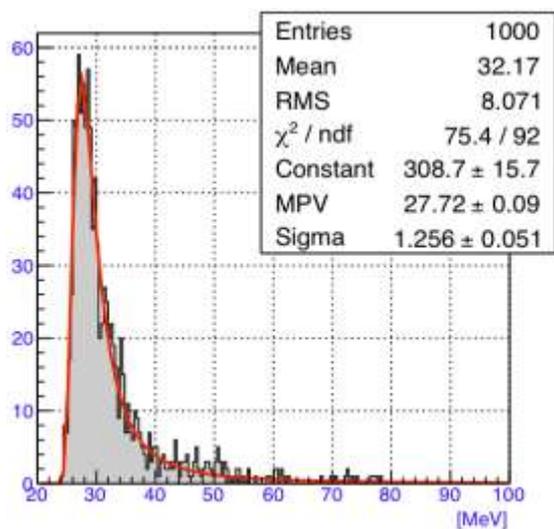


Рисунок 4.5 - Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле (а). Схема измерения разрешающей способности кристалла LYSO с помощью космических мюонов (б) и внешний вид кристалла LYSO с приклеенными APD1-2 (в).

Относительная разрешающая способность кристалла LYSO (σ_E/E) может быть оценена из спектра $(A1-A2)/(A1+A2)$ (Рисунок 6 б) и составляет величину равную $\sigma_E/E = 0.18\%/\sqrt{E}$, где E – наиболее вероятная энергия выделенная в кристалле мюоном равная 0.028 ГэВ.

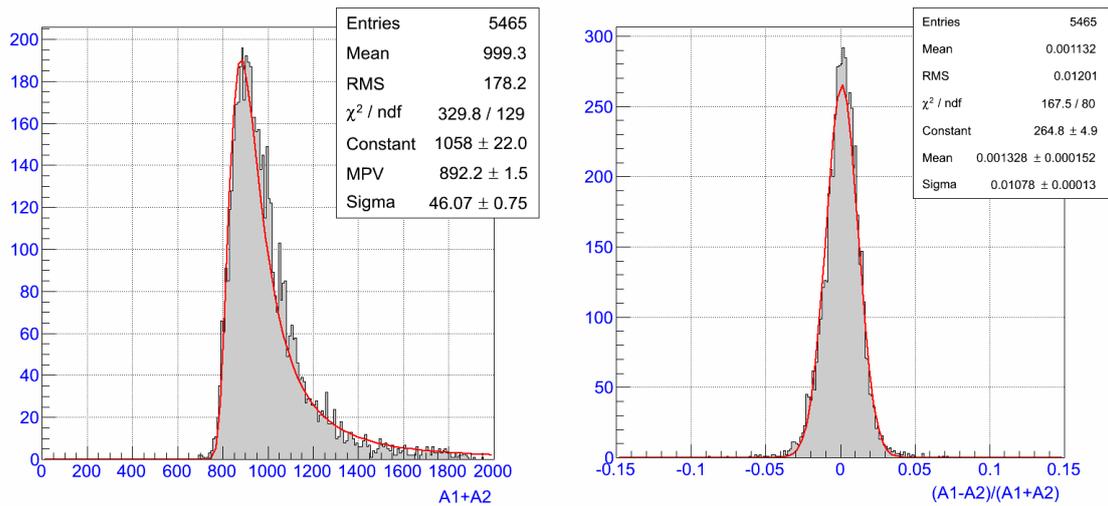


Рисунок 4.6 - Спектр суммы (а) и относительной разности (б) сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле.

Во втором квартале 2015 г. проводились работы по новому измерению энергетического разрешения кристалла LYSO (30x30x50 mm²) с лавинными фотодиодами (APD 10x10мм² Hamamatsu) с новым электронным блоком по оцифровке и обработке сигналов APDs для калориметра эксперимента Mu2e.

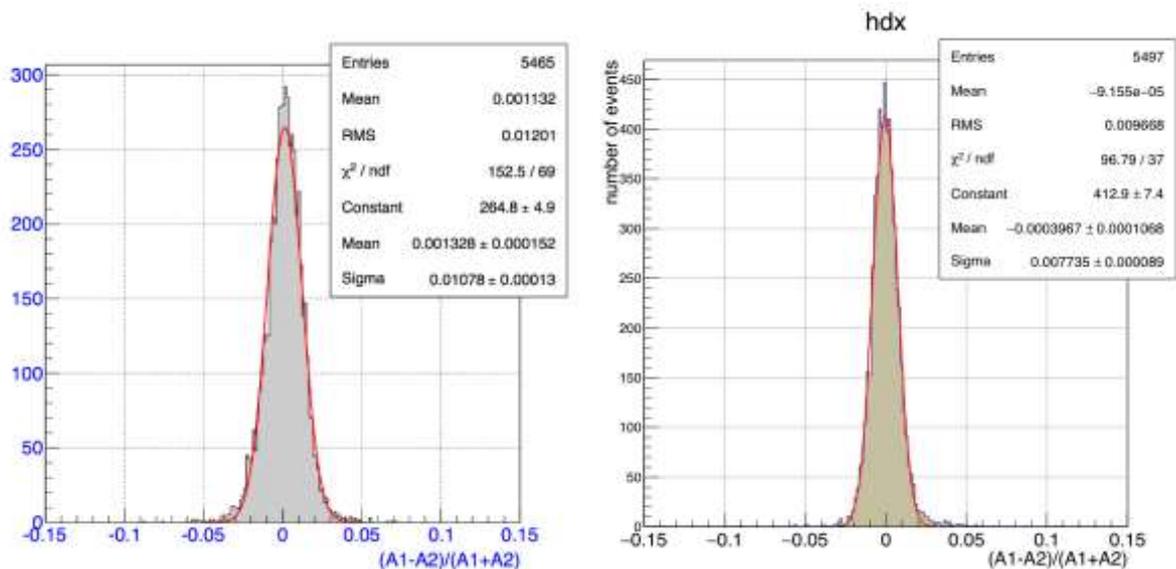


Рисунок 4.7 - Спектр относительной разности сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле LYSO с помощью АЦП LeCroy ADC 2249A (слева) и CAEN WDT 5742 (справа).

Новые измерения проводились с помощью современных электронных блоков по оцифровке формы сигналов с APDs, CAEN WDT 5742, которые существенно повышают точность измерения амплитуды и формы сигналов. Повышение точности измерения амплитуды с помощью блока WDT 5742 по сравнению с ADC 2249A связано с

использованием более точного метода определения амплитуды сигнала. Относительная разрешающая способность кристалла LYSO (σ_E/E) может быть оценена из спектра $(A1-A2)/(A1+A2)$ (Рисунок 7) и составляет величину равную $\sigma_E/E = 0.13\%/\sqrt{E}$, где E – наиболее вероятная энергия выделенная в кристалле мюоном равная 0.028 ГэВ, $A1$ и $A2$ амплитуды сигналов с APD1 и APD2, соответственно. Как видно из Рисунок7 измеренное энергетическое разрешение кристалла на 38% лучше, чем измерения ($\sigma_E/E = 0.18\%/\sqrt{E}$) проведенные ранее с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) LeCroy ADC 2249A.

4 Наиболее важные достижения в 2015 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.

4. Публикации в 2015 году

1. K. Afanciev, ... R. Djilkibaev et al. “Response of LYSO:Ce Scintillation Crystals to Low Energy Gamma-Rays”, Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 12, No. 2, pp. 319–324 2015.
2. R. Djilkibaev, O.Karavichev, V. Postoev “LYSO scintillator studies for a fast low-energy calorimeter” JINST 10, P03019, 2015.

5 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX

Руководитель темы, дфмн В.С. Пантуев

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 Брукхевенской 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 15-ти лет на ускорительном комплексе 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

Работы, проведённые на установке «PHENIX» в 2015 году

На установке успешно завершён очередной ремонт одной из дрейфовых камер. Камера, размер которой 2 на 4.5 метра, была вскрыта. Произведён визуальный осмотр проволоки. Все порванные нити были удалены по специально разработанной технологии. В октябре месяце проведена проверка электроники одной из камер. Обнаружены две неработающие карты электроники, которые были извлечены и отремонтированы. Камеры проверены как по высокому напряжению, так и по системе считывания и готовы к началу новых измерений в феврале 2016 года.

Наиболее важные достижения в 2015 году

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

5 Публикации

1. A. Adare et al., Measurements of elliptic and triangular flow in high-multiplicity $3\text{He}+\text{Au}$ collisions at $s_{NN}\sqrt{s}=200$ GeV. Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 14, 142301.

A. Adare et al., ϕ meson production in $d+\text{Au}$ collisions at $s_{NN}\sqrt{s}=200$ GeV. Phys.Rev. C92 (2015) 4, 044909.

2. A. Adare et al., Systematic study of charged-pion and kaon femtoscopy in Au + Au collisions at $s_{NN}\sqrt{s}=200$ GeV. Phys.Rev. C92 (2015) 3, 034914.

3. A. Adare et al., Systematic Study of Azimuthal Anisotropy in Cu+Cu and Au+Au Collisions at $sNN\sqrt{=62.4}$ and 200 GeV. Phys.Rev. C92 (2015) 3, 034913.
4. A. Adare et al., Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized p+p collisions at $s\sqrt{=200}$ GeV. Phys.Rev. D91 (2015) 3, 032001.
5. A. Adare et al., Search for dark photons from neutral meson decays in $p+p$ and $d + Au$ collisions at $sNN\sqrt{= 200}$ GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 3, 031901.
6. A. Adare et al., Cross section for bb^- production via dielectrons in d+Au collisions at $sNN\sqrt{=200}$ GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 1, 014907.
7. A. Adare et al., Centrality dependence of low-momentum direct-photon production in Au+Au collisions at $sNN\sqrt{=200}$ GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 6, 064904.
8. A. Adare et al., Measurement of K^0_S and K^*_0 in $p+p$, $d+Au$, and $Cu+Cu$ collisions at $sNN\sqrt{=200}$ GeV. Phys.Rev. C90 (2014) 5, 054905.
9. A. Adare et al., Heavy-quark production and elliptic flow in Au+Au collisions at $sNN\sqrt{=62.4}$ GeV. Phys.Rev. C91 (2015) 4, 044907.
10. A. Adare et al., Measurement of long-range angular correlation and quadrupole anisotropy of pions and (anti)protons in central $d+Au$ collisions at $sNN\sqrt{=200}$ GeV. Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 19, 192301.
11. N.N. Ajitanand et al., Comparison of the space-time extent of the emission source in $d+Au$ and Au+Au collisions at $sNN=200$ GeV. Nucl.Phys. A931 (2014) 1082-1087.
12. A. Adare et al., Measurement of $Y(1S+2S+3S)$ production in $p+p$ and Au+Au collisions at $sNN\sqrt{=200}$ GeV/ Phys.Rev. C91 (2015) 2, 024913.

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 01.2.00 305485

Руководители темы: внс, дфмн Ю.В. Рябов и снс, дфмн Ю.В. Григорьев

В соответствии с планом на 2015г по исследованию нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролета на установках НСВП-ТРОНС ОЭФ ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР-2М ЛНФ ОИЯИ группа ТРОНС ЛИРП ОЭФ (научный руководитель Ю.В.Рябов, исполнители: Ю.В.Григорьев, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, А.В.Новиков-Бородин, Е.В.Хаустов, Д.В.Хлюстин) проводила проверку работоспособности спектрометрической аппаратуры, детекторов нейтронов и гамма-лучей, а также вела работу по созданию нового быстродействующего жидкостного шестисекционного (n, γ)-детектора на основе растворителя ЛАБ с гадолиниевым поглотителем нейтронов. Проведена работа по созданию многосекционного спектрометра на основе 8 кристаллов NaI на нейтронном пучке 50м пролетной базе импульсного нейтронного источника РАДЭКС, что позволит использовать спектрометрию множественности излучений в экспериментах по радиационному захвату и делению. К сожалению, из-за отсутствия финансовой поддержки не удалось реализовать технологий имеющейся проект удлинения двух пролетных баз и строительства павильона для детекторов и накопителей информации. Учитывая, что реализация проекта позволило бы улучшить энергетическое разрешение и фоновое условия в измеряемых спектрах, следует невыполненные планы 2015г перенести на 2016г или поздние сроки. В связи с удачной проводкой протонного пучка линейного ускорителя ММФ в начале 2016г. в зд. 25 на импульсный нейтронный источник РАДЭКС и свинцовый куб СВЗ \square 100 реально выполнить намеченные планы для фундаментальных и прикладных ядерно-физических исследований, в том числе: нейтрон-нейтронных и нейтрон-электронных взаимодействий и получения нейтрон-ядерных величин, необходимых для внедрения в практику передовых высоких технологий

Проведены расчеты характеристик предлагаемого времяпролетного спектрометра в комбинации со спектрометром по времени замедления СВЗ \square 100, что позволяет более эффективно использовать нейтронный комплекс ММФ ИЯИ.

В рамках совместной работы ИЯИ г.Троицк и ОИЯИ г.Дубна проведена модернизация экспериментальной аппаратуры, что позволяет вести измерение времяпролетных спектров с высоким разрешением на пролетных базах импульсного источника нейтронов ИРЕН ЛНФ ОИЯИ.

Сделаны 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 нейтронотвод в виде стальной вакуумной трубы длиной 4м 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 возможных других мультинейтронных нейтральных ядер. Проводилась работа по восстановлению установки для изучения сильновозбужденных 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.

Для исследования оптических и акустических спектров колебания и дважды дифференциальных сечений неупругого и упругого рассеяния тепловых нейтронов в конденсированных средах подготавливался проект многоугольного спектрометра рассеяния нейтронов на конденсированных средах.

По результатам работы подготовлены и выпущены следующие публикации за 2014–2015гг:

1. Ю.В.Григорьев, И.А.Васильев, О.Н.Либанова, Ю.В.Рябов, Д.В.Хлюстин. Исследование резонансной структуры нейтронных сечений и их интегральных характеристик на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС, ИН–06. - Препринт ИЯИ, Троицк, (в печати)
2. А.А.Алексеев, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Ю.В.Рябов. Комбинированный спектрометр СВЗ–100 и TOF метод. Препринт ИЯИ РАН, 1413/2015, ноябрь 2015, Москва 2015.
3. A.A.Alekseev, Yu.V.Grigoriev, V.A.Dulin, O.N.Libanova, A.V.Novikov-Borodin, V.L.Matushko, Zh.V. Mezentseva, Yu.V.Ryabov. The TOF method for the LSDS-100 spectrometer. – Proc. Int. Seminar ISINN-23, Dubna, JINR (in print).
4. 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. The TOF method for the LSDS-100 spectrometer. - EPrint arXiv: <http://arxiv.org/abs/1510.07622>, 26 Oct. 2015.
5. Ю.В.Григорьев, Д.В.Хлюстин. Введение в нейтронную ядерную физику (методическое пособие для студентов МФТИ). - Препринт ИЯИ, Троицк (в печати,).

6. Ю.В Григорьев (совместно с Д.В.Хлюстином) прочитал курс лекций: Введение в нейтронную ядерную физику студентам МФТИ с 1 сентября по 21 декабря 2015г.
7. Ю.В Григорьев осуществлял научное руководство над н.с. Д.В.Хлюстиным, как соискателем ученой степени кандидата наук.
8. A.V.Novikov-Borodin. Set Theory as Unified Scheme for Physics. - E-Print arXiv: <http://arXiv.org/abs/0901.3962>, 8 Jan 2015.

7 Исследования по физике фотоядерных взаимодействий

Руководитель темы: д.ф.-м.н., профессор Владимир Георгиевич Недорезов

За последние годы изучение электромагнитных взаимодействий ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Это включало в себя прецизионное измерение амплитуд фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах, изучение спиновых структурных функций и формфакторов нуклонов, исследование коллективных возбуждений ядер (гигантских резонансов), фото – и электроделения ядер. Эксперименты выполнялись на пучках реальных и виртуальных фотонов, релятивистских ионов и фемтосекундных лазеров с большой импульсной мощностью. На этой основе развивались прикладные исследования с использованием фотоядерных методов для создания систем безопасности, детектирования взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностики и др.

Приведенные результаты относятся к следующим направлениям исследований:

1. Электромагнитные взаимодействия нуклонов и ядер; свойства адронов и их связанных состояний в ядерной среде (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра).
2. Свойства гигантских резонансов в ядрах.
3. Нелинейные эффекты квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров.
4. Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.
5. Источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8.

Результаты:

1. Исследованы реакции множественного рождения мезонов и мультифрагментации ядер углерода, а также их полные сечения фотопоглощения в области энергий фотонов от 700 до 1500 МэВ. Измерена вероятность вылета нуклонов различной множественности вплоть до полного развала ядра углерода на отдельные нуклоны (рисунок 2.1). Полученные данные интерпретированы в рамках теоретической модели RELDIS.

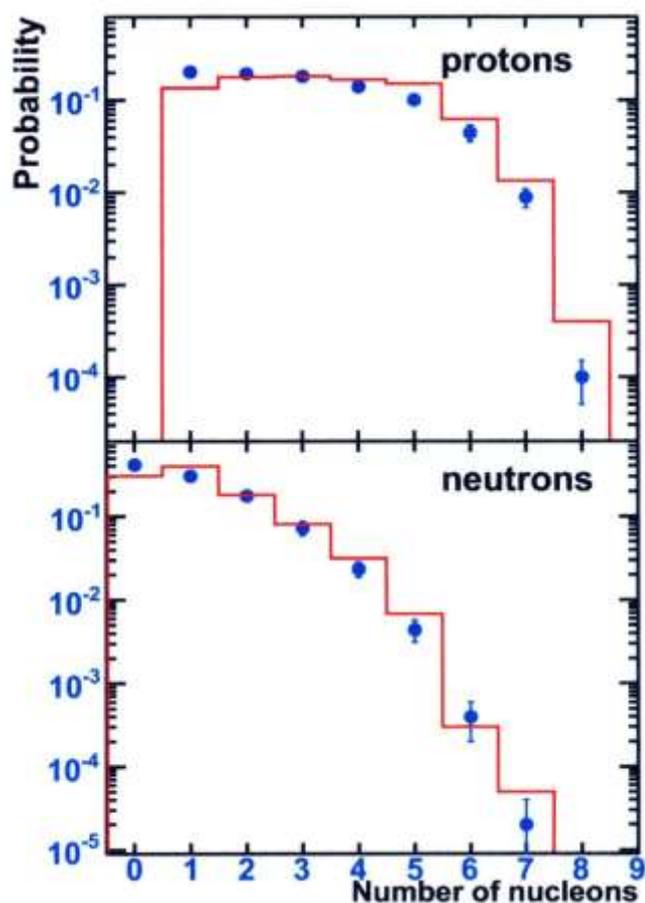


Рисунок 7.1 - Вероятность распада ядра углерода под действием фотонов с энергией 700 – 500 МэВ на протоны и нейтроны с разной множественностью. Точки – эксперимент, гистограмма – расчет по каскадно-испарительной модели RELDIS.

Проведена сборка и наладка основных элементов детектора BGO-OD в эксперименте на ускорителе ELSA (Бонн, Германия). Проведены пучковые испытания и получены предварительные данные по фоторождению мезонов и фрагментации ядер при энергии фотонов до 4 ГэВ.

2. В рамках задачи «полного опыта» в фоторождении мезонов на нуклонах получены первые в мире данные по спиновым асимметриям для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ при энергиях фотонов от 1050 до 1450 МэВ. Измерения выполнены международной коллаборацией A2 на ускорителе MAMI C с использованием детектора Crystal-Ball/TAPS и протонной поляризованной мишени ОИЯИ-ИЯИ. Полученные данные подтверждают предположение о доминировании в этой реакции амплитуды $\Delta 3/2^-$. Результаты чувствительны к небольшим вкладам от других парциальных волн.

3. Коллаборацией А2 на ускорителе МАМІ С выполнены измерения асимметрий комптоновского рассеяния на протоне в области энергий Δ -резонанса с использованием пучка циркулярно/линейно поляризованных фотонов и продольно/поперечно поляризованной протонной мишени, созданной сотрудниками ОИЯИ и ИЯИ РАН. Из данных измерений впервые получены экспериментальные значения всех четырех спиновых поляризуемостей протона, которые описывают реакцию спина протона на воздействие налетающего поляризованного фотона.

4. На ускорителе МАМІ С выполнены измерения дифференциальных сечений фоторождения ω -мезонов на протоне при энергиях налетающих фотонов от порога реакции $\gamma p \rightarrow \omega p$ до 1400 МэВ в пределах полного углового диапазона. Высокое качество данных вблизи порога открывает доступ к ряду интересных физических аспектов процесса. В частности, получена оценка длины ωN -рассеяния.

5. Исследовано фоторождение $\pi\eta$ -пар на нуклонах от порога до энергии налетающих фотонов 1.4 ГэВ. Впервые выполнены измерения квазисвободных реакций $\gamma p \rightarrow p\pi^0\eta$, $\gamma n \rightarrow n\pi^0\eta$, $\gamma p \rightarrow p\pi^+\eta$ и $\gamma n \rightarrow n\pi^-\eta$ на нуклонах, связанных в дейтроне. Чтобы исследовать эффекты взаимодействия в конечном состоянии, были также изучены соответствующие реакции на протонной мишени. Для конечного состояния $\pi^0\eta$ было также исследовано когерентное рождение в реакции $\gamma d \rightarrow d\pi^0\eta$. Эксперименты проведены на пучке меченых фотонов ускорителя МАМІ с использованием 4 π -электромагнитного калориметра на основе детекторов Crystal Ball и TAPS. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями изобарной модели.

6. На пучке меченых фотонов от ускорителя МАМІ С коллаборацией А2 измерены дифференциальные сечения реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ вплоть до энергии в системе центра масс $W=1.9$ ГэВ. Новые результаты, полученные с высоким энергетическим и угловым разрешением, увеличивают существующую базу данных по фоторождению π^0 на ~47%. Благодаря беспрецедентной статистической точности и покрытию полного углового диапазона результаты чувствительны к высшим парциально-волновым амплитудам.

7. Измерены полные сечения, угловые распределения и распределения инвариантных масс для фоторождения $\pi^0\pi^0$ пар на свободных протонах и на нуклонах, связанных в дейтроне. Измерения выполнены на ускорителе МАМІ при энергиях энергетически меченых фотонов до 1400 МэВ. Результаты по дифференциальным сечениям для свободных и квазисвободных протонов почти идентичны по форме, но отличаются по абсолютной величине на $\leq 15\%$, что указывает на присутствие эффектов взаимодействия в конечном состоянии. Данные для квазисвободных нейтронов аналогичны протонным данным в области второго резонанса, но различаются при более

высоких энергиях. Проведено сравнение с расчетами по двухпионной модели MAID и модели связанных каналов Бонн-Гатчина.

8. Выполнены измерения эффективности регистрации нейтронов с энергией до 400 МэВ в кристаллах NaI детектора Crystal Ball. Данные об эффективности получены из исследования фоторождения π^0 -мезонов на дейтериевой мишени с использованием пучка энергетически меченых фотонов от ускорителя МАМІ.

9. Предложен проект вывода поляризованных гало-антипротонов из накопителя установки FAIR с помощью изогнутого кристалла кремния и магнитного септума для проведения экспериментов с твердой поляризованной мишенью. Для мишени длиной 10 см расчетная светимость составляет $10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

10. Содружеством ИЯИ РАН, НИЯУ ("МИФИ") и Cyclotron Institute, Texas A&M University (США) проведены работы по изучению высокоэнергетических изоскалярных монополярных (ИСМ) возбуждений типа частица-дырка (p-h) в средне-тяжелых ядрах с целью определения коэффициента сжимаемости ядерной материи. В рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели изучена усредненная по энергии изоскалярных монополярных возбуждений двойная переходная плотность для ядра ^{208}Pb в широком энергетическом интервале, включающем изоскалярный гигантский монополярный резонанс и его обертоны. Проанализированы усредненные по энергии силовые функции указанных гигантских резонансов. Изучены теоретические аспекты возможности восстановления унитарности, нарушаемой в модели вследствие использования оптического потенциала.

11. С помощью γ - активационной методики на тормозном пучке с максимальной энергией 55 МэВ исследовано фоторасщепление изотопов титана. Определены выходы и интегральные сечения фотопротонных реакций на изотопах $^{47, 48, 49, 50}\text{Ti}$. Показано, что расчеты по программе TALYS, не учитывающей изоспиновую структуру ГДР, не описывает выход фотопротонных реакций на тяжелых изотопах титана $^{49, 50}\text{Ti}$.

12. Изучены общие отличия в сечениях фотоядерных реакций и параметрах гигантского резонанса в ядрах, связанные с использованием спектров тормозных фотонов Шиффа, Зельцера и Бергена. Показано, что структура в сечениях исследуемых реакций зависит также от типа мониторинга пучков.

13. В диапазоне энергий фотонов от 4 до 46 МэВ измерены сечения реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$. Показано, что энергии фотонов около 27 МэВ второй пик отсутствует. Уточнены параметры пика вблизи порога реакции $^{115}\text{In}(\gamma, n)$. Рассмотрены возможности использования этой реакции для мониторинга потоков тормозных фотонов в гамма-активационных работах.

14. Разработана методика выделения вклада изовекторного электрического квадрупольного гигантского резонанса на фоне доминирующего изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса при измерении асимметрии вперед–назад вылета быстрых нейтронов в реакции (γ, n) на изотопах свинца с помощью пороговых нейтронных детекторов.

15. Для сечений реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$, используемых в разрабатываемом фотоядерном методе обнаружения скрытых взрывчатых веществ, проведены компиляция известных экспериментальных и модельно-расчетных данных, а также самостоятельные расчеты по программам TALYS и EMPIRE. Получены указания на существенное занижение уровней модельно рассчитанных величин по сравнению с доступными результатами измерений.

16. В рамках моделей взаимодействия излучения с веществом, реализованных в программах GEANT и MCNP, проведены расчеты эмиссии γ -квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах радиоизотопов ^{12}N и ^{12}B , образованных в этих мишенях.

16. Разработана методика фотоядерного получения и радиохимического извлечения образуемого в мишени из металлического цинка естественного изотопного состава в результате реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$ радионуклида ^{67}Cu , применяемого в медицине для радиоиммунотерапии.

17. Разработана методика экспериментального определения выходов реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ при $E_e \sim 50$ МэВ с учетом выхода фоновой реакции $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$.

18. Совместно с ЛАЯ и ЛНИ ИЯИ РАН создана компьютерная модель фото-нейтронного W-Be-источника тепловых нейтронов, проведены исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в центре замедлителя. Оптимизация параметров источника выполнена с помощью программы MCNP5 (Monte-Carlo-N-Particle), моделирующей процессы взаимодействия, гамма-квантов, электронов и нейтронов с конструкционными материалами источника. Оценены значения потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри и снаружи источника. Показана возможность достижения плотности тепловых нейтронов в измерительной полости порядка 10^8 нейтрон/см²/с.

19. С учетом результатов моделирования изготовлен прототип фото-нейтронного W-Be- источника тепловых нейтронов (рис.2). В источнике предусмотрены внутренняя полость для облучения образцов тепловыми нейтронами, и каналы для вывода

тепловых и быстрых нейтронов из источника. Проведен монтаж источника на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Для оптимизации параметров источника проведены дополнительные работы: установлен дополнительный вакуумпровод, проведена юстировка пучка, установлено дополнительное охлаждение вольфрамовой мишени. Проведены пробные сеансы на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5. Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника была оценена по активации образца Си-64 и составила ~ 107 нейтрон/см²с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выводном канале источника.



Рисунок 7.2 - Фотонейтронный источник в процессе монтажа на ускорителе ЛУЭ-8-ИЯИ РАН.

7 ПУБЛИКАЦИИ:

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати)

1. P.P.Martel, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurements of Double-Polarized Compton Scattering Asymmetries and Extraction of the Proton Spin Polarizabilities. Phys. Rev. Lett. 114, 112501 (2015) .
2. M.Martemianov, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A new measurement of the neutron detection efficiency for the NaI Crystal Ball detector. Journal of Instrumentation JINST, 10, T04001 (2015).
3. I.I.Strakovsky, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of the ω meson on the proton near threshold. Phys. Rev. C 91, 045207 (2015).

4. J.R.M. Annand, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of target and beam-target asymmetries in the $\gamma p \rightarrow \pi^0 np$ reaction. Phys. Rev. C 91, 055208 (2015).
5. A.Kaeser, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. The isospin structure of photoproduction of $\pi\eta$ pairs from the nucleon in the threshold region. Phys. Lett. B 748, 244 (2015).
6. P. Adlarson, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of π^0 photoproduction on the proton at MAMI C. Phys. Rev. C 92, No. 2, 024617 (2015).
7. M. Dieterle, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of π^0 -pairs off protons and off neutrons. Eur. Phys. J. A, 51, 142 (2015).
8. S.Schumann, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Threshold π^0 photoproduction on transverse polarized protons at MAMI. Phys. Lett. B (in print).
9. М.Л.Горелик, Ш.Шломо, Б.А.Тулупов, М.Г.Урин "О свойствах высокоэнергичных изоскалярных монополярных возбуждений в среднетяжелых сферических ядрах", ЯФ, т. 78, стр. 595, 2015.
10. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin "Properties of high-energy isoscalar monopole excitation in medium-heavy mass spherical nuclei", Phys.At.Nucl., v.78, p.551, 2015.
11. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin "On Properties of High-Energy Isoscalar Monopole (p-h)-Type Excitations in Medium-Heavy Mass Spherical Nuclei" , EPJ Web of Conferences (принято к печати).
12. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin "Investigation of the energy-averaged double transition density of isoscalar monopole excitations in medium-heavy mass spherical nuclei", Physical Review (послано в печать).
13. Л.З.Джилавян, А.М.Лапик, Б.А.Тулупов "Разделение вкладов изовекторных $E2$ и $E1$ гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами", ЭЧАЯ (послано в печать).
14. С.С. Бельшев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, А.А. Кузнецов, В.Н. Орлин, К.А. Стопани. «Фотоядерные реакции на изотопах титана». Ядерная физика, 2015, том 78, №3-4, с. 246–255.
15. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, A.A. Kuznetsov, V.N. Orlin, and K.A. Stopani. "Photonuclear Reactions on Titanium Isotopes". Physics of Atomic Nuclei, 2015, Vol. 78, No.2, pp. 220–229.
16. Л.З. Джилавян. «Экспериментальные параметры изовекторного $E1$ -гигантского резонанса в зависимости от корректности учета спектров тормозных фотонов». Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 79, № 4, с. 581–586.
17. L. Z. Dzhilavyan. "Experimental Parameters of the Isovector $E1$ Giant Resonance, Depending on the Correctness of Bremsstrahlung Photon Spectra Calculations". Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 4, pp. 537–542.
18. Л.З. Джилавян. «Сечение реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ в области $E1$ гигантского резонанса». Ядерная физика, 2015, том 78, №7-8, с. 668–677.
19. L.Z. Dzhilavyan. "Cross Section for the Reaction $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ in the Region of the $E1$ Giant Resonance". Physics of Atomic Nuclei, 2015, Vol. 78, No. 5, pp. 624–633.

20. Л.З. Джилавян. «Возможность разделять изовекторные $E1$ и $E2$ гигантские резонансы при измерении асимметрии вылета нейтронов с помощью пороговых детекторов» Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 80, № 3.

21. О.И. Ачаковский, С.С. Бельшев, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Сечения реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ ». Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 80, № 3.

22. С.С. Бельшев, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Эмиссия γ -квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах образованных в этих мишенях ^{12}N и ^{12}B ». Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 80, № 3.

23. V.Nedorezov, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A.Turinge, N.Rudnev e.a. (GRAAL collaboration), Disintegration of ^{12}C nuclei by 700–1500 MeV photons, Nucl.Phys. A940 (2015) 264-278.

24. P. Levi Sandri, V.Nedorezov, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A.Turinge, N.Rudnev. e.a. First Measurement of the Σ Beam Asymmetry in η' Photoproduction off the Proton near Threshold, Eur.Phys.J. A51 (2015) 7, 77.

25. А.А.Туринге*, А.М.Лапик, А.М.Мушкаренко, В.Г.Недорезов N.Rudnev. Fragmentation of Light Nuclei by Intermediate Energy Photons. , Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 54-59.

26. К.А.Ivanov, A.V.Rusakov, A.A.Turinge, V.Nedorezov e.a. (9 authors). Novel photonuclear techniques based on femtosecond lasers, Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 54-59.

27. V. Vegna, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A. Ignatov, A.Turinge, N.Rudnev, e.a. . Measurement of the Σ beam asymmetry for the ω photo-production off the proton and the neutron at GRAAL. Phys.Rev. C91 (2015) 6, 065207.

- доклады на конференциях и школах

1. Г.М.Гуревич. Измерение спиновых поляризуемостей протона. Восьмые Черенковские чтения. Москва, ФИАН, 14.04.2015.

2. G.M.Gurevich. First measurement of the proton spin polarizabilities. 65 International conference NUCLEUS-2015 (Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015). Book of abstracts, p. 54 (2015).

3. G.M.Gurevich, A.A.Lukhanin, F.Maas, Yu.A.Plis, A.O.Sidorin, A.V.Smirnov, A.Thomas, Yu.A.Usov. On the feasibility of using an extracted polarized antiproton beam of the HESR with a solid polarized target. XVI International Workshop in Polarized Sources, Targets and Polarimetry. PSTP2015, Ruhr-University Bochum, Germany, 14-18 September 2015.

4. G.M.Gurevich, V.P.Lisin. Measurement of the proton spin polarizabilities at MAMI. XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions “EMIN-2015” Moscow, October 5-8, 2015.

5. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin. Unitarity of the particle-hole dispersive optical model. 65 International conference NUCLEUS-2015 (Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015). Book of abstracts, p. 145 (2015).

6. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin. On Properties of High-Energy Isoscalar Monopole (p-h)-type Excitations in Medium-Heavy Mass Spherical Nuclei, The International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" NSRT-2015, Dubna, Russia. Book of Abstracts, p.38.

7, M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin. Properties of High-Energy Isoscalar Monopole Excitations in Medium-Heavy Mass Spherical Nuclei. XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions “EMIN-2015” Moscow, October 5-8, 2015.

8. S.S.Verbitsky, L.Z.Dzhilavyan, A.M.Lapik, V.N.Ponomarev, A.V.Rusakov, B.A.Tulupov. Scintillation Spectrometer Ability for Forward-to-Backward Asymmetry Measuring at Neutron Emission in (γ, n_0) -Reactions. XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions “EMIN-2015” Moscow, October 5-8, 2015.

9. L.Z. Dzhilavyan. “Possibilities to separate IVE1 & IVE2 giant resonances by forward-to-backward asymmetries measured with neutron threshold detectors”. Book of abstracts of LXV International Conference “Nucleus 2015” (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg State University. Saint-Petersburg. 2015. P. 109.

10. O.I. Achakovskiy S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, Yu.N. Pokotilovski. “Cross sections of the reactions $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ ”. Book of abstracts of LXV International Conference “Nucleus 2015” (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg State University. Saint-Petersburg. 2015. P. 109.

11. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, Yu.N. Pokotilovski. “Emission of γ -quanta, electrons, positrons from characteristic targets at decays of produced in the targets ^{12}N and ^{12}B ”. Book of abstracts of LXV International Conference “Nucleus 2015” (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg State University. Saint-Petersburg. 2015. P. 269.

12. P.A. Алиев, С.С. Бельшев, В.В. Ханкин, А.А. Кузнецов, Г.С. Алешин, А.Б. Приселкова, Л.З. Джилавян, С.Н. Калмыков, Б.С. Ишханов. Возможности фотоядерного получения медицинских радионуклидов. VIII Всероссийская конференция по радиохимии «Радиохимия – 2015 (г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.)», Секция 7 «Ядерная медицина». Тезисы докладов. С. 430.

13. L.Z. Dzhilavyan. “About yield measuring for the reactions $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ and $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ ”. Proceedings of the XIV International Seminar on ElectroMagnetic Interactions of Nuclei (EMIN – 2015, October 5-5 Moscow, Russia). INR RAS, Moscow, 3 pp.

14. B.Bantes, V.Nedorezov, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, N.Rudnev e.a. The BGO Calorimeter of BGO-OD Experiment. , J.Phys.Conf.Ser. 587 (2015) 1, 012042.

15. V.Nedorezov. Multifragmentation of nuclei: new experimental approaches and results, PoS BaldinISHEPPXXII (2015) 042.

16. I.A.Pshenichnov, V.Nedorezov, A.Turinge, Multifragment break-up of ^{12}C in photonuclear reactions: a theorist's point of view, in PoS BaldinISHEPPXXII (2015) 046.

17. Andreev A.V, Ilic R.D., Konobeevsky E.S., Latysheva L.N., Sobolevsky N.M., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. Optimization of a Photoneutron W-Be-source of thermal neutrons. Тезисы доклада на Международной конференции «Ядро 2014», Минск, 2014 г.

18. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Gromov A.V., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Solodukhov G.V., Zuyev S.V./ W-Be PHOTONEUTRON SOURCE OF INR RAS // LXV International Conference on Nuclear Physics «Nucleus 2015. New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies». June 29 – July 3, 2015, Peterhof, Saint-Petersburg.

19. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Konobeevski E.S., Pletnikov E.V., Sitnikov N.M., Zuyev S.V. / NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS OF AEROSOL FILTERS AT PHOTONEUTRON SOURCE OF INR RAS // LXV International Conference on Nuclear

Physics «Nucleus 2015. New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies». June 29 – July 3, 2015, Peterhof, Saint-Petersburg.

20. A.Andreev¹, Yu.Burmistrov¹, A.Gromov¹, R.Ilić², E.Konobeevsky¹, E.Koptelov¹, L.Latysheva¹, M.Mordovskoi¹, V.Ponomarev¹, S.Potashev¹, A.Rogov³, S.Sabinin¹, S.Sidorkin¹, N.Sobolevsky¹, G.Solodukhov¹, V.Tishin¹, S.Zuyev¹ «Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (γ, n) reactions»
1Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia 2"VINČA" Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia 3Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. NUFRA2015, Kemer, Turkey, October 2015.

препринты

1. M.Martemianov, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A new measurement of the neutron detection efficiency for the NaI Crystal Ball detector. arXiv: 1502.07317v1[physics.ins-det].

2. P. Adlarson, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of π^0 photoproduction on the proton at MAMI C. arXiv: 1506.08849 [hep-ex].

3. Л.З. Джилаван. «Возможности разделять IVE1 и IVE2 гигантские резонансы при измерении асимметрии вперед-назад вылета нейтронов с помощью пороговых детекторов» Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1402/2015. 1402/2015, июнь 2015.

4. С.С. Вербицкий, Л.З. Джилаван, А.М. Лапик, В.Н. Пономарев, А.В. Русаков, Б.А. Тулупов. Об измерении асимметрии вперед-назад вылета нейтронов в реакциях (γ, n_0) с помощью сцинтилляционных спектрометров. Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1411/2015, октябрь 2015.

5. О.И. Ачаковский, С.С. Бельшев, Л.З. Джилаван, Ю.Н. Покотилковский. «Сечения реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ и эмиссия γ -квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах образованных в них ^{12}N и ^{12}B . Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1399/2015, 1399/2015, март 2015.

6. Л.З. Джилаван. Проект измерений на ЛУ-50 выходов реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$. Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1400/2015, 1400/2015, март 2015.

Проведенные мероприятия:

XIV Международный семинар «Электромагнитные взаимодействия ядер – EMIN-2015», 10-12 октября 2015 г., Москва, 120 участников.

8 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский

Настоящий проект направлен на экспериментальное исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия, и в частности, механизмов nn -корреляций в малонуклонных системах. Основной целью физики малонуклонных систем на протяжении последних 40 лет ее развития была попытка строго количественно описать разнообразные процессы в малонуклонных системах на основе современных высокоточных $2N$ и $3N$ взаимодействий с использованием уравнений Фаддеева (УФ). Однако оказалось, что во многих случаях наблюдаются сильные расхождения экспериментальных данных с результатами наиболее полных и точных на сегодня Фаддеевских расчетов.

В частности, такие расхождения были обнаружены в реакции nd -развала в кинематике нейтрон-нейтронного квазисвободного рассеяния (КСР) при энергии 25 МэВ. Оказалось, что экспериментальные сечения nn -КСР превышают теоретические оценки на $\sim 18\%$, при этом теория хорошо описывает сечения np -КСР, измеренные в той же кинематике КСР. Подобная критическая ситуация обнаружена также в данных для nd - и pd - развала в “Space Star” кинематике. Оказалось, что экспериментальные данные для pd и nd развала сильно отличаются друг от друга, тогда как теоретические сечения развала оказываются почти одинаковыми и не совпадают с экспериментальными данными.

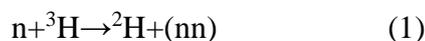
Возможное объяснение этих расхождений состоит в существенном усилении в системах ${}^3\text{H}(pnn)$ и ${}^3\text{He}(ppn)$ nn - и pp -корреляций в поле третьего нуклона за счет предполагаемого существования в этих системах нестатических и зависящих от относительного импульса парных и трехчастичных сил. В этом случае частичная фокусировка двух тождественных нуклонов в поле третьего, нетождественного, может приводить к парным корреляциям тождественных нуклонов притягивающего характера в спин-синглетном 1S_0 -состоянии, т.е. сверхпроводящего типа. Основная идея предлагаемых нами экспериментов состоит в том, что если из ${}^3\text{H}$ быстро удалить протон, то наблюдаемый характер импульсных распределений “оставшейся” nn пары не должен измениться. И можно, рассчитывать, что измеренные nn -корреляции, в частности энергии nn - синглетного состояния окажутся не те, которые присущи свободным nn - системам.

В настоящем проекте предлагается исследование реакции подхвата протона из ядра ${}^3\text{H}$ - $n+{}^3\text{H}\rightarrow{}^2\text{H}+(nn)$, а также реакций $n+{}^2\text{H}\rightarrow{}^1\text{H}+(nn)$ и $d+{}^2\text{H}\rightarrow(pp)+(nn)$ с регистрацией как заряженной частицы ${}^2\text{H}({}^1\text{H}, pp)$, так и нейтронов от развала синглетного nn 1S_0 состояния. В экспериментах будет проведено прямое определение энергии nn - квазисвязанного синглетного 1S_0 состояния в различных реакциях и на основе сравнения

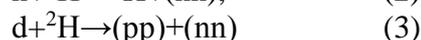
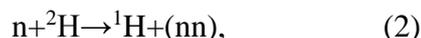
этих энергий и их анализа проведены оценки степени *nn*-корреляций в различных реакциях и определен механизм самих этих корреляций.

8 Основные результаты

В рамках темы предлагается исследование как реакции подхвата протона из ядра ${}^3\text{H}$



так и реакций



с регистрацией как заряженной частицы ${}^2\text{H}$, ${}^1\text{H}$ или *pp*, так и нейтронов от развала синглетного *nn* 1S_0 состояния.

В эксперименте будет проведено прямое определение энергии *nn*-квазисвязанного синглетного 1S_0 состояния в различных реакциях и на основе сравнения этих энергий и их анализа проведены оценки степени *nn*-корреляций в различных реакциях и определен механизм самих этих корреляций. При исследовании реакции (2) в ядре мишени ${}^3\text{H}$ может изначально существовать коррелированная *nn*-пара, в реакциях (3,4) такое состояние может образовываться динамически. Теоретический анализ измеренных в разных реакциях (1-3) *nn*-корреляций (энергий *nn*-квазисвязанного синглетного 1S_0 состояния) позволит исследовать зависимости эффективного притяжения, возникающего между нейтронами от характера их исходного состояния в свободном пространстве.

Основные результаты полученные в 2015 г.

В результате проведенного кинематического моделирования реакций (2-4) были определены параметры детектирующей системы [3]. Впервые отмечено, что форма энергетического распределения частиц от распада квазисвязанного состояния однозначно связана с энергией этого состояния [1]. При условии, что детектирование частицы происходит под углом, соответствующим (или близким к) углу вылета *NN*-системы в двухчастичной реакции, попасть в детектор могут только “развальные” частицы, вылетающие в системе центра масс двухнуклонной системы или вперед ($\sim 0^\circ$), или назад ($\sim 180^\circ$). В результате получается специфический энергетический (и соответствующий ему временной) спектр, характеризующийся двумя пиками с расстоянием между ними, зависящим от энергии квазисвязанного состояния.

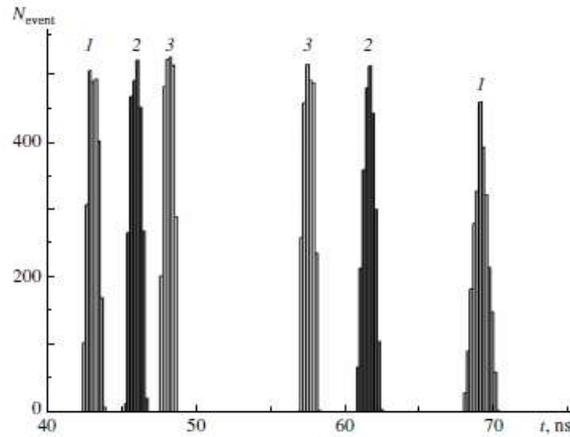


Fig. 3. Time-of-flight spectra of neutrons from the breakup of the ${}^2\text{n}$ quasibound state for its energies of (1) 200, (2) 80, and (3) 30 keV. The parameters of the simulation are identical to those in Fig. 1.

Рисунок 8.1 - Моделированные временные спектры нейтронов. Энергия квазисвязанного состояния - 1-200, 2-80, и 3-30 кэВ.

Видно, что различным энергиям квазисвязанного состояния соответствуют различные расстояния между пиками. Следует отметить, что форма спектров развалных частиц зависит только от энергии квазисвязанного состояния и кинетической энергии двухнуклонной системы до ее развала, и не зависит от реакции, в которой эта система (nn, пр или pp) была образована. Таким образом, проведенное моделирование реакций показало, что при определенных кинематических условиях полного эксперимента (регистрация трех частиц под определенными углами с определением их энергий) энергии синглетных состояний могут быть определены, исследуя вид энергетических спектров продуктов реакции.

2. Проведена обработка предварительных данных по исследованию реакции $d + 2\text{H} \rightarrow (\text{pp}) + (\text{nn})$ с регистрацией двух протонов и нейтрона [1]. Целью эксперимента являлось получение энергетического (временного) спектра нейтронов и сравнение его с результатами моделирования для различных энергий квазисвязанного состояния nn-системы. В области модельных максимумов в экспериментальном спектре наблюдались явные пики, однако для количественных оценок энергии квазисвязанного состояния статистика пока недостаточна.

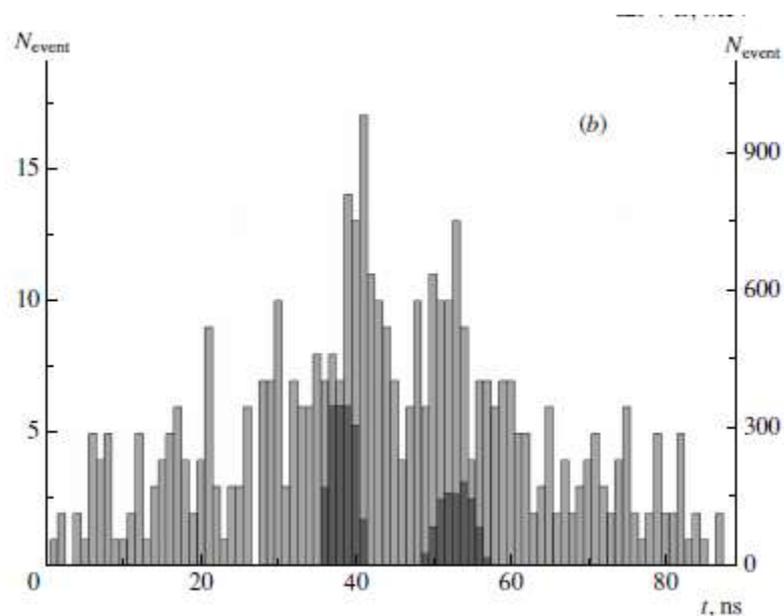


Рисунок 8.2 - Экспериментальный и моделированный временные спектры вторичного нейтрона. Моделирование проведено для энергии квазисвязанного состояния np -системы 80 кэВ.

3. В 2015 г. велась работа по подготовке и проведению эксперимента на нейтронном канале РАДЭКС в реакциях $n+2H \rightarrow p+n+n$. В качестве активной мишени в этом эксперименте будет использован жидкий дейтерированный сцинтиллятор C_6D_6 , являющийся одновременно дейтериевой мишенью и детектором вторичных нейтронов. В качестве детекторов вторичных нейтронов будут использованы водородосодержащие сцинтилляторы.

а) Поскольку регистрация нейтронов может проходить в присутствии сильного γ -фона необходимо обеспечить эффективное отделение нейтронных событий от событий, вызванных гамма-квантами. Для исследования различных вариантов n - γ разделения по форме импульсов проводилось облучение быстрых сцинтилляторов нейтронами и гамма-квантами $PuBe$ -источника. В качестве детекторов использовались сцинтилляторы на основе кристаллов стильбена и жидкие водородо-содержащие и дейтерированные сцинтилляторы. Рассмотрены различные варианты оптимизации n - γ разделения, в том числе метод линеаризации, использование двумерной информации и поворота координат [4].

б) Для определения световых выходов различных сцинтилляторов при облучении нейтронами был поставлен эксперимент на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ [2]. В эксперименте детекторы облучались моноэнергетическими нейтронами, полученными в реакции $d+2H \rightarrow 3He+n$ в различных конфигурациях совпадательного эксперимента с регистрацией, как нейтрона, так и 3He . Проведенное моделирование

показало, что при энергии дейтронного пучка 15 МэВ возможно получение квазимоноэнергетического пучка нейтронов в интервале энергий 3–14 МэВ, с разбросом по энергии, зависящим от углового акцептанса детектора гелионов. Были проведены измерения спектров световых выходов и эффективности регистрации нейтронов для различных сцинтилляторов при нескольких значениях энергии нейтронов.

В декабре 2015 г. были проведены предварительные измерения реакции $n+2H \rightarrow p+n+n$ на нейтронном канале РАДЭКС. Реакция была исследована в геометрии взаимодействия в конечном состоянии при энергии первичных нейтронов 20-50 МэВ с целью получения данных об энергии квазисвязанного синглетного состояния динейтронной системы. Была использована схема эксперимента, показанная на рис.3.1. В качестве активной мишени будет использован жидкий дейтерированный сцинтиллятор C6D6, являющийся одновременно дейтериевой мишенью и детектором вторичных нейтронов.

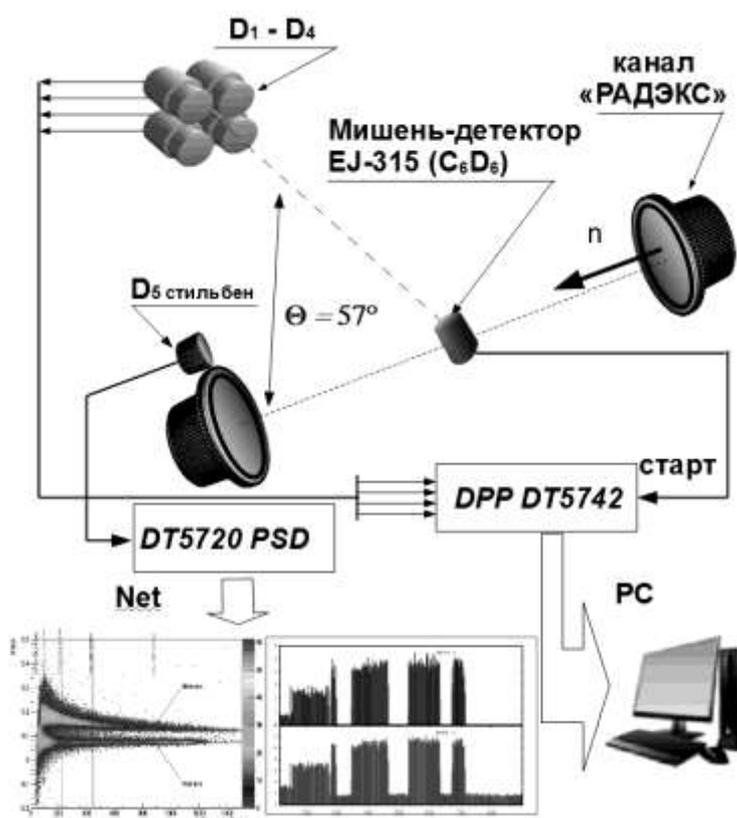


Рисунок 8.3 - Схема эксперимента по исследованию реакции nd -развала

В качестве детекторов вторичных нейтронов (D_1-D_4) использованы водородосодержащие сцинтилляторы. Отбирались события тройных совпадений – протона (в активной мишени) и двух нейтронов в нейтронных детекторах. Обработка данных

сеанса позволит получить информацию о временных спектрах нейтронов, измеренных в реакции nd -развала в геометрии взаимодействия в конечном состоянии, и на их основе получить данные о энергии квазисвязанного состояния np -системы при нескольких энергиях нейтронов.

8 Литература

1. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование реакции $d + d \rightarrow 2He + 2n$ при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015, Т. 78, № 7-8, с. 687–695.
2. С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / РЕАКЦИЯ $d + {}^2H \rightarrow {}^3He + n$ КАК ИСТОЧНИК КВАЗИМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).
3. С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, И.М.Железных, А.Г.Гасанов, В.М.Лебедев, А.В.Спасский, З.Я.Садыгов / УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ NN -КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ $d + {}^2H \rightarrow n + n + p + p$ // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).
4. Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zuyev S.V. / Digital n - γ pulse-shape discrimination with nanosecond waveform digitizer // LXV International Conference “NUCLEUS 2015” “New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies”, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 253.

8 ПУБЛИКАЦИИ

5. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование реакции $d + d \rightarrow 2He + 2n$ при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015, Т. 78, № 7-8, с. 687–695.
6. С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / РЕАКЦИЯ $d + 2H \rightarrow 3He + n$ КАК ИСТОЧНИК КВАЗИМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).
7. С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, И.М.Железных, А.Г.Гасанов, В.М.Лебедев, А.В.Спасский, З.Я.Садыгов / УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ NN -КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ $d + 2H \rightarrow n + n + p + p$ // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).

ДОКЛАДЫ на Конференциях

8. E.Konobeevski, V.Lebedev, M.Mordovskoy, A.Spasskii, S.Zuyev / The use of $d(d,n){}^3He$ reaction as a tool for neutron detectors examination // LXV International Conference “NUCLEUS 2015” “New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies”, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 90. Устный доклад

1. Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zuyev S.V., Zheleznykh I.M., Gassanov A.G., Sadygov Z.Y. / Setup for studying pp-correlation effects in $d + 2H \rightarrow (nn) + (pp)$ AND $3He + 2H \rightarrow 3H + (pp)$ reactions // LXV International Conference “NUCLEUS 2015” “New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies”, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 91. Устный доклад
2. Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zuyev S.V. / Digital n- γ pulse-shape discrimination with nanosecond waveform digitizer // LXV International Conference “NUCLEUS 2015” “New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies”, Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 253. Устный доклад
3. E. Konobeevski, A.Kasparov, V.Lebedev, M.Mordovskoy, A.Spasky, S.Zuyev / Determination of Energies of NN-Quasibound Singlet States in $dd \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$ and $dd \rightarrow (np)^s + (np)^s$ Reactions // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS. Стенд
4. А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев / Математические методы разделения импульсов, вызванных нейтронами и гамма-квантами // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XVI Международной научной конференции, посвященной 75-летию профессора В.П. Дьяконова. – Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2015, выпуск 16, с. 24. Устный доклад

9 Исследование нейтринных осцилляций и нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов

Руководитель Куденко Юрий Григорьевич, профессор, заведующий

Исследование редких распадов элементарных частиц является важной задачей как для расширения наших знаний о природе и свойствах элементарных частиц и их взаимодействий, так и для поиска новых физических явлений.

В рамках исследования нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов проводился анализ данных эксперимента E949 (поиск редких распадов каонов, БНЛ, США) по поиску тяжелых стерильных нейтрино с массами 175-300 МэВ. В результате этого анализа получено новое ограничение на параметры смешивания этой гипотетической частицы с активными нейтрино. Разработанные при поиске тяжелых нейтрино методы анализа данных и статистического анализа были в дальнейшем использованы для поиска редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино, запрещенного в первом порядке в Стандартной Модели.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и 2 нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц, монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2015 гг. В 2014-2015 гг. часть сеансов проводилась в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой создан прототип ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов. Все счетчики отправлены в ЦЕРН, где проводится подготовка к сеансам на пучке.

Кроме того, разрабатывается детектор мюонного пробега для эксперимента WAGASCI, который предназначен для измерения сечений взаимодействия нейтрино на

ядрах воды и пластика, что позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

9 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

9.1 Исследование нарушения фундаментальных CP и T симметрий в распадах каонов

Анализ данных, накопленных в эксперименте E949, позволил получить в распадах положительных каонов новые ограничения на смешивание тяжелых и активных нейтрино. Установлен верхний предел (90% C.L.) на элемент матрицы смешивания $|U_{\mu n}|^2$ в диапазоне масс тяжелых нейтрино 175 — 300 МэВ. Этот результат на два порядка превосходит предыдущее ограничение, полученное в распадах каонов, и примерно на порядок улучшает текущее самое сильное ограничение из поиска распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191 в диапазоне масс 175 — 270 МэВ. По итогам этой работы участник научной группы А.Т. Шайхиев в июне 2015 года защитил кандидатскую диссертацию «Поиск тяжелых нейтрино в распадах положительных каонов».

Разработанные при поиске тяжелых нейтрино методы анализа данных и статистического анализа были в дальнейшем использованы для поиска редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино в эксперименте E949. Этот распад каона на четыре фермиона в первом порядке запрещен в Стандартной модели и возможен только в более высоких порядках слабого взаимодействия. Важная информация может быть получена о нейтрино-нейтринных взаимодействиях и шестифермионных взаимодействиях. В 2015 году был выполнен анализ с целью поиска событий из этого распада на основе всех данных E949 (1.7×10^{12} остановленных в мишени каонов). Подход к анализу был аналогичным к поиску тяжелых нейтрино в распадах остановленных каонов. Основными фоновыми событиями, как и в случае поиска тяжелых нейтрино, были распады $K^+ \rightarrow \mu \nu \gamma$, когда фотон не регистрировался фотонными вето детекторами. В результате анализа получены новые предварительные ограничения на вероятность распада $K \rightarrow \mu 3 \nu$ на уровне 90% CL:

$\Gamma(K \rightarrow \mu 3 \nu) / \Gamma(K \rightarrow \text{all}) < 2.5 \times 10^{-6}$ (в рамках Стандартной Модели);
 $\Gamma(K \rightarrow \mu 3 \nu) / \Gamma(K \rightarrow \text{all}) < 1.8 \times 10^{-6}$ (ν - ν взаимодействия); $\Gamma(K \rightarrow \mu 3 \nu) / \Gamma(K \rightarrow \text{all}) < 2.0 \times 10^{-6}$ (шести-фермионное взаимодействие). Полученные ограничения являются наилучшими и примерно в 3 раза улучшают существующие экспериментальные пределы.

Эксперимент NA62 (ЦЕРН) нацелен на поиск редкого распада положительно заряженного каона ($K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu \nu \nu \nu \nu$), чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели. В рамках подготовки этого эксперимента были проведены

испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц (~500 каналов), монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

9.2 Изучение нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой на протонных ускорителях KEK и J-PARC

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведен анализ данных, набранных в режиме *антинейтрино* в 2014 – 2015 гг. В этих *антинейтринных* сеансах набрана статистика 4.04×10^{20} POT (протонов на мишени), сравнимая с данными в *нейтринной* моде, а всего в T2K за 2010 - 2015 гг. набрано $\sim 11.04 \times 10^{20}$ POT.

Анализ данных на “исчезновение” в антинейтринной моде показал, что в дальнем детекторе Супер-Камиокандэ зарегистрировано 34 события (мюонные антинейтрино и нейтрино) при ожидаемых 104 событиях в отсутствие (анти)нейтринных осцилляций. Предварительный анализ также продемонстрировал, что значения угла смешивания ($\sin^2\theta_{23} = 0.46^{+0.14}_{-0.06}$) и разности квадратов масс ($|\Delta m^2_{23}| = (2.5^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$), полученные для антинейтринной моды, близки к соответствующим значениям для нейтринной моды.

Проведен анализ и на «появление» электронных антинейтрино в *антинейтринной* моде. Зарегистрировано 3 кандидата в события на «появление» электронных (анти)нейтрино, что пока не позволяет делать определенные выводы об осцилляциях мюонных антинейтрино в электронные в виду малой статистики.

Получены результаты измерения инклюзивного сечения взаимодействия мюонных нейтрино на ядрах железа через заряженные токи для трех значений энергии нейтрино в диапазоне 1-3 ГэВ. Особенность этого анализа заключается в том, что использовались данные, полученные в ближнем детекторе INGRID, отдельные модули которого расположены под разными углами по отношению к оси исходного пучка нейтрино. Результаты показали хорошее согласие полученных сечений с предсказаниями нейтринных моделей (генераторов NEUT и GENIE).

Впервые измерены сечения взаимодействия электронных нейтрино в области энергий более 1.5 ГэВ с водой. Эти данные важны для измерения осцилляций мюонных нейтрино в электронные в детекторе Супер-Камиокандэ и позволяют уменьшить систематическую ошибку измерения осцилляционных параметров.

Значительный прогресс был достигнут в исследовании систематических погрешностей в осцилляционном анализе, которые определяют чувствительность

эксперимента к CP нечетной фазе. В результате исследований на протяжении 4-х лет удалось снизить систематическую ошибку с 18% до ~6%.

9.3 Разработка новых сцинтилляционных детекторов для экспериментов с ускорительными нейтрино

В рамках проекта Laguna-LBNO закончено создание полностью активного сегментированного детектора нейтрино (TASD), состоящего из 9000 сцинтилляционных стрипов со спектросмещающими волокнами, которые формируют 50 X-Y плоскостей. Все счетчики переправлены в ЦЕРН. Объем детектора $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$. Проводится тестирование электроники и ведется подготовка к сборке всего детектора для проведения тестов на пучке в ЦЕРНе.

Проводилась разработка сегментированного водного детектора нейтрино (WAGASCI), который будет расположен на пучке нейтрино в J-PARC вблизи мишени (эксперимента T2K) под углом около 2.5 градусов по отношению к направлению пучка протонов. Были разработаны и изготовлены 230 экструдированных сцинтилляционных пластин размером 7 мм x 21 см x 200 см для детектора пробега мюонов (MRD). Закончена стадия исследования прототипов таких детекторов с использованием S-образных спектросмещающих волокон и микропиксельных лавинных фотодиодов. Выбрана оптимальная геометрия детекторов, аналогичная SMRD детекторам, созданным в ИЯИ РАН для ближнего нейтринного детектора ND280. Первый модуль детектора планируется установить на on-axis нейтринном пучке и использовать в измерения совместно с детектором INGRID.

9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных, накопленных в эксперименте E949, позволил получить в распадах положительных каонов новые ограничения на смешивание тяжелых и активных нейтрино. Установлен верхний предел (90% C.L.) на элемент матрицы смешивания $|U_{\mu n}|^2$ в диапазоне масс тяжелых нейтрино 175 — 300 МэВ. Этот результат на два порядка превосходит предыдущее ограничение, полученное в распадах каонов, и примерно на порядок улучшает текущее самое сильное ограничение из поиска распадов тяжелых нейтрино в эксперименте CERN PS191 в диапазоне масс 175 — 270 МэВ.

Разработанные при поиске тяжелых нейтрино методы анализа данных и статистического анализа были в дальнейшем использованы для поиска редкого распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \nu$, т.е. распада положительно каона на мюон и три нейтрино в эксперименте E949.

В рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) по поиску редкого распада положительно заряженного каона на положительно заряженный пион и 2 нейтрино, чувствительного к новой физике за рамками Стандартной Модели, были проведены испытания счетчиков, усилителей и фотосенсоров для годоскопа частиц, монтаж годоскопа, а также проведены первые сеансы.

В рамках изучения нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с длинной базой на протонном ускорителе J-PARC (Япония) проведена дальнейшая работа по анализу данных, накопленных в 2010-2015 гг. В 2014-2015 гг. часть сеансов проводилась в режиме исследования *антинейтрино*. Результаты анализа имеют большое значение как для изучения свойств нейтрино, так и для исследования CP-нарушения в лептонном секторе. Кроме того, важным результатом анализа является измерение сечений взаимодействия нейтрино (мюонных и электронных) с различными ядрами, а также поиск стерильных нейтрино.

Для будущих ускорительных нейтринных экспериментов с короткой и длинной базой создан прототип ближнего нейтринного детектора, работающего в сильном магнитном поле и состоящего из 9000 сцинтилляционных сегментов на основе экструдированных пластиков, спектросмещающих волокон и лавинных фотодиодов. Все счетчики отправлены в ЦЕРН, где проводится подготовка к сеансам на пучке.

Кроме того, разрабатывается детектор мюонного пробега для эксперимента WAGASCI, который предназначен для измерения сечений взаимодействия нейтрино на ядрах воды и пластика, что позволит уменьшить систематические ошибки нейтринного эксперимента T2K (J-PARC).

9 ПУБЛИКАЦИИ

1 A.V. Artamonov, ..., M. Khabibullin, ..., Yu. Kudenko, ..., A. Shaikhiev, ..., et al. (E949 Collaboration) / Search for heavy neutrinos in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ decays // Phys.Rev. D91 (2015) 052001, WOS:000350998700004.

2 K. Abe, ..., M. Khabibullin, ..., Yu. Kudenko, ... et al. / Neutrino oscillation physics potential of the T2K experiment // PTEP 2015 (2015) 043C01, WOS:000355312800005.

3 K. Abe, ..., M. Khabibullin, ..., Yu. Kudenko, ... et al. / Search for short baseline ν_e disappearance with the T2K near detector // Phys.Rev. D91 (2015) 051102, WOS:000351040800001.

4 K. Abe, ..., M. Khabibullin, ..., Yu. Kudenko, ... et al. / Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target // Phys.Rev. D91 (2015) 7, 072010, WOS:000353636500001.

5 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande // PTEP 2015 (2015) 053C02, WOS:000356183900009.

6 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurement of the ν_{μ} charged current quasielastic cross section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam // Phys.Rev. D91 (2015) 11, 112002, WOS:000355623000001.

7 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurement of the electron neutrino charged-current interaction rate on water with the T2K ND280 π^0 detector // Phys.Rev. D91 (2015) 112010, WOS:000356483000001.

8 K. Abe,..., M. Khabibullin,..., Yu. Kudenko,... et al. / Measurement of the ν CCQE cross section on carbon with the ND280 detector at T2K // Phys.Rev. D92 (2015) 112003, WOS:000366169900001.

9 F. Hahn, Yu. Kudenko et al. / Prospects for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ observation at CERN in NA62 // Journal of Physics Conference Series, V.631 (2015) 012041.

10 K. Massri, ... Yu. Kudenko et al. / Precision tests of the Standard Model with Kaon decays at CERN // Journal of Physics Conference Series, V.631 (2015) 012040.

11 Y. Kudenko, V. Paolone / Neutrino physics: status and open questions // Nucl.Part.Phys.Proc. 260 (2015) 167-171.

12 A.T. Shaikhiev and Yu.G. Kudenko / NEW RESULTS ON STERILE NEUTRINOS SEARCHES // Physics of Atomic Nuclei № 13, 2015.

13 S. Fedotov, A. Kleymenova, O. Mineev et al. / 3X3 MM² SENSITIVE SiPM CHARACTERIZATION FOR THE NEW CHOD DETECTOR OF THE NA62 EXPERIMENT, CERN // Poster at the Conference on New Photo-Detectors, PhotoDet 2015 International Conference on New Photo-detectors (PD15), July 6-9, 2015, Moscow, Troitsk, Russia.

14 A. Kleymenova / Experiment NA62 for measurement of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ decay // Talk at 58 MPTI Conference, November 2015 Moscow, Russia.

15 F. Hosomi,..., M. Khabibullin,... Yu. Kudenko et al. / Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI // Talk at PhotoDet 2015 International Conference on New Photo-detectors, July 6-9, 2015, Moscow, Troitsk, Russia.

16 A. Mefodiev,..., M. Khabibullin,... Yu. Kudenko et al. / The design, construction and testing of T ASD (Totally Active Scintillator Detector) // Poster at PhotoDet 2015 International Conference on New Photo-detectors, July 6-9, 2015, Moscow, Troitsk, Russia.

17 Y. Kudenko, T. Kobayashi / Future LBL neutrino experiments in Japan // Invited talk at The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 20-26 August 2015.

18 T. Ovsyannikova / The new experiment WAGASCI for water to hydrocarbon neutrino cross section measurement using the J-PARC beam // Talk at the International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-10 October 2015.

19 N. Chimuma, A. Izmaylov, M. Khabibullin et al. / A New Experiment at J-PARC to Measure the Neutrino Cross Section Ratio between Water and Plastic // Poster at the International Conference on Flavor Physics & CP Violation, FPCP 2015, Nagoya, Japan, 25- 29 May 2015.

20 A. Blondel, Y. Kudenko / New results in neutrino oscillations // Invited talk at the International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 5-10 October 2015.

21 Y. Kudenko / Overview of neutrino oscillations // Invited talk at 4th Gribov Memorial Workshop, Chernogolovka, Russia, 27 June 2015.

22 A. Izmaylov / T2K status and prospects // Talk at VII CPAN, Segovia, Spain, 12-15 December 2015.

23 Y. Kudenko, M. Yokoyama / Study of neutrino oscillations in the T2K experiment and development of new neutrino detectors // Invited talk at the Anniversary Scientific Session "Progress and Trends in Science and Technology" to commemorate 10 years of partnership between the RFBR and JSPS, 21-22 October 2015, Moscow, Russia.

Сотрудники лаборатории занимались организацией и проведением Международной Конференции "Новые фотонные детекторы" (International Conference on New Photo-Detectors, PD15), которая проводилась с 6 по 9 июля 2015 г. в Троицке, Москва. Число участников - 139 человек (в том числе более 50 зарубежных ученых из Германии, Италии, Англии, США, Японии, Швейцарии, Испании, Канады и других стран). Сайт Конференции PD15: <http://www.pd15.inr.ru/>.

Научная программа конференции состояла из пленарных заседаний и постерных докладов. Всего на конференции было представлено 83 доклада (устных и постерных), в которых был отражен весь спектр исследований в области фотонных детекторов по следующим основным направлениям:

1. Последние достижения в разработке микропиксельных лавинных фотодиодов.
2. Вакуумные фотоприемники (фотоумножители, гибридные ФЭУ, микроканальные пластины).

3. Современная электроника для фотодетекторов и больших систем.
4. Применение фотодетекторов в физике элементарных частиц, физике высоких энергий, нейтринной и ядерной физике.
5. Ядерные технологии, ядерная медицина, медицинские приборы и промышленное применение фотоприемников.

Готовятся к изданию Труды Конференции, которые будут опубликованы в издательстве Proceedings of Science (PoS), Триест, Италия (<http://pos.sissa.it>).

10 Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце

Руководитель д.ф.-м.н. Коптелов Э.А.

10.1 Важнейшие результаты, полученные в 2015г

Выполнено математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100.

Проведены измерения нейтронных и γ -полей снаружи биологической защиты спектрометра СВЗ-100 после её модернизации (усиления) в соответствии с выработанными рекомендациями при параметрах протонного пучка подаваемого на мишень спектрометра -- 0.6 мкА среднего тока и энергии протонов – 209 МэВ.

Определено отрицательное влияние нейтронного гало на разрешение СВЗ-100, с целью уменьшения влияния фоновых нейтронов, увеличен диаметр ионопровода на участке возле мишени.

Выработаны требования к характеристикам детекторов способных выделять сигналы от α -частиц на фоне электромагнитных помех.

Построен график зависимости энергетического разрешения спектрометра СВЗ-100 от энергии замедляющихся нейтронов. Проводится сравнение с подобными зарубежными установками. LANSCE - СВЗ в Лос-Аламосе, масса свинцового тела 20 т.

TARS - эксперимент на СВЗ в ЦЕРНе, масса свинцового тела 300 т.

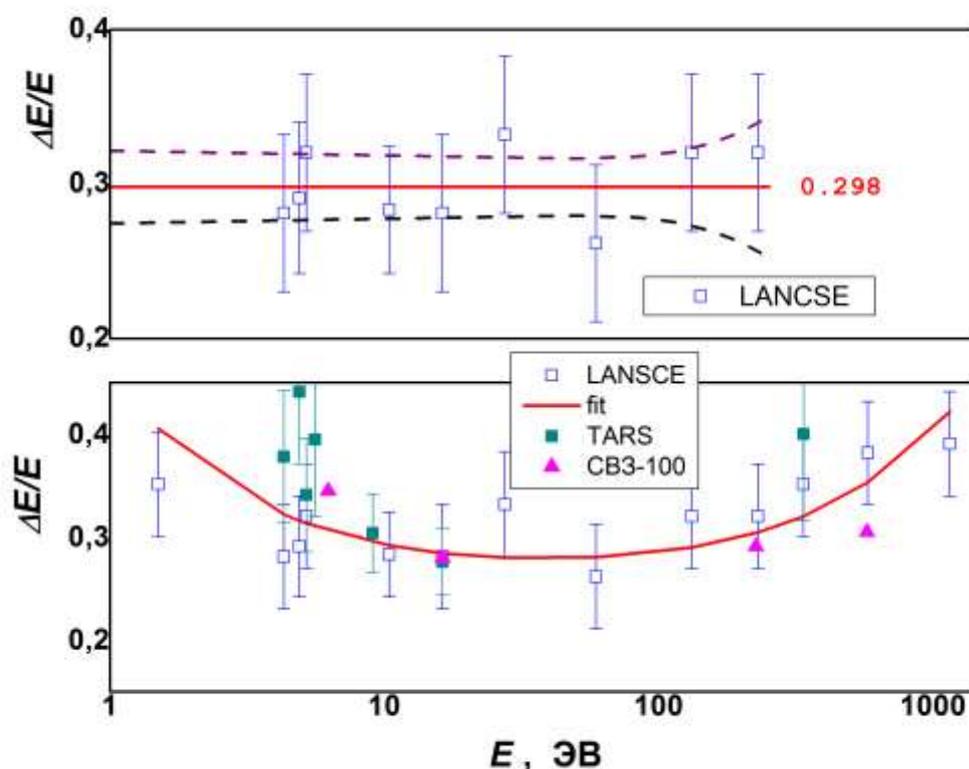


Рисунок - Энергетическое разрешение $\Delta E/\bar{E}$ в функции средней энергии нейтронов E .
(□) – данные LANSCE ; (■) – данные эксперимента TARS; (▲) – данные эксперимента СВЗ-100. Вверху: линия – среднее значение разрешения на интервале от 4.3 до 230 эВ; штриховые линии – границы погрешности ($\pm \sigma$); внизу: красная линия – расчет.

10 ПУБЛИКАЦИИ:

Л.Н.Латышева, Н.М.Соболевский, Э.А.Коптелов, Р.Д.Илич. *Математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100 ИЯИ РАН. Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2015, №11.

Продемонстрировано влияние энергетического разрешения СВЗ-100 на форму нейтронных сечений. Разработанная модель позволяет установить соответствие экспериментальных данных, полученных на нейтронных спектрометрах разными методами и с разным разрешением.

А.А.Алексеев, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Рябов. *Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод*. Препринт ИЯИ РАН 1413/2015.

Предложен и обоснован спектрометр гибридного типа, сочетающий сильные стороны методики времени замедления нейтронов в свинце и методики времени пролёта нейтронов.

А.А. Алексеев, А.А. Бергман, А.И. Берлев, Э.А. Коптелов, В.С. Шорин*. *Детектор γ -лучей радиационного захвата нейтронов для спектрометра по времени замедления в свинце СВЗ-100*. Препринт ИЯИ РАН 1404/2015.

Описана конструкция пропорционального ионизационного счетчика для исследования радиационного захвата нейтронов на спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100 ИЯИ РАН. Измерены характеристики γ -счетчика и спектрометрического канала регистрации.

11 Проблемы физики трансмутации ядерных материалов и технология подкритических систем на пучках заряженных частиц

Руководители: д.ф.-м.н Коптелов Э.А., д.ф.-м.н. Соболевский Н.М.

Соисполнители: ОИЯИ, Мюкатекс

11 Важнейшие результаты, полученные в 2015 г

Продолжены расчетно-теоретические работы по поиску оптимальной конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния 237. Продолжено дальнейшее развитие транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования процессов взаимодействия частиц с веществом.

11 Публикации:

Н.М.Соболевский. *Алгоритм запоминания дерева адронного каскада в транспортном коде SHIELD*. Препринт ИЯИ РАН 1398/2015, Москва, 2015, 15 с.

Подготовлена к публикации в 2016 году издательством Springer International Publishing Switzerland глава под названием «Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russia Academy of Sciences» в сборнике «Thorium Energy for the World». Авторы: С.Ф. Сидоркин, А.Д. Рогов, Л.И. Пономарев, Э.А. Коптелов

Таблица 11.1 - Ожидаемые значения мощности стенда для протонов с энергиями 300-600 МэВ и различных комбинаций мишеней:

Average proton current I_p (μA)	Multiplication M (k_{eff})	Average power of blanket, P (MW), for proton energy 300–600 MeV							
		W (plates) or PbBi target				Natural uranium target (cylindrical fuel elements)			
		300	400	500	600	300	400	500	600
100	10 (0.90)	0.36	0.58	0.83	1.04	0.51	0.81	1.14	1.46
	20 (0.95)	0.73	1.16	1.66	2.08	1.02	1.62	2.29	2.91
150	10 (0.90)	0.55	0.88	1.25	1.56	0.77	1.22	1.72	2.18
	20 (0.95)	1.10	1.75	2.50	3.12	1.54	2.44	3.44	4.36
200	10 (0.90)	0.73	1.16	1.66	2.08	1.03	1.62	2.29	2.91
	20 (0.95)	1.47	2.32	3.32	4.16	2.05	3.25	4.58	5.82
250	10 (0.90)	0.92	1.46	2.08	2.60	1.28	2.03	2.86	3.64
	20 (0.95)	1.83	2.91	4.16	5.20	2.57	4.06	5.72	7.28
300	10 (0.90)	1.09	1.75	2.50	3.12	1.54	2.43	3.43	4.37
	20 (0.95)	2.19	3.5	5.00	6.24	3.08	4.86	6.86	8.74
Neutron yield, Y (n/p)		3.5	5.6	8	10	4.9	7.8	11	14

Importance of the primary neutrons, $\omega \approx 1.3$

12 Создание и приборное оснащение нейтронного комплекса ИЯИ РАН
Руководитель д.ф-м.н Коптелов Э.А.

12 Важнейшие результаты, полученные в 2015 г

1. Создан кольцевой детектор тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов.
Проведены испытания в сеансе декабря 2015 года.



2. Проведены измерения профилей нейтронных пучков установок «Геркулес» и «Кристалл», имеющих нейтронные концентраторы на источнике ИН-06, с помощью твердотельных запоминающих пластин.

12 Публикации:

А.А.Алексеев, Р.А.Садыков, В.С.Литвин, Е.С.Клементьев, С.Н.Аксенов, Д.Н.Трунов, Н.М.Соболевский, С.Ф.Сидоркин, Э.А.Коптелов. *Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИН-06 Института ядерных исследований РАН. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2015, № 3, с. 5-10.

В Институте ядерных исследований РАН (г. Троицк) введен в эксплуатацию импульсный нейтронный источник ИН_06 (spallation source). Измерены спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника, предназначенного для исследований конденсированных сред, наносистем и функциональных материалов. Сравнение расчетных и экспериментальных нейтронных спектров показывает их хорошее совпадение. Приводятся данные по плотности нейтронных потоков при заданных параметрах работы линейного ускорителя протонов, являющегося драйвером нейтронного источника ИН_06.

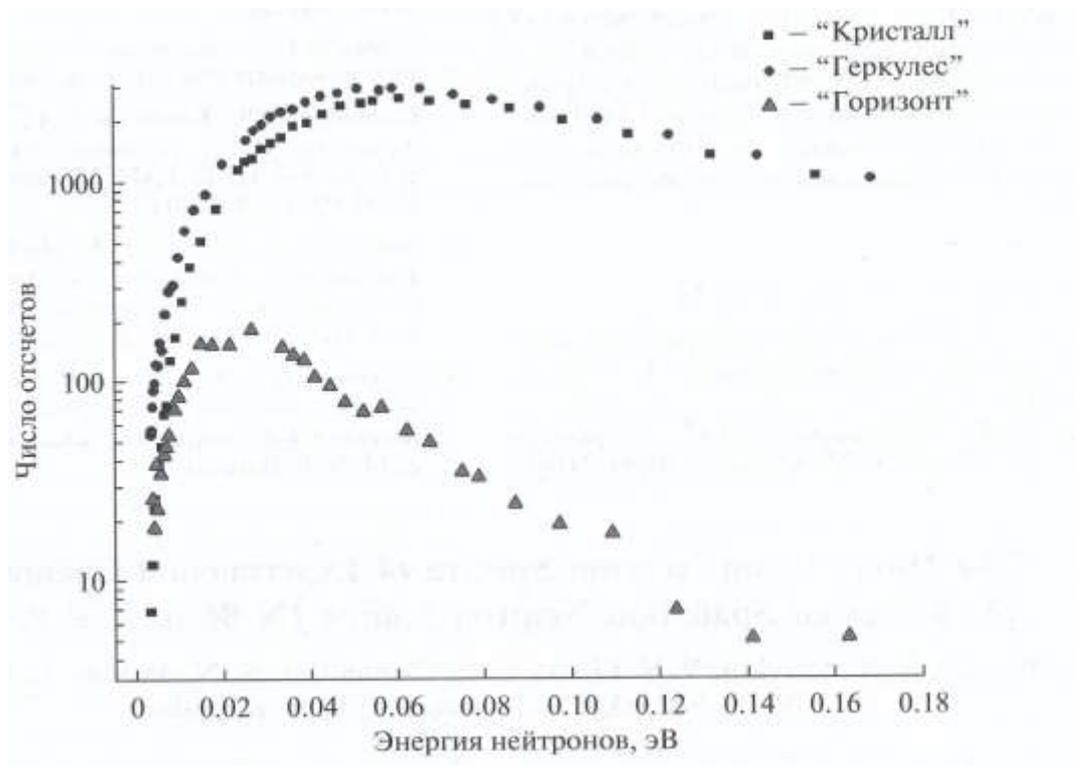


Рисунок 12.1 - Сравнение спектров нейтронов импульсного источника ИН-06 для установок «Кристалл», «Геркулес», «Горизонт»

13 Разработка высокоэффективных твердотельных детекторов нейтронов

Руководитель Садыков Равиль Асхатович

С помощью радиоизотопного источника проведены испытания новых счетчиков нейтронов и прототипов двухкоординатного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/LiF и лавинных фотодиодов (твердотельных фотоумножителей) и световодов из оргстекла [1-3]. Эти счетчики также были испытаны на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС и ИН-06. По результатам направлена публикация в Rev. Scient. Instr., и в журнал «Кристаллография» [4] (выходит в 2016 г.)

С помощью детектирующих пластин «Image plate» Получены профили пучков нейтронов на установках «Кристалл» и «Горизонт».

Методами малоуглового рассеяния рентгеновского излучения (совместно с ИК РАН) и нейтронов (в ОИЯИ) исследована структура наноматериала — диэлектрика с высокой теплопроводностью на основе высокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия [5].

Также методом малоуглового рассеяния нейтронов (в ОИЯИ) исследована структура водно-масляных эмульсий и взвесей наноалмазов в воде.

Разработка сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов. — ЛИТВИН В.С., МАРИН В.Н., КАРАЕВСКИЙ С.Х., ТРУНОВ Д.Н., АКСЕНОВ С.Н., САДЫКОВ Р.А. — НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ — 2015 — 16 - 20 февраля 2015 г. — НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ "МИФИ" — Москва. <http://nsession.mephi.ru/prog/01/01.htm>

New type of scintillation detectors of thermal neutrons based on ZnS(Ag) /LiF and avalanche photodiodes. MARIN V.N., NEDOREZOV V.G., LITVIN V.S., AXENOV S.N., STOLYAROV A.A., TRUNOV D.N., SADYKOV R.N. International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Moscow, Troitsk <http://indico.inr.ru/event/4/contributions>

A neutron detector with WLS-fibers readout and SiPM. LITVIN Vasily, KARAEVSKY Sergey, SADYKOV Ravil. International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015 <http://indico.inr.ru/event/4/contributions>

14 Нейтронная радиография

Во время сеанса работы ускорителя, проходившего с 7 по 23 января были измерены профили прямого пучка на установках “КРИСТАЛЛ” и “ГОРИЗОНТ”. Профили были получены при помощи пластин для нейтронной и гамма радиографии FUJI BAS IP 2025 с разрешением 50 мкм.

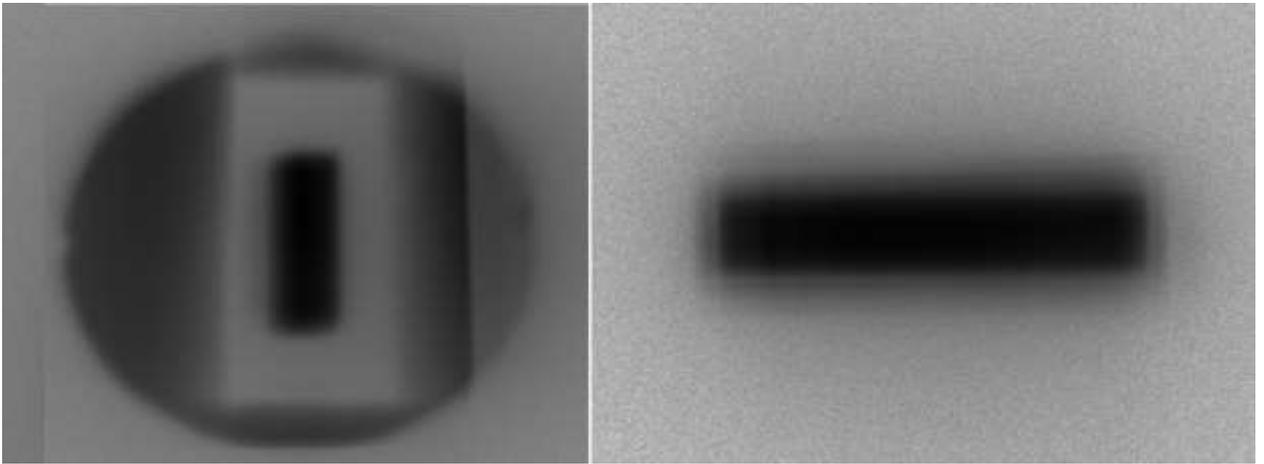


Рисунок 14.1 - Профиль прямого пучка

На рисунке 1 показаны полученные профили прямого пучка. Слева показан профиль установки “КРИСТАЛЛ”, справа профиль установки “ГОРИЗОНТ”

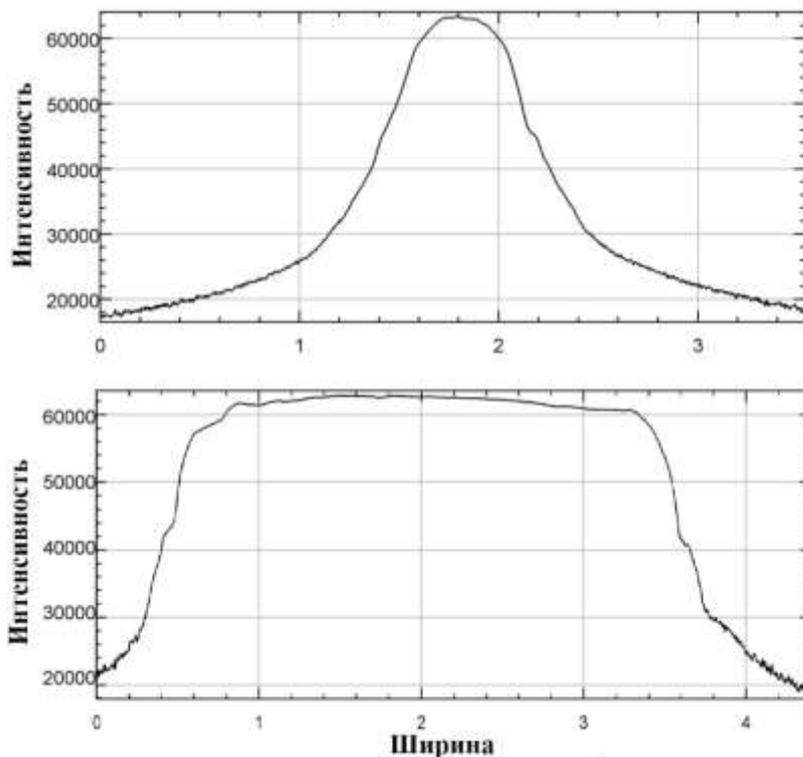


Рисунок 14.2 - Сечения профиля установки “ГОРИЗОНТ”

В дальнейшем планируется произвести сравнение смоделированных спектров и полученных экспериментально. На рисунке 2 показаны сечение профиля прямого пучка.

Сверху показано вертикальное сечение, справа – горизонтальное сечение. Это требуется для того чтобы оценить правильности установки и калибровки нейтронных коллиматоров на этих двух установках.

В лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН проведена разработка кольцевого детектора тепловых нейтронов на основе твердотельных счетчиков на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag)/LiF$ эффективностью 70%. Причиной такого замещения гелиевых счетчиков сцинтилляционными является резко возросший дефицит изотопа $He-3$, тем более, что в силу особенности конструкции твердотельные счетчики также являются нечувствительными к γ -фону.

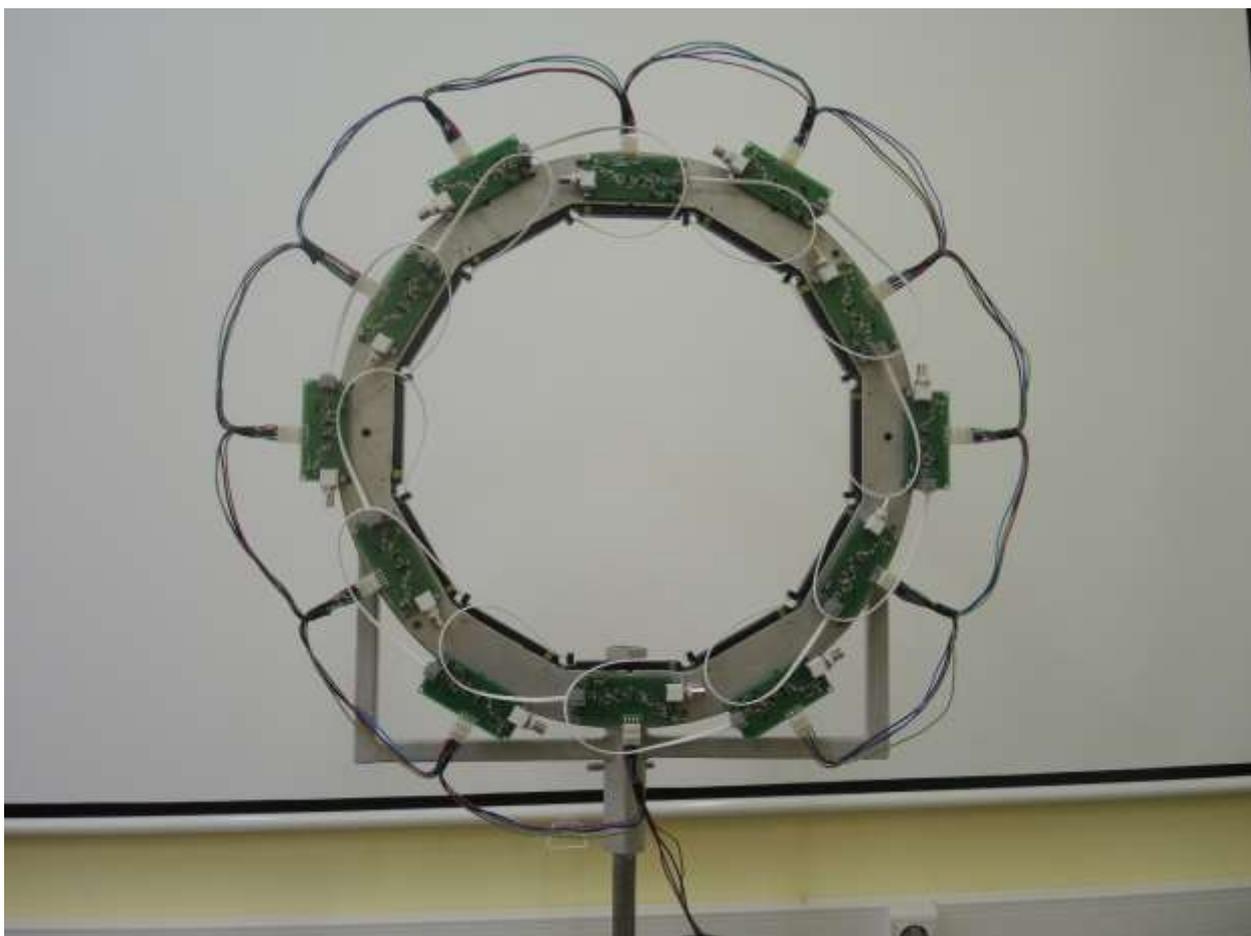


Рисунок 14.3 - Кольцевой детектор.

Конструкция самого детектора сделана из борного пластика с внешним диаметром 560 мм. На внутреннем диаметре кольца расположены 12 твердотельных счетчиков. По плоской части кольца размещена электроника, обслуживающая счетчики.

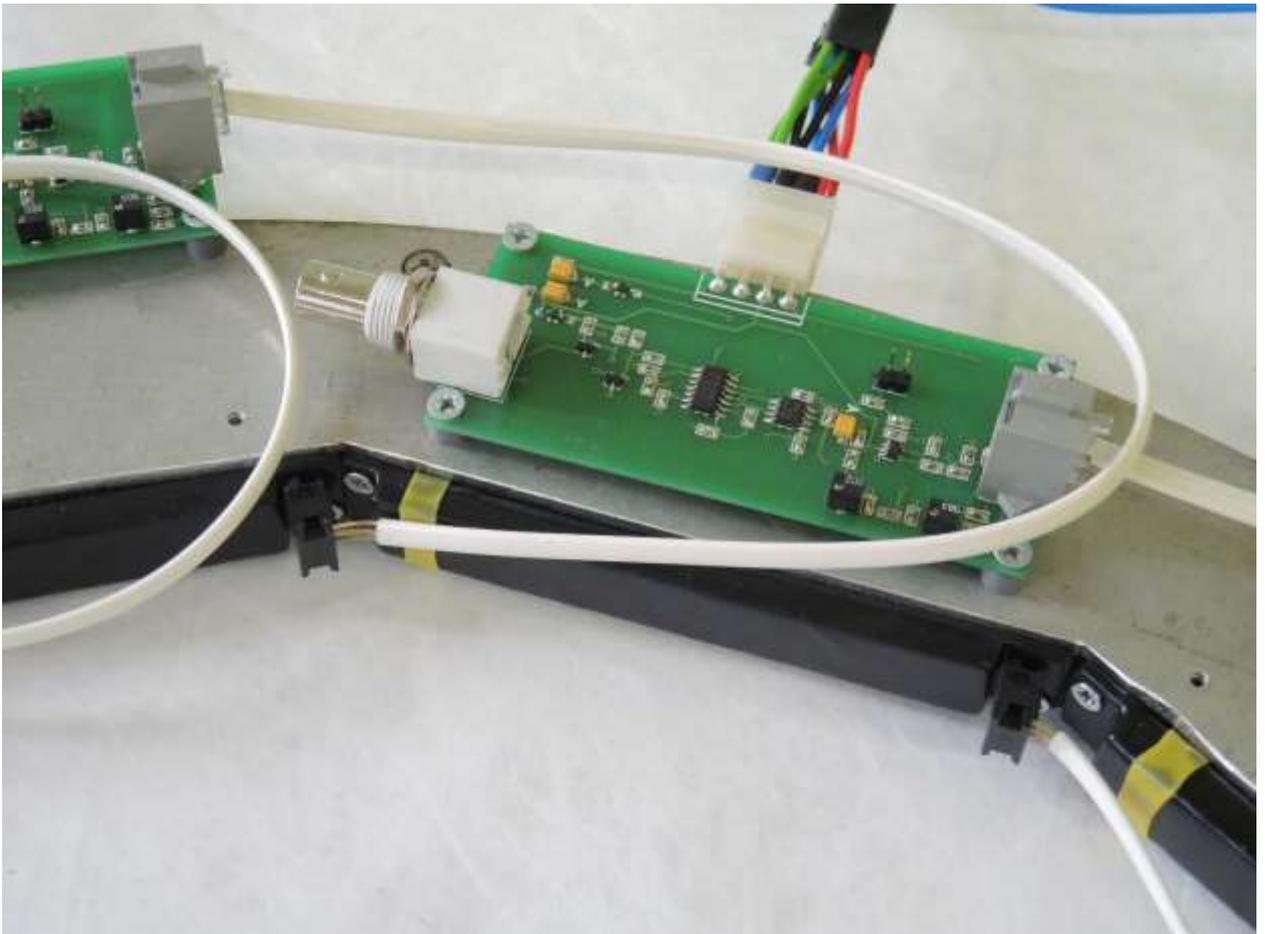


Рисунок 14.4 - Размещение счетчиков и электроники на кольце.

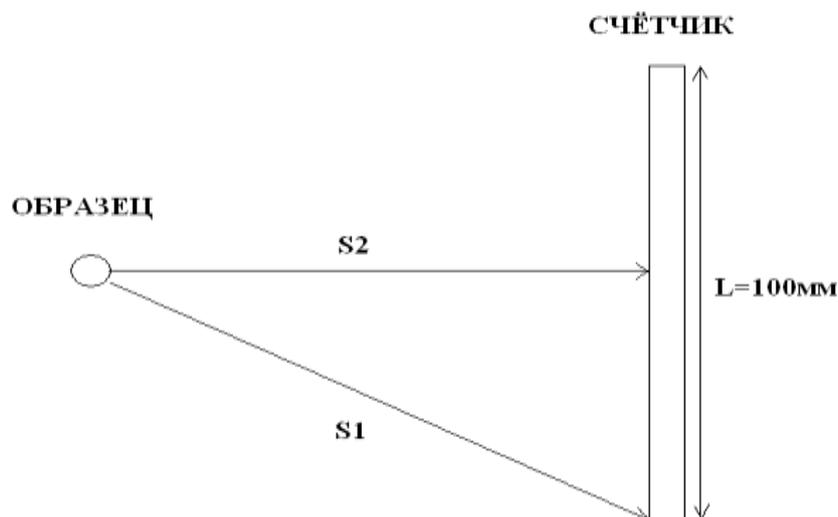
Кольцевой счетчик работает совместно с время –пролетной электроникой.

В сеансе в декабре 2015года на импульсном источнике РАДЕКС были проведены тесты кольцевого счетчика :

1. измерялся фон.
2. Были получены дифрактограммы от технического алмаза.

Кольцевой детектор размещался под углом 90 градусов относительно образца.

Разрешение по времени пролета:



Для теплового нейтрона с $\lambda=1.8\text{А}$ $v=2500$ м/сек, соответственно:



Временное разрешение-2 мксек.

Перекрываемый телесный угол:

$$\Omega = \frac{Nab}{4\pi R^2} = \frac{16 \times 100 \times 15}{12.56 \times 252^2} = \frac{2400}{797610.24} \approx 0.03 \text{стерад},$$

где N-число счетчиков, а и b-линейные размеры счетчика, R-радиус кольцевого детектора.

Публикации ЛНИ 2015

Статьи в иностранных реферируемых журналах

1. V.T.Taasti, H.Knudsen, M.H.Holzscheiter, **N.Sobolevsky**, B.Thomsen, N.Bassler. *Antiproton annihilation physics in the Monte Carlo particle transport code SHIELD-HIT12A*. Nucl.Instr.Meth. **B347** (2015) 65–71.

2. H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical study of projectile fragmentation in the $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ reactions at 1 GeV/nucleon*. Phys. Rev. **C91** (2015) 034605 (8 pages)

3. A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation*. Phys. Rev. **C92** (2015) 014610 (11 pages).

4. N.Buyukcizmeci, A.Ergun, H.Imal, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Investigation of isotope composition of nuclear fragments with angular momentum and Coulomb effects in peripheral $^{84}\text{Kr}+^{112,124}\text{Sn}$ collisions at 35 A MeV*. Nuclear Science and Techniques **26** (2015) S20507 (6 pages), (Chinese Academy of Sciences)

5. **A.S.Botvina**, J.Steinheimer, E.Bratkovskaya, M.Bleicher, J.Pochodzalla. *Formation of hypermatter and hypernuclei within transport models in relativistic ion collisions*. Phys. Lett. **B742** (2015) 7-14.

6. The effect of hydrostatic pressure up to 1.61 GPa on the Morin transition of hematite-bearing rock: Implications for planetary crustal magnetization //Bezaeva N.S., Demory F., Rochette P., Sadykov R.A., Gattacceca J., Gabriel T., Quesnel Y.//В журнале Geophysical Research Letters, издательство American Geophysical Union (United States), том 42.2015, DOI: 10.1002/2015GL066306

7. M. V. Kondrin, V. V. Brazhkin, and Y. B. Lebed. Fluctuation-dissipation theorem and the dielectric response in supercooled liquids, The Journal of Chemical Physics, (2015), 142

8. Journal of Alloys and Compounds(2015) 295-298. High pressure synthesis of a new phase of YbAg₂: Structure, valence of Yb and properties A.V. Tsvyashchenko , A.P. Menushenkov, V.A. Sidorov, A.E. Petrova,L.N. Fomicheva, O.V. Chernysheva, Yu.B. Lebed, S.N. Axenov, S.L. Bud'ko, Liling Sun, Zhongxian Zhao.

9. C. H. Woo, Haohua Wen, A. A. Semenov, S. L. Dudarev and Pui-Wai Ma, "Quantum heat bath for spin-lattice dynamics". – *Phys. Rev. B*, 2015, vol. 91, p. 104306.

10. Matthias Hud, Peter Lazor, Roland Mathieu, **Alexander G Gavriliuk** and Viktor V Struzhkin " PPMS-based set-up for Raman and luminescence spectroscopy at high magnetic field, high pressure and low temperature ", EPJ Techniques and Instrumentation **3**, (2015).

Статьи в российских реферируемых журналах

1. К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, **Н.М.Соболевский**, А.В.Юдин. *Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных материалах*. Известия РАН сер. Физическая, **79** (2015) 432-435.

2. А.А.Алексеев, Р.А.Садыков, В.С.Литвин, Е.С.Клементьев, С.Н.Аксенов, Д.Н.Трунов, **Н.М.Соболевский**, С.Ф.Сидоркин, Э.А.Коптелов. *Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИН-06 Института ядерных исследований РАН*. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 3, с. 5-10.

3. . **Л.Н.Латышева**, **Н.М.Соболевский**, Э.А.Коптелов, Р.Д.Илич. *Математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100 ИЯИ РАН*. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 11

4. . V.A.Karnaukhov, S.P.Avdeyev, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, P.A.Rukoyatkin, V.I.Stegaylov, H.Oeschler, **A.S.Botvina**. *Expansion time of hot nuclei produced by a relativistic deuteron beam*. Phys. At. Nuclei, **78**, No.5 (2015) 574-578 (Yad. Fiz. **78**, No.7-8 (2015) 618-622).

5. Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов - В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып 18, стр. 96-101

6. I. S. Lyubutin, **A. G. Gavrilyuk**, Yu. A. Davydova, A. G. Ivanova, I. A. Troyan, S. N. Sul'yanov, S. S. Starchikov, S. N. Aksenov, K. V. Glazyrin, "Equation of state and structural phase transitions in iron-based Ba₃TaFe₃Si₂O₁₄ langasite at high hydrostatic pressures", JETP Letters **100(12)**, 798-806 (2015).

Препринты

1. . **Н.М.Соболевский**. Алгоритм запоминания дерева адронного каскада в транспортном коде SHIELD. Препринт ИЯИ РАН 1398/2015, Москва, 2015, 15 с.
2. . **N.Sobolevsky**, A.Botvina, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, **L.Latysheva**, R.Ogul. *Decomposition of the absorbed dose by LET in tissue-equivalent materials within the SHIELD-HIT transport code*. arXiv:1512.04867v1 [nucl-th] 7 Dec 2015 <http://arxiv.org/abs/1512.04867>
3. H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical study of projectile fragmentation in the reactions $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ at 1 GeV/nucleon*. arXiv:1403.4786v1 [nucl-th].
4. A.Ergun, H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, **A.S.Botvina**. *Influence of angular momentum and Coulomb interaction of colliding nuclei on their multifragmentation*. arXiv:1408.2840v1 [nucl-th].
5. Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов - В.Н. Марин, Р.А. Садыков, В.Г. Недорезов, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров — Препринт ИЯИ РАН, 2015, 12 стр.
6. **А.А.Алексеев**, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Ю.В.Рябов, "Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод". Препринт ИЯИ РАН 1413/2015, Москва
7. **А.А.Алексеев**, Ю.В.Григорьев, В.А.Дулин, Э.А.Коптелов, О.Н.Либанова, В.Л.Матушко, Ю.В.Рябов, "Комбинированный спектрометр СВЗ-100 и TOF метод". Препринт ИЯИ РАН 1413/2015, Москва

Участие в конференциях

1. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, **L.Latysheva**, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, **N.Sobolevsky**, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev. *Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (γ,n) reactions*. **Invited talk** at the NUFRA2015 International Conference Kemer, Turkey, October 6-11, 2015. http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Sobolevsky_nufra2015.pdf
2. **L.Latysheva**, **N.Sobolevsky**. *The SHIELD-HIT code for hadron therapy: decomposition in LET of dose fields in tissue and BNCT option*. **Poster talk** at the NUFRA2015 International Conference Kemer, Turkey, October 6-11, 2015. http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Latysheva_nufra2015.pdf
3. R.Ogul, H.Imal, A.Ergun, N.Buyukcizmeci, **A.S.Botvina**, W.Trautmann. *Theoretical Study of Projectile Fragmentations in Relativistic Heavy-Ion Reactions*. EPJ Web of Conference, **93** (2015) 02022 (Proceedings of CGS15, Dresden.) <http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2015/12/contents/contents.html>
4. **A.S.Botvina**. *Production of hypernuclei from excited nuclear residues in relativistic ion collisions: New opportunities for AFTER@LHC*. **Invited talk** at the International Workshop "Probing the Strong Interaction at A Fixed Target Experiment with the LHC beams", Les Houches School, January 12 - 17, 2014, Les Houches, France. <https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=8591>
5. **A.Botvina**. *Statistical approach for supernova matter and nuclear multifragmentation*. Talk at the ATHENA Brussels workshop on Astrophysics. January 27 - 28, 2014 - Universite Libre de Bruxelles - Belgium. <http://exp-astro.physik.uni-frankfurt.de/meetings/athena-brussels-meeting/hprogram-new.php>
6. **A.Botvina**, J.Pochodzalla, M.Bleicher, E.Bratkovskaya, K.Gudima, J.Steinheimer. *Hypernuclei and hypermatter in relativistic heavy-ion reactions*. **Invited talk** at

the International SPHERE workshop, Prague, Czech Republic, September 9-11, 2014.
http://rafael.ujf.cas.cz/sphere2014/presentations/Botvina_SPHERE_2014.pdf

7. **A.Botvina.** *Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions.* Strangeness in Quark Matter, SQM2015, JINR, Dubna, Russia July 6-11, 2015.
<http://sqm.jinr.ru/images/sampledData/Speakers.pdf> <https://indico-new.jinr.ru/getFile.py/access?contribId=295&sessionId=18&resId=0&materialId=slides&confId=34>

8. **A.S. Botvina,** M.Bleicher, E.Bratkovskaya, N.Buyukcizmeci, K.Gudima, I.Mishustin, J.Pochodzalla, A.Sanchez-Lorente, J.Steinheimer. *Formation mechanisms of hypernuclei.* **Invited talk** at the Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation (from basic research to applications) - NUFRA2015. Kemer (Antalya), Turkey, October 4 - 11, 2015.
http://fiac.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Botvina_nufra2015.pdf

9. Разработка сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе твердотельных фотоумножителей и световодов. ЛИТВИН В.С., МАРИН В.Н., КАРАЕВСКИЙ С.Х., ТРУНОВ Д.Н., АКСЕНОВ С.Н., САДЫКОВ Р.А. // НАУЧНАЯ СЕССИЯ НИЯУ МИФИ, 2015, 16 - 20 февраля 2015 г., НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ "МИФИ"/Москва.
<http://nsession.mephi.ru/prog/01/01.htm>

10. New type of scintillation detectors of thermal neutrons based on ZnS(Ag) /LiF and avalanche photodiodes. MARIN V.N., NEDOREZOV V.G., LITVIN V.S., AXENOV S.N., STOLYAROV A.A., TRUNOV D.N., SADYKOV R.N. International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Moscow, Troitsk, Abstracts, Poster Session / 22 , Page 49.
<http://indico.inr.ru/event/4/contributions>

11. A neutron detector with WLS-fibers readout and SiPM. LITVIN Vasily, KARAEVSKY Sergey, SADYKOV Ravil. // International Conference on New Photo-Detectors (PD15), 06 - 09 July 2015, Abstracts, Poster Session / 22 , Page 5.
<http://indico.inr.ru/event/4/contributions> (стендовый доклад)

12. Конференция «Дифракция нейтронов – 2015», 18-19фев.,2015г., Гатчина, Орлова Роща, ПИЯФ НИЦ КИ. <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/difrakciya-nejtronov-2015/about> Р.А.Садыков «Многоцелевая дифракционная и радиографическая установка».

13. Конференция «Дифракция нейтронов – 2015», 18-19фев.,2015г., Гатчина, Орлова Роща, ПИЯФ НИЦ КИ. <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/difrakciya-nejtronov-2015/about> Р.А.Садыков «Камеры высокого давления для дифракции нейтронов»

14. I.S. Lyubutin, **A.G. Gavriiliuk,** I.A. Trojan, S.S. Starchikov, Yu.A. Davydova, P.G. Naumov, V.V. Struzhkin, A.I. Chumakov, and R. Rüffer, “ High-Pressure Magnetic and Structural Transitions in Multiferroics of the Langasite Family Observed by Three Mössbauer Methods TMS, NFS and SMS”, International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME 2015), Hamburg, Germany, 13 – 18 September 2015, Abstracts p. 157 (**Poster session**).

15. **G. Gavriiliuk,** I. S. Lyubutin, A. A. Mironovich, S. G. Ovchinnikov, V. V. Struzhkin, “Interplay between Kondo effect and superconductivity in pnictide superconductors”, 13-я Конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления», ИФВД РАН, Троицк, Московская обл., 05 июня 2015 г. Тезисы докладов стр. 11 (**Устный**).

патент №155572 Держатель камеры высокого давления для рентгеновского дифрактометра, авторы: Садыков Равиль Асхатович, Гаврилюк Александр Григорьевич,

Аксенов Сергей Николаевич, Лебедь Юлия Борисовна, Кузнецов Вячеслав Иванович.
(RU). Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской
Федерации 18сент2015г. Патентообладатель-ИЯИ РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Построена модель конформной космологии, являющаяся альтернативной к моделям инфляции, основанная на представлении о распаде ложного вакуума в классе конформных теорий.

Подведен итог работе, посвященной изучению моделей ранней Вселенной с конформной симметрией, механизмам генерации и свойствам возмущений в этих моделях.

Для класса дилатационно-инвариантных теорий с галилеоном доказана запрещающая теорема, утверждающая наличие возмущений, распространяющихся со сверхсветовыми скоростями в метрике Фридмана-Робертсона-Уокера.

На основе анализа кривых блеска сверхновых типа Ia получены ограничения на пространственно-временные вариации скорости распада никеля-56.

Завершено исследование возможного распределения барионного вещества около нашей Галактики при помощи меры дисперсии, измеряемой по сигналам от пульсаров в шаровых скоплениях и Магеллановых облаках.

Предложен квазиклассический метод вычисления S-матрицы для двух-стадийных гравитационных переходов, включающих в себя коллапс материи с образованием черной дыры и испарением последней.

Предложен конкретный вариант модификации метода beta-разложения улучшающий сходимость рядов теории возмущений в области низких и средних энергий.

Разработан метод вычисления неупругих структурных функций дейтрона в области возбуждения нуклонных резонансов и переходной области к глубоко-неупругому рассеянию.

Проведены вычисления дифференциальных сечений неупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на ядрах ^{12}C , ^{56}Fe и ^{208}Pb .

Исследованы партонные распределения в тяжелых ядрах (^{56}Fe и ^{208}Pb) в области высоких инвариантных переданных импульсов Q .

Изучена феноменология моделей с асимметричной темной материей - хилогенезиса – в экспериментах на ускорителях (LHC).

Изучена феноменология смешивания в хиггсовском секторе суперсимметричных моделей с низким масштабом нарушения суперсимметрии.

Коллаборацией “Байкал” при участии коллектива ОТФ исследована чувствительность нейтринного телескопа Байкал-ГВД к нейтринному сигналу от аннигиляции или распадов частиц темной материи в центре нашей Галактики.

Рассмотрена феноменология гипотетических нейтральных калибровочных бозонов с недиагональным по ароматам взаимодействием с фермионами.

Построено самосогласованное квазиклассическое описание распада ложного вакуума индуцированного столкновениями частиц в (1+1)-мерной теории поля.

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

Завершена обработка результатов измерения рассеяния электронов на изотопах водорода H₂ и D₂ с энергией 14-25 кэВ.

Исследован эффект влияния обратного рассеяния электронов на регистрирующем детекторе на функцию пропускания для спектрометров по типу МАС-Е фильтров.

Рассчитаны поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике КАТРИН с учетом внутреннего движения атомов в молекуле;

Разработаны оптимальные критерии выделения сигнала стерильного нейтрино в спектре бета-распада трития;

Исследован вклад различного представления спектра конечных состояний в измеряемую величину массы нейтрино.

С помощью радиоизотопного источника проведены испытания новых счетчиков нейтронов и прототипов двухкоординатного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/LiF и лавинных фотодиодов (твердотельных фотоумножителей) и световодов из оргстекла. Эти счетчики также были испытаны на импульсных источниках нейтронов РАДЭКС и ИН-06.

С помощью детектирующих пластин «Image plate» Получены профили пучков нейтронов на установках «Кристалл» и «Горизонт».

Методами малоуглового рассеяния рентгеновского излучения (совместно с ИК РАН) и нейтронов (в ОИЯИ) исследована структура наноматериала — диэлектрика с высокой теплопроводностью на основе высокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия.

Также методом малоуглового рассеяния нейтронов (в ОИЯИ) исследована структура водно-маслянных эмульсий и взвесей наноалмазов в воде.

Во время сеанса работы ускорителя, проходившего с 7 по 23 января были измерены профили прямого пучка на установках “КРИСТАЛЛ” и “ГОРИЗОНТ”. Профили были получены при помощи пластин для нейтронной и гамма радиографии FUJI BAS IP 2025 с разрешением 50 мкм.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых.