

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В 2012 г. в ЛНФ на импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН продолжались методические работы по подготовке экспериментов. На выведенных пучках нейтронов были испытаны многодетекторная система «Ромашка»-1, предназначенная для измерения нейтронных сечений, и установка АУРА для исследования (n, e) рассеяния. Активно велись прикладные работы с применением методов нейтронной спектроскопии.

Значительная часть фундаментальных исследований в области нейтронной ядерной физики проводилась на нейтронных пучках ядерных центров России, Германии, Республики Корея, Китая, Франции. Работы велись в традиционных направлениях: изучение процессов нарушения пространственной и временной четности при взаимодействии нейтронов с ядрами; изучение процесса деления; экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитных свойств нейтрона и его бета-распада; гамма-спектроскопия нейтронно-ядерных взаимодействий; структура атомного ядра; получение новых данных для реакторных приложений и для ядерной астрофизики; эксперименты с ультрахолодными нейтронами; прикладные исследования.

I. Экспериментальные и методические исследования.

Создание и усовершенствование многоцелевых детекторных систем для измерений нейтронных сечений на установке ИРЕН ЛНФ.

В рамках сотрудничества между ОИЯИ и Институтом ядерных исследований и ядерной энергетики (ИЯИЯЭ) Болгарской академии наук (БАН) в ЛНФ ведутся работы по созданию и модернизации детекторных систем на основе кристаллов NaI «Ромашка-1» и «Ромашка-2». Предполагается использование этих систем для проведения экспериментов на выведенных нейтронных пучках установки ИРЕН.

«Ромашка-1» – это передвижная, легко перестраиваемая, многодетекторная система для регистрации гамма-лучей, состоящая из 24 сцинтилляционных сборки (6-гранных NaI(Tl) кристаллов Amcryst + ФЭУ R1306 с делителем и генератором высоковольтного питания фирмы Hamamatsu) (рис. 17). Проведена энергетическая и временная калибровки кристаллов. Создана система накопления данных на основе двух 16-канальных оцифровщиков AFI Electronics,



Рис. 17. «Ромашка»-1 на канале №3 установки ИРЕН.

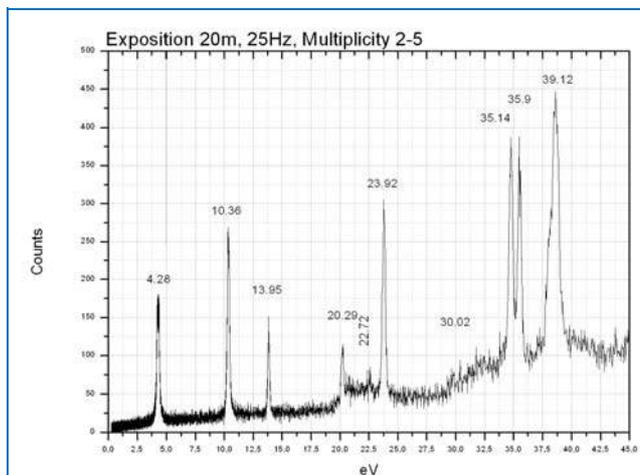


Рис. 18. Зависимость выхода реакции $Ta(n, \gamma)$ от энергии нейтронов, полученная в измерениях на пролетной базе 30 м.

объединенных в один 32-канальный модуль. Система позволяет записывать на жесткий диск всю информацию, регистрируемую каждым из 24х кристаллов, с последующим ее анализом в режиме off-line. Это позволяет регистрировать как временные, так и энергетические спектры, проводить анализ наложений, множественности совпадений, мертвого времени и других параметров, необходимых для корректного определения нейтронных сечений и параметров нейтронных резонансов. В настоящее время система испытывается на пучке нейтронов канала №3 установки ИРЕН (рис. 18).

«Ромашка-2» состоит из двух наборов по 6 монокристаллов NaI(Tl) трапецеидального сечения, в форме ромашки, помещены в металлические цилиндры-контейнеры диаметра порядка 30 см. К торцу каждого кристалла оптически соединен электронный умножитель фотонов ФЭУ-110. Система предназначена для определения концентрации радиоактивных элементов в окружающей среде и исследования радиационного захвата нейтронов в экспериментах, проводимых на установке ИРЕН в ЛНФ ОИЯИ путем измерения множественности гамма-лучей распада радиоактивных ядер.

Работы в рамках подготовки эксперимента по измерению (n,e) рассеяния.

Завершено размещение установки АУРА на канале №2 ИРЕН. Выполнена комплексная отладка программного обеспечения измерительного модуля с новым 8-канальным временным кодировщиком. При испытании установки АУРА на канале №2 ИРЕН с помощью ^3He -счетчика (диаметром 30 мм и давлением 8 ат) были выполнены измерения спектра пучка нейтронов, перекрытого серебряным фильтром. Пучок был ограничен парафин-борным коллиматором до диаметра 80 мм. Счетчик располагался вертикально по оси пучка. Площадь пучка, перекрываемая счетчиком, была $\sim 22 \text{ см}^2$. На рис. 19 показан спектр нейтронного пучка.

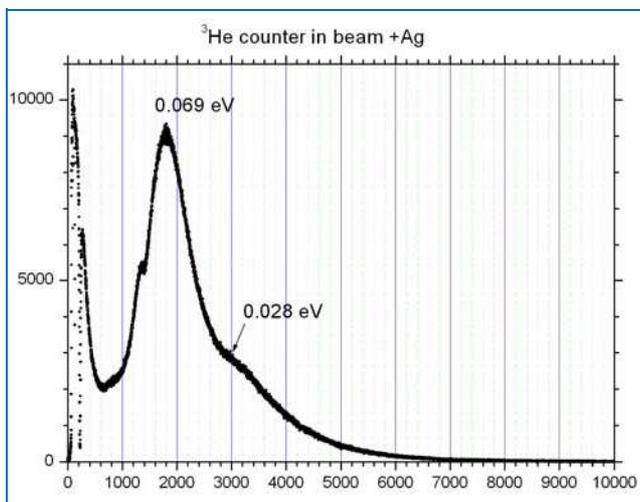


Рис. 19. Спектр нейтронов на канале №2 ИРЕН, ширина временного канала 2 мкс.

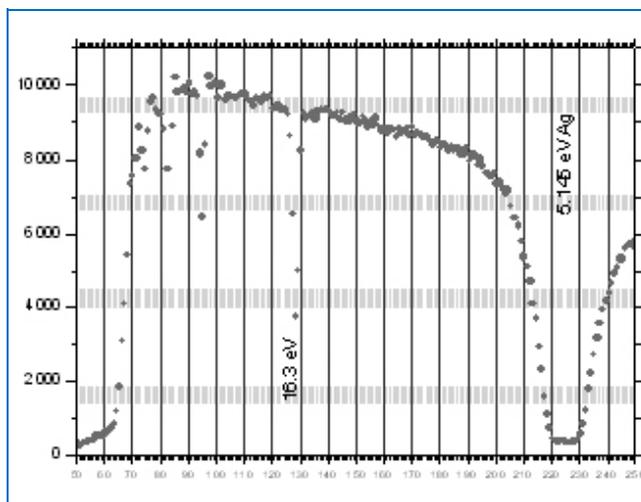


Рис. 20. Участок нейтронного спектра с резонансными провалами серебра, ширина временного канала 2 мкс.

На рис. 20 показан участок спектра с резонансными провалами серебра, который использовался для определения пролетной базы – расстояния между нейтронным источником ИРЕН и местом расположения гелиевого счетчика. Было определено, что база равна 13.75 м, а время между стартовым импульсом и вспышкой ~ 7 мкс. Оцененный интегральный нейтронный поток установки ИРЕН при работе на частоте повторения импульсов 25 Гц составил $1.2 \cdot 10^{11}$ 1/с. Продолжаются расчеты с целью уточнения поправок для эксперимента по извлечению длины n,e-рассеяния из угловой анизотропии медленных нейтронов, рассеиваемых аргоном (точность поправок должна быть не хуже 10–4). Поправка на различие эффективностей детекторов, регистрирующих нейтроны под углами вперед и назад, уточняется расчетами в реальной

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

геометрии с учетом теплового движения атомов газа. Расчеты проводятся на кластере ЛИТ. Необходимая точность уже получена для 20 энергетических точек в диапазоне энергий нейтронов от 0,0065 до 0,8 эВ. Произведены оценки рассеяния и пропускания нейтронов кадмием, покрывающим стенки коллиматоров, для учета соответствующих погрешностей на отражение нейтронов в детекторы от «своих» и противоположных им коллиматоров.

Измерение угловой корреляции между спинами осколков деления и направлением вылета мгновенных нейтронов деления.

Известно, что мгновенные нейтроны деления испускаются в лабораторной системе отсчета с сильной анизотропией, которая в основном обусловлена фокусировкой нейтронов по направлению вылета осколков деления. Однако различные попытки анализа экспериментальных данных по анизотропии нейтронного излучения привели к выводу, что анизотропия не может быть полностью описана только кинематической фокусировкой нейтронов, испускаемых движущимся фрагментом. Возможные причины, которые могли бы объяснить наблюдаемые расхождения в экспериментальных данных – это либо существование так называемых «разрывных» нейтронов, либо наличие анизотропной компоненты испускания нейтронов в системе центра масс осколков. Последняя гипотеза проверяется в настоящем исследовании.

Первый поисковый эксперимент, в котором использовалась детекторная система CODIS для регистрации осколков деления и набор нейтронных детекторов DEMON, был проведен в 2003 году в Страсбурге, чтобы проверить возможность такого рода экспериментов. Анализ этого тестового измерения показал, что анизотропия испускания нейтронов по отношению к спине осколка может быть эффективно измерена с помощью тройной корреляции нейтрон-нейтрон-осколок деления. Однако из-за низкой статистики в этом эксперименте никаких выводов относительно наличия этого эффекта сделать не удалось. Основные эксперименты, в которых была накоплена достаточная статистика, были проведены в Страсбурге в 2009-2011 годах. В 2012 году был проведен анализ этих основных экспериментов. Обработка данных заключалась в определении углов вылета осколков деления, образующих ось деления и в последующем проектировании направлений вылета двух или более нейтронов деления на плоскость, перпендикулярную оси деления. Теоретические расчеты предсказывают наличие угловой анизотропии в этой плоскости, описываемой формулой $W=1+a_2 \cdot \cos(2\varphi)$ (см. **рис. 21а**). Экспериментальная кривая была получена только для части накопленной статистики, что связано со сложной методикой обработки данных, и демонстрирует наличие анизотропии аналогичного вида (см. **рис. 21б**) с коэффициентом a_2 , характеризующим величину эффекта, равным $(6 \pm 3) \times 10^{-3}$, что качественно согласуется с теоретическими расчетами.

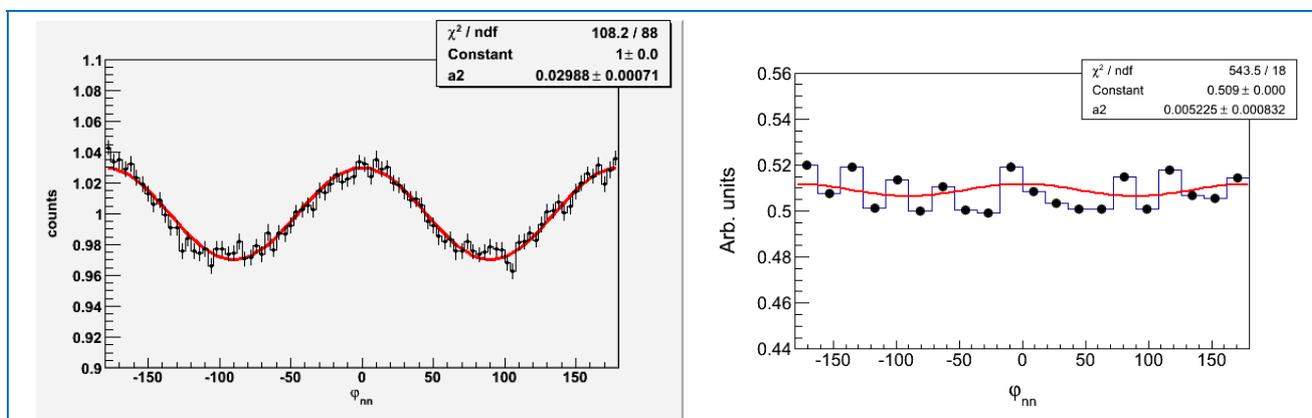


Рис. 21. а) – расчетная кривая угловой анизотропии вылета двух нейтронов в плоскости, перпендикулярной оси деления; б) – экспериментальная кривая, демонстрирующая наличие искомой анизотропии.

Развитие методов исследования физики деления.

Разработан и применен для исследования спонтанного деления ^{252}Cf новый метод восстановления энергии мгновенных нейтронов деления, применимый к единичным событиям с измеренным временем пролета нейтрона. Экспериментальные данные были получены с помощью двойной ионизационной камеры с сетками Фриша и детектором быстрых нейтронов на базе сцинтиллятора NE213. В качестве электронной аппаратуры использовалась система восьми синхронных оцифровщиков с амплитудным разрешением 12 бит и частотой дискретизации 100 МГц. Распределения мгновенных нейтронов по множественности и энергии определялись с помощью анализа кинематики процесса деления с использованием измеренных значений кинетических энергий осколков деления, величины угла между направлением движения осколков деления и нейтрона и измеренной величиной времени пролета нейтроном заданной пролетной базы. Идея восстановления энергетических распределений нейтронов основана на том, что измеренная величина времени пролета нейтрона в единичном событии деления трактовалась как средняя величина из известного времяпролетного распределения. Исходя из этого, определялся набор других реализаций данной величины с соответствующими вероятностями и с ними производились вычисления необходимых кинематических характеристик события деления. В результате усреднения по сформированной выборке получались данные, не содержащие систематических погрешностей, связанных с нелинейной зависимостью между измеренными величинами и величинами, полученными с их применением. В процессе анализа экспериментальных данных был разработан новый метод разделения мгновенных нейтронов и γ -квантов. Метод основан на корреляционных функциях, параметры которых используются для отделения мгновенных γ -квантов от мгновенных нейтронов деления. Максимум корреляционной функции (между детекторным сигналом и экспонентой с постоянной времени спада близкой к аналогичному параметру детекторного сигнала) реализуется при задержке экспоненциального сигнала на время, равное времени пролета нейтроном заданной пролетной базы. Цифровая реализация корреляционного алгоритма позволила более чем на порядок повысить фактор подавление мгновенных γ -квантов деления. Важным достоинством метода явилось то, что он имеет единственный параметр для критерия отбора событий.

Исследования реакций (n,p), (n,альфа).

Продолжены экспериментальные и теоретические исследования реакций (нейтрон, заряженная частица) на быстрых нейтронах. Измерения проводятся на ускорителях Ван-де-Граафа ЭГ-5 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ и ЭГ-4.5 Института физики тяжелых ионов Пекинского университета. Данные о реакциях с вылетом заряженных частиц, вызванных быстрыми нейтронами, представляют значительный интерес для изучения механизмов ядерных реакций, структуры атомных ядер, выбора конструкционных материалов и проведения расчетов при создании новых установок для ядерной энергетики.

Проведены измерения реакций $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$ и $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ при $E_n \sim 4.0 - 6.5$ МэВ, начата обработка данных. Завершена обработка данных из измерений реакций $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P}$ и $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)^{37}\text{Ar}$, выполненных при энергии нейтронов 4.5 - 6.5 МэВ.

В рамках статистической модели выполнен систематический анализ сечений реакции (n, α) в энергетическом диапазоне от 6 до 20 МэВ. Из сравнения экспериментальных и теоретических значений сечений был получен фактор кластеризации α -частиц. Показано, что этот фактор зависит от энергии нейтронов.

Исследования структуры ядра.

Продолжается анализ экспериментальных данных по интенсивностям двухквантовых каскадов в ~ 40 ядрах из области масс $39 < A < 201$. Протестировано несколько известных и предполагаемых феноменологических энергетических зависимостей плотности уровней и

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

радиационных силовых функций каскадных γ -переходов и выявлены наиболее подходящие для максимально точной аппроксимации экспериментальных данных.

Разработка принципиально новых модельных представлений о плотности уровней и ширинах эмиссии γ -квантов необходима прежде всего для оценки потребности в новых экспериментальных данных и определения параметров сверхтекучей фазы ядерной материи. Прежде всего, порога разрыва куперовских пар с точностью не хуже несколько десятков процентов. Это дало бы возможность детально исследовать процесс изменения сверхтекучих свойств такого специфического объекта, как нагретое атомное ядро.

Имеющаяся в настоящее время информация для полномасштабного решения такой задачи недостаточна. Но развитие дальнейших экспериментальных исследований в этом направлении не содержит принципиальных трудностей и вполне может быть реализовано на используемой в физике низких энергий экспериментальной основе.

Исследования возможности поиска нарушения пространственной четности в дифракции нейтронов на ИБР-2.

Выполнены испытания прототипа установки для поиска нарушения пространственной четности в дифракции нейтронов на 30-ти метровой базе 1-го канала ИБР-2. Испытана система регистрации и накопления информации. Определены параметры пучка нейтронов. Получено указание на маятниковое поведение отраженного пучка нейтронов дифракции, что свидетельствует о хорошем качестве монокристалла бромида калия и пучка нейтронов. На основании полученных результатов сделана оценка времени, необходимого для обнаружения эффекта нарушения пространственной четности в дифракции, на уровне статистической точности $3 \cdot 10^{-4}$.

Исследование взаимодействия релятивистского пучка дейтронов с массивной размножающей мишенью из естественного урана.

В рамках проекта "Е и Т РАО" массивная (512 кг) мишенная сборка КВИНТА из природного урана (диаметр ~ 30 см и длина 65 см) с 10 см свинцовым бланкетом в марте и декабре 2012 г. облучалась на Нуклотроне ОИЯИ дейтронами с энергией от 1 до 8 ГэВ. С помощью детекторов ДЕМОН и ИЗОМЕР-М были измерены характеристики энергетических спектров мгновенных нейтронов и временные спектры запаздывающих нейтронов (ЗН) деления между импульсами ускорителя. Была успешно проведена оптимизация защиты детекторов с целью снижения уровня различных источников фона. Результаты измерений декабря 2012 года обрабатываются.

Зависимость от энергии E_d падающих дейтронов относительных полных выходов Y_{DN} ЗН, измеренных в марте 2012 года, согласуется вплоть до $E_d = 8$ ГэВ с соответствующей зависимостью полных чисел деления N_f , полученных интегрированием пространственных распределений скорости деления ядер мишени по объему сборки КВИНТА. Указанные распределения были измерены с помощью твердотельных трековых детекторов и независимо методом активации. Было установлено, что величины Y_{DN} и N_f (при нормировке на один падающий дейтрон и на один ГэВ его энергии) остаются постоянными в пределах погрешностей эксперимента (10-15)% во всем изученном диапазоне энергий дейтронов. Групповой анализ временных спектров ЗН указывает на рост средней энергии нейтронов, вызывающих деление ядер мишени с увеличением энергии падающих дейтронов. Этот результат будет уточнен при анализе данных измерений декабря 2012 года, проведенных с минимальной продолжительностью импульса падающих дейтронов.

Работы по созданию установки для исследования возможности накопления холодных нейтронов на конце выведенного пучка нейтронов.

Ранее нами был предложен проект нового высокоинтенсивного источника УХН производительностью $\sim 10^8$ УХН/с, объемная плотность УХН в котором может достигать 10^5 н/см³, что на 3 порядка превышает ныне существующие источники. Источник представляет собой сферический сосуд, заполненный жидким гелием при температуре 0.6 К, и окруженный замедлителем из твердого метана. Такая схема источника позволяет располагать его на выведенных пучках тепловых нейтронов, что многократно снижает тепловую нагрузку на источник и, соответственно, стоимость источника. Это позволяет многократно расширить спектр применения УХН не только для научных целей, но также для прикладных и образовательных целей.

В рамках исследования возможности создания нового гелиевого источника УХН, велись работы по созданию экспериментальной установки для проведения тестовых измерений. Тестовые измерения должны показать, какой выигрыш в потоке холодных нейтронов можно ожидать в полости на конце нейтронновода при окружении её замедлителем/отражателем из твёрдого метана. Разработаны и изготовлены основные части установки:

- криостат для создания метановой полости и охлаждения метана до гелиевой температуры, включающий систему подачи метана и испарения метана из криостата (рис. 22);
- прерыватель нейтронного потока (рис. 23).



Рис. 22. Криостат (в разобранном виде).

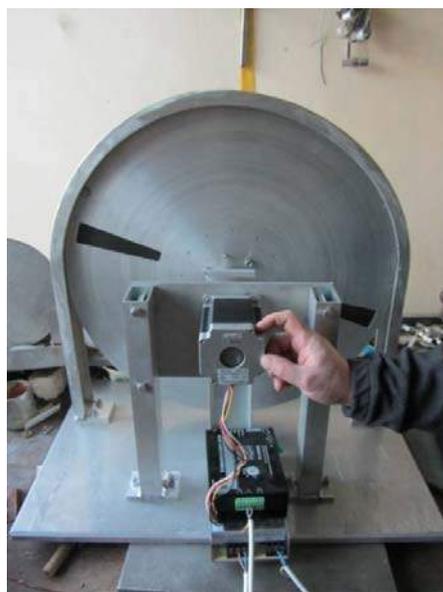


Рис. 23. Прерыватель нейтронного потока.

Проведение измерений запланировано на 2013 год. Реализовать измерения можно как на реакторе ИБР-2 (пучок №2) так и на реакторе ИР-8 (КИ, Москва). В первом случае можно вести измерения спектра вылетающих из полости нейтронов при различных энергиях ("монолиниях") падающих нейтронов. Во втором случае измеряется методом времени пролёта спектр на входе в полость и спектр на выходе из полости. Для этих измерений изготовлен прерыватель.

Сотрудничество в коллаборации GRANIT в ILL (Франция).

Цель коллаборации состоит в развитии и строительстве гравитационного нейтронного спектрометра второго поколения с ультравысоким энергетическим разрешением – GRANIT (ГРАвитационные Нейтронные Индуцированные Переходы). Этот спектрометр позволит

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

наблюдать переходы резонанса между нейтронными квантовыми состояниями в поле тяготения Земли. Планируется впервые измерить энергию квантовых состояний непосредственно. Ожидается, что в спектрометре можно будет достичь времени хранения УХН в квантовых состояниях порядка секунды.

Этот новый спектрометр станет инструментом для широкого диапазона исследований в физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, квантовой механики, физики поверхности и методических приложений. В рамках коллаборации GRANIT проведены работы по настройке детекторов спектрометра, а также было принято участие в работах по вводу в эксплуатацию и настройке источника УХН спектрометра.

В 2012 году коллаборация занималась вводом в эксплуатацию различных частей спектрометра GRANIT. Первым важным шагом должно стать гарантированно устойчивая работа источника УХН, предназначенного для спектрометра, и его эффективной стыковки с установкой GRANIT. Проведены работы по оптимизации и наладке работы гелиевого источника.

Эксперимент по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне.

Совместно с Gettysburg College (Gettysburg, Pennsylvania, США) проведен завершающий этап работы по анализу данных первой попытки измерения сечения n-n рассеяния, осуществленной на Уральском импульсном реакторе ЯГУАР с целью изучения зарядовой симметрии ядерных сил. Показано, что наблюдаемый аномально сильный эффект возрастания интенсивности рассеяния с ростом энергии импульса ЯГУАРа может быть объяснен радиационной десорбцией водорода с поверхности алюминиевого канала установки под действием мощной дозы гамма излучения во время импульса реактора. Получена величина коэффициента десорбции, $\eta(\gamma) = 0.02$, что согласуется с литературными данными из других экспериментов. Выполнен анализ литературы по обезгаживанию и методам обработки поверхностей металлов, указавший на возможность снижения коэффициента $\eta(\gamma)$ до величины приемлемой для измерения сечения n-n рассеяния.

Работа по изучению временной зависимости константы электромагнитного взаимодействия.

В совместной работе с Госуниверситетом Северной Каролины (NCSU, Raleigh, North Carolina, USA) выполнены работы по использованию изотопных данных из зон природного реактора в Окло для изучения изменения со временем фундаментальной константы электромагнитного взаимодействия «альфа». Результаты для «альфа» зависят от плохо известной температуры активных зон во время работы реактора (10^9 лет тому назад). Было показано, что используемая «лютециевая термометрия», основанная на сильной температурной зависимости сечения выжигания ^{176}Lu и, соответственно, на изменении в концентрации изотопов ^{176}Lu и ^{175}Lu , страдает от недостаточной точности сечений захвата нейтронов лютецием-175 с образованием лютеция-176 в основном и изомерном состояниях. Выполнено моделирование потока гамма квантов в реакторе Окло с результатом, что их величина недостаточна для того, чтобы влиять на выжигание ^{176}Lu посредством гамма квантов, как это имеет место в звездах при мощных вспышках гамма излучений.

II. Теоретические исследования.

Исследование нейтронных потоков, генерируемых нейтронными источниками на базе линейных ускорителей электронов.

В 2012 году продолжалось исследование получения нейтронов и радиоизотопов на источниках, использующих линейные ускорители электронов. Исследованы основные физические характеристики процесса получения нейтронов посредством облучения потоком

электронов материалов с большими атомными номерами. Рассмотрено тормозное излучение электронов, которое производит фотоядерные реакции. Экспериментальные данные, полученные в исследованиях фотоядерных реакций, используются для описания выхода нейтронов при поглощении γ -излучения ядрами. Распределение фотонейтронов по энергиям исследуется на основе существующих теоретических моделей. Нейтроны, статистически распределенные по энергии, составляют основную часть всех получаемых нейтронов, доля прямых нейтронов также учитывается в расчетах. Спектр нейтронов, средняя энергия и полный выход нейтронов вычисляются в зависимости от энергии и тока электронов и от характеристик облучаемых образцов. Исследование выполнено без обращения к "численной Монте-Карло симуляции". Результаты вычислений удовлетворительно согласуются с результатами соответствующих экспериментальных измерений.

О возможности повысить поток нейтронов ИРЕН.

С использованием программы FLUKA выполнены расчеты выходов нейтронов из вольфрамовой и урановой мишеней разной конфигурации, результаты для вольфрамовой мишени дали возможность сопоставить их с экспериментальными данными, полученными ранее на бустере ИБР-30 по программе ЭКОН. Показана возможность увеличения выхода нейтронов в 2 – 4 раза без использования второй секции ускорителя, если тормозную мишень из вольфрама или урана окружить двумя слоями из 18 плутониевых стержней.

Работы по волновой оптике.

Предложен новый эффективный способ аналитического описания электромагнитных волн в анизотропных средах. Показано, как рассчитывать отражение и преломление на границе раздела между изотропной и анизотропной средами. Исследовано расщепление волн при отражении и преломлении и появления поверхностных волн. Обсуждаются поверхностные волны Дьяконова и способы их наблюдения. Показывается как рассчитывать отражение и пропускание плоско параллельных одноосных пластин.

III. Методические и прикладные исследования.

Исследование свойств полупроводниковых детекторов и сцинтилляторов.

В 2012 году изготовлены альфа и гамма детекторы из быстрых неорганических сцинтилляторов LFS на основе микропиксельных лавинных фотодиодов с высокой плотностью пикселей (15000 пиксел/мм²).

Регистрация альфа частиц исследована с помощью быстрых неорганических сцинтилляторов LFS-3 (2 x 2 x 10 мм) на основе микропиксельных лавинных фотодиодов при комнатной температуре. Полученное энергетическое разрешение для альфа частиц с энергией 5.5 МэВ от радиоактивного источника ²⁴¹Am составило 9%. Амплитудный спектр показан на **рис.24** (слева). Регистрация гамма-излучения осуществлялась с помощью LFS-8 сцинтиллятором (3x3x0.5мм3) на основе микропиксельных лавинных фотодиодов в широком энергетическом диапазоне (59.6-662кэВ) при комнатной температуре. Энергетическое разрешение равняется 11.5% для 662 кэВ гамма квантов от радиоактивного источника ¹³⁷Cs. Амплитудный спектр показан на **рис. 24** (справа). Результаты показали, что такие детекторы можно использовать в позитрон-эмиссионных сканерах, для контроля радиоактивного загрязнения в различных средах и общественной безопасности (Associated Particle Imaging для обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков).

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

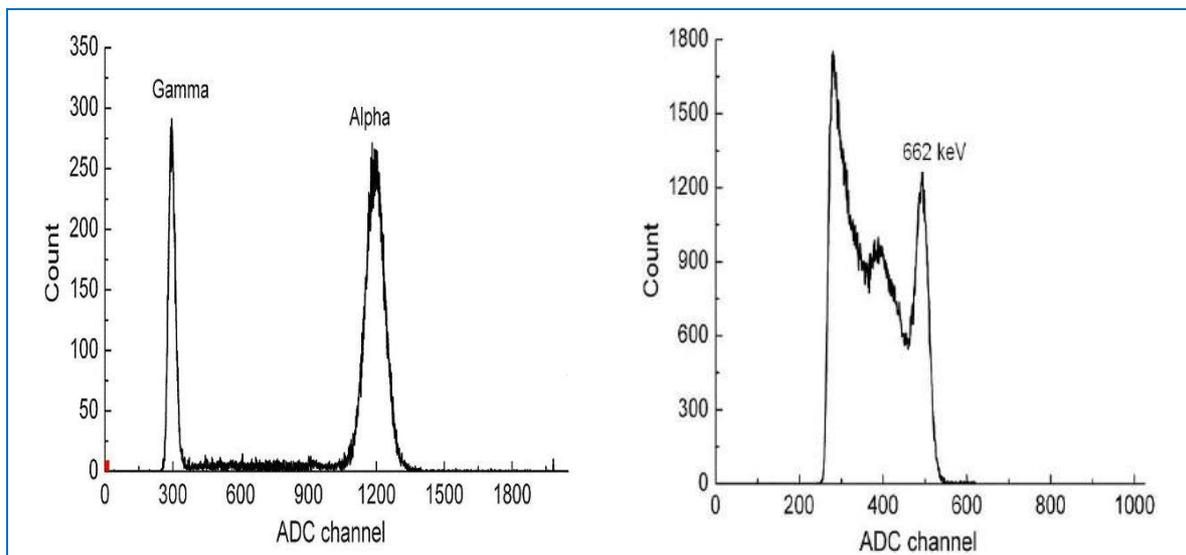


Рис. 24. Амплитудные спектры от ^{241}Am альфа (слева) и ^{137}Cs гамма (справа) источников.

Кроме этого, для измерения осколков деления и легких заряженных частиц, испускаемых в процессе деления, создан стенд из тонкого прострельного кремниевого ΔE детектора толщиной порядка 12 мкм и 600 мкм кремниевого детектора Тimerix (E) в котором энергии частиц полностью поглощаются (рис. 25).



Рис. 25. Половинная часть стенда.

Такой стенд предназначен для изучения возможности применения метода E- ΔE в комбинации с позиционно-чувствительным детектором высокого разрешения Тimerix для изучения процесса деления. Этот метод позволяет идентифицировать легкие заряженные частицы по заряду и массе, а также отделять их от фоновых событий, связанных с рассеянием осколков на подложке. Одной из наиболее сложных задач при создании данного стенда явилась организация схемы совпадений для одновременной регистрации ΔE и E сигналов. Детектор E (Тimerix) имеет собственную систему считывания, которая позволяет регистрировать время для каждого события, но не предполагает интеграцию с внешними электронными блоками. Сигнал от ΔE детектора считывается с помощью настольного оцифровщика CAEN (12 бит, 250МГц/выб), который также позволяет регистрировать время прихода события. На данном этапе совпадения организованы за счет анализа временных меток двух типов событий, записанных на компьютер, в off-line режиме. Временное разрешение этого метода недостаточно

для эффективной организации совпадений. Ведется работа по созданию более эффективной схемы совпадений.

Аналитические исследования с использованием методов нейтронной спектроскопии.

На импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН продолжались работы по развитию и применению методов элементного и изотопного анализа с использованием нейтронной спектроскопии. Измерениями пропускания нейтронов через образцы проводился анализ содержания бора в керамиках из нанокompозитных материалов, изготовленных в Белорусском государственном университете (Минск). Новые многофункциональные материалы сочетают в себе свойства эффективного нейтронного протектора с высокой термостойкостью и механической прочностью.

Совместно с Государственным астрономическим институтом им. Штернберга МГУ методом резонансной спектроскопии продолжались исследования предположительно космической пыли в пробах, взятых с ледника Алтая.

По запросу Центральной геологической лаборатории Министерства природных ресурсов и энергетики Монголии проведен анализ руды на содержание редкоземельных элементов.

Ядерно-физические аналитические методики на базе пучков заряженных частиц.

Неразрушающие ядерно-физические аналитические методики, базирующиеся на пучках заряженных частиц низких энергий, широко используются для исследования глубинных профилей элементов при решении разного рода технических и научно-экспериментальных задач. Их аналитические возможности были исследованы на специально подобранных образцах. Методика резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия позволяет измерять глубинные профили почти всех элементов с достаточно высоким разрешением по глубине.

Как можно видеть в таблице, в результате обработки одного спектра рассеянных ионов гелия была получена информация о глубинных профилях 7 элементов, начиная от углерода и заканчивая висмутом, с атомными концентрациями от 1 до 100 ат.%. В образце обнаружены два слоя: слой окиси титана толщиной 140 нм и слой кобальта толщиной около 100 нм, нанесенные на кремниевую подложку. Между этими двумя слоями обнаружен промежуточный слой, толщиной около 20 нм, состоящий из всех трех элементов.

Таблица №1.

Толщина слоя 10^{15} ат./см ²	Глубина, нм	Концентрация элементов, ат.%						
		C	O	Si	Ti	Co	Br	Bi
50	5,5	8,0				89,3	1,0	1,7
100	16,6	5,0				94	1,0	
760	101,2					100		
100	117,5		40		30	30		
650	255,3		70		30			
5000	10301,5			100				

Тонкий слой на поверхности образца содержит небольшое количество примесных элементов: углерода – 9×10^{15} ат./см², брома – $1,5 \times 10^{15}$ ат./см² и висмута – $8,5 \times 10^{14}$ ат./см². Этот слой является демонстрацией, как преимуществ методики резерфордовского обратного рассеяния, так и ее недостатков. Наблюдаемое в эксперименте количество атомов висмута показывает, что методика резерфордовского обратного рассеяния оказывается чувствительной к такому количеству атомов тяжелого элемента, которое меньше их количества, содержащегося

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

в монослое. С другой стороны, довольно значительное количество ($\sim 10^{16}$ ат./см²) атомов углерода не обеспечивает заметного выхода рассеянных ионов гелия.

Улучшение аналитических возможностей методики резерфордовского обратного рассеяния иногда достигается путем повышения начальной энергии ионов гелия. Так, например, чувствительность методики к атомам кислорода можно увеличить путем повышения энергии ионов гелия выше 3,045 МэВ. Энергетическая зависимость сечения рассеяния имеет узкий резонанс с сечением в максимуме, превышающим сечение резерфордовского рассеяния в 17 раз. Для нашего электростатического генератора эта энергия является вполне доступной. Измерения при нескольких энергиях, превышающих резонансную, позволяет детально исследовать глубинный профиль кислорода в приповерхностном слое образца.

В образце TiO/Pt/Si выполнено исследование глубинного профиля кислорода с помощью резонанса в упругом рассеянии ионов гелия с энергией 3,045 МэВ на атомах кислорода. Показано, что путем сканирования по энергии вблизи резонанса обнаружены 3 слоя толщиной 10 – 30 нм, содержащие кислород с концентрацией 50 – 60 – 67 ат. % и один слой с концентрацией кислорода около 10 ат. %. Измерение концентрации кислорода выполнено с точностью 2 ат. %.

Последовательный анализ образца на пучке протонов и ионов гелия позволяет повысить точность определения концентрации легких элементов и увеличить глубину анализа. Для демонстрации этих возможностей был использован образец, состоящий из двух слоев Ag и LiNbO₃, нанесенных на кремниевую подложку. Последовательное исследование двухслойного образца на пучке ионов гелия и протонов позволило не только получить информацию об элементном составе этих двух слоев с общей толщиной около 2,5 мкм, но и увеличить глубину анализа образца до величины примерно 20 мкм. Обработка двух спектров показала наличие заметной концентрации кремния как в слое Ag, так и в слое LiNbO₃. Переход между этими слоями толщиной около 100 нм имеет промежуточный состав с примесью Si.

С помощью методик RBS и ERD исследовано влияние облучения быстрыми нейтронами с дозой $1,4 \times 10^{14}$ н/см² на характеристики SiC и SiC(N) пленок. Обнаружено изменение проводимости слоев в 100 раз, в то время как концентрация элементов и толщина слоев в образцах не претерпела заметных изменений.

С помощью ядерно-физических аналитических методик проводилось исследование глубинных профилей концентрации дейтерия в образцах, предназначенных для исследования астрофизического S-фактора и экранирующего электронного потенциала в реакции $d(d, n)^3\text{He}$ на мишенях из дейтеридов титана, тантала и циркония.

Аналитические исследования на реакторе ИБР-2.

В подотчетный период разрабатывался пакет программ для комплексной автоматизации нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2, включающий в себя базу данных, сервисные программы для заполнения базы данных, программы для регистрации веса образцов, измерения спектров, расчета концентраций элементов. В процессе работы с программами проводилась их модернизация. Исследовались различные нестандартные случаи, возникающие при обработке гамма спектров программой Genie 2000 (Canberra). Начата разработка механической части устройства для смены образцов на детекторах и продолжена работа по модернизации пневмотранспортной установки.

Проведены измерения плотности потоков тепловых и резонансных нейтронов в каналах облучения пневмотранспортной установки РЕГАТА и на некоторых пучках нейтронов в новых экспериментальных условиях после завершения реконструкции ректора ИБР-2.

В рамках международной программы «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в

Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов» в 2012 году завершен анализ и опубликованы работы, отражающие вклад сектора НАА в европейский атлас по Македонии, Болгарии, Хорватии и Сербии. В европейский атлас переданы также данные по некоторым областям России (Тихвин, Кострома, Иваново, Москва).

В 2012 году в рамках совместного с Египтом проекта «Оценка экологической ситуации в дельте р. Нил с использованием ядерно-физических аналитических методов» завершен массовый многоэлементный анализ почв и донных отложений, отобранных в различных регионах дельты Нила и вдоль его русла. Исследованы также почвы из оазиса Сива в Сахаре. Полученные результаты представляют интерес для геологов и экологов Египта с точки зрения новой информации об элементах, концентрации которых определены впервые.

В рамках договора о сотрудничестве с Институтом биологии южных морей (Севастополь) проведен анализ образцов макроводорослей-биомониторов в прибрежной зоне Черного моря, от полуострова Тарханкут до Керченского полуострова с целью оценки состояния прибрежной экосистемы Крыма.

Впервые получены результаты многоэлементного анализа мхов-биомониторов и лишайников из района гг. Стелленбош и Кейптаун, ЮАР, для оценки атмосферных загрязнений в этом регионе. Для оценки состояния водной экосистемы этого же региона был проведен анализ образцов моллюсков и устриц из двух заливов Индийского океана. Предварительные результаты показали эффективность выбранных объектов для разработки системы биомониторинга в условиях развивающегося порта в Кейптауне.

Подготовлен и опубликован обзор по результатам более чем 20-летнего сотрудничества СНАПИ и аналитического центра Геологического института РАН в области исследования качества продуктов питания ядерно-физическими аналитическими методами. Аналогичные исследования начаты совместно с Тбилиским государственным университетом им. И. Джавахишвили, Грузия.

Совместно со специалистами Бухарестского университета были проанализированы образцы мало изученных лессовых отложений глубиной до 20 метров из Юго-Восточной Добруджи для оценки изменения элементного состава этого вида почв за последние 1,2 млн лет. Результаты ИНАА, проведенного на реакторе ИБР-2 в 2012 году, в сочетании с данными ЭПР, РФА, сканирующей электронной микроскопии, радиометрического и термолюминесцентного анализа позволили сделать целый ряд выводов, отраженных в работе (Duliu et al., 2012a). Было установлено, что образцы разного возраста имеют сходный элементный состав, что свидетельствует о происхождении выветриваемой пыли из одного и того же наиболее вероятного источника, – гор Мачин, расположенных на севере Добруджи. На международном семинаре ИСИНН-20 была доложена работа по изучению донных отложений и горных пород двух полузакрытых (semiclosed) экосистем: приледникового озера Быля (горы Фэгэраш) и озера кратерного происхождения Св. Ана (горы Харгита) (Duliu et al., 2012b).

В 2012 году на установке РЕГАТА проведен НАА двух торфяных колонок (природных планшетов), отобранных в Западной Сибири, с целью обнаружения космической пыли. Эти исследования в комплексе с результатами электронной сканирующей микроскопии свидетельствуют о возможном присутствии частиц внеземного происхождения. Был проанализирован также материал, полученный с помощью магнитных ловушек при таянии высокогорного ледника на Алтае со следами вещества внеземного происхождения.

В рамках проекта РФФИ совместно с МГУ (НИИ и Музей антропологии им. Д.Н. Анучина) выполнен НАА волос представительной группы детей Онгудайского района республики Алтай, а также почв из мест их проживания с целью установления возможных корреляций элементного состава и выявления эндемических особенностей влияния геохимической среды на организм человека.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В сотрудничестве с биофизиками Института физики им. Э. Андроникашвили Грузинского государственного университета им. И. Джавахишвили и Университета им. И. Чавчавадзе в 2012 году продолжались исследования по разработке методов синтеза наночастиц золота и серебра некоторыми новыми штаммами бактерий - экстремофилов и сине-зеленой водорослью *Spirulina platensis*. В комплексе с рядом оптических и аналитических методов нейтронный активационный анализ использовался для разработки технологии синтеза наночастиц исследуемыми микроорганизмами. С целью оценки возможности применения полученных наноматериалов для медицинских и фармацевтических целей методом НАА на реакторе ИБР-2 исследовался также элементный состав микробиальных образцов, содержащих наночастицы золота и серебра.

Совместно с Научно-практическим центром НАНБ по материаловедению Национальной академии наук Беларуси и специалистами по рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии университета в Галаце, Румыния, выполнена работа по изучению изменения характеристик нитридов в системе Li-N при различном давлении синтеза. Было показано, что увеличение давления азота в процессе формирования нитридов приводит образованию структур с повышенным содержанием азота в объеме и с более мелким размером кристаллита.

На базе СНААПИ в 2012 году проводился Практикум для студентов старших курсов Университета «Дубна» и студентов и учителей Международных Летних Школ (май-июнь, июль и сентябрь 2012 года), организуемых УНЦ ОИЯИ, для слушателей V Высших курсов стран СНГ "Синхротронные и нейтронные исследования наносистем (СИН-нано)" (17июня - 5 июля 2012, Москва-Дубна), а также для Международной научной школы для молодежи по нанотехнологии (сентябрь, 2012). За отчетный период на базе сектора были выполнены две курсовых и три бакалаврских работы. В секторе выполняются пять кандидатских диссертаций.