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
член-корр. РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

24 января 2017 года

# ОТЧЁТ
# О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
# ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

(промежуточный за 2016 год)
0031-2015-0004

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

М.В.Либанов
19 января 2017 года

Москва 2017

# СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н. М.В.Либанов (введение, заключение)
19.01.2017

Исполнители темы:

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

д.ф.-м-н. Ткачёв И.И. (разделы 1,3)
19.01.2017

д.ф.-м-н. Недорезов В.Г. (раздел 1)
19.01.2017

к.ф.-м-н. Конобеевский Е.С. (раздел 1)
19.01.2017

д.ф.-м-н. Куденко Ю.Г. (разделы 1 - 3)
19.01.2017

д.ф.-м-н. Коптелов Э.А. (раздел 1)
19.01.2017

# РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 46 с., 17 рис.

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА, РЕДКИЕ МЮОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ФОТОЯДЕРНЕ 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 2016 год.

Рассматривались проекты:

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

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

Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e»;

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.

Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Предложена модель с правой калибровочной группой U_R(1), действующей на фермионы первого и второго поколений. Показано, что предложенная модель способна объяснить мюонную $(g\text{-}2)_\mu$ аномалию и может быть проверена в ближайшем будущем.

Получена зависимость от числа активных кварков на четырёхпетлевом уровне для соотношений между полюсными и бегущими массами c-, b- и t-кварков. Аналитическая

теория возмущений применена для изучения несинглетной аннигиляции e+e- в адроны, а также для поляризационных правил сумм Бьёркена. Получено хорошее согласие в экспериментальными данными.

Дан детальный расчёт ядерных поправок для неупругого рассеяния электронов на дейтерии и рождения димюонов протонами на дейтериевой мишени. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Исследовано образование плотных пиков тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр на космологической стадии радиационного доминирования. Плотность получающихся по этому механизму пиков значительно больше, чем у гало тёмной материи, которые формируются позже по механизму вторичной аккреции. Если частицы тёмной материи способны аннигилировать, то пики плотности должны являться яркими источниками гамма-излучения. Сравнение рассчитанного аннигиляционного сигнала с данными Fermi-LAT по диффузному гамма-фону ограничивает сверху современный космологический параметр плотности чёрных дыр.

Произведён набор статистического материала на установке ОКА на ускорителе У-70 ИФВЭ. Всего из данных записанных за 2013-2016 гг. планируется реконструировать $O(10^{+8})$ $K^{+}_{e3}$ распадов, представляющих интерес для измерения форм-факторов и поисков аномальных взаимодействий. Продолжалась обработка статистических экспериментальных данных, записанных в ходе нескольких сеансов на ускорителе У-70 в предыдущие годы. Исследовались распады K -> μνγ и K→ eνγ. События надёжно отделены от фона и исследованы на предмет определения структуры распада.

Выполнен анализа данных эксперимента E949 с использованием методов, разработанных для поиска тяжёлых нейтрино. В результате было получено ограничение на вероятность распада $Br(K^{+} \to mu^{+} + X) < 5.7x10^{-7}$ в интервале импульсов мюонов 130-175 МэВ/с, из которого затем получено ограничение на вероятность распада K->mu3nu в Стандартной модели, с учётом nu-nu взаимодействия и 6-ти фермионного взаимодействия.

По теме «Проверка фундаментальных законов сохранения лептонных чисел в процессе μ-e конверсии на ядрах (Эксперимент MECO) проводились работы по анализу калибровочных измерений с помощью космических мюонов и радиоактивного источника $Co^{60}$ ячейки калориметра, состоящей из кристалла LYSO (30x30x50 mm2) с двумя лавинными фото-диодами (APD 10x10мм2 Hamamatsu); получено хорошее согласие результатов.

Осуществлялась поддержка участия студентов и аспирантов в международных конференциях, в научной работе в международных коллаборациях.

В эксперименте ХАДЕС исследовались азимутальные потоки заряженных частиц, полученные в результате измерений реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон. Установлено, что метод, используемый в предварительном анализе коллективных потоков на эксперименте ХАДЕС сильно подвержен так называемым «нон-флоу» эффектам – короткодействующим корреляциям частиц, не связанных с общей плоскостью симметрии столкновения.

Для установки СВМ на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН в 2016г было развернуто изготовление и тестирование на 44 модулей переднего адронного калориметра фрагментов, который будет использоваться для определения центральности и угла плоскости реакции.

Было проведено исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакции $d+^2\mathrm{H}\rightarrow(\mathrm{nn})^{\mathrm{S}}+(pp)^{\mathrm{S}}\rightarrow n+n+p+p$ при энергии дейтронов 15 МэВ на циклотроне НИИЯФ МГУ. Впервые, в кинематически полном эксперименте получено значение энергии квазисвязанного синглетного $^1S_0$ состояния $(nn)^{\mathrm{S}}$ системы.

Выполнен первый в мире успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью, разработанной и созданной российскими участниками коллаборации A2. Высокая эффективность и низкий порог регистрации протонов отдачи в мишени открывают новые возможности в исследовании спиновой структуры протона и получении модельно независимых данных.

Выполнено исследование реакции $\gamma p\rightarrow p\pi^0$ при энергиях фотонов от 425 до 1445 МэВ с использованием поперечно поляризованной протонной мишени и продольно поляризованного пучка. Впервые измерена асимметрия пучок-мишень $F$ и получены новые прецизионные данные для мишенной асимметрии $T$.

Выполнены прецизионные измерения фотонной асимметрии $\Sigma$ для реакции $\gamma\mathrm{p}\rightarrow\pi^0\mathrm{p}$ в диапазоне энергий 320−650 МэВ в коллаборацией A2 на фотонном пучке ускорителя MAMI. Полученные результаты существенно улучшают существующие мировые данные.

Используя опыт работы на импульсном нейтронном источнике «РАДЭКС», сотрудники Института участвовали в пусковых и наладочных работах на сооружаемом импульсном нейтронном источнике ЛНФ ОИЯИ «ИРЕН-1» (г. Дубна). Удалось достигнуть времени жизни быстрых нейтронов в растворе сцинтиллятора около 5-6 мкс.

Проведены исследования временного разрешения и соотношения время-энергия нейтронов спектрометра СВЗ-100 после внесения изменений в конструкцию спектрометра и окружающей биологической защиты.

Продолжены работы по оптимизации конструкции демонстрационного подкритического стенда для решения проблем выжигания минорных актиноидов и ториевого ядерного цикла ядерных энергетических установок будущего.

Продолжены работы по нейтронной радиографии с использованием нейтронных запоминающих пластин Image Plate.

Разработаны модели нейтронного фильтра, детектирующих систем для спектрометров прямой и обратной геометрии.

Развиты методы нейтронной радиографии на белом пучке с использованием нейтронно-чувствительных пластин типа IP Fuji.

Проведено 2 сеанса общей продолжительностью 696 часов работы линейного ускорителя протонов на установки РАДЭКС и импульсный нейтронный источник ИН-06 с энергией 209 МэВ, а также на комплекс протонной терапии с энергиями 209, 158 и 127 МэВ. Длительность импульса изменялась в диапазоне от 1 до 120 мкс, частота следования от 1 до 50 Гц, интенсивность пучка от десятков наноампер при работе на комплекс протонной терапии до 50÷60 микроампер при работе на нейтронный источник. Суммарная наработка с интенсивным пучком составила свыше 3200 мкА·часов при работе на нейтронный источник и 640 мкА·часов при работе на РАДЭКС.

В области протонной лучевой терапии исследованы новые формирующие устройства собственного изготовления.

В области брахитерапии с иттербиевыми источниками было установлено, что частичное экранирование источников позволяет сделать их излучение направленным и лучевая нагрузка на соседние критические органы не превысит допустимого уровня толерантности.

Проведены исследования, направленные на развитие технологии получения актиния-225 и других альфа-излучающих радионуклидов, перспективных для применения в медицине, из облученной ториевой мишени.

Получены экспериментальные сечения радиоизотопов теллура, образующихся в основном и метастабильном состоянии ($^{119g}$Te, $^{119m}$Te, $^{121g}$Te, $^{121m}$Te) при облучении сурьмы протонами средних энергий. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими, рассчитанными по предложенной ранее систематике.

Разработаны методы калибровки модулей переднего адронного калориметра с помощью космических мюонов. Проведены Монте-Карло расчеты влияния отклика переднего адронного калориметра на физические параметры установки MPD/NICA в целом.

Разработаны и произведены сцинтилляционные детекторы элементарных частиц на основе экструзионного полистирола в виде пластин длиной 3 м и шириной от 3 до 10 см. Проведены измерения детектирующих элементов с участием студентов и аспирантов МФТИ и МИФИ на испытательном стенде в ИЯИ РАН и на тестовом пучке в ЦЕРН.

Проведена доработка новой версии и обновление дизайна сайта Программы www.particles_nuclei.inr.ru.

На сильноточном линейном ускорителе ИЯИ РАН проведено шесть сеансов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, обеспечено проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований в том числе направленных на развитие ядерных технологий для медицины, материаловедения и пр. Общая продолжительность сеансов в 2016 году составила 2050 часов. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 85000 мкА·часов при среднем токе пучка до 130 мкА и энергии 143 МэВ. Обеспечена работа ускорителя и транспортировка пучка с энергией 209 МэВ на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ. Работы велись при интенсивности пучка от десятков наноампер для КПТ и до 50÷60 микроампер для ИН-06. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя.

Среди работ по модернизации ускорителя следует отметить работу по разработке первого ускоряющего резонатора (100÷113 МэВ) основной части ускорителя. Выбрана структура CDS, предложенная и разработанная в ИЯИ РАН.

В течение 2016 года проведена модернизация основных систем каналов транспортировки пучка в экспериментальном комплексе: вакуумной системы, системы измерения потерь ионов, системы радиационного контроля, системы питания электромагнитных устройств, системы контроля и управления, системы диагностики пучка. Разработана и испытана высокоскоростная электроника индукционного датчика тока для измерения суб-микросекундных импульсов тока пучка на канале на РАДЭКС, разработана и испытана система быстрой аварийной защиты по разнице токов на канале на ИН-06, разработана и изготовлена электроника многопроволочного профилометра на канале на СВЗ-100, разработана и испытана высокочувствительная электроника индукционного датчика тока на канале на КПТ, собран, установлен и испытан ионизационный монитор для контроля поперечного сечения пучка на канале на КПТ.

В эксперименте Double Chooz получено новое значение угла смешивания $\theta_{13}$ при анализе событий реакции обратного бета распада с захватом нейтрона на водороде. Комбинированная величина для захватов нейтрона на водороде и гадолинии составляет

$\sin^2 2\theta_{13}$ = 0.088±0.033. Измерены выходы космогенных изотопов $^{8}$Li и $^{9}$Li при захвате мюонов ядрами углерода $^{12}$C и $^{13}$C.

В эксперименте GERDA получен новый результат по измерению времени жизни по отношению к двойному бета распаду $^{76}$Ge с улучшенной точностью $T_{1/2}$= (1.926±0.095)·$10^{21}$ лет. Безнейтринный двойной электронный захват на ядре $^{36}$Ar не был обнаружен и уставлен нижний предел на этот процесс равный $T_{1/2} > 3.6 \cdot 10^{21}$ лет. Это на три порядка величины лучше предыдущих ограничений.

Разработана маломасштабная технология очистки отходов обогащенного германия, образовавшихся во время производства детекторов. Создана в России полномасштабная модель установки очистки.

В ИЯИ РАН разработаны и созданы калибровочные системы для установки TAIGA-HiSCORE и для первого телескопа TAIGA-IACT на основе светодиодов высокой мощности, диффузных рассеивателей света и оптоволоконных кабелей. Эти системы успешно тестируются в полевых условиях в Тункинской долине. С помощью этих систем удалось синхронизировать оптические станции установки TAIGA-HiSCORE с точностью ~ 100 пс, что позволяет достичь высокого углового разрешения ~0,1°.

Осенью 2016 года в рамках проекта TAIGA в Тункинской долине смонтирован первый из 10-12 планирующихся узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых.

# СОДЕРЖАНИЕ


Реферат 3

Введение 10

Основные результаты 12

1 Физика элементарных частиц 12

2 Разработка методики и исследование транспортировки сильноточных пучков протонов и отрицательных ионов водорода в экспериментальном комплексе ИЯИ РАН 26

3 Неускорительная физика частиц: двойной безнейтринный бета распад ядер, осцилляции реакторных нейтрино 31

4 Эксперимент Тунка/TAIGA 38

Заключение 42

# ВВЕДЕНИЕ

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

Работы велись по следующим проектам:

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

Экспериментальное исследование редких и запрещённых 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 лаборатория;

Развитие ядерных технологий на протонных пучках Московской мезонной фабрики;

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

Исследование и разработка каналов транспортировки сильноточных 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.

# ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

## 1 Физика элементарных частиц

### 1.1 Теоретическое исследование физики за пределами Стандартной Модели

Научный руководитель Н.В.Красников.

Предложена модель с правой калибровочной группой U_R(1), действующей на фермионы первого и второго поколений. Показано, что предложенная модель способна объяснить мюонную $(g-2)_\mu$ аномалию и может быть проверена в ближайшем будущем.

Получена зависимость от числа активных кварков на четырехпетлевом уровне для соотношений между полюсными и бегущими массами c-, b- и t-кварков. Аналитическая теория возмущений применена для изучения несинглетной аннигиляции e+e- в адроны, а также для поляризационных правил сумм Бьёркена. Получено хорошее согласие в экспериментальными данными.

Дан детальный расчет ядерных поправок для неупругого рассеяния электронов на дейтерии и рождения димюонов протонами на дейтериевой мишени. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Эти расчеты принципиально важны при анализе данных по рассеянию нейтрино на дейтерии и других легких ядрах.

### 1.2 Теоретические исследования космологических аспектов физики частиц

Научный руководитель - академик И.И.Ткачёв.

Исследовано образование плотных пиков темной материи вокруг первичных черных дыр на космологической стадии радиационного доминирования. Плотность получающихся по этому механизму пиков значительно больше, чем у гало темной материи, которые формируются позже по механизму вторичной аккреции. Если частицы темной материи способны аннигилировать, то пики плотности должны являться яркими источниками гамма-излучения. Сравнение рассчитанного аннигиляционного сигнала с данными Fermi-LAT по диффузному гамма-фону ограничивает сверху современный космологический параметр плотности черных дыр, см. рис 1.1. В определенном диапазоне масс полученные ограничения сильнее других известных ограничений.

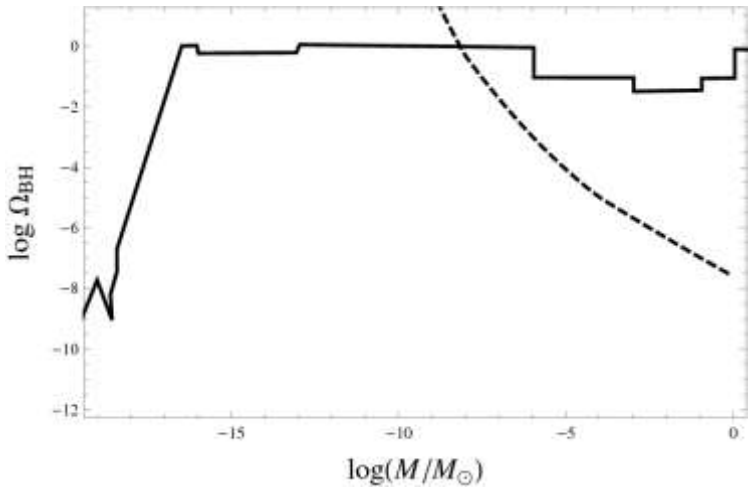



Рисунок 1.1 Ограничения сверху на космологический параметр плотности первичных черных дыр. Сплошная кривая показывает ранее известные ограничения, а штрихованная кривая показывает новое ограничение на основе эффекта аннигиляции частиц темной материи.

1.3 Исследование распадов заряженных К-мезонов (эксперименты ИСТРА, ОКА)

Руководители: д.ф.м.н. Ю.Г.Куденко и чл.-корр. В.Ф. Образцов.

Произведён набор статистического материала на установке ОКА на ускорителе У-70 ИФВЭ. Сеанс проведен со следующими результатами: использовался пучок с импульсом - 17.7 ГэВ/с, через установку пропущено пучковых каонов - $12.2 \times 10^9$, записано триггеров - $1.7 \times 10^9$, из них K2pi – $42 \times 10^6$, и также Ke3 – $5 \times 10^6$.

Всего из данных записанных за 2013-2016 гг. планируется реконструировать $O(10^{+8})$ $K^+_{e3}$ распадов, представляющих интерес для измерения форм-факторов и поисков аномальных взаимодействий.

Продолжалась обработка статистических экспериментальных данных, записанных в ходе нескольких сеансов на ускорителе У-70 в предыдущие годы. Исследовались распады K -> μνγ и K→ eνγ. События надёжно отделены от фона и исследованы на предмет определения структуры распада. В настоящее время работа находится в стадии завершения. Результаты подготавливаются к печати.

1.4 Исследование редких распадов К-мезонов, изучение эффектов CP и T нарушения (Эксперименты E246, E949, БНЛ, E36, КЕК, JPARC)

Научный руководитель Ю.Г. Куденко

Выполнен анализа данных эксперимента E949 с использованием методов, разработанных для поиска тяжелых нейтрино. В результате было получено ограничение на вероятность распада Br(K^+ -> \mu^+ + X) < 5.7x10^{-7} в интервале импульсов

мюонов 130-175 МэВ/с, из которого затем получено ограничение на вероятность распада K->\mu\3\nu: Br(K->\mu\3\nu) < 2.4 x 10^{-7} (Стандартная Модель); Br(K->\mu\3\nu) < 2.4 x 10^{-7} (\nu-\nu взаимодействие); Br(K->\mu\3\nu) < 2.7 x 10^{-7} (6-ти фермионное взаимодействие). Верхний предел на вероятность распада положительного каона на мюон и 3 нейтрино в зависимости от импульса мюона показан на рисунке 1.2.

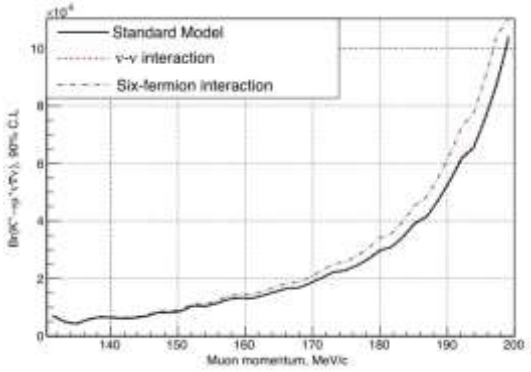



Рисунок 1.2 Верхний предел (90% CL) на вероятность распада K+ -> \mu+ 3\nu в зависимости от импульса мюона.

## 1.5 Проверка фундаментальных законов сохранения лептонных чисел в процессе μ-e конверсии на ядрах (Эксперимент MECO)

Научный руководитель д.ф.-м.н. Р.М. Джилкибаев.

Проводились работы по анализу калибровочных измерений с помощью космических мюонов и радиоактивного источника Co60 ячейки калориметра. состоящей из кристалла LYSO (30x30x50 mm2) с двумя лавинными фото-диодами (APD 10x10мм2 Hamamatsu). Кристалл LYSO состоит из следующих химических элементов LuY2SiO5:Ce. Измерения проводились с новым электронным блоком (WDT 5742 CAEN) по оцифровки и обработке сигналов APDs для калориметра эксперимента Mu2e. Получена оценка для $N_{pe}$ равную 1900 и 2300 ф.э./МэВ, соответственно. Усредненная оценка $N_{pe}$ составляет величину равную 2100 ф.э./МэВ. Оценка $N_{pe}$, полученная из спектра с космическими мюонами с наиболее вероятным энерговыделением 28 МэВ, дает величину равную 1600 ф.э./МэВ и находится в хорошем согласии (30%) с измерениями с радиоактивным источником $Co^{60}$.

## 1.6 Научно-образовательный проект по теоретической и экспериментальной физике элементарных частиц

Руководители Рубаков В.А., Куденко Ю.Г.

Поддержка участия студентов и аспирантов в международных конференции, школах и рабочих совещаниях, проведенных в ЦЕРН, Японии, Китае, США, Польше, Англии, Норвегии, Индии. Поддержка участия молодых ученых, аспирантов и студентов в научной работе в международных коллаборациях. Разработка курсов для обучения студентов и аспирантов в ведущих вузах России и аспирантуре РАН. Поддержка лекторов на школах для школьников, студентов и аспирантов. Закупка оборудования для научной работы с участием студентов и аспирантов.

## 1.7 Исследования по релятивистской ядерной физике

Руководитель проекта А.Б. Курепин.

Исследовались азимутальные потоки заряженных частиц, полученные в результате измерений реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон на установке ХАДЕС. Установлено, что метод, используемый в предварительном анализе коллективных потоков на эксперименте ХАДЕС сильно подвержен так называемым «нон-флоу» эффектам – короткодействующим корреляциям частиц, не связанных с общей плоскостью симметрии столкновения. Была продолжена работа по созданию новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978 канального электромагнитного калориметра для проведения исследований на пучках ядер как действующего ускорителя SIS18 в GSI, так и создаваемого ускорителя SIS-100 на ФАИР в Дармштадте, Германия. На созданном с помощью группы ИЯИ РАН испытательном стенде были проведены калибровка и выбор рабочего HV-напряжения первых 86 модулей калориметра с трехдюймовыми ФЭУ Hamamatsu R6091.

Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН в 2016г было развернуто изготовление и тестирование на космике 44 модулей переднего адронного калориметра фрагментов (PSD – Projectle Spectator Detector) (рис.1.3). Этот калориметр будет использоваться в установке CBM для определения таких глобальных характеристик событий в ядро-ядерных столкновениях как центральность и угол плоскости реакции.

Рисунок 1.3 Процесс сборки одного из модулей адронного калориметра в ИЯИ РАН

### 1.8 Поиск сверхузких дибарионных резонансов на Московской мезонной фабрике

Руководитель проекта - Е.С. Конобеевский.

Было проведено исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакции $d+^2\mathrm{H}\rightarrow(\mathrm{nn})^{\mathrm{S}}+(pp)^{\mathrm{S}}\rightarrow n+n+p+p$ при энергии дейтронов 15 МэВ на циклотроне НИИЯФ МГУ. Впервые, в кинематически полном эксперименте получено значение энергии квазисвязанного синглетного $^1S_0$ состояния $(nn)^{\mathrm{S}}$ системы. Значение энергии состояния определено из сравнения экспериментального времяпролетного спектра нейтрона от развала $(nn^{\mathrm{S}})$ -системы с результатами моделирования, зависящими от этой энергии.

Полученное из $\chi^2$-анализа значение энергии $E_{\mathrm{nn}} = 76 \pm 6$ кэВ, значительно ниже значений, пересчитанных из длин рассеяния в экспериментах по *nd*-развалу (120 – 160 кэВ), что указывает на эффективное усиление *nn*-взаимодействия в промежуточном состоянии в исследуемой реакции. Был проведен анализ данных полученных нами в реакции $nd\rightarrow pnn$ при энергии 40 МэВ, данных по реакции $dd\rightarrow ppnn$, и данных современных экспериментов по определению длины *nn*-рассеяния в реакции $nd\rightarrow pnn$.

Обнаружена зависимость полученных в этих работах значений длин рассеяния ($a_{\mathrm{nn}}$) от относительного импульса двухнейтронной системы и третьей заряженной частицы (протона или дипротона) при соответствующей кинематике реакции. Обнаруженная зависимость объясняется в рамках Дибарионной модели *NN*-взаимодействия введением нового механизма - обмена скалярным σ-мезоном между дибарионом ( в нашем случае *nn*-синглетом $^1S_0$) и заряженной частицей (протоном или *pp*-синглетом $^1S_0$).

1.9 Исследования по физике фотоядерных взаимодействий (изучение ненуклонных степеней свободы атомных ядер)

Научный руководитель д.ф.-м.н. Недорезов В.Г.

Выполнен первый в мире успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью, разработанной и созданной российскими участниками коллаборации A2 (рис. 1.4). Высокая эффективность и низкий порог регистрации протонов отдачи в мишени открывают новые возможности в исследовании спиновой структуры протона и получении модельно независимых данных. Поляризация протонов мишени составила ≈ 65%, время поддержания поляризации при температуре 45 мК в магнитном поле 0,4 Т около 100 часов. На пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя MAMI измерены поляризационные наблюдаемые в реакциях фоторождения $\pi^0$ и $\pi^+$ мезонов, а также асимметрия сечения комптоновского рассеяния, позволяющая извлечь модельно независимые данные о спиновых поляризуемостях протона.

Рис. 1. Элементы активной поляризованной мишени

Выполнено исследование реакции $\gamma p \rightarrow p\pi^0$ при энергиях фотонов от 425 до 1445 МэВ с использованием поперечно поляризованной протонной мишени и продольно поляризованного пучка. Впервые измерена асимметрия пучок-мишень $F$ и получены новые прецизионные данные для мишенной асимметрии $T$. В эксперименте использована система мечения фотонов по энергии ускорителя MAMI и фотонные спектрометры Crystal Ball и TAPS. Выполнено разложение поляризационных сечений по полиномам Лежандра и сравнение с предсказаниями PWA-моделей. Новые данные дают информацию о вкладах различных барионных резонансов в сечение.

Выполнены прецизионные измерения фотонной асимметрии Σ для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ в диапазоне энергий 320−650 МэВ. Измерения проводились коллаборацией A2 на фотонном пучке ускорителя MAMI. Полученные результаты существенно улучшают

существующие мировые данные и хорошо согласуются с предсказаниями моделей MAID, SAID и Бонн-Гатчина. Обнаружено указание на интерференцию между слабыми *F*-волнами и резонансами *N*(1520)3/2− и *N*(1535)1/2−.

## 1.10 Проект РАДЭКС

Руководитель проекта- д.ф.-м.н. Ю.В. Рябов

Используя опыт работы на импульсном нейтронном источнике «РАДЭКС», в течение 2016 г. по Протоколу о сотрудничестве участвовали в пусковых и наладочных работах на сооружаемом импульсном нейтронном источнике ЛНФ ОИЯИ «ИРЕН-1» (г. Дубна). После задержки пусковых работ на «ИРЕН-1» при смене клистронов, было временно прекращено участие в пусковых работах этой установки. Полностью укомплектован 6-ти канальный ЖСД общим объемом 250л сцинтилляционной жидкости ЖС-20. Что позволит эту регистрирующую систему использовать в первых сеансах на установке «РАДЭКС». Проведены испытания прозрачности ЖС при различной концентрации вводимого химического соединения гадолиния на экспериментальном объеме 2л. В результате удалось достигнуть времени жизни быстрых нейтронов в растворе ЖС около 5-6 мкс.

В настоящее время проводится испытание долговременной стабильности раствора ЖС при достигнутой концентрации гадолиния. (Рук. Рябов Ю.)

## 1.11 Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце

Научный руководитель д.ф.- м.н. Э.А.Коптелов.

Проводились исследования временного разрешения и соотношения время-энергия нейтронов спектрометра СВЗ-100 после внесения изменений в конструкцию спектрометра и окружающей биологической защиты. Изучалось влияние рецикличных нейтронов на фоновую подложку в нейтронных спектрах деления полученных методом спектрометрии по времени замедления. Исследовалось влияние активационных γ-квантов на спектры радиационного захвата нейтронов измеренных методом СВЗ.

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

Руководитель проекта – Коптелов Э.А.

Были продолжены работы по выработке оптимального решения создания демонстрационного подкритического стенда для подхода к решению проблем выжигания минорных актиноидов, а также проблемы ториевого ядерного цикла ядерных энергетических установок будущего. Продолжено дальнейшее развитие транспортного

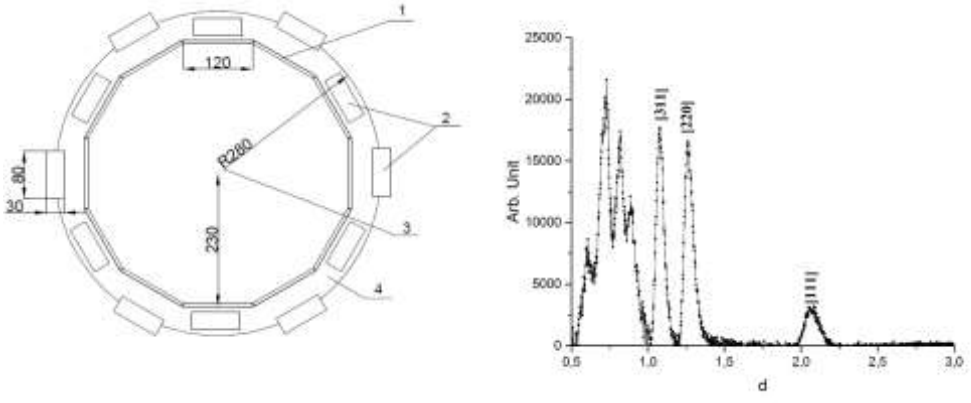
кода SHIELD как инструмента математического моделирования процессов взаимодействия частиц с веществом.

### 1.13 Развитие новых методов регистрации нейтронов

Руководитель проекта к.-ф.м.н. Р.А.Садыков.

Продолжены работы по нейтронной радиографии с использованием нейтронных запоминающих пластин Image Plate. Получены профили падающих нейтронных пучков на месте образца и на выходе из многослойного концентратора на установках «ГЕРКУЛЕС» и «КРИСТАЛЛ».Проведена проверка сходимости пучка на месте образца в установке «ГЕРКУЛЕС» . Методом нейтронной радиографии на белом пучке были измерены образцы камер высокого давления с механическими дефектами. Исследование контраста позволило выявить наличие трещины, возникшей в результате экстремального нагружения. В процессе съемки были использованы коллиматор соллера и бериллиевый фильтр для оценки влияния их на разрешение вблизи образца.

На установках «КРИСТАЛЛ» (канал №8, ИН06) и «ГЕРКУЛЕС»(канал №10, ИН06) были протестированы два кольцевых детектора, состоящих из 12 линейных сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов. Эти кольцевые детекторы могут перемещаться вдоль оси пучка нейтронов. В качестве образца был взят порошок карбонадо. Дифрактограммы получены при трех различных конфигурациях детектирующей системы, был проведен монтаж защиты из кадмия.




а б

Рисунок 1.5 Кольцевой детектор, состоящий из 12 линейных сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов (а) и нейтронограмма поликристаллического технического алмазного порошка как сумма 12 нейтронограмм (б).

## 1.14 Разработка время-пролетных спектрометров неупругого рассеяния нейтронов на нейтронном комплексе ИЯИ РАН

Руководители проекта - Э.А. Коптелов, Е.С. Клементьев.

Были разработаны модели следующих основных узлов: нейтронного фильтра, детектирующих систем для спектрометров прямой и обратной геометрии. Геометрические параметры и состав узлов был оптимизирован при помощи Монте-Карло моделирования. Использовались нейтронные транспортные коды McStas и VITESS. Такое моделирование является в настоящее время обязательным этапом при разработке установок в ведущих нейтронных центрах, ни один новый прибор не создается без предварительной оптимизации параметров компонент.

Были оптимизированы геометрические параметры нейтронного фильтра на основе охлаждаемого до криогенных температур поликристаллического бериллия с порогом пропускания 4.9 meV. Была разработана новая методика разделения парциальных вкладов в спектр магнитных возбуждений;

Был определен магнитный вклад от f- и d-электронных подсистем в спектр возбуждений кобальтитов редкоземельных ионов, определен магнитный формфактор для данных соединений.

## 1.15 Создание и приборное оснащение нейтронного комплекса ИЯИ РАН

Руководители Э.А.Коптелов, Р.А.Садыков.

Основной частью ядерно-физических установок, нейтронографических и мессбауэровских спектрометров является детектор, измеряющий энергию и количество рассеянных от образца в различных направлениях нейтронов и гамма лучей. Образцы при этом могут находиться в различных условиях: температура, магнитное поле и давление. С этой целью были направлены усилия на развитие новых детекторов и создание криостатов и камер высокого давления.

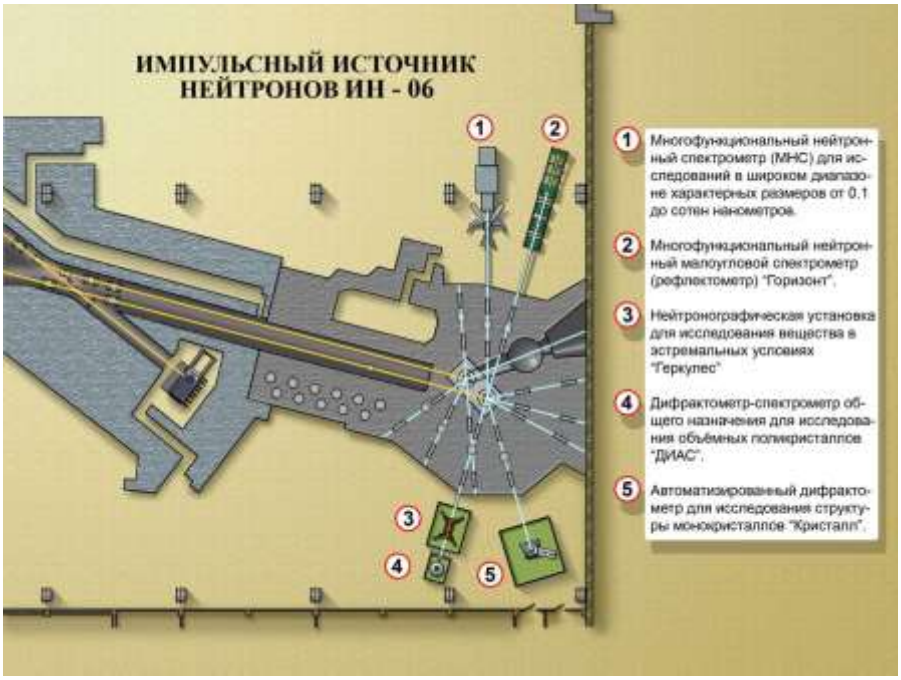



Рисунок 1.6 Установки источника тепловых нейтронов ИН-06 для исследования конденсированных сред.

В текущем году было произведено развитие методов нейтронной радиографии на белом пучке с использованием нейтронно-чувствительных пластин типа IP Fuji. Пластины типа Image Plate чувствительны только к гамма, но благодаря покрытию из оксида гадолиния становиться возможно регистрировать нейтронное излучение. Пластины обладают эффектом памяти, и для очистки изображение с них необходимо использовать яркие люминесцентные лампа. Благодаря высокой разрешающей способности считывателя(50 мкм) они идеально подходят для радиографических исследований.

## 1.16 Развитие ядерных технологий на протонных пучках Московской мезонной фабрики

Руководитель Фещенко А.В.

В 2016 году на установки экспериментального комплекса проведено 2 сеанса общей продолжительностью 696 часов. Работы проводились на установки РАДЭКС и импульсный нейтронный источник ИН-06 с энергией 209 МэВ, а также на комплекс протонной терапии с энергиями 209, 158 и 127 МэВ. Длительность импульса изменялась в диапазоне от 1 до 120 мкс, частота следования от 1 до 50 Гц, интенсивность пучка от десятков наноампер при работе на комплекс протонной терапии до 50÷60 микроампер при работе на нейтронный источник. Суммарная наработка с интенсивным пучком составила свыше 3200 мкА·часов при работе на нейтронный источник и 640 мкА·часов при работе на РАДЭКС.

Помимо выполнения физической программы и плана научно-исследовательских работ в первом сеансе совместно с органами Роспотребнадзора проводились измерения радиационной обстановки в здании экспериментального комплекса и на прилегающих территориях с целью подготовки материалов для получения санитарно-эпидемиологического заключения. При этом пучок подавался на установки РАДЭКС, ИН-06 и спектрометр по времени замедления СВЗ-100. Заключение было получено осенью 2016 года сроком на пять лет.

## 1.17 Радиотерапия

Руководитель Акулиничев С.В.

В области протонной лучевой терапии были проведены два тестовых сеанса с подачей пучка протонов в процедурную КПТ. В этих сеансах были исследованы новые формирующие устройства собственного изготовления. На Рис. 1.7 показаны результаты измерения профилей пучка в зависимости от юстировки.

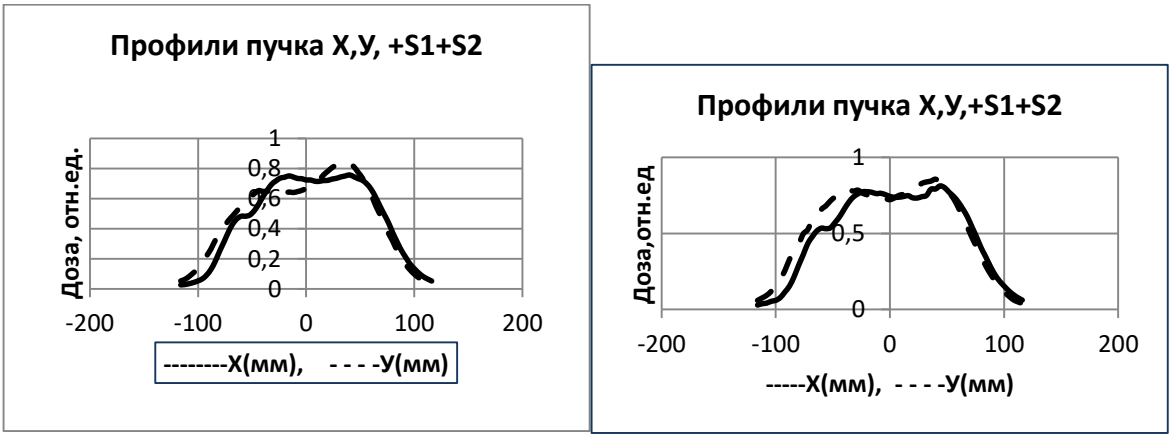



Рисунок 1.7 Варианты юстирования вторичного рассеивателя.

В проведенных сеансах было установлено, что новые формирующие устройств обеспечивают требуемые профили и глубинные дозовые распределения пучков только при условии точного их выставления по оси пучка. Таким образом была впервые показана и численно определена чувствительность параметров сформированных пучков к углам установки формирующих устройств по отношению к начальному пучку протонов.

В области брахитерапии с иттербиевыми источниками проводились исследования радиационных свойств иттербиевых источников с использованием оригинальной монте-карловской программы Fotelp. Было установлено, что частичное экранирование иттербиевых источников позволяет сделать их излучение направленным. Например, полу-

экран из вольфрама толщиной только 1 мм позволяет добиться градиента мощности излучения в нужном направлении почти на порядок величины (см. рисунок 1.8). Это в свою очередь позволяет повысить качество лучевой терапии за счет защиты от излучения соседних здоровых органов. Было установлено, что в случае внутриполостной брахитерапии с иттербиевыми источниками при радикальном лечении злокачественных опухолей гинекологической и анальной областей лучевая нагрузка на соседние критические органы не превысит допустимого уровня толерантности.

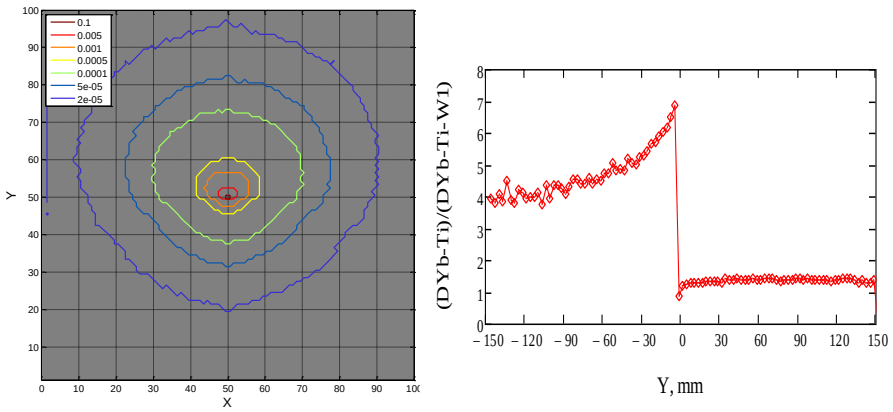



Рисунок 1.8 Изодозы направленного иттербиевого источника активности 1 Ки (слева) и оношение мощности в направлениях вперед-назад для толщины вольфрамого экрана 1мм.

## 1.18 Разработка технологии получения медицинских изотопов на сильноточных протонных пучках

Руководитель Жуйков Б.Л.

Проведены исследования, направленные на развитие технологии получения актиния-225 и других альфа-излучающих радионуклидов, перспективных для применения в медицине, из облученной ториевой мишени.

Изучено влияние радиационного воздействия на экстракционно-хроматографические смолы (ЭХС) Sr Resin и DGA Resin (Triskem Int.), используемые для отделения $^{225}$Ac и $^{223}$Ra. Максимальная доза, поглощенная сорбентами вследствие γ-излучения, составила 150 кГр. Сорбенты облучали в контакте с растворами кислот, используемыми при разделении. Обнаружено, что коэффициенты удерживания, определенные для $Am^{3+}$ и $Sr^{2+}$ (аналоги $Ac^{3+}$ и $Ra^{2+}$), не изменялись в исследуемом диапазоне поглощенных доз. В то же время, сорбционная емкость сорбента снижалась даже для относительно небольших доз. Так, при поглощенной дозе 44 кГр, емкость Sr Resin по $Sr^{2+}$ уменьшилась на 4-7%, а в случае DGA Resin – на 20-22%.

Были изучены закономерности экстракционного, хроматографического и экстракционно-хроматографического поведения Pa(V), позволяющие отделить его от других элементов, образующихся при облучении протонами природного тория. Определены коэффициенты распределения Pa(V) в широком диапазоне концентраций азотных и солянокислых растворов для ряда ЭХС, произведенных компанией Triskem Int. Показано, что среди исследованных смол перспективными для выделения радиоизотопов Pa(V) являются TEVA и Octanol resin.

Получены экспериментальные сечения радиоизотопов теллура, образующихся в основном и метастабильном состоянии ($^{119g}$Te, $^{119m}$Te, $^{121g}$Te, $^{121m}$Te) при облучении сурьмы протонами средних энергий. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими, рассчитанными по предложенной ранее систематике (Б.Л. Жуйков, А.С. Ильинов. Систематика высокоспиновых изомерных отношений в реакциях с протонами средних энергий. *Ядерная физика*, 2006, т. 69, №4, с.1-3). В теоретическом подходе оценивается отношение вероятностей образования ядер в метастабильном и основном состояниях в ядерных реакциях с протонами средних энергий, приводящих к вылету из ядра более двух нуклонов:

$$\sigma_m/\sigma_g \approx a\cdot\exp[-b\cdot(J_m - J_t)]$$

где

$\sigma_m$ – сечение образования ядра в метастабильном состоянии;

$\sigma_g$ – сечение образования ядра в основном состоянии;

$J_m$ и $J_t$ – величины спина образующегося метастабильного ядра и ядра мишени, соответственно;

$a$ и $b$ – эмпирические коэффициенты, $a = 2$, $b = 0.5$.

1.19 Разработка ускорительного проекта НИКА и подготовка экспериментов

Руководители Л.В.Кравчук, А.Б.Курепин.

Разработаны методы калибровки модулей переднего адронного калориметра с помощью космических мюонов. Проведены Монте-Карло расчетов влияния отклика переднего адронного калориметра на физические параметры установки MPD/NICA в целом.

### 1.20 Разработка и создание компактных детекторов ядерных излучений для учебно-исследовательских работ в школах и учебных институтах

Руководитель О.В. Минеев.

Разработаны и произведены сцинтилляционные детекторы элементарных частиц на основе экструзионного полистирола в виде пластин длиной 3 м и шириной от 3 до 10 см. Проведены измерения детектирующих элементов с участием студентов и аспирантов МФТИ и МИФИ на испытательном стенде в ИЯИ РАН и на тестовом пучке в ЦЕРН. В ходе проведения тестов исследовались световыход детекторов, затухание сигнала вдоль всей длины детектора, оптимальное расположение оптоволокна в сцинтилляторе, количество мультипиксельных фотодиодов и оптоволокон, необходимых для достижения заданных параметров по световыходу и временному разрешению.

### 1.21 Информационное обеспечение Программы

Руководитель проекта. к.э.н. Т.Г. Куденко.

Научные консультанты: академик И.И.Ткачев, д.ф.-м.н. Ю.Г. Куденко.

Исполнитель - Сектор Информационных технологий ИЯИ РАН.

Доработка новой версии и обновление дизайна сайта Программы www.particles_nuclei.inr.ru. Обновление данных по разделам сайта. Размещение новых ссылок. Подготовка данных и создание разделов отчета по проектам программы за все предыдущие годы. Подготовка материалов для проведения расширенного заседания Научного Совета Программы. Отображение на страницах сайта материалов о заседании расширенного Научного Совета по соответствующим разделам – доклады, отчеты, иллюстративные и графические материалы.

## 2 Разработка методики и исследование транспортировки сильноточных пучков протонов и отрицательных ионов водорода в экспериментальном комплексе ИЯИ РАН

Руководители Кравчук Л.В., Фещенко А.В.

На сильноточном линейном ускорителе ИЯИ РАН проведено шесть сеансов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, обеспечено проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований в том числе направленных на развитие ядерных технологий для медицины, материаловедения и пр. Общая продолжительность сеансов в 2016 году составила 2050 часов. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 85000 мкА·часов при среднем токе пучка до 130 мкА и энергии 143 МэВ. Обеспечена работа ускорителя и транспортировка пучка с энергией 209 МэВ на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ. Работы велись при интенсивности пучка от десятков наноампер для КПТ и до 50÷60 микроампер для ИН-06. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя.

Среди работ по модернизации ускорителя следует отметить работу по разработке первого ускоряющего резонатора (100÷113 МэВ) основной части ускорителя. Необходимость выполнения данной работы обусловлена снижением электрической прочности существующего резонатора с шайбами и диафрагмами (DAW) вследствие чего ухудшается надежность работы ускорителя и становится практически невозможным не только увеличение интенсивности пучка, в том числе за счет удвоения частоты следования импульсов, но и приходится ее уменьшать для обеспечения приемлемой надежности работы. В результате проведенного сравнительного анализа как уже используемых в интенсивных ЛУ ионов водорода, так и перспективных структур, с целью снижения затрат на изготовление, выбрана структура CDS, предложенная и разработанная в ИЯИ РАН. Данная структура уже была апробирована в действующем бустере ускорителя электронов установки PITZ, DESY, Zeuthen. Проведена доработка структуры для удовлетворения требованиям первого резонатора ускорителя ИЯИ РАН. Ведется адаптация методик ВЧ настройки секций CDS и проработка узлов объединения секций CDS в резонатор. Выбранная структура имеет поперечные размеры заметно меньшие, чем иные известные структуры (рис. 2.1). При этом обеспечивается ВЧ эффективность в целом не ниже, чем других у структур, увеличение напряженности электрического поля на поверхности структуры минимально, а размеры ячеек во всех четырех секциях максимально унифицированы.

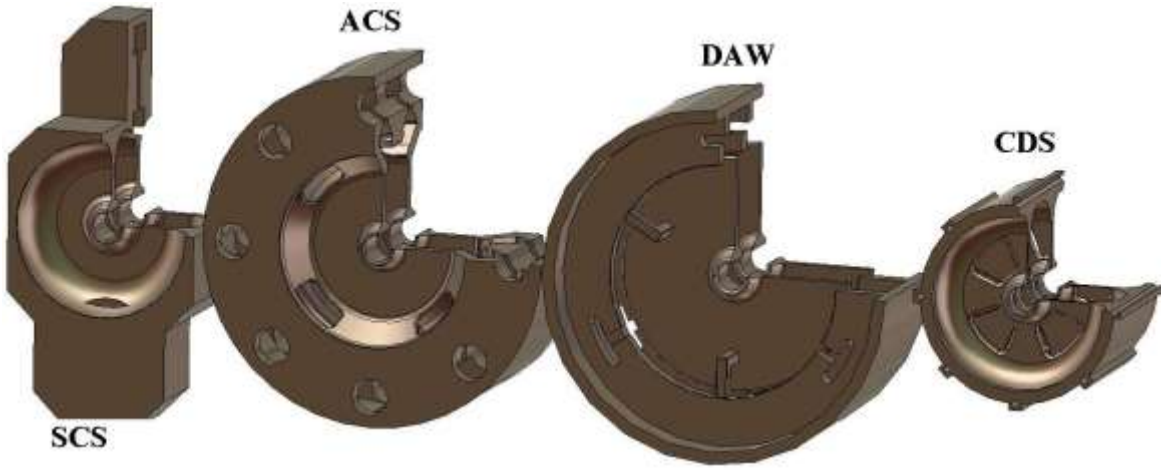



Рисунок 2.1 Сравнение поперечных размеров ячеек различных структур.

В 2016 году на установки экспериментального комплекса проведено 2 сеанса общей продолжительностью 696 часов. Работы проводились на установки РАДЭКС и импульсный нейтронный источник ИН-06 с энергией 209 МэВ, а также на комплекс протонной терапии с энергиями 209, 158 и 127 МэВ. Длительность импульса изменялась в диапазоне от 1 до 120 мкс, частота следования от 1 до 50 Гц, интенсивность пучка от десятков наноампер при работе на комплекс протонной терапии до 50÷60 микроампер при работе на нейтронный источник. Суммарная наработка с интенсивным пучком составила свыше 3200 мкА·часов при работе на нейтронный источник и 640 мкА·часов при работе на РАДЭКС.

Помимо выполнения физической программы и плана научно-исследовательских работ в первом сеансе совместно с органами Роспотребнадзора проводились измерения радиационной обстановки в здании экспериментального комплекса и на прилегающих территориях с целью подготовки материалов для получения санитарно-эпидемиологического заключения. При этом пучок подавался на установки РАДЭКС, ИН-06 и спектрометр по времени замедления СВЗ-100. Заключение было получено осенью 2016 года сроком на пять лет.

В течение 2016 года проведена модернизация основных систем каналов транспортировки пучка в экспериментальном комплексе: вакуумной системы, системы измерения потерь ионов, системы радиационного контроля, системы питания электромагнитных устройств, системы контроля и управления, системы диагностики пучка. Так, например, по системе диагностики выполнены следующие работы: разработана и испытана высокоскоростная электроника индукционного датчика тока для измерения суб-микросекундных импульсов тока пучка на канале на РАДЭКС, разработана

и испытана система быстрой аварийной защиты по разнице токов на канале на ИН-06, разработана и изготовлена электроника многопроволочного профилометра на канале на СВЗ-100, разработана и испытана высокочувствительная электроника индукционного датчика тока на канале на КПТ, собран, установлен и испытан ионизационный монитор для контроля поперечного сечения пучка на канале на КПТ. Пример информации, получаемой о пучке, представлен на рис. 2.2.

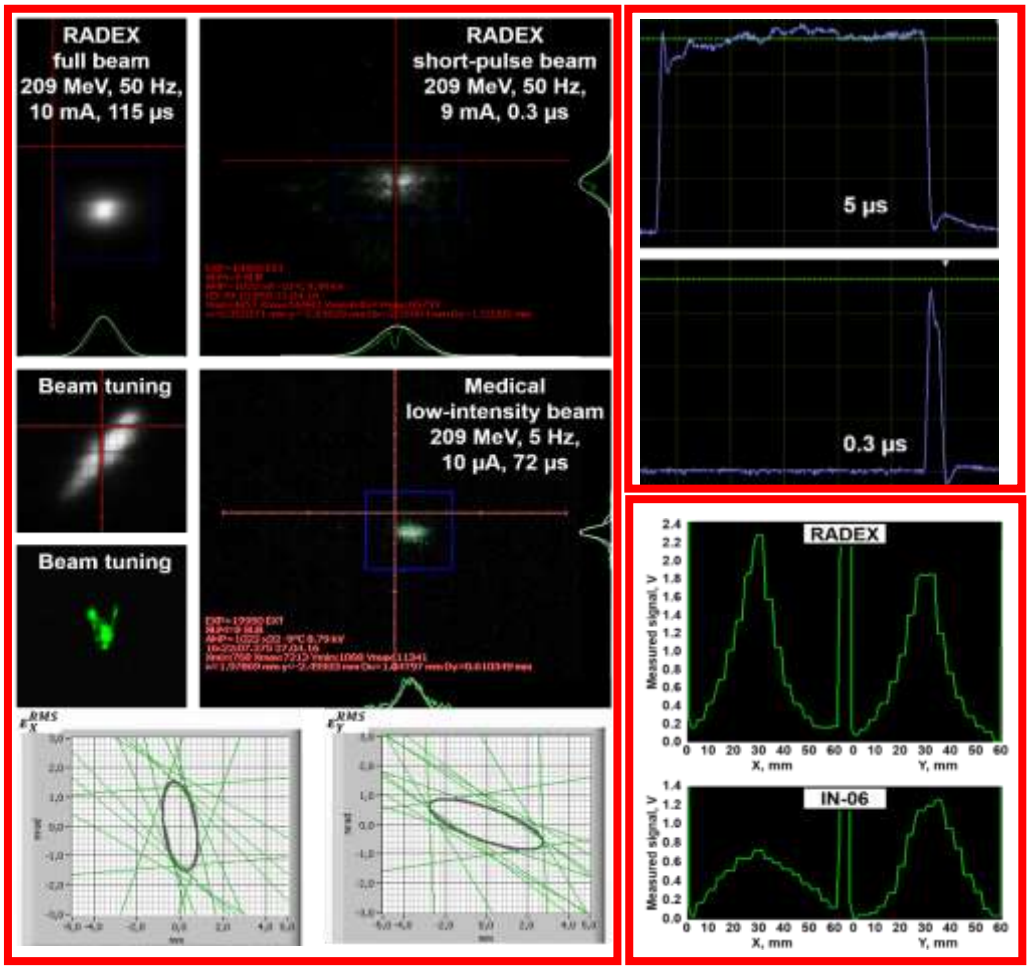



Рисунок 2.2 Пример информации о пучке (слева – поперечные сечения и восстановленные эмиттансы, справа вверху – импульсы тока пучка, справа внизу – профили пучка в каналах на РАДЭКС и ИН-06)

## 2 ПУБЛИКАЦИИ

1) I.V. Rybakov, Y.Z. Kalinin, V.N. Leontev, A.N. Naboka, V.V. Paramonov, V.L. Serov, A.V. Feschenko «Comparison of accelerating structures for the first cavity of the main part of the INR linac», J.Phys.: Conf.Ser., 747, p. 012073.

2) А. С. Белов, В. Н. Зубец, Л. П. Нечаева, Е. С. Никулин, А. В. Турбабин, О. Т. Фролов, «Режим работы протонного инжектора линейного ускорителя ИЯИ РАН с частотой повторения импульсов 100 Гц», ( ПТЭ, 2016, № 2, с. 1–6. Journal Instruments and Experimental Techniques, 59(2), 203-208, DOI 10.1134/S0020441216020032), http://link.springer.com/article/10.1134/S0020441216020032.

3) А. С. Белов, С. Е. Голубовский, В. Н. Зубец, Е. С. Никулин, О. Т. Фролов, СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ПУЧКА ИОНОВ ВОДОРОДА (принято в печать в ПТЭ).

4) V. Paramonov, “Possible Parameters of Proton Acceleration Using Backward Traveling Wave Harmonic”. ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, Vol. 13, No. 7, pp. 901–906. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016. (В журнале «Письма в журнал Физика атомного ядра и элементарных частиц»).

5) V. Paramonov, S. Philipp, I. Rybakov, A. Skassyrskaya, F. Stephan. “Physics design of an L-band normal conducting RF gun cavity for high peak and average RF power”. (Направлена статья в журнал Nuclear Instruments and Methods, A.)

6) A. S. Belov, «Design of Transversal Phase Space Meter for Atomic Hydrogen Beam Source», (International Journal of Modern Physics: Conference Series, Volume 40 (2016), DOI: 10.1142/S2010194516601010, 1660101.)

Доклады на конференциях и школах

1) I.V. Rybakov, Y.Z. Kalinin, V.N. Leontev, L.V. Kravchuk, A.N. Naboka, V.V. Paramonov, V.L. Serov, A.V. Feschenko «Proposal of the Accelerating Structure for the First Cavity of the Main Part of INR Linac», RuPAC’16, St.-Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

2) I.V. Rybakov, I.I. Isaev, «Estimation of Multipacting in CDS Structure», RuPAC’16, St.-Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

3) I.V. Rybakov, V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya «Manufacturing Tolerances Estimation for Proton Linac Cavities», RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

4) A.I. Kvasha, V.A.Feschenko, V.L.Serov “Development of the INR Linac DTL RF System” RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

5) A.I.Kvasha, V.L.Serov “Powerful RF triode as anode modulator vacuum tube”, RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

6) V.S. Klenov, S.E. Bragin, O.T. Frolov, S.E. Golubovski, O.V. Grekhov, O.M. Volodkevich, V.N. Zubets. “The pepper-pot emittance measuring device at the 400 kev H-minus lebt channel”, RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

7) S. Gavrilov, A. Feschenko, P. Reinhardt-Nickoulin “INR RAS Instrumentation for Bunch Shape and Beam Cross-Section Monitoring”, RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

8) D. Chermoshentsev, A. Feschenko, S. Gavrilov “Electrodynamic Characteristics of RF-Deflector for Bunch Shape Monitor”, RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

9) M. Churaev, S. Gavrilov “Thermal Loads of Wire-Based Beam Instrumentation at Ion Linacs”, RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

10) V.V. Paramonov “Optimization of RF Probe Vicinity for Probes in RF Gun Cavities, TUPSA069”, RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

11) V.V. Paramonov “Effective RF Deflecting Structures for Bunch Rotation andDeflection”. RuPAC’16, St.Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

12) S. Gavrilov, V. Gaydash, V. Gorbunov, Y. Kalinin, Y. Kiselev, P. Reinhardt-Nickoulin, I. Vasilyev. Beam diagnostics and instrumentation upgrade for multipurpose research complex of INR RAS. RuPAC’16, St.-Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

13) V. Aseev, S. Bragin, S. Gavrilov, P.Reinhardt-Nickoulin, O. Volodkevich. Beam Simulation and Measurements at Beam Line to RADEX Experimental Area of INR Linac. RuPAC’16, St.-Petersburg, 21-25 ноября 2016 (в печати).

# 3 Неускорительная физика частиц: двойной безнейтринный бета распад ядер, осцилляции реакторных нейтрино

Научный руководители:

Леонид Борисович Безруков

Валерий Витальевич Синёв

Ответственный исполнитель

Игорь Романович Барабанов

Исполнители:

Анна Васильевна Вересникова,

Валерий Иванович Гуренцов,

Евгений Александрович Янович,

Баярто Константинович Лубсандоржиев

## 3 РЕФЕРАТ

Детекторы Double Chooz (дальний и ближний) продолжали успешно функционировать, измеряя спектр реакторных антинейтрино на двух расстояниях. Получено новое значение угла смешивания $\theta_{13}$ при анализе событий реакции обратного бета распада с захватом нейтрона на водороде. Комбинированная величина для захватов нейтрона на водороде и гадолинии составляет $\sin^2 2\theta_{13} = 0.088 \pm 0.033$. Измерены выходы космогенных изотопов $^{8}$Li и $^{9}$Li при захвате мюонов ядрами углерода $^{12}$C и $^{13}$C. Проведен анализ светового фона от наполнителя делителей напряжения в дальнем детекторе.

Имея в виду перспективу исследования нейтринных осцилляций реакторных нейтрино, в состав новой коллаборации JUNO вступила группа сотрудников ИЯИ РАН.

В эксперименте GERDA получен новый результат по измерению времени жизни по отношению к двойному бета распаду $^{76}$Ge с улучшенной точностью $T_{1/2} = (1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$ лет. Также осуществлён поиск других редких процессов с чувствительностью лучшей достигнутой ранее. Безнейтринный двойной электронный захват на ядре $^{36}$Ar не был обнаружен и уставлен нижний предел на этот процесс равный $T_{1/2} > 3.6 \cdot 10^{21}$ лет. Это на три порядка величины лучше предыдущих ограничений.

## 3 ВВЕДЕНИЕ

Ведущийся во Франции эксперимент с реакторными антинейтрино Double Chooz вступил в завершающуюся фазу. В состав коллаборации Double Chooz входит группа группа физиков из ИЯИ РАН в составе: Координатор Леонид Борисович Безруков;

научный руководитель Валерий Витальевич Синёв; ответственный исполнитель Баярто Константинович Лубсандоржиев.

За пять лет измерений накоплена большая статистика зарегистрированных событий реакции обратного бета распада (ОБР) на двух детекторах. Преимущества расположения эксперимента на АЭС с только двумя реакторами позволили тщательно измерить фон детекторов во время остановки обоих реакторов. Измерен спектр от распада радиогенного изотопа $^{9}$Li. За время работы детекторов получен огромный опыт эксплуатирования сцинтилляционных детекторов и изучены их характеристики. Измеренное значение угла смешивания не противоречит измерениям в других аналогичных экспериментах Daya Bay и RENO.

Имея в виду перспективу исследования нейтринных осцилляций реакторных нейтрино, в состав новой коллаборации JUNO вступили слудцющие сотрудникои ИЯИ РАН: Л.Безруков, Е.Дорошкевич, С.Крохалёва, Б.Лубсандоржиев, С.Лубсандоржиев, В.Ляшук, В.Синёв, И.Ткачёв, Е.Янович.

Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий.

Международный эксперимент GERDA, расположенный в подземной лаборатории Национальной лаборатории Гран-Сассо Национального института ядерной физики Италии (LNGS INFN), продолжался в течение 2016 года. Основными результатами 2016 года является окончание разработки и монтажа второй фазы эксперимента. Была продолжена обработка экспериментального материала, полученного в первой фазе эксперимента, результаты опубликованы в печати. В состав коллаборации GERDA входит группа группа физиков из ИЯИ РАН в составе: ОЛВЭНА: I. Barabanov, V. Gurentsov, A. Veresnikova, E. Yanovich, ОЭФ: L. Bezrukov, E. Doroshkevich, B. Lubsandorzhiev, O. Selivanenko, БНО: A.Gangapshev, V. Kazalov, V.V. Kuzminov.

# 3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

## 3.1 Осцилляции реакторных нейтрино

В 2016 г. Коллаборация Double Chooz продолжала набор статистики двумя детекторами. Сотрудники ИЯИ принимали участие в удалённых дежурствах на детекторах при помощи программного обеспечения, созданного в Коллаборации.

Сделан анализ осцилляций на основе регистрации нейтринных событий по захватам нейтрона реакции обратного бета-распада (ОБР) протонами сцинтиллятора [1]. Улучшен отбор событий фона и случайных совпадений. На рис.3.1 показаны спектры наблюдаемых энерговыделений в детекторе с полученными в результате анализа спектрами фонов. Здесь же приведено отношение наблюдаемого спектра антинейтрино к

смоделированному ожидаемому в отсутствии осцилляций. Наблюдается значительное отклонение отношения от единицы, что свидетельствует о регистрации осцилляций нейтрино с углом смешивания $\sin^2 2\theta_{13} = 0.095 \pm 0.038$. Анализ изменения потока при различных уровнях мощности реакторов дает это же значение угла смешивания $\sin^2 2\theta_{13} = 0.120 \pm 0.042$. Комбинированная величина для захватов нейтрона на водороде и гадолинии составляет $\sin^2 2\theta_{13} = 0.088 \pm 0.033$.

Был сделан анализ захвата остановившихся мюонов легкими изотопами, входящими в состав сцинтиллятора: кислорода, азота и углерода [2]. За 489.5 дней наблюдалось $2.3 \times 10^6$ захватов мюонов в детекторе, из них $1.8 \times 10^5$ захвачены легкими элементами.

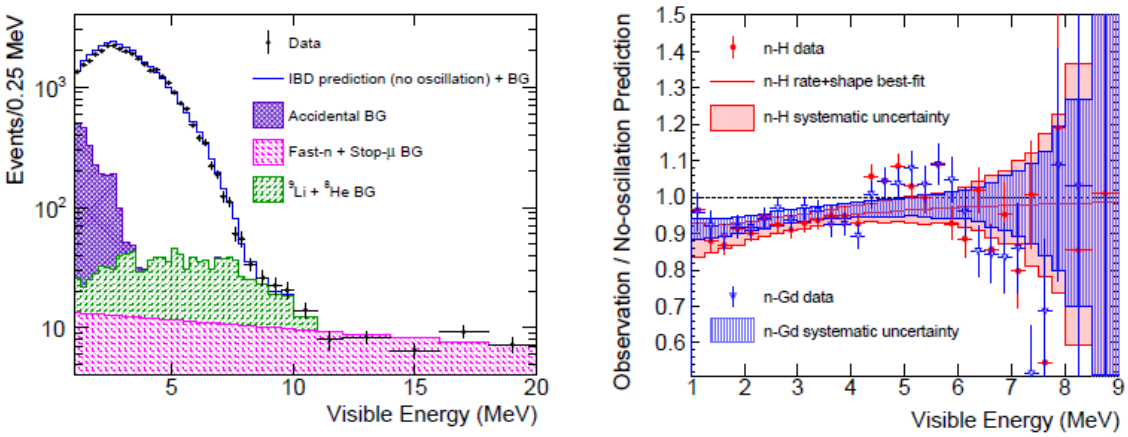



Рисунок 3.1 Левая панель: наблюдаемый спектр кандидатов ОБР (черные точки), в сравнении со смоделированным спектром (синяя гистограмма). Показаны разным цветом вклады, образующие гистограмму модельного спектра: синий – предсказываемый спектр реакции ОБР в отсутствии осцилляций, зеленый – бета-спектр космогенных изотопов $^9$Li и $^8$He, пурпурный – спектр случайных совпадений. Правая панель: Отношение кандидатов ОБР наблюдаемого энергетического распределения к соответствующему распределению, полученному для гипотезы отсутствия осцилляций. Красные точки и полоса систематической погрешности для захватов нейтронов на водороде, синие и соответствующая полоса для захватов на Gd.

Получено наиболее точное на сегодняшний день значение скорости счета реакции $^{12}\mathrm{C}(\mu^-,\nu)^{12}\mathrm{B}$ $6.57^{+0.11}_{-0.21} \times 10^3$ с$^{-1}$ или $(17.35^{+0.35}_{-0.59})$% ядерных захватов. Скорость счета переходов в основное состояние $^{12}$B определена, как $5.68^{+0.14}_{-0.23} \times 10^3$ с$^{-1}$. Измерены до сих пор не наблюдавшиеся реакции $^{12}\mathrm{C}(\mu^-,\nu\alpha)^8\mathrm{Li}$, $^{13}\mathrm{C}((\mu^-,\nu n\alpha)^8\mathrm{Li}$ и $^{13}\mathrm{C}(\mu^-,\nu n)^{12}\mathrm{B}$. Более того

количество □n распадов, сопровождающих остановившиеся мюоны определено на уровне $5.5\sigma$. Реакция $^{13}C(\mu^-, \nu\alpha)^9Li$ обнаружена на уровне $2.7\sigma$ с учетом пренебрежимо малой примеси производства $^8He$.

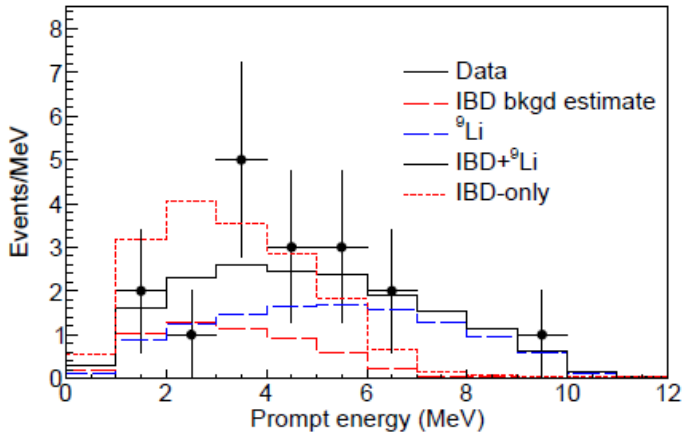



Рисунок 3.2 Мгновенно выделяемая энергия от кандидатов в распады $^9Li$ во временном окне $\Delta t < 0.5$ с. Показаны: фон ОБР событий (красная крупно-штриховая линия), МК спектр $^9Li$ событий (синяя крупно-штриховая линия), их сумма (черная сплошная линия) удовлетворяет полученным данным (точки с ошибкой). Здесь же показан масштабированный спектр чистых ОБР событий (красная мелко-штриховая).

Проведен анализ спонтанного светового излучения, исходящего от эпоксидного наполнителя, покрывающего делитель ФЭУ [3].

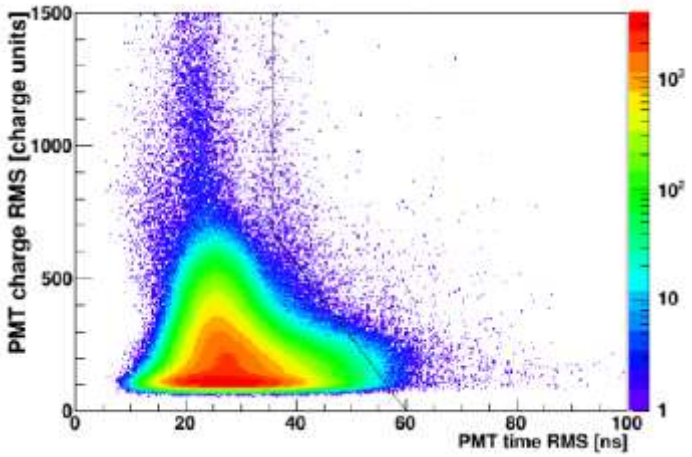



Рисунок 3.3 Двумерное распределение среднеквадратичной дисперсии заряда ФЭУ ($\sigma_q$) и среднеквадратичной дисперсии времени срабатывания ФЭУ ($\sigma_t$) в дальнем детекторе. Ломаная линия показывает установленное обрезание событий светового фона.

Сделан анализ проходящих сквозь детектор потоков мюонов [4]. Получены годовые вариации этих потоков за время работы двух детекторов. Поток мюонов, проходящих через ближний детектор $(3.64\pm0.04)\times10^{-4}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$ и через дальний $(7.00\pm0.05)\times10^{-5}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$.

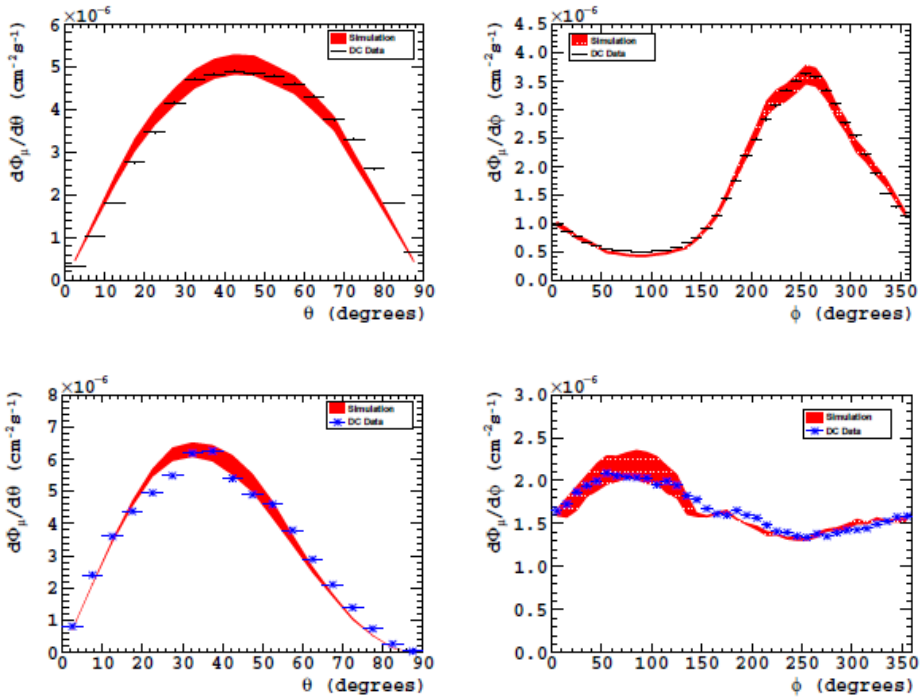



Рисунок 3.4 Угловые распределения (слева для зенитного угла q, справа для азимутального угла f) для дальнего (вверху) и ближнего (внизу) детекторов Double Chooz. Точки – экспериментальные величины, красные области – смоделированные.

В проекте JUNO сотрудники ИЯИ принимали участие в создании нового фотокатода для ФЭУ, используемых в детекторе, и подготовили установку для измерения концентрации изотопа углерода-14 в жидком сцинтилляторе для JUNO.

### 3.2 Поиск безнейтринного двойного бета-распада германия-76

Продолжалась эксплуатация второй фазы эксперимента GERDA. Основная цель второй фазы эксперимента снижение уровня фона на порядок по сравнению с результатом первой фазы до уровня 10-3 /кэВ.кг.год.

На основе экспериментальных данных, полученных в первой фазе эксперимента GERDA выполнен поиск двойного бета распада ($2\nu\beta\beta$) изотопа 76Ge на три возбужденных уровня. Использовались данные по 14-и германиевым детекторам, обогащенным по

изотопу 76Ge, погруженным в жидкий аргон. Анализ был основан на поиске совпадений сигналов двух детекторов, в одном из которых регистрировался гамма квант от распада возбужденного состояния ядра 76Se и двух электронов от двойного бета распада в другом. Из отсутствия сигнала получены верхние пределы для искомых распадов на уровне T(1/2)>(1,6-2,3)·1023 лет. Полученные пределы превосходят на два порядка значения, полученные в предыдущих аналогичных экспериментах.

На основе анализа данных первой фазы эксперимента GERDA с полной экспозицией 17,9 кг.год и улучшенным анализом источников фона получено новое значение периода двух нейтринного бета распада Ge-76: $\boldsymbol{T^{2\nu}_{1/2} = (1.926 \pm 0.095) \times 10^{21}}$ лет.

Разработана и создана система антисовпадений в установке ГЕРДА по поиску двойного бета распада германия-76. Система состоит из набора 810 сцинтилляционных волокон, образующих цилиндр высотой 2,2 м и диаметром 47 см вокруг основных германиевых детекторов. Сцинтилляционные волокна просматриваются 90 кремниевыми фотоумножителями. Система регистрирует сигнал от сцинтилляционных вспышек жидкого аргона. Экспериментально получено, что в эксперименте по регистрации двойного двух нейтринного бета распада германия-76 достигнуто снижение фона в 45 раз.

Разработана маломасштабная технология очистки отходов обогащенного германия, образовавшихся во время производства детекторов. Создана в России полномасштабная модель установки очистки. Начаты отладочные работы.

## 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коллаборация Double Chooz представила измерения нейтринного угла смешивания $\theta_{13}$ (один из параметров, описывающих процесс нейтринных осцилляций) для электронных антинейтрино, наблюдаемых через процесс обратного бета-распада, в котором нейтрон захватывается водородом. Была развита новая техника достижения значительного подавления фона и систематических ошибок. Получена величина $\sin^2 2\theta_{13}$ = 0,095+0,038-0,039 из наблюдаемой скорости событий как функции мощности реактора (этот метод не чувствителен к энергетическому спектру антинейтрино).

Выполнен анализ захвата остановившихся мюонов легкими изотопами, входящими в состав сцинтиллятора: кислорода, азота и углерода [2]. Получено наиболее точное на сегодняшний день значение скорости счета реакции $^{12}$C(□$^{□}$,□)$^{12}$B $6.57^{+0.11}_{-0.21} \times 10^{3}$ с$^{-1}$ или $(17.35^{+0.35}_{-0.59})$% ядерных захватов.

В эксперименте GERDA получен новый результат по измерению времени жизни по отношению к двойному бета распаду $^{76}$Ge с улучшенной точностью $T_{1/2}$= (1.926±0.095)·$10^{21}$ лет. Также осуществлён поиск других редких процессов с

чувствительностью лучшей достигнутой ранее. Безнейтринный двойной электронный захват на ядре $^{36}$Ar не был обнаружен и уставлен нижний предел на этот процесс равный $T_{1/2} > 3.6 \cdot 10^{21}$ лет. Это на три порядка величины лучше предыдущих ограничений.

## 3 ПУБЛИКАЦИИ


1. Y.Abe, S. Appel, T. Abrahao, ... ...(ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhiev, V.Sinev) et al., Measurement of $\theta_{13}$ in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection, JHEP 01 (2016) 163; arXiv:1510.08937 [hep-ex]

2. Y. Abe, T. Abrahao, H. Almazan, …...(ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhiev, V.Sinev)et al., Muon capture on light isotopes in Double Chooz, Phys. Rev. C 93, 054608, 2016; arXiv:1512.07562 [nucl-ex].

3. Y. Abe, T. Abrahao, H. Almazan, …...(ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhiev, V.Sinev)et al., «haracterization of the Spontaneous Light Emission of the PMTs used in the Double Chooz Experiment, JINST 11 (2016) no.08, P08001; arXiv:1604.06895 [physics.ins-det].

4. T. Abrahao, H. Almazan, J.E. dos Anjos, …...(ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhiev, V.Sinev)et al., Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors, arXiv:1611.07845 [hep-ex].

5. Fengpeng An, Guangpeng An, Qi An, … ...(ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhiev, V.Sinev) et al. Neutrino physics with JUNO, J. Phys. G 43 (2016) 030401; arXiv:1507. 05613 [physics.ins-det].

6. Zelimir Djurcic, Vic Guarino, Anatael Cabrera, …...(ОЭФ: L.Bezrukov, B.K Lubsandorzhiev, V.Sinev)et al., JUNO Conceptual Design Report, arXiv:1508. 07166 [physics.ins-det].

7. Limit on the Radiative Neutrinoless Double Electron Capture of 36Ar from GERDA Phase I. GERDA Collaboration (M. Agostini (Gran Sasso), … (ОЛВЭНА: I. Barabanov, V. Gurentsov, A. Veresnikova, E. Yanovich, ОЭФ: L. Bezrukov, E. Doroshkevich, B. Lubsandorzhiev, O. Selivanenko, БНО: A.Gangapshev, V. Kazalov, V.V. Kuzminov) et al.). May 5, 2016. 7 pp. Published in Eur.Phys.J. C76 (2016) no.12, 652. e-Print: arXiv:1605.01756 [nucl-ex]

## 4 Эксперимент Тунка/TAIGA

Научный руководитель Баярто Константинович Лубсандоржиев]

## 4 РЕФЕРАТ

В 2016 году в рамках эксперимента Тунка велись активные работы по проекту TAIGA (Tunka Advanced Instrument for Gamma & cosmic ray Astrophysics).

## 4 ВВЕДЕНИЕ

Проект TAIGA включает в себя успешно функционирующую в течение ряда лет установку Тунка-133 площадью 3 км$^2$ и три установки, находящиеся в стадии создания – это TAIGA-HiSCORE, TAIGA-IACT и TAIGA-GRANDE.

В коллаборацию TAIGA входят физики из ИЯИ РАН: Б.К. Лубсандоржиев, Г.И.Рубцов.

TAIGA-HiSCORE – это проект широкоугольного черенковского детектора ШАЛ с порогом в несколько десятков ТэВ для исследований в области физики космических лучей и поиска локальных источников гамма-квантов высоких энергий. Низкий порог регистрации ШАЛ в установке достигается включением в одну оптическую станцию 4-х 10-дюймовых ФЭУ (R7081 фирмы HAMAMATSU), каждый ФЭУ снабжен конусом Винстона, что позволяет увеличить чувствительную площадь оптической станции до 0,64 м$^2$, рис. 1а.

## 4 Статус проекта TAIGA

В настоящее время пущена в строй первая очередь установки TAIGA-HiSCORE, состоящая из 28 оптических станций. Энергетический порог для адронов составляет ~250 ТэВ, что соответствует порогу для гамма-квантов в ~80 ТэВ. На рис. 1б показан измеренный в 2016 году этой установкой энергетический спектр первичного космического излучения. Как видно из рисунка данные TAIGA-HiSCORE хорошо согласуются в области малых энергий с прямыми баллонными экспериментами (ATIC-2) и при больших энергиях с данными нашего детектора Тунка-133. В настоящее время все 28 существующих оптических станций TAIGA-HiSCORE направлены на Крабовидную Туманность для регистрации гамма-квантов высоких энергий от этого локального источника.

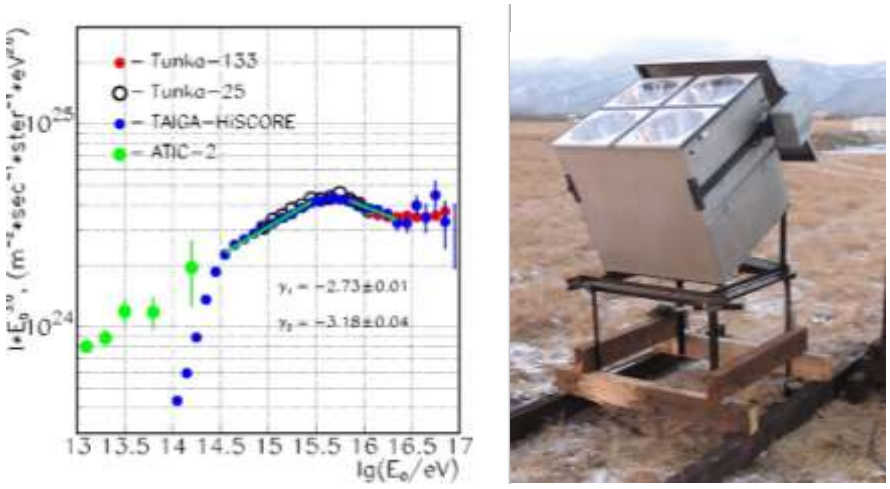



Рисунок 4.1 а) - Оптический модуль черенковского детектора ШАЛ TAIGA-HiSCORE (модуль ориентирован в направлении Крабовидной Туманности); б) – Энергетический спектр первичного космического излучения, измеренный установкой TAIGA-HiSCORE (28 оптических станци1)

Осенью 2016 года в рамках проекта TAIGA в Тункинской долине смонтирован первый из 10-12 планирующихся узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT. На рис. 2 представлен эскиз камеры изображения телескопа, состоящий из 547 малогабаритных фотоумножителей XP1911B и выходной электроники на базе MAROC-3.

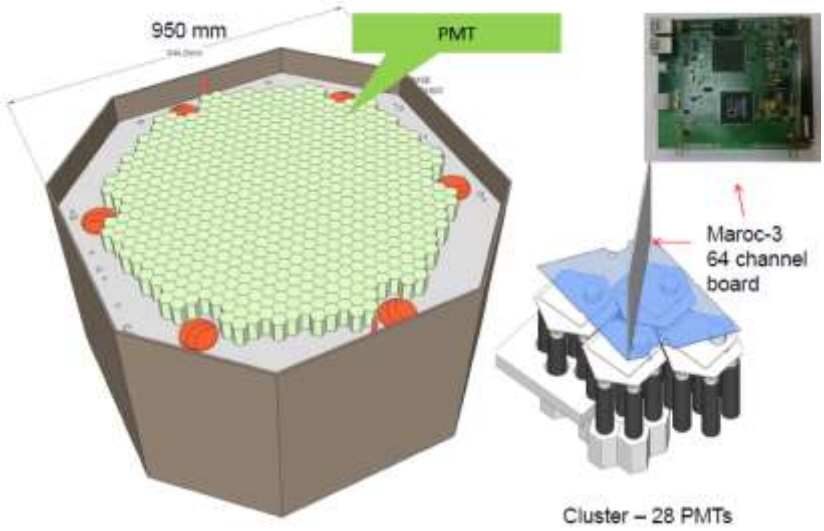



Рисунок 4.2 Эскиз камеры изображения первого телескопа TAIGA-IACT.

На рис.4.3а показан первый телескоп с камерой изображения и несколькими зеркалами. На рис.4.3б можно видеть первые зарегистрированные события от ШАЛ.

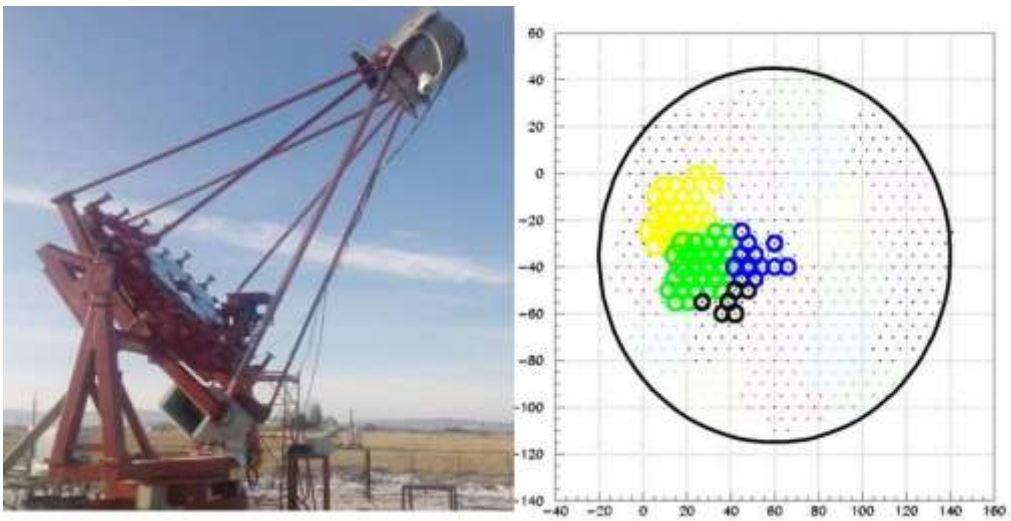



Рисунок 4.3 а) Первый телескоп TAIGA-IACT, смонтированный в Тункинской долине; б) первые зарегистрированные телескопом события от широких атмосферных ливней.

В ИЯИ РАН разработаны и созданы калибровочные системы для установки TAIGA-HiSCORE и для первого телескопа TAIGA-IACT на основе светодиодов высокой мощности, диффузных рассеивателей света и оптоволоконных кабелей. Эти системы успешно тестируются в полевых условиях в Тункинской долине. С помощью этих систем удалось синхронизировать оптические станции установки TAIGA-HiSCORE с точностью ~ 100 пс, что позволяет достичь высокого углового разрешения ~0,1°.

В ИЯИ РАН также разработан и создан измерительный стенд для тестирования и исследования параметров фотоумножителей камер изображения телескопов TAIGA-IACT.

## 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осенью 2016 года в рамках проекта TAIGA в Тункинской долине смонтирован первый из 10-12 планирующихся узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT.

## 4 ПУБЛИКАЦИИ

1. Berezhnev S.F., Budnev N.M., Chiavassa A., et al. The Primary CR Spectrum by the Data of the Tunka-133 Array // JPS conference proceedings. 2016. Vol.9. P.010009.

2. N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, et al. The TAIGA experiment: from cosmic ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 052006.

3. V.V. Prosin, N.M. Budnev, A. Chiavassa, et al. Results and perspectives of cosmic ray mass composition studies with EAS arrays in the Tunka Valley // Journal of Physics: Conference Series 718 (2016) 052031.

4. V.V. Prosin, , S.F. Berezhnev, N.M. Budnev, et al. Results from Tunka-133 (5 years observation) and from the Tunka-HiSCORE prototype // EPJ Web of Conferences 121, 03004 (2016).

5. N. Budnev, I. Astapov, N. Barbashina, et al. The TAIGA experiment: From Cosmic Ray to Gamma-Ray Astronomy // NIMA in press. Available on-line 14 June 2016 (Vienna). / http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.041.

6. O. Gress, I. Astapov, N. Budnev, et al. The wide-aperture gamm-ray telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley // NIMA in press. Available on-line 14 June 2016. / http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.08.031.

12. B.K.Lubsandorzhiev. Multi_TeV Gamma-Ray Astronomy // Physics of Particles and Nuclei. 2016. Vol.47. No.6. P.947-956.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Предложена модель с правой калибровочной группой U_R(1), действующей на фермионы первого и второго поколений. Показано, что предложенная модель способна объяснить мюонную $(g-2)_\mu$ аномалию и может быть проверена в ближайшем будущем.

Получена зависимость от числа активных кварков на четырёхпетлевом уровне для соотношений между полюсными и бегущими массами c-, b- и t-кварков. Аналитическая теория возмущений применена для изучения несинглетной аннигиляции e+e- в адроны, а также для поляризационных правил сумм Бьёркена. Получено хорошее согласие в экспериментальными данными.

Дан детальный расчёт ядерных поправок для неупругого рассеяния электронов на дейтерии и рождения димюонов протонами на дейтериевой мишени. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Исследовано образование плотных пиков тёмной материи вокруг первичных чёрных дыр на космологической стадии радиационного доминирования. Плотность получающихся по этому механизму пиков значительно больше, чем у гало тёмной материи, которые формируются позже по механизму вторичной аккреции. Если частицы тёмной материи способны аннигилировать, то пики плотности должны являться яркими источниками гамма-излучения. Сравнение рассчитанного аннигиляционного сигнала с данными Fermi-LAT по диффузному гамма-фону ограничивает сверху современный космологический параметр плотности чёрных дыр.

Произведён набор статистического материала на установке ОКА на ускорителе У-70 ИФВЭ. Всего из данных записанных за 2013-2016 гг. планируется реконструировать $O(10^{+8})$ $K^+_{e3}$ распадов, представляющих интерес для измерения форм-факторов и поисков аномальных взаимодействий. Продолжалась обработка статистических экспериментальных данных, записанных в ходе нескольких сеансов на ускорителе У-70 в предыдущие годы. Исследовались распады K -> μνγ и K→ eνγ. События надёжно отделены от фона и исследованы на предмет определения структуры распада.

Выполнен анализа данных эксперимента E949 с использованием методов, разработанных для поиска тяжёлых нейтрино. В результате было получено ограничение на вероятность распада $Br(K^+ \to mu^+ + X) < 5.7x10^{-7}$ в интервале импульсов мюонов 130-

175 МэВ/с, из которого затем получено ограничение на вероятность распада K->mu3nu в Стандартной модели, с учётом nu-nu взаимодействия и 6-ти фермионного взаимодействия.

По теме «Проверка фундаментальных законов сохранения лептонных чисел в процессе μ-e конверсии на ядрах (Эксперимент MECO) проводились работы по анализу калибровочных измерений с помощью космических мюонов и радиоактивного источника $Co^{60}$ ячейки калориметра, состоящей из кристалла LYSO (30x30x50 mm2) с двумя лавинными фото-диодами (APD 10x10мм2 Hamamatsu); получено хорошее согласие результатов.

Осуществлялась поддержка участия студентов и аспирантов в международных конференциях, в научной работе в международных коллаборациях.

В эксперименте ХАДЕС исследовались азимутальные потоки заряженных частиц, полученные в результате измерений реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон. Установлено, что метод, используемый в предварительном анализе коллективных потоков на эксперименте ХАДЕС сильно подвержен так называемым «нон-флоу» эффектам – короткодействующим корреляциям частиц, не связанных с общей плоскостью симметрии столкновения.

Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН в 2016г было развернуто изготовление и тестирование на 44 модулей переднего адронного калориметра фрагментов, который будет использоваться для определения центральности и угла плоскости реакции.

Было проведено исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакции $d+^2\mathrm{H}\rightarrow(\mathrm{nn})^{\mathrm{S}}+(pp)^{\mathrm{S}}\rightarrow n+n+p+p$ при энергии дейтронов 15 МэВ на циклотроне НИИЯФ МГУ. Впервые, в кинематически полном эксперименте получено значение энергии квазисвязанного синглетного $^1S_0$ состояния $(nn)^{\mathrm{S}}$ системы.

Выполнен первый в мире успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью, разработанной и созданной российскими участниками коллаборации A2. Высокая эффективность и низкий порог регистрации протонов отдачи в мишени открывают новые возможности в исследовании спиновой структуры протона и получении модельно независимых данных.

Выполнено исследование реакции $\gamma p\rightarrow p\pi^0$ при энергиях фотонов от 425 до 1445 МэВ с использованием поперечно поляризованной протонной мишени и продольно поляризованного пучка. Впервые измерена асимметрия пучок-мишень $F$ и получены новые прецизионные данные для мишенной асимметрии $T$.

Выполнены прецизионные измерения фотонной асимметрии Σ для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ в диапазоне энергий 320−650 МэВ в коллаборацией A2 на фотонном пучке ускорителя MAMI. Полученные результаты существенно улучшают существующие мировые данные.

Используя опыт работы на импульсном нейтронном источнике «РАДЭКС», сотрудники Института участвовали в пусковых и наладочных работах на сооружаемом импульсном нейтронном источнике ЛНФ ОИЯИ «ИРЕН-1» (г. Дубна). Удалось достигнуть времени жизни быстрых нейтронов в растворе сцинтиллятора около 5-6 мкс.

Проведены исследования временного разрешения и соотношения время-энергия нейтронов спектрометра СВЗ-100 после внесения изменений в конструкцию спектрометра и окружающей биологической защиты.

Продолжены работы по оптимизации конструкции демонстрационного подкритического стенда для решения проблем выжигания минорных актиноидов и ториевого ядерного цикла ядерных энергетических установок будущего.

Продолжены работы по нейтронной радиографии с использованием нейтронных запоминающих пластин Image Plate.

Разработаны модели нейтронного фильтра, детектирующих систем для спектрометров прямой и обратной геометрии.

Развиты методы нейтронной радиографии на белом пучке с использованием нейтронно-чувствительных пластин типа IP Fuji.

Проведено 2 сеанса общей продолжительностью 696 часов работы линейного ускорителя протонов на установки РАДЭКС и импульсный нейтронный источник ИН-06 с энергией 209 МэВ, а также на комплекс протонной терапии с энергиями 209, 158 и 127 МэВ. Длительность импульса изменялась в диапазоне от 1 до 120 мкс, частота следования от 1 до 50 Гц, интенсивность пучка от десятков наноампер при работе на комплекс протонной терапии до 50÷60 микроампер при работе на нейтронный источник. Суммарная наработка с интенсивным пучком составила свыше 3200 мкА·часов при работе на нейтронный источник и 640 мкА·часов при работе на РАДЭКС.

В области протонной лучевой терапии исследованы новые формирующие устройства собственного изготовления.

В области брахитерапии с иттербиевыми источниками было установлено, что частичное экранирование источников позволяет сделать их излучение направленным и лучевая нагрузка на соседние критические органы не превысит допустимого уровня толерантности.

Проведены исследования, направленные на развитие технологии получения актиния-225 и других альфа-излучающих радионуклидов, перспективных для применения в медицине, из облученной ториевой мишени.

Получены экспериментальные сечения радиоизотопов теллура, образующихся в основном и метастабильном состоянии ($^{119g}$Te, $^{119m}$Te, $^{121g}$Te, $^{121m}$Te) при облучении сурьмы протонами средних энергий. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими, рассчитанными по предложенной ранее систематике.

Разработаны методы калибровки модулей переднего адронного калориметра с помощью космических мюонов. Проведены Монте-Карло расчеты влияния отклика переднего адронного калориметра на физические параметры установки MPD/NICA в целом.

Разработаны и произведены сцинтилляционные детекторы элементарных частиц на основе экструзионного полистирола в виде пластин длиной 3 м и шириной от 3 до 10 см. Проведены измерения детектирующих элементов с участием студентов и аспирантов МФТИ и МИФИ на испытательном стенде в ИЯИ РАН и на тестовом пучке в ЦЕРН.

Проведена доработка новой версии и обновление дизайна сайта Программы www.particles_nuclei.inr.ru.

На сильноточном линейном ускорителе ИЯИ РАН проведено шесть сеансов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, обеспечено проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований в том числе направленных на развитие ядерных технологий для медицины, материаловедения и пр. Общая продолжительность сеансов в 2016 году составила 2050 часов. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 85000 мкА·часов при среднем токе пучка до 130 мкА и энергии 143 МэВ. Обеспечена работа ускорителя и транспортировка пучка с энергией 209 МэВ на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ. Работы велись при интенсивности пучка от десятков наноампер для КПТ и до 50÷60 микроампер для ИН-06. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя.

Среди работ по модернизации ускорителя следует отметить работу по разработке первого ускоряющего резонатора (100÷113 МэВ) основной части ускорителя. Выбрана структура CDS, предложенная и разработанная в ИЯИ РАН.

В течение 2016 года проведена модернизация основных систем каналов транспортировки пучка в экспериментальном комплексе: вакуумной системы, системы измерения потерь ионов, системы радиационного контроля, системы питания

электромагнитных устройств, системы контроля и управления, системы диагностики пучка. Разработана и испытана высокоскоростная электроника индукционного датчика тока для измерения суб-микросекундных импульсов тока пучка на канале на РАДЭКС, разработана и испытана система быстрой аварийной защиты по разнице токов на канале на ИН-06, разработана и изготовлена электроника многопроволочного профилометра на канале на СВЗ-100, разработана и испытана высокочувствительная электроника индукционного датчика тока на канале на КПТ, собран, установлен и испытан ионизационный монитор для контроля поперечного сечения пучка на канале на КПТ.

В эксперименте Double Chooz получено новое значение угла смешивания $\theta_{13}$ при анализе событий реакции обратного бета распада с захватом нейтрона на водороде. Комбинированная величина для захватов нейтрона на водороде и гадолинии составляет $\sin^2 2\theta_{13} = 0.088 \pm 0.033$. Измерены выходы космогенных изотопов $^{8}$Li и $^{9}$Li при захвате мюонов ядрами углерода $^{12}$C и $^{13}$C.

В эксперименте GERDA получен новый результат по измерению времени жизни по отношению к двойному бета распаду $^{76}$Ge с улучшенной точностью $T_{1/2} = (1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$ лет. Безнейтринный двойной электронный захват на ядре $^{36}$Ar не был обнаружен и уставлен нижний предел на этот процесс равный $T_{1/2} > 3.6 \cdot 10^{21}$ лет. Это на три порядка величины лучше предыдущих ограничений.

Разработана маломасштабная технология очистки отходов обогащенного германия, образовавшихся во время производства детекторов. Создана в России полномасштабная модель установки очистки.

В ИЯИ РАН разработаны и созданы калибровочные системы для установки TAIGA-HiSCORE и для первого телескопа TAIGA-IACT на основе светодиодов высокой мощности, диффузных рассеивателей света и оптоволоконных кабелей. Эти системы успешно тестируются в полевых условиях в Тункинской долине. С помощью этих систем удалось синхронизировать оптические станции установки TAIGA-HiSCORE с точностью ~ 100 пс, что позволяет достичь высокого углового разрешения ~0,1°.

Осенью 2016 года в рамках проекта TAIGA в Тункинской долине смонтирован первый из 10-12 планирующихся узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых.