

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.2. НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В 2013 г. в ЛНФ работы велись в традиционных направлениях: изучение процессов нарушения пространственной и временной четности при взаимодействии нейтронов с ядрами; изучение процесса деления; экспериментальное и теоретическое исследование фундаментальных свойств нейтрона; гамма-спектроскопия нейтронно-ядерных взаимодействий; структура атомного ядра; получение новых данных для реакторных приложений и для ядерной астрофизики; эксперименты с ультрахолодными нейтронами. Значительная часть исследований выполнена на модернизированной исследовательской ядерной установке ИБР-2, импульсном источнике резонансных нейтронов ИРЕН и установке ЭГ-5. Особо следует отметить широкий круг прикладных работ, связанный с применением НАА. Ряд работ в области фундаментальной физики и физики ультрахолодных нейтронов проводились на установках ядерных центров Китая, США, Франции.

1.2.1 Экспериментальные и методические исследования.

1.2.1.1. Создание и усовершенствование многодетекторных систем для измерения нейтронных сечений с помощью импульсного источника резонансных нейтронов ИРЕН ЛНФ.

Создана и протестирована мобильная, реконфигурируемая гамма-спектрометрическая система nGamma для исследования ядерных реакций под действием нейтронов разных энергий, связанных с испусканием гамма-лучей. В первоначальной (минимальной, тестовой) конфигурации она состоит из 24 NaI(Tl)-детекторов гамма-лучей смонтированных на двух кольцах (рис. 1). Экспериментально определены энергетические и временные характеристики отдельных трактов системы. С помощью системы измерена энергетическая зависимость плотности потока нейтронов на расстояние 60 м от нейтрон-производящей мишени импульсного нейтронного источника ИРЕН.

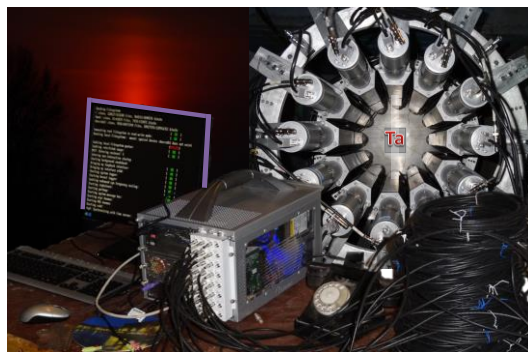


Рис. 18 Многодетекторная, передвижная, реконфигурируемая

Собрана и протестирована 12-детекторная (2 модуля по 6 кристаллов NaI(Tl)) гамма-спектрометрическая система «Ромашка» для проведения исследований резонансного радиационного захвата (и деления) атомных ядер нейтронами на 4-ом канале установки ИРЕН (Рис. 19). Измерены энергетические характеристики отдельных трактов системы с помощью компьютеризованной системы сбора и анализа установки nGamma. Собран и установлен коллиматор гамма-нейтронного пучка.



Рис. 19. 12-детекторная NaI(Tl) гамма-спектрометрическая система «Ромашка» (ИЯЯЕ-БАН) на 4-ом канале импульсного нейтронного источника ИРЕН.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Продолжается отладка экспериментальной установки АУРА (Анизотропия Угловых РАСпределений), предназначенной для измерений энергетической зависимости угловой анизотропии упруго рассеянных медленных нейтронов на благородных газах с целью извлечения длины n,e-рассеяния. В данное время установка АУРА расположена на 15-метровой пролетной базе канала №2 установки ИРЕН. Схема установки АУРА приведена на **рис. 20**.

На вращающейся платформе закреплены четыре ^3He -счетчика в защитах и держатель образцов (для газообразных мишеней имеется цилиндрическая алюминиевая камера). Платформа вращается на $\pm 180^\circ$ шаговым двигателем, управляемым персональным компьютером. 8-канальный временной кодировщик связан с компьютером через порт USB-2 и регистрирует сигналы с детекторов и двух монитрных ^3He -счетчиков. Смена позиций детекторов при заданных параметрах, экспозиций в каждой позиции и накопление измеряемой информации в 8 спектрах (для каждого счетчика в 2-х позициях) осуществляется программой управления экспериментом.

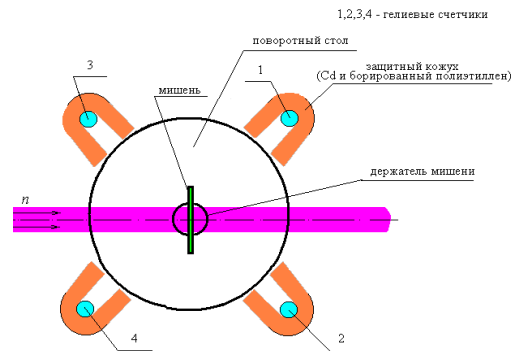


Рис. 20. Схема детектирующего модуля установки АУРА для исследования твердых образцов.

При интенсивности ИРЕН $\sim 2 \cdot 10^{11}$ н/с проведены тестовые эксперименты на твердых образцах. На **рис. 21а)** и **21б)** приведены времяпролетные спектры, полученные при рассеянии нейтронов кадмиевой мишенью толщиной 0,5 мм и мишенью из вольфрама толщиной 0,3 см, а на **рис. 22** – времяпролетные спектры нейтронов, полученные с мишенью из плексигласа. На **рис. 22** очевидно преимущественное рассеяние нейтронов вперед, как это и должно быть на водородосодержащей мишени

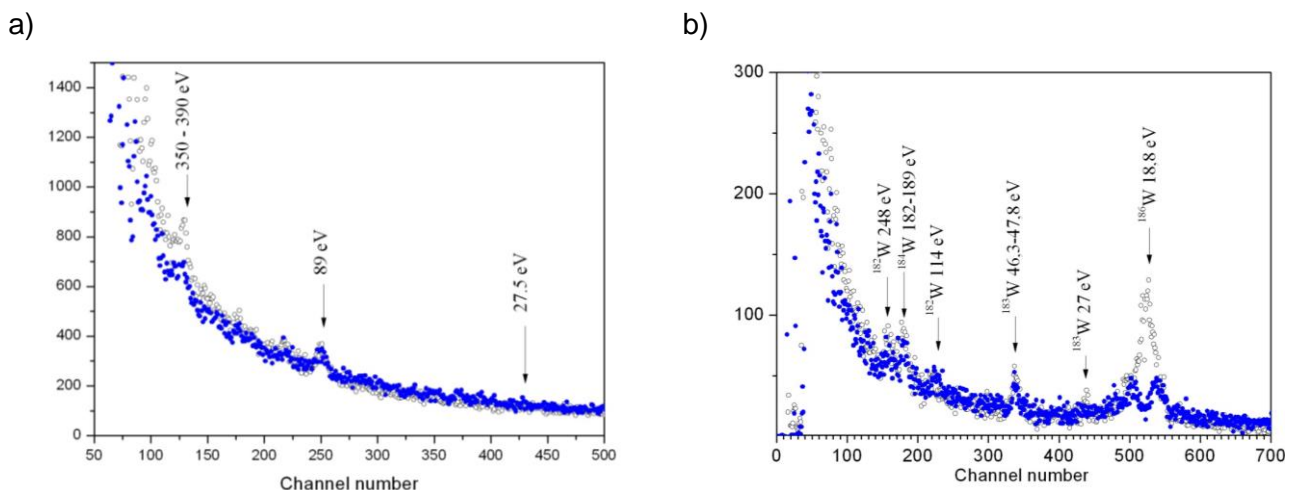


Fig. 21. а) Времяпролетный спектр нейтронов, рассеянных кадмием, полученный одним из детекторов. Открытые кружки – рассеяние назад, точки – рассеяние вперед. Ширина временного канала 0,5 мкс. б) Времяпролетный спектр нейтронов, рассеянных вольфрамом. Открытые кружки – рассеяние назад, точки – рассеяние вперед. Ширина временного канала 0,5 мкс.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Входные отверстия 2-го и 4-го детекторов были перекрыты серебряными пластинами, и на соответствующих спектрах рассеянных вперед нейтронов наблюдался провал при энергии ~ 10 эВ. Провал связан с тем, что нейтроны с такой энергией после рассеяния на водороде на 45° приобретают энергию, соответствующую «серебряному резонансу» 5.15 эВ.

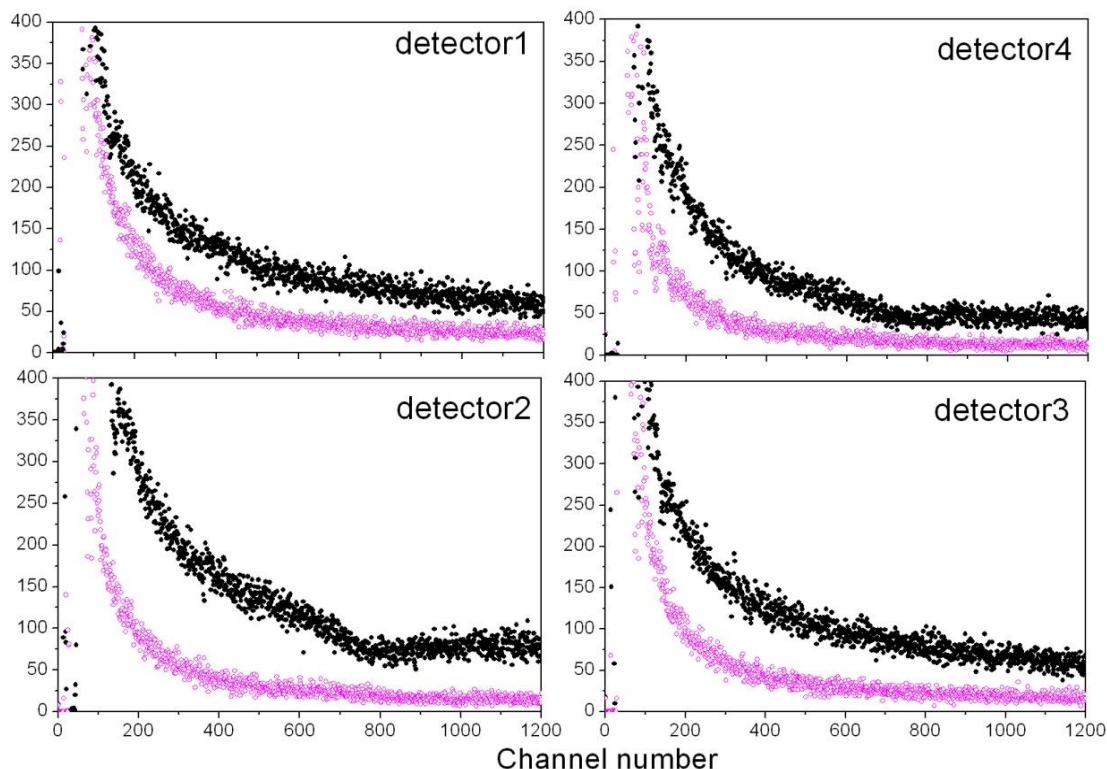


Рис. 22. Времяпролетные спектры нейтронов, рассеянных плексигласом. Открытые кружки – рассеяние назад, точки – рассеяние вперед. Ширина временного канала 0,5 мкс.

Продолжаются расчеты с целью уточнения поправок для эксперимента по извлечению точного значения длины n, e -рассеяния из угловой анизотропии медленных нейтронов, рассеиваемых аргонем при нормальном давлении. Для получения длины b_{ne} с точностью 2 – 3 % нужна точность определения всех поправок не хуже 10^{-4} .

Кинематическая поправка – отношение эффективностей детекторов, регистрирующих рассеянные нейтроны под углами вперед и назад с учетом теплового движения атомов газа уточняется в расчетах методом Монте-Карло в реальной геометрии. Расчеты проводятся на кластере ЛИТ. Для измерений с аргонем необходимая для эксперимента по времени пролета точность этой поправки уже получена. Рассчитаны поправки для 20 энергетических точек в диапазоне энергий нейтронов от 0,0065 до 0,8 эВ. Расчетная зависимость анизотропии рассеяния нейтронов от их начальной энергии с учетом теплового движения атомов аргона при длине n, e - взаимодействия $b_{ne} = -1,32 \cdot 10^{-3}$ Фм и анизотропия без учета n, e -рассеяния показаны на **рис. 23**. Полученная из вычислений методом Монте-Карло поправка $C(E) = \varepsilon(135^\circ) / \varepsilon(45^\circ)$ на различие интенсивностей регистрации детекторами рассеяния нейтронов аргонем вперед и назад с учетом теплового движения его атомов представлена на **рис. 24** вместе с расчетом этой поправки $C(E)$ без учета теплового движения атомов газа (пунктирная линия). Продолжаются аналогичные расчеты этой поправки для криптона в качестве рассеивателя.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

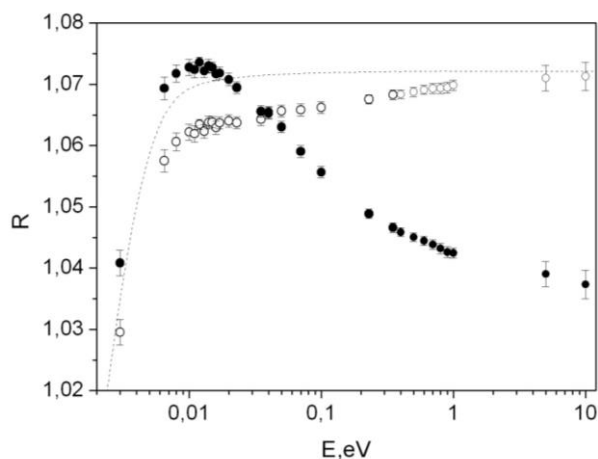


Рис. 23. Зависимость анизотропии рассеяния нейтронов от начальной энергии нейтронов с учетом теплового движения атомов Ar (при $b_{ne} = -1,32 \cdot 10^{-3}$ Фм): открытые точки – расчеты с поправкой на эффективность, черные точки – без поправок. Пунктирная кривая – анизотропия без учета п,е-рассеяния.

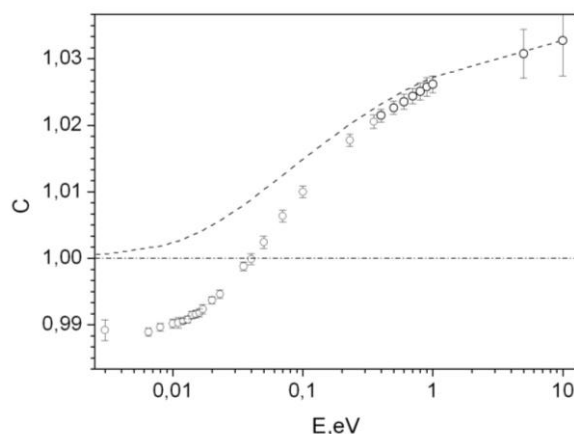


Рис. 24. Поправка $C(E) = \varepsilon(135^\circ) / \varepsilon(45^\circ)$, полученная из вычислений методом Монте-Карло для интенсивностей рассеяния вперед и назад аргоном. Пунктирная кривая – расчет $C(E)$ без учета теплового движения атомов газа.

Оценки рассеяния нейтронов кадмием, покрывающим стенки коллиматоров показали, что при энергии нейтронов 0,5 эВ через кадмий толщиной 0,2 см проходит $0,6 \cdot 10^{-4}$ падающих под различными углами нейтронов, а отражается 10^{-4} нейтронов. Такая погрешность приемлема в нашем эксперименте.

После завершения испытаний на пучке ИРЕН установку АУРА предполагается разместить на канале №1 реактора ИБР-2 для проведения измерений с благородными газами. Для окончательной проверки установки АУРА планируется провести измерения с образцом ванадия с целью получения анизотропии рассеяния в области тепловых энергий нейтронов. В этой области энергий у ванадия в проведенном ранее эксперименте на ИБР-2 наблюдалась

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

анизотропия при рассеянии нейтронов вперед и назад, отличная от кинематической. Интересно подтвердить этот результат измерениями с установкой АУРА на ИРЕН.

Оценены поправки на многократное рассеяние нейтронов ванадием разных толщин. Расчеты производились для энергий нейтронов 0,025 эВ и 0,1 эВ для трех углов рассеяния вперед $30^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$, $45^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$ и $60^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$ и соответствующих углов рассеяния назад $150^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$, $135^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$ и $120^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$. Из расчетов видно, что допущенное ранее пренебрежение многократным рассеянием для такой толщины ванадия было оправданным.

1.2.1.3. Развитие методов исследования физики деления.

Продолжаются работы, проводимые совместно с Техническим университетом (г. Прага, Чехия), по применению пиксельных кремниевых детекторов для регистрации заряженных частиц, испускаемых в процессе деления. В более ранних работах была продемонстрирована возможность измерения энергий осколков деления с помощью пиксельных детекторов Medipix2, а также направления вылета осколков благодаря высокому позиционному разрешению этих детекторов. Детектор Medipix2 представляет собой двухслойный кремниевый детектор размером $1.4 \times 1.4 \text{ см}^2$. Верхний, сенсорный слой представляет собой обычный полупроводниковый детектор (как правило, используется кремниевый слой толщиной 300 мкм). Нижний слой, называемый считывающим слоем, состоит из 256×256 пикселей (размер одного пикселя составляет 55×55 микрон). Каждый пиксель представляет собой интегральную микросхему, позволяющую определять наличие сигнала в пикселе и отсчитывать число срабатываний при заданных дифференциальных (верхнем и нижнем) порогах. Принцип регистрации заряженных частиц в детекторах семейства Medipix основан на эффекте распределения заряда (charge sharing effect). Суть эффекта состоит в том, что при попадании частицы в сенсорный слой детектора заряд «расплывается» по мере его собирания, формируя довольно обширную область собирания заряда, затрагивающую несколько пикселей. Пиксели, сработавшие в считывающем слое детектора, образуют кластер. Размер кластера зависит от типа и энергии частицы, попавшей в сенсорный слой детектора.

Новое поколение пиксельных детекторов – Timepix позволяет также определять время прихода импульса в каждом пикселе. Кроме того, возможна работа детектора в режиме определения времени нахождения сигнала над порогом (Time-over-threshold – TOT mode), при котором возможно определение величины заряда, собранной каждым пикселем. В 2013 году в ЛНФ совместно с ТУ Прага проводились измерения тройного спонтанного деления ^{252}Cf с использованием детекторов Timepix. Для идентификации тройных частиц использовался ΔE -E метод, позволяющий разделять легкие заряженные частицы по заряду. В качестве ΔE -детектора использовался тонкий кремниевый детектор (12 мкм), в качестве E-детектора – пиксельный детектор TimePix с толщиной сенсорного слоя 300 мкм.

Схема экспериментальной установки показана на **рис. 25**. В вакуумной камере располагается спонтанный источник деления ^{252}Cf и сборка ΔE -E детекторов. Между источником и детекторами установлена алюминиевая фольга толщиной 31 мкм, которая обеспечивает полное поглощение осколков деления и альфа-частиц из спонтанного альфа-распада калифорния (6.2 МэВ). Таким образом, детекторы регистрируют только длиннопробежные легкие заряженные частицы из тройного деления. Сигнал из ΔE детектора подается на зарядово-чувствительный предусилитель, далее усиленный сигнал разветвляется и подается на быстрый и спектроскопический тракты. Быстрый тракт состоит из формирующего усилителя и дискриминатора с фиксированным порогом, сформированный логический сигнал (+3.3 В CMOS-TTL) подается на внешний вход детектора Timepix, определяющий триггер для срабатывания детектора Timepix.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

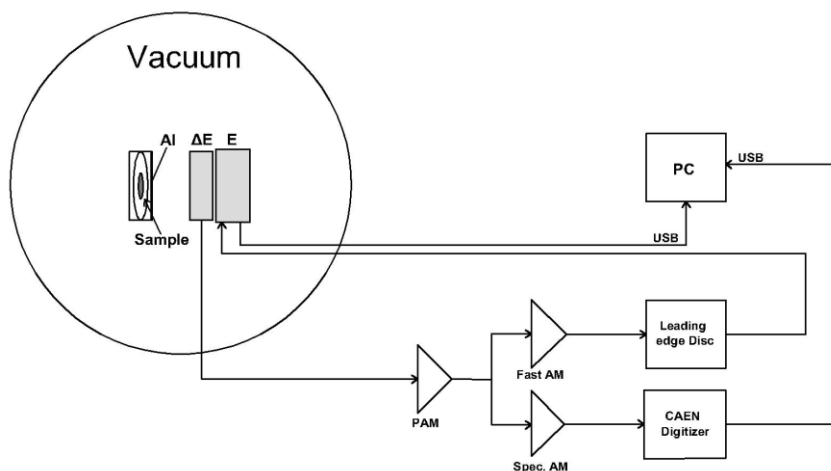


Рис. 25. Схема экспериментальной установки.

Вторая часть сигнала подается на спектрометрический усилитель, который формирует сигнал для считывания в оцифровщике CAEN DT5720. Оцифрованные сигналы записываются в память компьютера через стандартный USB порт. Сигналы с детектора Timerix, работающего в режиме TOT, считываются через USB интерфейс FitPIX и также записываются в память компьютера с помощью программы Pixelman. Синхронизация двух независимых потоков данных (с ΔE и E детекторов) производится в режиме off-line путем сравнения временных отметок с оцифровщика и интерфейса FitPIX.

На рис. 26 представлен двухмерный ΔE - E спектр, на котором хорошо видно разделение легких заряженных частиц по заряду. Из-за высокого порога в ΔE детекторе не удастся наблюдать изотопы водорода. Более тяжелые частицы имеют гораздо меньший выход и не наблюдаются при использовании довольно слабого источника. Конечной целью эксперимента является поиск и изучение четверного деления с одновременным испусканием двух легких заряженных частиц.

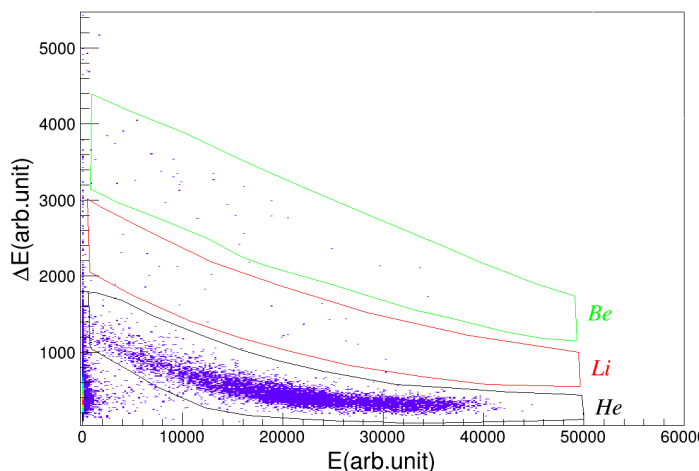


Рис. 26. ΔE - E распределение легких заряженных частиц из спонтанного источника ^{252}Cf .

В 2013 году была создана установка, предназначенная для прецизионных измерений множественности мгновенных нейтронов деления (МНД) в зависимости от распределений масс осколков деления (ОД) и их полной кинетической энергии (ПКЭ). Детектор построен на базе позиционно-чувствительной двойной ионизационной камеры деления с анодом, состоящим из 48 полос (рис. 27).

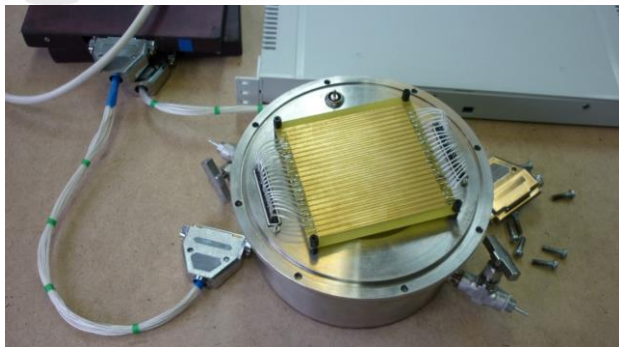


Рис. 27. Общий вид позиционно-чувствительной камеры. Крышка камеры с закрепленным 48-стриповым анодом.

Согласно расчетам координатное разрешение детектора в плоскости анода не превышает сотых долей миллиметра. С помощью созданной установки можно реализовать высококачественные измерения не только распределений МНД, но также массово-энергетических характеристик. Кроме этого, предложено использование разработанного детектора в экспериментах по нейтронной радиографии в качестве вполне конкурентной альтернативы к используемым в настоящее время решениям. Для этого был рассмотрен полностью цифровой вариант электронной аппаратуры дискретизации импульсов двойной ионизационной камеры, состоящей из 128 параллельных каналов дискретизации импульсов.

1.2.1.4. Исследования нарушения пространственной четности в ядерных реакциях.

Ранее на пучке холодных поляризованных нейтронов PF1В реактора ИЛЛ (Гренобль, Франция) были проведены измерения Р-нечетной асимметрии в радиационном захвате на естественном свинце. Эксперимент проводился с целью получения дополнительной информации для объяснения аномально большой величины поворота спина нейтронов в измерениях пропускания поперечно поляризованных нейтронов через образец. Получено ограничение на эффект в радиационном захвате $\alpha_\gamma \leq 8.1 \cdot 10^{-7}$. Проведен теоретический анализ и сделаны расчеты Р-нечетных эффектов при взаимодействии поляризованных нейтронов с естественным свинцом. Расчеты выполнены для двух наборов резонансных параметров. Для дальнейшего исследования эффектов несохранения четности в свинце предпочтительны два возможных эксперимента: измерение асимметрии в полном сечении и в радиационном захвате. Хотя эти эффекты много меньше, чем в экспериментах по вращению спина, но их реализация проще методологически.

Проведен анализ экспериментальных коэффициентов лево-правой и Р-нечетной асимметрии в интегральном спектре γ -квантов при взаимодействии ядер с поляризованными тепловыми нейтронами. Из приведенных результатов следует, что во всех случаях, когда в измерениях Р-нечетной асимметрии наблюдается значимый эффект, коэффициент лево-правой асимметрии оказывался намного меньше коэффициента Р-нечетной, хотя, казалось бы, согласно теоретическим расчетам, эти коэффициенты должны быть примерно равными для интегрального спектра для тепловой энергии нейтронов одного и того же ядра. Достоверно лево-правая асимметрия не обнаружена ни в одном из исследованных ядер, кроме разве брома. Поскольку измеренные значения коэффициентов лево-правой асимметрии гораздо меньше для ^{nat}La , ^{nat}Cl , ^{nat}Br , чем это следует из расчета, необходимо продолжить эти исследования на пучках с высоким потоком нейтронов для получения по возможности значимого результата в измерениях коэффициента лево-правой асимметрии и выяснения причин расхождения расчета и эксперимента.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.2.1.5. Исследования возможности поиска нарушения пространственной четности в дифракции нейтронов.

На канале №1 реактора ИБР-2 выполнены исследования дифракции нейтронов на монокристалле бромида калия в окрестности р-волнового резонанса ^{81}Br . На **рис. 28** представлены спектры нейтронов дифракции для трех углов падения нейтронов на монокристалл. Видно, что поворот кристалла на $100''$ приводит к расщеплению рефлекса 1-го порядка, а рефлекс 2-го порядка просто смещается. Наблюдаемый эффект скорее всего связан с трех волновой дифракцией нейтронов (эффект многократного рассеяния).

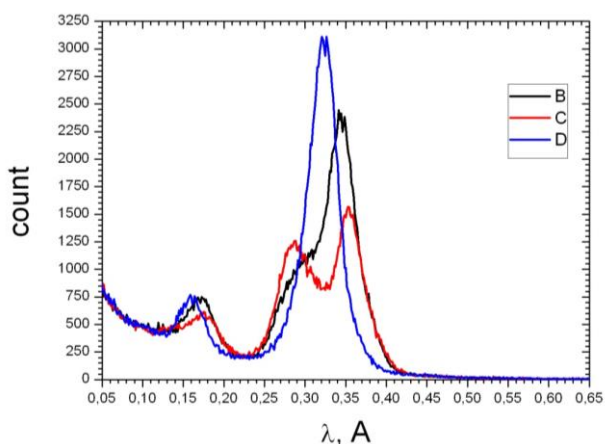


Рис. 28. Спектры нейтронов дифракции. Синяя линия – точное выполнение условий Брэгга, черная линия – кристалл повернут на $60''$, красная линия – кристалл повернут на $100''$.

Для того чтобы проверить эффект многократного рассеяния в дифракции нейтронов, было решено уйти в область более низких энергий нейтронов. Результаты измерений представлены на **рис. 29**. Видно, что рефлекс 2-го порядка больше рефлекса 1-го порядка и это можно объяснить только трехволновой дифракцией нейтронов (многократным брэгговским рассеянием).

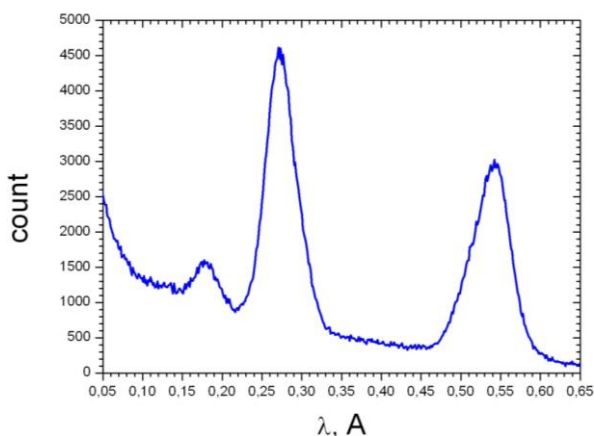
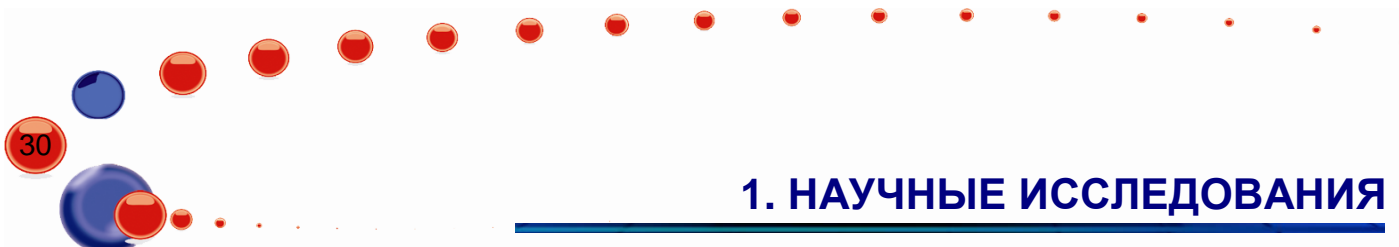


Рис. 29. Спектр нейтронов дифракции от монокристалла KBr , рефлекс первого порядка соответствует длине волны $\sim 0,55 \text{ \AA}$.

1.2.1.6. Исследования реакций (n,p) , (n,α) .

Продолжаются 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



1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

быстрыми нейтронами, представляют значительный интерес для изучения механизмов ядерных реакций, структуры атомных ядер, выбора конструкционных материалов и проведения расчетов при создании новых установок ядерной энергетики.

В конце 2013 г. проведены измерения реакций $^{66}\text{Zn}(n,\alpha)^{63}\text{Ni}$ и $^{144}\text{Sm}(n,\alpha)^{141}\text{Nd}$ при $E_n=4$ МэВ, тем самым была завершена серия измерений этих реакций, начатая нами годом ранее. Проведены также измерения реакции $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ при $E_n=5.5$ и 6.5 МэВ. Получены энергетические спектры заряженных частиц, данные обрабатываются.

Завершена обработка данных измерений реакций $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$ и $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ при $E_n=4.0-6.5$ МэВ. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с существующими библиотечными оценками и данными других авторов (рис. 30, 31). Анализ показывает существенное разногласие расчетных данных, представленных различными библиотеками, в то время как для изотопа ^{57}Fe экспериментальных данных нет. Для ^{63}Cu имеются два достаточно давних измерения в области нескольких МэВ, но со значительным расхождением.

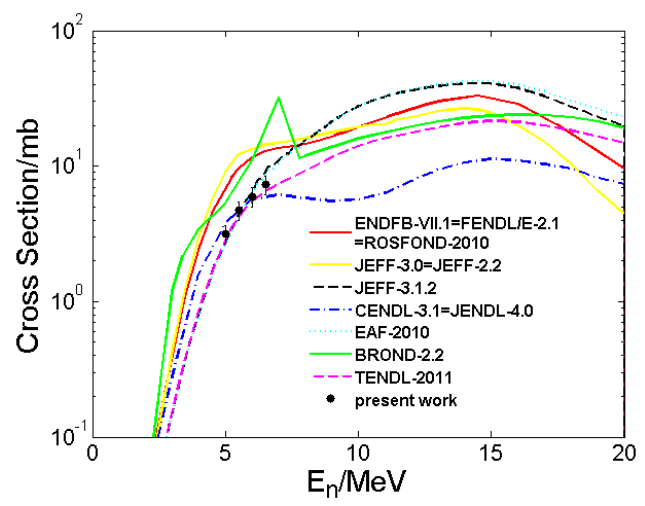
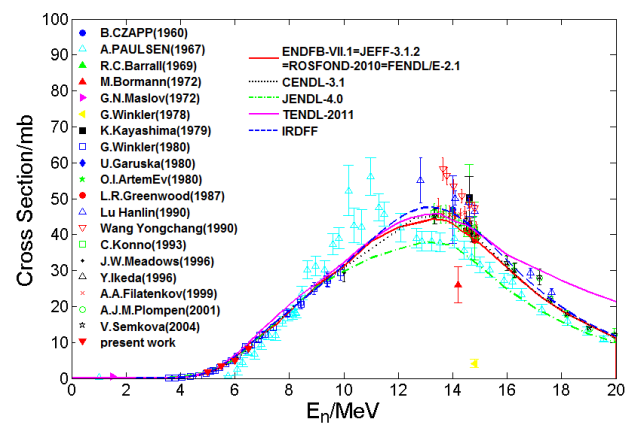


Рис. 31. Полученные сечения реакции $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ в сравнении с существующими на сегодняшний день данными и оценками (Справа).

Рис. 30. Полученные сечения реакции $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$ в сравнении с оценками (Слева).



Проведен теоретический анализ усредненных по спектру деления сечений реакций (n,p), (n,α) в рамках статистической модели. Сечения реакций (n,α) и (n,p), вызванных быстрыми нейтронами, важны для оценки производства водорода и гелия, ядерного нагрева и трансмутации в конструкционных материалах для ядерной энергетики, с другой стороны систематический анализ нейтронных сечений необходим при изучении механизмов ядерных реакций. К тому же часто бывает необходимо оценить нейтронные сечения ядер, для которых нет экспериментальных данных, невозможно или затруднено их получение. Мы использовали статистическую модель, основанную на теории Вайскопфа и Ивинга для систематического анализа известных экспериментальных сечений (n,α) и (n,p) реакций, усредненных по спектру нейтронов деления ^{235}U . Поскольку наша основная цель — получение усредненного систематического поведения сечений (n,α), (n,p) реакций для средних и тяжелых ядер в энергетической области спектра нейтронов деления, мы не рассматривали более детальную

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

теорию Хаузера-Фешбаха, в которой используется оптический потенциал в зависимости от отдельных свойств ядер. Для средних и тяжелых ядер ($Z \gg 1$) были получены формулы:

$$\sigma(n, p) = C_p \pi (R + \lambda/2\pi)^2 e^{-K_p \frac{N-Z+1}{A}},$$

$$\text{где } C_p = \exp\left(Z A^{1/6} \frac{2\gamma-1}{\sqrt{13.5(E_n + Q_{np})}}\right), K_p = 4\xi \sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{np})}}$$

$$\sigma(n, \alpha) = C_\alpha \pi (R + \lambda/2\pi)^2 e^{-K_\alpha \frac{N-Z+0.5}{A}},$$

$$C_\alpha = 2 \exp\sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{n\alpha})}} \left(-3\alpha + \gamma \left(\frac{4Z}{A}\right) + \varepsilon_\alpha - 2.058 \frac{Z}{A^{1/3}}\right), K_\alpha = 2\xi \sqrt{\frac{A}{13.5(E_n + Q_{n\alpha})}}.$$

здесь Z , N , A – число нейтронов, протонов и массовое число ядра-мишени; α , γ , ξ – константы Вайцзеккера; ε_α – энергия связи α -частицы. Параметры K_i и C_i ($i = p$ или α) для каждой энергии нейтронов могут быть получены из соответствующих зависимостей имеющихся экспериментальных данных. На **рис. 32а**), **32б**) представлены вычисленные по вышеприведенным формулам с параметрами $K_p = 80$, $C_p = 2.8$, $K_\alpha = 65$, $C_\alpha = 0.04$ значения сечений для средней энергии нейтронов 5 МэВ в сравнении с экспериментальными данными.

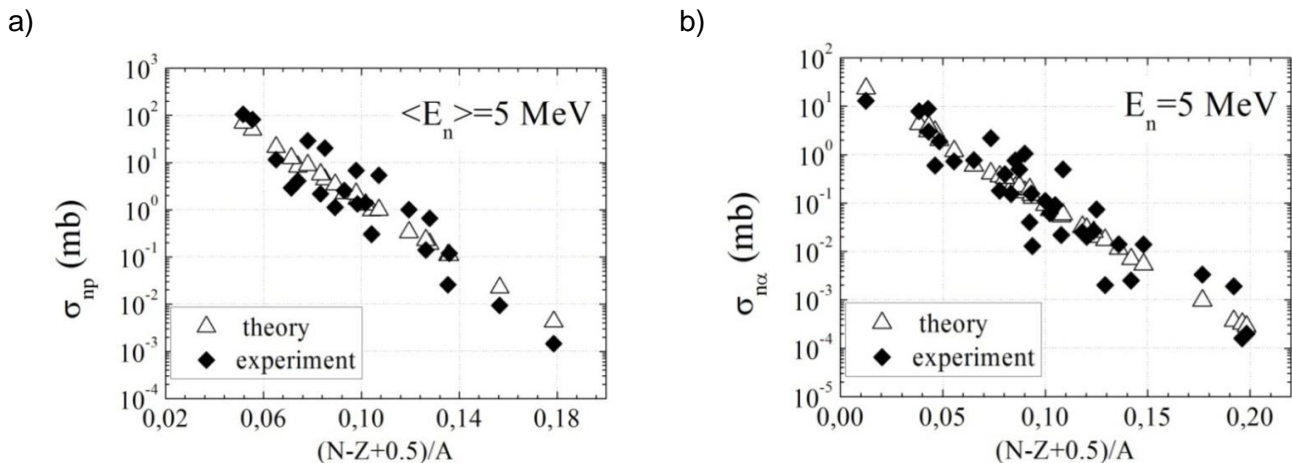


Рис. 32. а) Теоретические и экспериментальные сечения (n,p) реакции; б) Теоретические и экспериментальные сечения (n,α) реакции.

1.2.1.7. Исследования структуры ядра.

На базе модели Струтинского для плотности n-квазичастичных уровней и модели Кадменского, Маркушева и Фурмана для радиационных ширин E1-переходов между высоковозбужденными уровнями с использованием ряда феноменологических представлений разработан первый вариант перспективной практической модели каскадного гамма-распада

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

нейтронного резонанса. Модель базируется на результатах выполненного в ЛНФ ОИЯИ анализа полученных к настоящему времени экспериментальных данных об интенсивностях $I_{\gamma\gamma}$ двухквантовых каскадов между нейтронным резонансом и группой его низколежащих уровней. Модель предполагает, что сосуществование и взаимодействие фермионной и бозонной компонент ядерной материи может определять свойства ядерной материи в интервале энергии возбуждения, равном энергии связи нейтрона в ядре или несколько больше.

В реализованном варианте модель позволила описать интенсивности таких каскадов с точностью эксперимента для имеющегося набора из 40-ка составных ядер в области масс от ^{40}K до ^{200}Hg . Существующие до настоящего времени модельные представления о ядре, как о чисто фермионной системе, воспроизводят эти данные с погрешностью от нескольких десятков до сотни процентов (или даже больше).

Исследования показали, что спектры гамма-распада нейтронного резонанса и, вероятно, сечения взаимодействия нейтронов с ядром можно воспроизводить с точностью современного эксперимента при учете разрыва максимум 4 куперовских пар нейтронов (и/или протонов). Таким образом, наша модель позволяет получать недоступную иным методикам эксперимента фундаментальную информацию о свойствах сверхтекучей фазы ядерной материи в объекте конечного размера, содержащего заряженные и нейтральные ферми-частицы и т.д.

В качестве примера ниже приведены результаты модельной аппроксимации интенсивностей каскадов в трех четно-нечетных изотопах вольфрама (рис. 33). Экспериментальные данные получены в одном и том же эксперименте. Соответственно небольшие экспериментальные ошибки интенсивности сильно коррелированы. И не могут объяснить расхождения данных эксперимента с расчетами, использующими модельные представления о ядре как о системе только ферми-частиц. Это – прямое следствие того, что коэффициенты переноса ошибок плотности уровней и силовых функций на ошибки $I_{\gamma\gamma}$ быстро возрастают при уменьшении энергий первичного перехода каскада и могут превышать значение 10^2 - 10^3 .

Ступенчатая структура наиболее вероятной плотности уровней может быть объяснена только моделью, предполагающей, что число неспаренных нейтронов и протонов (в терминах теоретических моделей ядра – квазичастиц) при пороговых энергиях разрыва куперовских пар возрастает на две единицы. Необходимость использования в анализе эксперимента полностью феноменологических представлений о плотности бозонных возбуждений и ширинах гамма-переходов при их распаде/возбуждении обуславливает неизбежные систематические ошибки и в полученных данных для плотности уровней, и в силовых функциях. (Моделей, пригодных для анализа эксперимента и учитывающих последовательный разрыв куперовских пар для описания соответствующих параметров бозонной компоненты ядра, в настоящее время не существует.)

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

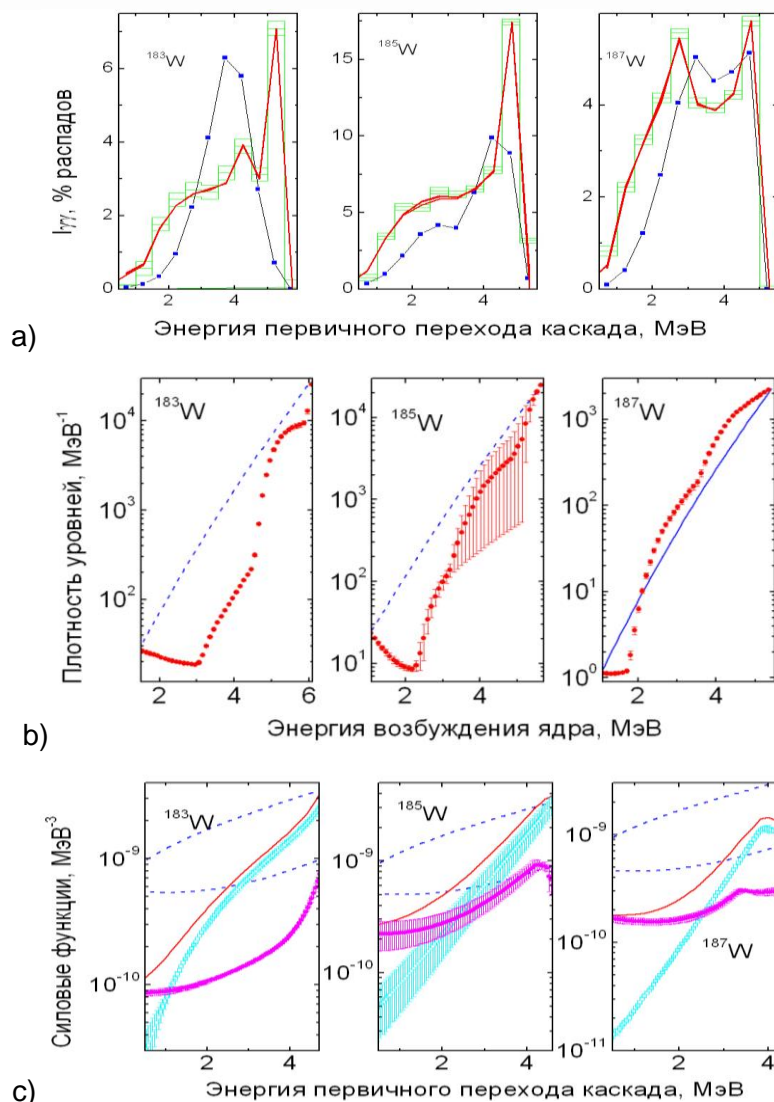


Рис. 33 а. Гистограммы – сопоставление экспериментальных интенсивностей каскадов (совместно с ошибками эксперимента) с расчетами, использующими статистическое представление о ядре и общепринятые модели плотности уровней и радиационных силовых функций (синие точки). Красные линии – группа из семи наилучших аппроксимаций, отличающихся исходными данными предлагаемой модели и случайными путями процесса поиска минимума χ^2 . Очень малый разброс этих данных показывает, что для реализованной модели существует только единственный минимум функции правдоподобия. **б.** Красные точки с ошибками – среднее значение наилучшей аппроксимирующей плотности уровней и их разброс для семи вышеприведенных вариантов аппроксимации. Синие линии – плотность промежуточных уровней каскадов для модели Ферми-газа. Точки излома – наиболее вероятные пороги разрыва очередной куперовской пары нуклонов ядра. **с.** Верхние синие линии – экстраполяция хвоста гигантского дипольного электрического резонанса, нижние – модели КМФ в сумме с постоянной силовой функцией M1-переходов. Голубые и фиолетовые точки с ошибками – силовые функции E1- и M1-переходов и их разброс соответственно. Красные линии – среднее значение суммы силовых функций E1- и M1- переходов, обеспечивающих наилучшую аппроксимацию $I_{\gamma\gamma}$ (без коэффициентов, учитывающих отношение модельных и аппроксимирующих плотностей уровней (Рис. 18 б)).

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значительный, но конечный разброс данных для фиксированных мультипольностей гамма-переходов и его практическое отсутствие для их суммы указывают на сильную антикорреляцию плотности уровней заданной четности и мультипольности возбуждающих их первичных переходов. Однако, эта корреляция значительно меньше по сравнению с данными иных реализованных к настоящему времени экспериментов.

1.2.1.8. Поиск синглетного состояния дейтрона.

На канале 116 реактора ИБР-2 проведён эксперимент по поиску синглетного дейтрона в реакции $n + p \rightarrow d + 2\gamma$. Спектр гамма-квантов от мишени из полиэтилена измерялся с помощью HPGe детектора. В пике, соответствующем прямому переходу с энергией 2223 кэВ, набрана статистика $2 \cdot 10^8$ отсчётов. Получена верхняя оценка сечения для испускания гамма-квантов с энергией в интервале 2100 - 2200 кэВ порядка 15 мкб (на уровне 3σ), что в 2 раза ниже величины, полученной Р.Хакенбургом (БНЛ). Планируется продолжить этот эксперимент с усовершенствованной методикой и новым программным обеспечением. Возможно также проведение этого эксперимента в Гренобле.

1.2.1.9. Модернизация установки «Колхида».

В ОИЯИ на импульсном реакторе ИБР-2 создана установка «Колхида», предназначенная для исследования нейтронно-оптических явлений при взаимодействии поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами. Установка «Колхида» состоит из следующих компонентов: спектрометр поляризованных нейтронов, поляризованная ядерная мишень, система управления. Спектрометр поляризованных нейтронов расположен на тангенциальном канале №1 импульсного реактора ИБР-2. Общая схема спектрометра изображена на **рис. 34**

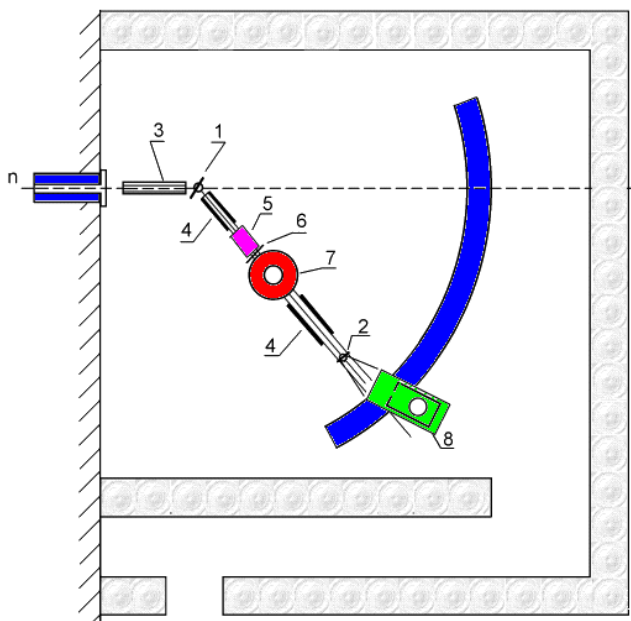


Рис. 34. Общая схема спектрометра: 1 – первичный коллиматор; 2 – коллиматор Соллера; 3 – кристалл поляризатора; 4 – ведущие магнитные поля; 5 – флиппер Мезея; 6 – шим; 7 – криостат; 8 – кристалл анализатора; 9 – детектор.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подготовки установки «КОЛХИДА» к штатной работе была осуществлена модернизация электроники управления исполнительными механизмами. В частности, для спектрометра поляризованных нейтронов установлены шаговые двигатели FL57STH76-1006B для изменения углового положения плеча детектора, платформы, поляризатора и анализатора. Для определения углов поворота установлены датчики угла OCD-SL00B-0016-S100 CRW. Система вращения различных компонентов установки осуществляется с помощью компьютерной программы. Программа использует алгоритм, при которой учитывается люфты двигателя. Таким образом, углы задаются с точностью $< 0.1^\circ$. Другая компьютерная программа управляет источником тока. С помощью этой программы устанавливается ток в сверхпроводящем соленоиде до 110 А с точностью 5 мА.

Также была модернизирована поляризованная ядерная мишень (рис. 35). Обновлена инфраструктура криостата растворения путем замены старых вакуумных устройств на современные, создана новая ванна растворения криостата, создан новый компонент криостата для нейтронного исследования образцов в сильном магнитном поле и при комнатной температуре.

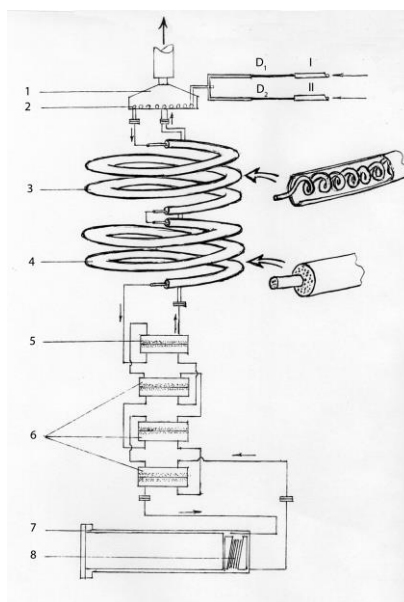


Рис. 35. Общий вид и схема узла растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$: 1 – ванна испарения; 2 – теплообменник ванны испарения; 3 – непрерывный теплообменник; 4 – спеченный непрерывный теплообменник; 5 – спеченный дискретный медный теплообменник; 6 – спеченные дискретные серебряные теплообменники; 7 – ванна растворения; 8 – ферромагнитный нейтронный резонатор с поляризованной мишенью

1.2.1.10. Экспериментальное изучение возможности накопления холодных нейтронов на конце выведенного пучка тепловых нейтронов.

Ранее нами была предложена идея создания нового источника УХН высокой мощности, производительность которого на высокоинтенсивных нейтронных пучках (как на реакторе ILL) может достигать $\sim 10^8$ УХН/с, а объёмная плотность УХН – 10^5 н/см³, что на 3 порядка превышает ныне существующие источники. Идея заключается в создании потока холодных (с длиной волны 9 Å) нейтронов в полости из замедлителя/отражателя, расположенного на конце выведенного нейтронновода с тепловыми нейтронами, и размещения в этой полости гелиевого

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

источника УХН. Сама полость является в этом случае источником холодных нейтронов. В качестве замедлителя/отражателя было предложено использовать твёрдый метан. Таким образом, источник УХН представляет собой сферический сосуд, заполненный жидким гелием при температуре 0.6 К, и окруженный замедлителем из твердого метана. Такая схема источника холодных нейтронов (расположение его на выведенном пучке тепловых нейтронов), многократно снижает тепловую нагрузку на источник и, соответственно, его стоимость по сравнению с источниками, размещёнными у активной зоны реактора. Снижение стоимости источника позволит существенно расширить спектр применения УХН и использовать эти нейтроны не только для проведения фундаментальных исследований, но также для прикладных и образовательных целей.

Для проверки идеи использования полости из твёрдого метана для формирования потока холодных нейтронов на конце нейтронотода с потоком тепловых нейтронов проведены тестовые измерения. Для этих измерений в 2012-2013 годах был разработан и изготовлен специальный криостат. Сами тестовые измерения проведены в 2013 году на инструменте DIN-2PI на канале №2 реактора ИБР-2. Инструмент предназначен для измерения неупругих передач энергии нейтронов методом времени пролета. На **рис. 36** представлены предварительные результаты измерения спектра нейтронов, формирующегося в метановой полости при облучении её нейтронами с энергией 25.0 эВ (длина волны 1.8 Å).

Solid methane. T=6.6K

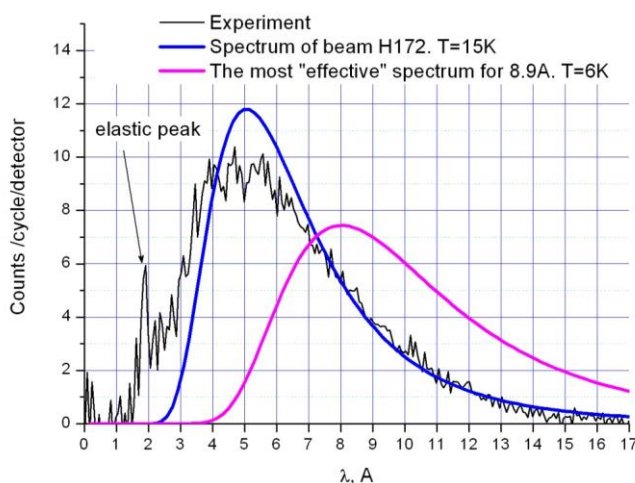


Рис. 36. Спектр нейтронов, замедленных в полости метана.

Для сравнения с измеренным спектром на **рис. 36** показаны максвелловские спектры нейтронов, соответствующие различным температурам. Один из них – спектр, при котором достигается наибольшее число нейтронов с длиной волны 9 Å (температура спектра 6 К). Второй – спектр нейтронов в одном из нейтронотодах, идущих от холодного замедлителя реактора ILL (Франция) (температура этого спектра 15 К). Интегралы под всеми спектрами одинаковы. По результатам измерений оценено, что альbedo метана для спектра, представленного на **рис. 36**, составляет ~65%, что очень близко предварительным расчётным оценкам, следующим из энергетической зависимости сечений.

Полученные результаты тестовых измерений говорят о том, что на пучке тепловых нейтронов внутри метановой полости можно получить спектр нейтронов близкий к спектру, идущему от холодного реакторного источника. Альbedo от твёрдого метана для холодных нейтронов близко к расчётному значению. Таким образом, идея создания гелиевого источника

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УХН внутри холодной полости на конце нейтроновода с тепловыми нейтронами представляется вполне реализуемой. Следующим шагом на пути развития данной идеи является создание прототипа источника, на котором необходимо проверить решения довольно большого числа технических проблем. Дальнейшая оптимизация температуры замедлителя возможна на прототипе источника УХН по выходу ультрахолодных нейтронов, т.к. вклад многофононных процессов в генерацию УХН может быть значительным.

1.2.1.11. Исследования физики УХН.

В совместной работе в составе коллаборации по ультрахолодным нейтронам (UCN collaboration, LANSCE, Los Alamos) измерены и опубликованы сечения неупругого рассеяния (нагрев УХН) для ванадия, V, и полиэтилена, $[C_2H_4]_n$. Подобные измерения актуальны, поскольку эти материалы широко используются в практике УХН-экспериментов, однако, имеющиеся данные противоречивы и зачастую не согласуются с теорией. В измерениях использован твердо-дейтериевый источник, в котором быстрые, генерированные 800-Мэвным пучком протонов, нейтроны замедляются в область УХН энергий. Выполненные измерения основаны на сравнении между V и $[C_2H_4]_n$ отношений отсчетов гамма-детектора и детектора рассеянных нейтронов с использованием известных значений сечений радиационного захвата. Измерения с гамма-детектором (HPGe) и нейтронным детектором (3He газовый счетчик) осуществлялись одновременно. Для УХН спектра со средней скоростью 4 м/с получены величины сечений нагрева 1970 ± 130 б и 25 ± 9 б для полиэтилена и ванадия соответственно. Результат для ванадия получен впервые, и он согласуется с теоретической оценкой. Сравнение с данными из других экспериментов показало, что результат для полиэтилена согласуется лишь со значением, полученным в Гренобле Ю. Покотилевским, однако он значительно ниже модельного значения 3500 б, получаемого из экстраполяции к 4 м/с по расчетам MCNP с существующей библиотекой данных для тепловых нейтронов.

В этой же коллаборации выполнена работа по измерению средней энергии потока "нагретых" нейтронов в результате взаимодействия УХН с ядрами водорода в поликристаллическом полимере PMP, $[C_6H_{12}]_n$. Работа представляет интерес в сравнении с нагревом УХН в полиэтилене, $[C_2H_4]_n$, и в связи с пока нерешенной проблемой потерь УХН при их хранении. Работа проведена с использованием твердо-дейтериевого источника УХН в Лос Аламосе. Измерялось отношение отсчетов рассеянных нейтронов для двух детекторов разной эффективности, и это отношение зависит от формы спектра потока и его средней энергии. Использовались газовые 3He детекторы с парциальным давлением 180 кПа в одном и 20 кПа в другом детекторах. Для получения результата, измеренное отношение сравнивалось с расчетами для разных средних энергий с использованием программы MCNP, в которой моделирование рассеяния в основном базируется на однофононном приближении, но также учитывает и многофононные процессы неупругого рассеяния нейтронов. Такое моделирование показало, что спектр энергий в потоке рассеянных нейтронов явно отличен от спектра Максвелла. Полученное нами значение средней энергии 26 ± 3 мэВ для полимера PMP отличается вдвое от значения 11 - 13 мэВ для полиэтилена, которое было получено ранее в анализе с использованием спектра Максвелла. В заключении нашей работы приводятся аргументы, согласно которым следует ожидать близкие значения средних энергий для $[C_6H_{12}]_n$ и $[C_2H_4]_n$.

1.2.1.12. Сотрудничество в коллаборации GRANIT в ILL (Франция).

ЛНФ ОИЯИ совместно с ФИАН и Университетом Вирджинии (США) являются коллективным членом коллаборации GRANIT. Цель коллаборации состоит в развитии и строительстве гравитационного нейтронного спектрометра второго поколения с ультравысоким энергетическим разрешением – GRANIT (Гравитационные Нейтронные Индуцированные

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Переходы). Этот спектрометр позволит наблюдать резонансные переходы между квантовыми состояниями нейтрона в поле тяготения Земли. Планируется впервые прецизионно измерить энергию квантовых состояний. Ожидается, что в спектрометре можно будет достичь времени хранения УХН в квантовых состояниях порядка секунды.

К концу 2013 года введены в эксплуатацию и протестированы все основные части спектрометра. Источник УХН, предназначенный для спектрометра, устойчиво работает, а нейтроны из источника извлечены в спектрометр. Измерен спектр, извлекаемых в спектрометр нейтронов, который оказался очень мягким. Так как с августа 2013 года до июля 2014 года реактор ILL, на котором расположен спектрометр GRANIT, остановлен, то коллаборацией ведутся исследования возможностей улучшения параметров источника УХН и системы детектирования нейтронов.

1.2.1.13. Продолжение эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона.

Продолжена работа по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона с гравитационным спектрометром EpiGraph, построенным в 2010-11 годах. Работа прибора основана на совместном использовании Нейтронных интерферометров Фабри-Перо и прерывателя-модулятора нейтронного потока (см. **рис. 37**). Изменение энергии нейтрона mgH при падении в гравитационном поле сравнивалась с энергией передаваемой нейтрону при дифракции в -1 порядок на движущейся дифракционной решетке.



Рис. 37. Прерыватель-модулятор.

Особенностью прибора является возможность использования оригинального метода времени пролета, основанного на измерении фазы осцилляции скорости счета детектора. Регистрация УХН ведется детектором, синхронизованным с модулятором. Высокая степень монохроматизации пучка ($\Delta v/v < 2\%$) позволяет работать с временами пролета, многократно превышающими период модуляции, что обеспечивает уникальное энергетическое разрешение прибора.

На пучке УХН Института Лауэ-Ланжевена проведен полномасштабный тестовый эксперимент с новыми интерферометрами Фабри-Перо и новой дифракционной решеткой. В конструкцию прибора внесен ряд усовершенствований. В результате условия эксперимента существенно улучшены (см. **рис. 38** и **39**). Существенно выросла скорость счета, и отношение

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

эффект фон. Увеличение глубины осцилляции скорости счета позволило увеличить частоту модуляции и, соответственно, чувствительность опыта.

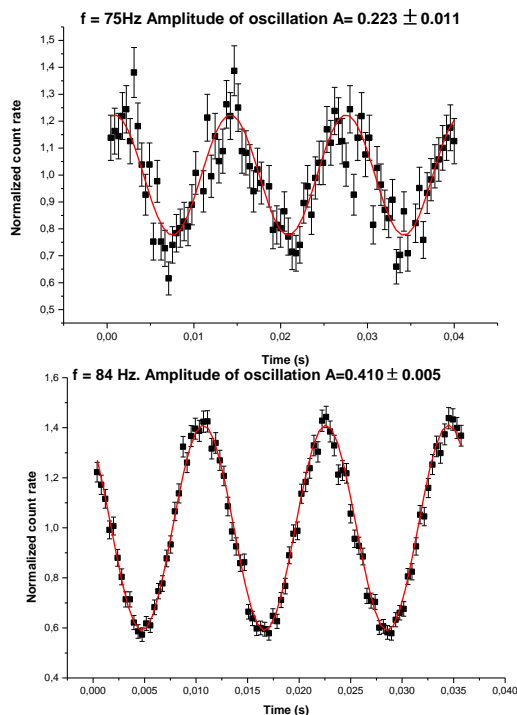


Рис. 38. Осцилляция скорости счета в эксперименте 2011 г (вверху) и в новом эксперименте.

В результате, скорость набора статистической точности в эксперименте была увеличена втрое: с 1.5×10^{-2} в день в 2011 году до 5×10^{-3} в день, что ведет к выигрышу во времени набора статистики почти на порядок.

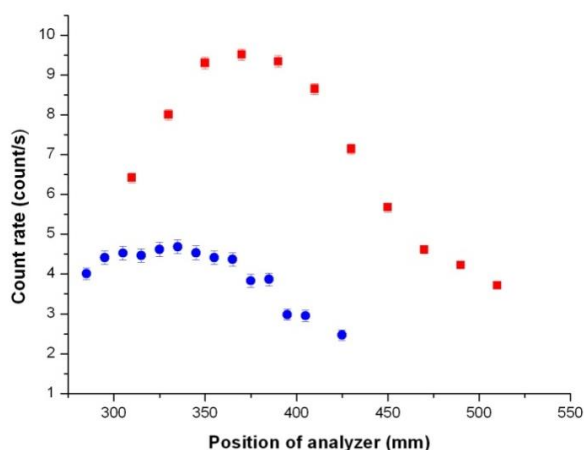


Рис. 39. Кривая сканирования (спектр) нейтронов в -1 порядке дифракции на движущейся решетке. Синие точки - в эксперименте 2011 г., красные - в новом эксперименте.

Вместе с тем, результаты эксперимента свидетельствуют о наличии некоторых систематических эффектов, изучение и исключение которых и является целью следующего этапа эксперимента.

1.2.1.14. Поиск взаимодействий нового типа.

Рассмотрен интерференционный метод поиска новых гипотетических взаимодействий. Хамелеонное скалярное поле сейчас рассматривается как возможная причина ускоренного расширения Вселенной. Это поле порождает потенциал взаимодействия между частицей и массивным телом. Предложен нейтронный интерферометр типа зеркала Ллойда для высокочувствительного поиска эффектов хамелеонного поля, в котором взаимодействие нейтрона с отражающим зеркалом приводит к сдвигу фазы нейтронной волны.

В более широком плане проанализированы возможные нейтронно-интерферометрические эксперименты по высокочувствительному поиску новых взаимодействий, как зависящих от спина (аксионное взаимодействие), так и не зависящих от спина (не Ньютоновская гравитация на малых расстояниях).

1.2.2. Методические и прикладные исследования.

1.2.2.1. Работы в сотрудничестве с ИКИ РАН.

Продолжаются работы по созданию аппаратуры для исследования планет Солнечной системы. В 2013 г. проведена калибровка нейтронных детекторов и гамма-спектрометра научной аппаратуры «Меркурианский гамма и нейтронный спектрометр» (НА МГНС). МГНС будет установлен на борту межпланетной миссии Европейского космического агентства «VeriColombo», запуск которой запланирован на 2015 г. Прибор предназначен для поиска водяного льда и определения элементного состава приповерхностного слоя грунта Меркурия.

Ведется мониторинг выхода нейтронов импульсного генератора ИНГ-10К. Идентичный генератор является частью научной аппаратуры «Динамическое альbedo нейтронов» (НА ДАН), находящейся в настоящее время на борту марсохода «Кьюриосити».

1.2.2.2. Аналитические и методические исследования на установке ИРЕН.

На пучке нейтронов установки ИРЕН с применением методов нейтронной спектроскопии продолжались исследования образцов грунта с высокогорного ледника Актру на Алтае с целью обнаружения космической пыли. Продолжалась обработка данных измерений пропускания нейтронов через образцы новых многофункциональных материалов, изготовленных в Белорусском государственном университете (Минск). Цель исследований — определение содержания бора в образцах. Для дальнейшего развития метода неразрушающего контроля элементного/изотопного состава образцов с применением техники нейтронной спектроскопии были проведены сравнительные исследования образца руды, предоставленной Центральной геологической лабораторией Министерства энергетики и природных ресурсов Монголии. В одном случае измерения были выполнены методом анализа нейтронных резонансов при радиационном захвате, в другом – применялась активационная методика. Результаты обоих методов находятся в хорошем согласии, однако при данной интенсивности установки ИРЕН активационная методика более чувствительна.

В 2013 г. на ИРЕН были проведены радиационные тесты сцинтилляторов и образцов мегатайла установки CMS (ЦЕРН). Это было необходимо для выбора оптимальных условий будущих экспериментов. Спектр нейтронов ИРЕН близок к спектру нейтронов в адронном калориметре CMS. Облучение образцов проводилось интегральным потоком 10^{12} н/см². Затем в течение 3-х недель измерялась наведённая активность на двух расстояниях от образца. Измерения спектров испускаемого гамма излучения проводились HpGe-детектором фирмы «Canberra».

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были опробованы несколько методик прямого измерения спектра быстрых нейтронов установки ИРЕН. Достаточно перспективным оказалось применение камеры деления с мишенью ^{235}U с токовым предусилителем для снятия сигнала. Применение такой аппаратуры в сочетании с высоким временным разрешением установки (100 нс) позволяет на пролетной базе 60 м регистрировать нейтроны с энергией до 20 МэВ (см. **рис. 40**). Однако в области энергий выше 3 МэВ имеется расхождение между измеренной плотностью потока и рассчитанной методом Монте-Карло. Исследования будут продолжены.

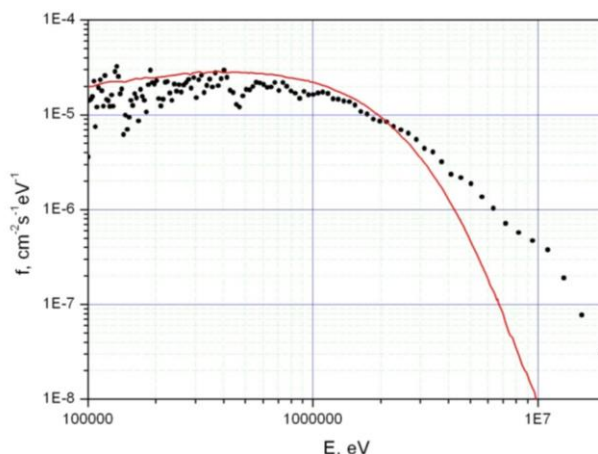


Рис. 40. Плотность потока нейтронов установки ИРЕН на пролетной базе 60 м: точки – экспериментальные значения, линия – расчет методом Монте-Карло.

1.2.2.3. Аналитические исследования на пучках заряженных частиц ускорителя ЭГ-5.

В 2013 году ускоритель ЭГ-5 проработал на различные эксперименты около 600 часов. Исследования глубинных профилей элементов с помощью ядерно-физических аналитических методик RBS (метод Резерфордского обратного рассеяния) и ERD (метод ядер отдачи) проводились совместно с представителями различных институтов стран-участниц ОИЯИ. В экспериментах принимали участие сотрудники ЛЯР, ЛЯП, Воронежского государственного университета, Томского политехнического университета, сотрудники Университета Марии Кюри-Склодовской (Люблин, Польша) и Электро-технологического института Словацкой Академии наук (Братислава). Были проанализированы образцы различного элементного состава и различных технологий приготовления в том числе, в частности, были исследованы глубинные профили элементов в образцах нанокристаллических пленок карбида кремния, приготовленных с помощью технологии PECVD (плазмохимическое осаждение из газовой фазы). Выполнено исследование электрических и оптических характеристик пленок в зависимости от их элементного состава.

Глубинные профили водорода и дейтерия были также исследованы с помощью ядерно-физических аналитических методик RBS и ERD в образцах, приготовленных для исследования ядерной реакции $d(d,\gamma)^3\text{He}$ при низких энергиях.

1.2.2.4. Аналитические исследования на реакторе ИБР-2.

Развитие экспериментальной базы сектора НАА

В подотчетный период в секторе НАА и прикладных исследований разрабатывался пакет программ для комплексной автоматизации нейтронного активационного анализа на исследовательской ядерной установке ИБР-2, включающий в себя:

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- базу данных анализируемых образцов и всех операций по проведению НАА;
- программу автоматизации измерения спектров наведенной активности с использованием программы набора и анализа спектров Genie-2000 и средства поддержки пакетных процедур S561 Genie-2000;
- программу автоматизации расчета концентраций элементов по результатам анализа гамма спектров программой Genie-2000;
- набор сервисных программ для автоматизации и облегчения заполнения базы данных;
- набор вспомогательных программ для обеспечения удобства работы и выполнения некоторых процедур QC/QA.

В процессе обучения персонала работе с пакетом программ проводилась модернизация программного обеспечения. Выполнена частичная модернизация механической части пневмотранспортной установки. Ведется работа по созданию устройств автоматической смены образцов на трех детекторах – приобретены устройства для двухосевого линейного перемещения образцов; разработаны и изготавливаются остальные комплектующие устройства.

Проведены тестовые испытания устройств линейного перемещения образцов на стенде. Разрабатывается программа управления устройствами автоматической смены образцов, совмещенная с программой автоматизации измерения спектров.

Работы по автоматизации НАА на реакторе ИБР-2 проводятся в рамках Координационной программы МАГАТЭ «Development of an Integrated Approach to Routine Automation of Neutron Activation Analysis» (F1.20.25/CRP1888, Contract No. 17363).

Методическая работа

Проводились испытания новых упаковочных материалов для облучения образцов и изготовления транспортных контейнеров с целью выбора материала с высокой радиационной стойкостью и небольшим фоном наведенной радиоактивности после облучения. После завершения реконструкции ИБР-2 проводились измерения плотности потоков тепловых и резонансных нейтронов на некоторых пучках нейтронов в новых экспериментальных условиях.

Биомониторинг

В рамках международной программы «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе – оценки на основе анализа мхов-биомониторов» в 2013 году завершен многоэлементный анализ 330 образцов мхов из Румынии (НАА в Дубне и атомная абсорбционная спектрометрия (ААС) в Университете «Валахия», Тарговице). Образцы были собраны участниками проекта Румыния-ОИЯИ из 4-х университетов Румынии в Тарговице, Галаты, Байа Марэ и Яши. Проведен статистический анализ полученных данных по 34 элементам и велась подготовка к изданию Атласа атмосферных выпадений следовых элементов в Румынии. Результаты этой работы будут доложены на предстоящем совещании Комиссии ООН по воздуху Европы (28-30 января 2014 года, Париж). Вклад сектора НАА в европейский атлас Европы отражен в публикациях сектора по Словакии, Македонии, Албании, Хорватии. Выполнена студенческая дипломная работа по оценке атмосферных выпадений следовых элементов вблизи тепловой электростанции в районе Очаково-Матвеевское г. Москвы. Работы по активному биомониторингу с использованием мхов-трансплантов позволили провести изучение воздушных загрязнений в центре Белграда, Сербия, а также в одном из наиболее экологически неблагоприятных районов Греции – Великой Фракийской низменности, Аттика. Эффективность использования мхов-биомониторов в изучении атмосферных выпадений радионуклидов продемонстрирована в совместных работах сектора со Словакией, Беларусью, ЮАР, Сербией и Таиландом.

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка состояния окружающей среды

В 2013 году в рамках совместного с Египтом проекта «Оценка экологической ситуации в дельте реки Нил с использованием ядерно-физических аналитических методов» продолжен многоэлементный анализ почв и донных отложений, отобранных вдоль русла реки Нил. Показано, что элементный состав этих объектов исследования определяется, главным образом, геохимическими особенностями изучаемого региона и не несет на себе следов антропогенной нагрузки.

В рамках договора о сотрудничестве с Институтом биологии южных морей (Севастополь) с целью оценки состояния прибрежной экосистемы Крыма завершен анализ образцов макроводорослей-биомониторов, отобранных в прибрежной зоне Черного моря. Отработана методика пробоотбора и пробоподготовки планктона для НАА на реакторе ИБР-2, и определен элементный состав 30 проб. Полученные результаты показали, что планктон может успешно использоваться в качестве биомонитора водных экосистем.

Результаты комплексных исследований воздушной среды с помощью мхов и лишайников, а также водной экосистемы вблизи развивающегося порта в Кейптауне (залив Салдана, Атлантический океан в районе Западного побережья ЮАР) с помощью моллюсков и устриц, вызвали интерес специалистов-экологов ЮАР и желание сотрудничать в рамках этого направления. Совместно с Университетом в Стелленбоше в РФФИ подан международный проект «Моллюски как биомониторы водных экосистем в ЮАР» (рег. номер 14-05-93963) по конкурсу (NFS-RFBR) на 2014 год.

Завершены и приняты в печать ведущим американским журналом *Advances in Microbiology* две совместные работы сектора и аналитического центра Геологического института РАН в области применения ядерно-физических аналитических методов для исследования качества продуктов питания, в частности, базидомицетов (грибов) Европейской части России, а статья по определению содержания Cl, Br, I и Se в организме человека – журналом *Environmental Geochemistry and Health*. Совместно с Тбилиским государственным университетом им. И. Джавахишвили, Грузия, проведены исследования сельскохозяйственных культур, подвергнутых биоэнергоактивации (направлено в журнал «Агрохимия», 2013).

Геология

В рамках совместного проекта ОИЯИ-Румыния проведен анализ донных отложений и горных пород из двух полузакрытых систем – ледниковом озере Балеа (в горах Фагара) и в кратерном озере Св. Анны (горный массив Харгита) с целью оценки уровня антропогенного загрязнения и определения источника происхождения донных отложений. Было показано, что согласно румынским нормативам содержание потенциально загрязняющих элементов (Cr, Co, As, Sb, Se) сравнимо с естественным составом окружающей среды. Дальнейшая обработка данных (R-mode, метод главных компонент PCA) отдельно для каждого озера показала, что Sr, Cr, Co, с одной стороны, и As, Sb, Br, Se, с другой стороны, создают для этих озер два различных кластера, с разными геохимическими свойствами.

Совместно с Western Cape University, ЮАР, проведен НАА образцов золы, образованной при сжигании угля на тепловой электростанции в Матла, в провинции Мпамаланга Южной Африки (Mpumalanga Province in South Africa). Показаны аналитические преимущества НАА с использованием тепловых нейтронов в определении элементного состава золы по сравнению с такими методами, как спектрометрия оптического излучения с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES), масс спектрометрия со связанной плазмой и лазерной абляцией (LA ICP-MS) и рентгено-флюоресцентный анализ (XRF).

В рамках совместного проекта сектора с Университетом в Бухаресте завершен элементный анализ терапевтических грязей, отобранных в разных лечебных источниках

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Румынии. В работе отмечена необходимость дальнейших исследований структуры минеральной матрицы изучаемых грязей с повышенной концентрацией некоторых тяжелых металлов, а также роли органических соединений, присутствующих в этих грязях.

Анализ материала внеземного происхождения

В 2013 завершен промежуточный этап работ по поиску космической пыли в торфяных колонках Сибири и в талой воде высокогорного ледника Актру на Алтае. Датирование слоев торфяных колонок было проведено в Университете им. Адама Мицкевича в Польше. Частицы, выявленные с помощью методов электронной микроскопии, а также оценка результатов НАА образцов торфа из этих колонок по соотношению концентраций железа и никеля, позволяют предполагать, что выявленные частицы могут иметь внеземное происхождение. Более спорной представляется идентификация материала, собранного с помощью магнитных ловушек в талой воде ледника на Алтае. Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на Семинаре ГАИШ МГУ в октябре 2013 г.

Антропологические исследования

В рамках завершаемого в 2013 году проекта РФФИ совместно с МГУ (НИИ и Музей антропологии им. Д.Н. Анучина) (№ проекта 12-06-00096/13) выполнен НАА волос представительной группы детей Онгудайского района республики Алтай, а также почв и растительности из мест их проживания, с целью установления возможных корреляций элементного состава и выявления эндемических особенностей влияния геохимической среды на организм человека.

Биотехнологии

В сотрудничестве с биофизиками Института физики им. Э. Андроникашвили Грузинского государственного университета им. И.Джавахишвили и Университета им. И.Чавчавадзе в 2013 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 элементный состав микробиальных образцов, содержащих наночастицы золота и серебра. Изучалось также влияние синтеза наночастиц на распределение матричных и следовых элементов в клетках.

Второе важное направление исследований развивается в области микробиотехнологии в сотрудничестве с Институтом биотехнологии и микробиологии АН Молдовы по извлечению цинка из сточных вод с использованием микроводоросли *Spirulina platensis*. Методом НАА на реакторе ИБР-2 был определен элементный состав микробиальных образцов и оценена эффективность накопления цинка и других металлов биомассой спироулины. Эта работа была отмечена золотой медалью на V Европейской Выставке Изобретений и Инноваций EUROINVENT 2013, Яссы, Румыния в категории «PhD research project». По материалам в области биотехнологий в октябре 2013 года защищена кандидатская диссертация.

Материаловедение

В 2013 году в рамках совместного гранта РФФИ-Беларусь (ОИЯИ) с Научно-практическим центром НАНБ по материаловедению Национальной академии наук Беларуси продолжены исследования по изучению изменения характеристик синтеза нитридов в системе Li-N при различном давлении. К этой работе были привлечены специалисты по рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии университета в Галаце, Румыния. Было показано, что увеличение давления азота в процессе формирования нитридов приводит к

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

образованию структур с повышенным содержанием азота в объеме и с более мелким размером кристаллитов.

Учебный процесс

На базе СНААПИ в 2013 году проводился Практикум для студентов старших курсов Университета «Дубна» и студентов и учителей Международных летних школ (май-июнь, июль и октябрь 2013 года), организуемых УНЦ ОИЯИ для слушателей III всероссийской летней учебно-полевой сессии Академического сообщества «Экос» совместно с Летней школой «Русского Репортёра» (<http://letnyayashkola.org/ecos>) (20 июля – 10 августа, 2013 года).

За отчетный период на базе сектора были выполнены две курсовых работы, четыре бакалаврских и две магистерских дипломных работы. В секторе выполняются пять кандидатских диссертаций.