

1. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.2. НЕЙТРОННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Введение

В 2002 году экспериментальная программа в области нейтронной ядерной физики в ЛНФ им. И.М. Франка включала традиционные направления исследований: изучение процессов нарушения пространственной и временной четности при взаимодействии нейтронов с ядрами; изучение квантово-механических характеристик и динамики процесса деления; экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитных свойств нейтрона и его бета-распада; гамма-спектроскопия нейтронно-ядерных взаимодействий; получение новых данных для реакторных приложений и для ядерной астрофизики; эксперименты с ультрахолодными нейтронами; прикладные исследования.

В связи с остановкой реактора ИБР-30, центр тяжести экспериментальных исследований переместился на реактор ИБР-2 и ЭГ-5, а также на базовые установки других ядерных центров России, Болгарии, Польши, Чехии, Германии, Республики Корея, Китая, Франции, США, и Японии.

1. Экспериментальные исследования

1.1. *Нарушение пространственной и временной четности при взаимодействии нейтронов с ядрами*

1.1.1 Поиск и исследование структуры подпороговых нейтронных p -резонансов на изотопах свинца методом комбинированной корреляционной гамма-спектроскопии

С целью поиска подпорогового нейтронного p -резонанса на изотопах свинца и объяснения эффекта нарушения четности (поворота спина нейтрона, поляризованного перпендикулярно импульсу, при прохождении через свинцовую мишень) проводились эксперименты на 1-м канале реактора ИБР-2. Изучалась зависимость сечения радиационного

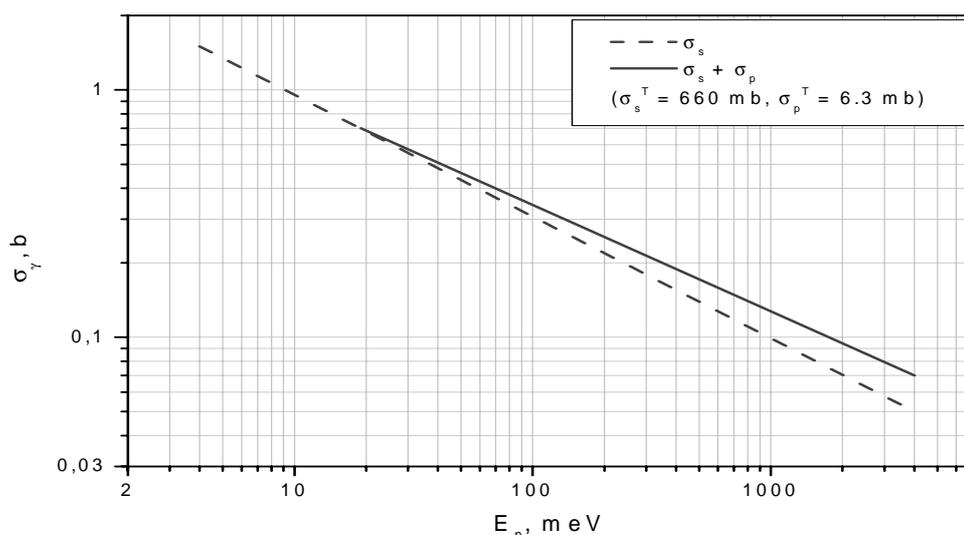


Рис. 1. Энергетическая зависимость сечения радиационного захвата нейтронов для s - и $s+p$ волн.

захвата нейтрона от энергии. Ожидаемое отклонение этой зависимости от закона $1/\sqrt{E}$, связанное с существованием такого резонанса, показано на **рис. 1**.

В интервале энергий нейтронов от 80 мэВ до 3 эВ были проведены измерения гамма-спектров радиационного захвата на образце свинца, обогащённом изотопом ^{204}Pb , весом 4.7 г с использованием гамма-спектрометра COCOS, схема которого представлена на **рис.2**.

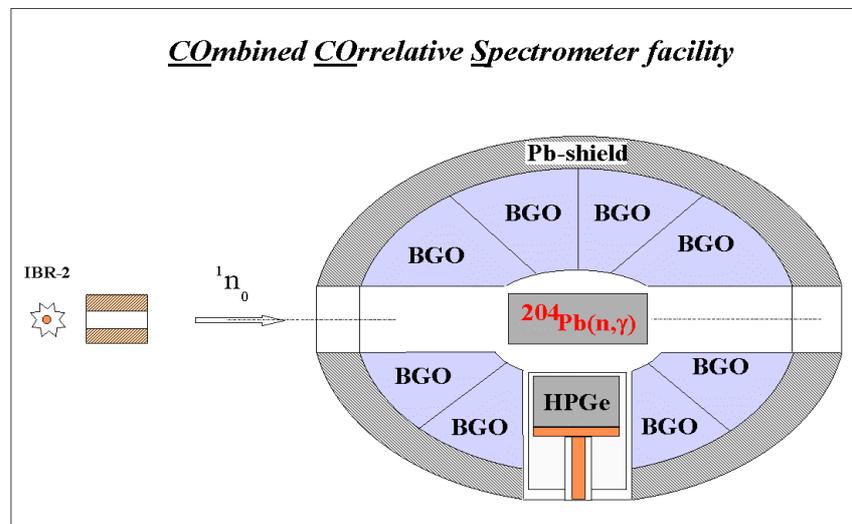


Рис. 2. Схема гамма-спектрометра COCOS.

Продемонстрирована принципиальная возможность проведения прецизионной гамма-спектроскопии малых количеств изотопа свинца в неблагоприятных фоновых условиях импульсного пучка нейтронов, а также эффективность избранного методического подхода. В полученных предварительных результатах в рамках 15%-ной погрешности не обнаружено проявление искомого резонанса для изотопа ^{204}Pb .

1.1.2 Измерение P-нечетной асимметрии вылета тритонов в реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ и последние результаты по измерению P-нечетной асимметрии эмиссии γ -квантов в реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow ^7\text{Li}(\text{o.c.})$

Эксперимент по измерению P-нечетной асимметрии вида $\alpha_{PNC}(\mathbf{s}_n, \mathbf{p}_t)$ в реакции $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ был проведен на холодных ($\langle \lambda_n \rangle = 4.7 \text{ \AA}$) поляризованных (94%) нейтронах пучка PF1В реактора ИЛЛ, Гренобль, Франция коллаборацией ЛНФ ОИЯИ-ПИЯФ-ИЛЛ. Подробности эксперимента приведены в публикуемой в настоящем сборнике отдельной статье. В основных измерениях в течении 18 суток был получен результат $\alpha'_{PNC} = -(8.1 \pm 3.9) \cdot 10^{-8}$. Кроме того были проведены измерения по оценке вклада P-четной лево-правой асимметрии $\alpha_{LR} \leq 8 \cdot 10^{-9}$. На основании этих данных и результатов таких же измерений в ПИЯФ, Гатчина сделана оценка величины слабой мезонной константы, соответствующей нейтральному току $-f_\pi \leq 1.2 \cdot 10^{-7}$. Планируется продолжение измерений.

Первый эксперимент по измерению P-нечетной асимметрии эмиссии γ -квантов в реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow ^7\text{Li}(\text{o.c.})$ был проведен в 2001 г в Гренобле на пучке поляризованных нейтронов PF1В реактора ИЛЛ. В основных измерениях было получено значение P-нечетной асимметрии вида $\alpha_{PNC}(\mathbf{s}_n, \mathbf{p}_\gamma) - \alpha = + (8.8 \pm 4.6) \cdot 10^{-8}$, и в нулевом эксперименте был обнаружен значительный фоновый эффект $\alpha_0 = -(14.8 \pm 3.3) \cdot 10^{-8}$. В эксперименте 2002 г. уделено значительное внимание выяснению природы фонового эффекта. Проведены исследования по оценке возможного вклада в измеряемую величину от реакций на конструкционных материалах установки и образцов: свинец, алюминий, литий, воздух. Установлено, что используемый в первом эксперименте образец для 0-теста локально

загрязнен, вероятнее всего хлором (или бромом), что и давало большой эффект на фоне. Основные результаты эксперимента (предварительные): измерения с образцом ^{10}B - $\alpha = -(11.0 \pm 6.6) \cdot 10^{-8}$, 0-тест - $\alpha_0 = (0.7 \pm 3.7) \cdot 10^{-8}$. Расчет исследуемой реакции в рамках кластерной модели с использованием «лучших» значений слабых мезонных констант дает для P-нечетной корреляции величину $\alpha^{theor} = -7.24 \cdot 10^{-8}$. Достигнутая экспериментальная точность не позволяет пока сделать оценку слабой мезонной константы f_{π} . Планируется продолжить измерения с новым суперзеркальным поляризатором, обеспечивающим в несколько раз большую интенсивность поляризованных нейтронов.

1.1.3 Нарушение четности в компаунд-ядрах: последние результаты коллаборации TRIPLE

В рамках коллаборации Time Reversal Invariance and Parity at Low Energy (TRIPLE) закончен анализ измерений нарушающего четность поворота спина в области 0.75 эВ нейтронного р-волнового резонанса на ^{139}La . Эксперимент был проведен на Лос-Аламосском импульсном источнике методом измерения нейтронного пропускания с двумя оптически поляризованными ^3He ячейками, используемыми как поляризатор и анализатор нейтронного спина. Анализ данных приводит к значению слабого матричного элемента $\chi W = (1.71 \pm 0.25)$ мэВ, что согласуется с более ранними экспериментальными данными по лантану.

1.1.4 Статус проекта KaTRIn

В рамках подготовки эксперимента по проверке временной инвариантности в ядерных реакциях **KaTRIn** разработана программа моделирования прохождения поляризованных тепловых нейтронов через поляризованные мишени. Программа работает с библиотеками сечений, аналогичными тем, что заложены в MCNP. Дополнительные библиотеки для учета эффектов нарушения пространственной четности и временной инвариантности рассчитаны в рамках двухуровневого приближения.

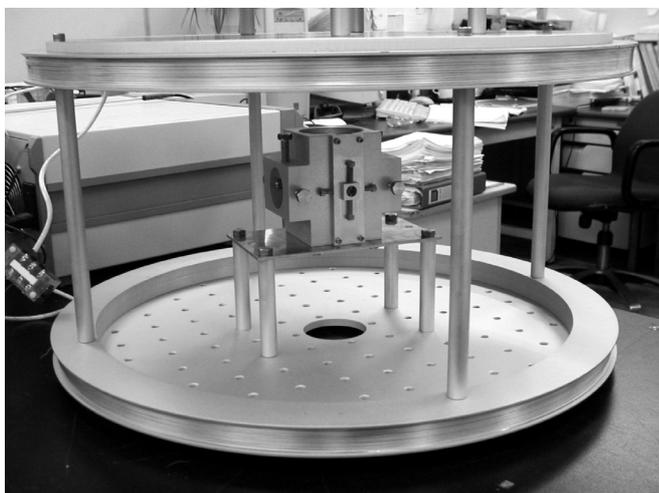


Рис. 3. Система колец Гельмгольца в сборке с нагревателем мишени.

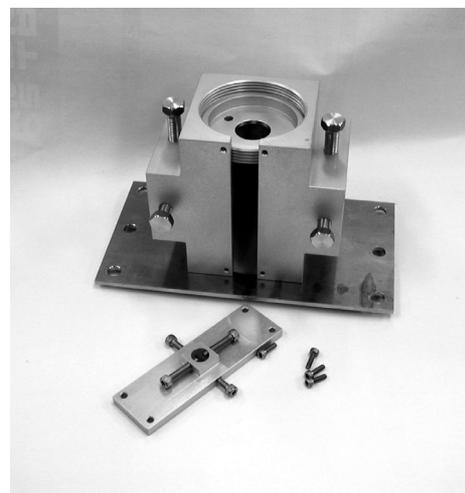


Рис. 4. Нагреватель мишени.

В рамках сотрудничества ЛНФ ОИЯИ – ФИАН по совершенствованию поляризатора нейтронов на основе ^3He с оптической накачкой, проводится модернизация системы наполнения кювет ^3He и рубидием с использованием фильтра высокой очистки ^3He (геттера).

Параллельно ведется работа по созданию поляризатора нейтронов на основе газовой мишени ^3He с лазерной накачкой для PAL и реактора «HANARO» (KAERI). Изготовлена система колец Гельмгольца диаметром 50 см с блоком питания, нагреватель для мишени,

крепежные элементы. Фотография колец в сборке с нагревателем показана на **рис. 3**. На **рис. 4** показан нагреватель в разобранном виде. Измеренное магнитное поле в центре - 23 Гаусса, что полностью совпадает с расчетами.

Систему в дальнейшем планируется использовать также в совместных экспериментах ЛНФ ОИЯИ – PAL – КЕК по проверке временной инвариантности в ядерных реакциях.

1.1.5 Разработка выстроенной ядерной мишени для поиска Т-неинвариантности

Для исследования эффектов Т-неинвариантности в нейтрон-ядерном взаимодействии с использованием Р-чётной Т-нечётной пятерной корреляции $c\mathbf{p}\mathbf{I}$ (здесь c , \mathbf{p} и \mathbf{I} соответственно спин нейтрона, момент нейтрона и спин ядра) требуется образец с выстроенными ядрами. Было предложено для выстраивания квадрупольных ядер в монокристаллах использовать динамический метод, насыщая соответствующие ЯКР-переходы с помощью СВЧ электромагнитного поля. В связи с этим в 2002 году проводились работы по изучению возможности применения метода динамического выстраивания ядер (ДВЯ) для исследования эффектов Т-неинвариантности:

- совместно с ИОНХом методом ЯКР проведены исследования на монокристалле ниобата лютетия с парамагнитной примесью трёхвалентного хрома. Найдены три резонансные линии, соответствующие переходам между уровнями со спинами 7/2, 5/2, 3/2 и 1/2. Частоты переходов незначительно отличаются от ранее полученных на керамическом образце;
- определено взаимное расположение направления градиента электрического поля и главной оси С кристалла.

1.2 Нейтронно-индуцированное и спонтанное деление

1.2.1 Интерференционные явления в делении ^{239}Pu резонансными нейтронами

В рамках нового теоретического подхода Барабанова-Фурмана к описанию деления, использующего представление спиральности для выходных делительных каналов и обычную теорию ядерных реакций, были получены формулы для парциальных и дифференциальных

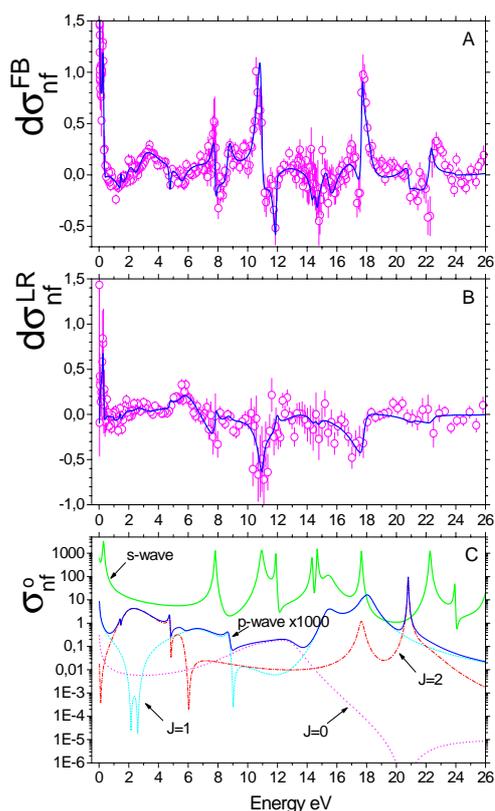


Рис. 5. Результаты фитирования Р-четных данных по угловой асимметрии «вперед-назад» (А) и «лево-право» (В) осколков деления из реакции $^{239}\text{Pu}(n, f)$ в области 0.02 – 25 eV, точки – эксперимент, кривые – результаты фитирования. С – s- и р-волновые сечения деления (с указанием спиновых компонент для р-волнового сечения деления). Фитирование проводилось с учетом разрешения нейтронного спектрометра.

сечений деления. С использованием этих формул и многоуровневого R – матричного формализма, а также программы минимизации FUMILI разработана программа для анализа экспериментальных данных по угловой анизотропии осколков при делении выстроенных ядер резонансными нейтронами и по P -четным угловым корреляциям «вперед-назад» и «лево-право», обусловленным интерференцией s - и p -волновых резонансов. Разработанная программа позволила выполнить анализ экспериментальных данных по P -четным угловым корреляциям, полученных на бустере ИБР-30+ЛУЭ-40 для ^{239}Pu . До сих пор анализ таких данных проводился с использованием менее строго подхода, предложенного Сушковым-Фламбаумом еще в 1982 г. Достоинством нового метода и новой программы является возможность совместного анализа всей совокупности экспериментальных данных по полным, парциальным и дифференциальным сечением деления с использованием единого набора резонансных параметров. На **рис.5** представлены результаты фитирования экспериментальных данных по угловым корреляциям «вперед-назад» и «лево-право» для ^{239}Pu . Расчеты показали, что из-за малой статистической точности экспериментальных данных, ограниченности энергетического разрешения и большого числа вводимых параметров p -волновых резонансов, описание экспериментальных данных с удовлетворительным χ^2 достигается с разным набором (по их числу и спином) p -резонансов. Поэтому большой интерес представляет продолжение экспериментов в условиях хорошей статистики и хорошего разрешения.

1.2.2 Интерференционные эффекты в угловых распределениях осколков деления

В выполненном цикле исследований угловой анизотропии осколков при делении ^{235}U резонансными нейтронами (Phys. of Atom. Nucl., **62**, p.840 (1999)) остается нерешенной проблема надежной нормировки извлекаемого из эксперимента коэффициента угловой анизотропии $A_2(E)$. Абсолютная нормировка этой величины зависит от правильной оценки выстроенности спинов ^{235}U в мишени в виде монокристалла уранил-рубидиевого нитрата, которая определяется точностью константы сверхтонкой связи P/k в этом кристалле. Были предприняты измерения температурной зависимости угловой анизотропии альфа-частиц ^{233}U (основной активности образца) с целью уточнения константы P/k для этого ядра. При охлаждении образца до 0.2K получена точность 30 %. Для достижения поставленной цели (точности 5–10 %) необходимо продолжить эксперимент с понижением температуры до нескольких $m\text{K}$.

1.2.3 Измерения сечения деления ^{234}U на источнике нейтронов nTOF (ЦЕРН)

На импульсном источнике нейтронов nTOF в ЦЕРНе с помощью быстрой ионизационной камеры проведены первые измерения сечения $^{234}\text{U}(n,f)$ -реакции для широкого интервала энергии нейтрона- от тепловой до 100 МэВ. Эти измерения проводятся в рамках

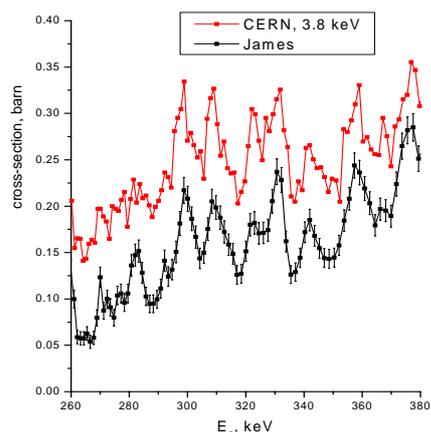


Рис. 6. Сравнение сечения, полученного на nTOF спектрометре с известными литературными данными.

европейской программы получения ядерных данных для АДС систем. Параллельно, используя уникальное энергетическое разрешение пTOF спектрометра, решается задача исследования тонкой структуры вибрационных резонансов, проявляющихся на барьере деления четно-четных ядер-мишеней. Точное знание параметров этой структуры позволяет получать количественную информацию о деформации делящихся ядер в точке разрыва и, таким образом, изучать свойства внешнего барьера деления. Приведенные на **рис.6** сечения $^{234}\text{U}(n,f)$ -реакции в области хорошо известного вибрационного резонанса 310 кэВ демонстрируют возможности пTOF спектрометра в решении данной задачи. В 2003 году планируется получение данных для ядер-мишеней ^{232}Th , ^{234}U , ^{236}U и ^{238}U .

1.2.4 Экспериментальные исследования процесса тройного деления

В сотрудничестве с GSI и Техническим университетом (Дармштадт, Германия) был проведен эксперимент по изучению спонтанного деления ^{252}Cf , сопровождаемого вылетом легких заряженных частиц. В эксперименте использовалась двойная ионизационная камера, позволяющая с высокой эффективностью регистрировать энергии и направления вылета двух осколков деления. Для регистрации легких заряженных частиц использовался набор ΔE - E телескопов, расположенных под углами, близкими к 90° по отношению к оси камеры. Кроме того регистрировались γ -кванты из деления с помощью двух сегментированных германиевых детекторов большого объема (GSI Super Clover detectors). Угловое разрешение всех детекторных систем позволяет достигнуть энергетического разрешения гамма-квантов (после поправки на Доплер-эффект) $\Delta E / E = 1\%$, что позволяет говорить о прецизионной гамма спектроскопии движущихся осколков. Кроме того, большой интерес представляет возможность наблюдения испускания гамма-квантов из возбужденных состояний тройных частиц. Вероятность образования легких заряженных частиц в возбужденном состоянии является чрезвычайно важным параметром для теории тройного деления, который может позволить оценить температуру ядра в момент деления.

1.3 Гамма-спектроскопия нейтронно-ядерных взаимодействий

1.3.1 Исследование двухквантовых гамма - каскадов

Продолжается обработка и анализ накопленной к настоящему времени экспериментальной информации о двухквантовых каскадах в неизученных до сих пор ядрах. Завершен анализ таких данных для ядер ^{60}Co и ^{184}W .

Схема возбужденных уровней изотопа ^{184}W относится к разряду хорошо изученных в разнообразных ядерных реакциях. Тем не менее, информация о 240 энергетически разрешенных каскадах позволила более чем вдвое расширить диапазон энергий возбужденных уровней, для которых установлены моды их распада. Такая информация необходима для тестирования современных моделей ядра.

Для составных ядер $^{185,187}\text{W}$ и $^{191,193}\text{Os}$ из интенсивностей двухквантовых каскадов определены интервалы наиболее вероятных значений плотности уровней, возбуждаемых первичными дипольными переходами при захвате тепловых нейтронов и их радиационные силовые функции. Для изотопов вольфрама указанные параметры каскадного гамма-распада нейтронного резонанса получены с наименьшей по сравнению с полученными ранее данными статистической и систематической погрешностями.

Во всех этих ядрах в интервале энергии возбуждения от ~ 1 до ~ 2 - 2.5 МэВ наблюдается четко выраженная ступенчатая структура. В рамках представлений обобщенно й модели сверхтекучего ядра этот факт свидетельствует об очень существенном влиянии спаривательного взаимодействия нуклонов на наблюдаемые свойства ядра, по крайней мере, ниже половины энергии связи нейтрона.

1.3.2 Спектроскопия ядра ^{159}Gd

Ядро ^{159}Gd находится в середине редкоземельной области, имеет большую деформацию и может быть представлено как четно-четный эллипсоид с нейтроном на внешней оболочке. Низколежащие уровни группируются в ротационные полосы, построенные на одноквазичастичных состояниях. Основные свойства такой системы можно рассматривать как взаимодействие одной частицы с полем ядра ^{158}Gd , свойства которого хорошо изучены. Уровни ^{159}Gd изучались в реакции $^{158}\text{Gd}(n,\gamma)$ в ЛНФ ОИЯИ, в БНЛ (Брукхэйвен, США) и в ИЛЛ (Гренобль), а также в реакциях передачи $^{158}\text{Gd}(d,p)$ и $^{160}\text{Gd}(d,t)$ на ускорителе Ван де Граафа в Техническом Университете (Мюнхен). В 2002 г. проводился анализ результатов измерений реакций передач $^{158}\text{Gd}(d,p)$ и $^{160}\text{Gd}(d,t)$. Заряженные частицы из реакций разделялись по энергии и по типу в Q3D спектрографе, схема которого изображена на **рис. 7**, и регистрировались позиционно-чувствительным детектором. Выход протонов из реакции $^{158}\text{Gd}(d,p)$ был измерен под 10 углами. Для теоретического описания угловых распределений протонов, связанных по энергии с определенными конечными состояниями ^{159}Gd использовалась DWBA аппроксимация. Реакция $^{160}\text{Gd}(d,t)$ была измерена под углами 8, 40, 45 и 50 градусов с неполяризованными дейтронами и 12, 16, 20, 25, 30 и 35 градусов с поляризованным пучком дейтронов. Для теоретического описания угловых распределений также использовалась DWBA аппроксимация. Анализ этих результатов позволил определить спины и четности уровней ^{159}Gd до энергии возбуждения 2320 кэВ. На основании результатов измерений всех реакций были построены ротационные полосы в ядре ^{159}Gd до энергии 1220 кэВ.

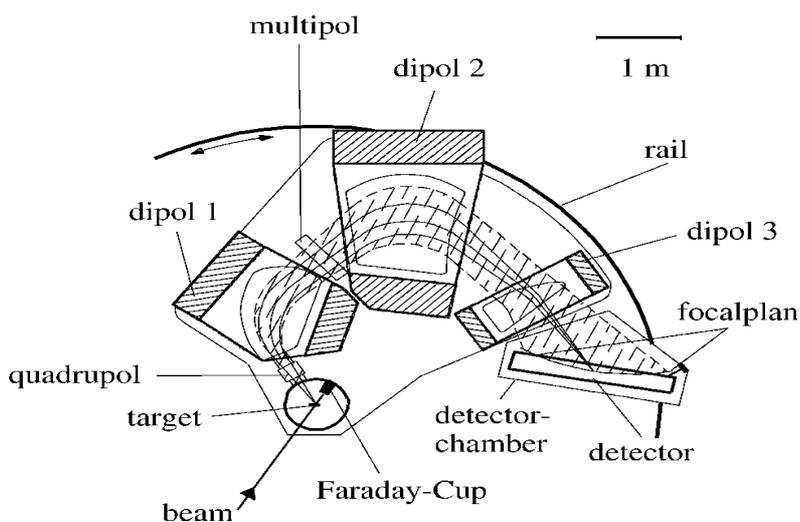


Рис. 7. Q3D спектрограф на ускорителе Ван де Граафа в Техническом Университете (Мюнхен).

1.3.3 Исследование плотности уровней и радиационных силовых функций изотопов Mo и Si

Были продолжены работы по изучению плотности уровней ядер и радиационных силовых функций в коллаборации с университетом г.Осло (Норвегия) и Ливерморской национальной лабораторией (США). Проведен совместный эксперимент на циклотроне университета г.Осло по изучению ядер ^{96}Mo и ^{97}Mo с использованием реакций $(^3\text{He},\alpha\gamma)$ и $(^3\text{He},^3\text{He}\gamma)$. Закончена совместная обработка результатов предыдущих измерений для ядер ^{27}Si и ^{28}Si . Получены плотности уровней для этих ядер в диапазоне энергий возбуждения до энергии связи нейтрона, а также энергетические зависимости радиационных силовых функций. Выполнена методическая работа, показывающая способ экспериментального изучения электромагнитной природы пигми резонанса в радиационных силовых функциях путем совместного анализа данных из $(^3\text{He},\alpha\gamma)$ и $(n,2\gamma)$ реакций применительно к одним и тем

же изучаемым ядрам. Продолжалась обработка результатов совместного эксперимента, выполненного в Лос Аламосской национальной лаборатории в конце 2001 г. по изучению $^{171}\text{Yb}(n,2\gamma)^{172}\text{Yb}$ реакции на тепловых нейтронах.

1.3.4 Измерение спектров гамма лучей в отдельных резонансах тантала

В сотрудничестве с университетом г. Лодзи (Польша) проводились эксперименты по отработке методики измерения спектров гамма-лучей в отдельных резонансах тантала. Благодаря оригинальному предложению - использованию очень толстого образца, подавляющего фоны самого спектрометра в пределах исследуемого резонанса - удалось на порядок снизить фоны, связанные с гамма-квантами от захвата нейтронов в германиевом детекторе и впервые измерить на спектрометре нейтронов по времени замедления в свинце гамма-спектры радиационного захвата для нескольких резонансов Та.

1.4 Астрофизические аспекты нейтронной физики

1.4.1 Измерение сечений нейтронного захвата изотопов ^{22}Ne , ^{30}Si , ^{40}Ar , $^{78,80,84,86}\text{Kr}$ при астрофизических энергиях

Завершена обработка экспериментальных данных и проведен анализ результатов совместных экспериментов ЛНФ ОИЯИ - ЦИ Карлсруэ (Forschungszentrum Karlsruhe) в рамках программы получения ядерных данных для астрофизики. Эксперименты проводились на ускорителях Ван-де-Граафа Карлсруэ и Тюбингена, Германия. В качестве источников нейтронов служили реакции $^7\text{Li}(p,n)$ и $\text{T}(p,n)$. Сечения захвата изотопов определялись активационным методом. Получены значения сечений для области энергий нейтронов 25 – 215 кэВ. На основе полученных данных и с использованием доступных данных по резонансным параметрам рассчитаны средние по Максвелловскому распределению сечения захвата для диапазона температур, соответствующих $kT = 1 - 250$ кэВ. В ряде случаев новые значения существенно отличаются от рекомендованных для использования в астрофизических расчетах (см. **рис. 8**). Проведен качественный анализ возможного влияния новых данных в различных астрофизических сценариях производства элементов.

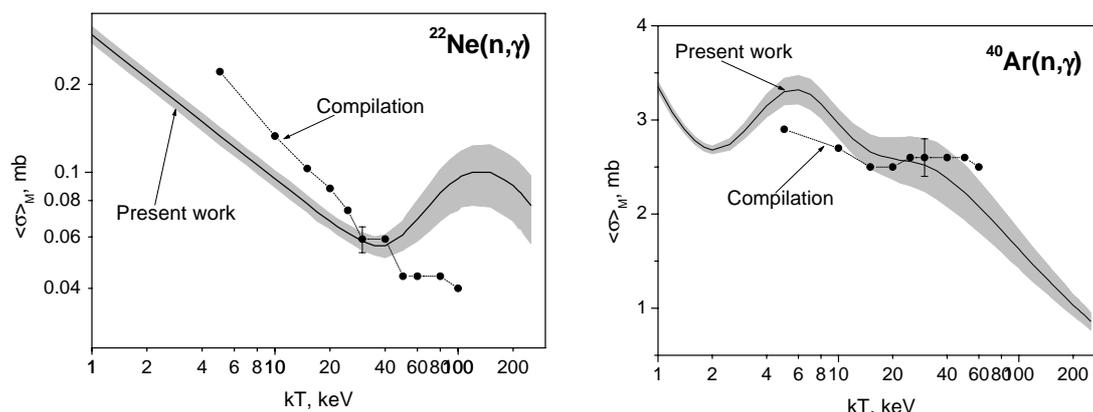


Рис. 8. Средние по Максвелловскому распределению сечения, полученные в данной работе, в сравнении с рекомендованными данными.

1.4.2 Моделирование нейтронного нуклеосинтеза в области серы и хлора на стадиях гидростатического горения массивных звезд

Совместно с сотрудниками Лодзинского университета, Польша продолжается работа по моделированию различных сценариев нуклеосинтеза. Созданная ранее программа по расчету нейтронного нуклеосинтеза на стадии гидростатического горения гелия в звездах массой $25 M_{\odot}$ расширена на последующую стадию гидростатического горения углерода. В программу добавлены возможности определения интегральных потоков реакций, анализ точек ветвлений и вклад различных ветвей в производство изотопов. Проведен анализ образования элементов в области S-Cl-Arg с учетом обновленных данных по нейтронным сечениям для ряда изотопов. Рассчитана зависимость концентрации элементов из указанной области на стадиях горения He и C от времени.

1.5 Индуцированные быстрыми нейтронами реакции с вылетом заряженных частиц

Начата модернизация детекторов, электронной аппаратуры и пучка быстрых нейтронов на ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ. Изучались характеристики пучка быстрых нейтронов с энергией 3,5-6,5 МэВ из d-D - реакции. Предстоит создать еще газообразную дейтериевую мишень, а также литиевую и тритиевую мишени.

Разрабатывается методика измерений на легких ядрах, исследования на которых имеют ряд особенностей, и задача не может быть решена с использованием методики, успешно применявшейся для изучения ядер средней массы.

В стадии решения еще две проблемы-понимания и выделения фона и правильного учета искажения энергетического спектра нейтронов источника.

При облучении камеры потоком быстрых нейтронов наряду с сигналами от заряженных частиц из исследуемой реакции и фоновых реакций на конструкционных материалах регистрируются и сигналы от заряженных частиц, возникающих в рабочем газе. Для подготовки к эксперименту и последующей обработки результатов измерений необходимо представлять, в какую область на двумерном амплитудном спектре ($P_{An} \times P_{Kam}$) должны попадать сигналы от заряженных частиц из интересующей нас реакции. С этой целью, был создан программный комплекс, моделирующий процессы, происходящие в камере.

Для детального сравнения спектров, получаемых в измерениях, и идентификации частиц в расчетах учитывался разброс сигналов за счет разрешающей способности детектора и изменение энергии α -частицы при прохождении слоя вещества конечной толщины, а так же энергетический разброс нейтронов в исходном спектре. Для этого была написана программа, моделирующая спектр вылетающих нейтронов для источника на базе ускорителя Ван де Граафа. Изменение спектра нейтронов, связанное с прохождением через вещество, рассчитывалось с помощью программы MCNP. Экспериментальные спектры, полученные для реакции $^{64}\text{Zn}(n, \alpha_0)^{61}\text{Ni}$ при энергии нейтронов $E_n=5$ МэВ и давлении газа Kr+4.71% CH₄ 1.2 атм, находятся в хорошем соответствии с модельным расчетом. В дальнейшем для проверки правильности расчетов планируется провести измерения спектров нейтронов на ЭГ-4,5 Пекинского университета.

С участием физиков из Лодзинского университета, Польша, начаты работы по созданию измерительного модуля для проведения многопараметрических измерений (с перспективой его использования на ИРЕН).

1.6 Программа ядерных данных

1.6.1 Исследование резонансной структуры нейтронных сечений осколочных и делительных материалов

В 2002 г продолжалась обработка времяпролетных спектров, ранее измеренных на 122 м, 501 м и 1006 м пролетных базах ИБР-30 с помощью многосекционных детекторов нейтронов и гамма-лучей для *Nb*, *Mo*, *Pb*, *U-235*, *Pu-239* образцов-фильтров. Из времяпролетных спектров после вычитания фона определялись полные и парциальные нейтронные групповые сечения, факторы резонансной блокировки полного сечения и сечения рассеяния в диапазоне энергий 0.100 эВ- 200 кэВ для *Nb*, *Mo* и *Pb*. Экспериментальные погрешности сечений и факторов блокировки составляют соответственно 3-7% и 8-15%. Аналогичные величины были определены расчетным путем по программе ГРУКОН на основе оцененных данных разных библиотек. В целом расчетные и экспериментальные данные совпадают, но в некоторых энергетических группах расхождения выходят за пределы экспериментальных ошибок.

Для урана-235 и плутония-239 из времяпролетных спектров разной кратности совпадений гамма-лучей после вычитания фоновых составляющих определены величина альфа ($\alpha = \sigma_{\gamma} / \sigma_f$) в разрешенных резонансах для диапазона энергий 1-1200 эВ и в энергетических группах 20 эВ- 10 кэВ. Кроме того, изучался доплер-эффект в величине альфа для плутония-239 при температурах 293 К и 77 К (сделано впервые). Экспериментальные погрешности в величине альфа составляют 2-30% в зависимости от резонансных особенностей величины альфа. Проведены расчеты величины альфа на основе оцененных данных разных библиотек по программе ГРУКОН. Различия расчетных и экспериментальных величин достигают 50% в некоторых резонансах и энергетических группах.

1.6.2 Измерения полных нейтронных сечений

В рамках сотрудничества ЛНФ ОИЯИ – PAL (Pohang Accelerator Laboratory) POSTECH (г. Поханг, Республика Корея) проведены измерения полных нейтронных сечений Ag, Cu, Sm, In, Dy (естественные смеси изотопов). Для Ag и Sm получены параметры нейтронных s - волновых резонансов в области 0.1 – 80 эВ, для Sm и In – до 10 эВ.

Измерения полных нейтронных сечений проводились на вертикальном нейтронном канале PAL по методу времени пролета. Пролетная база 10.8 м. В экспериментах использовался механизм автоматической смены образцов, разработанный и созданный в ЛНФ ОИЯИ (см. **рис. 9**). Механизм позволяет проводить измерения с четырьмя образцами, которые поочередно вводятся в нейтронный пучок. Погрешность фиксации положения образцов в пучке менее 1 мм.

Нейтроны регистрировались сцинтилляционным (ZnS(Ag)) детектором BC702/5 компании Vicron Corp., обогащенным ^6Li . Для разделения нейтронов и гамма – квантов (см. **рис.10**) использовалась схема n - γ сепарации, созданная в 2001 г. на базе стандартных блоков компании EG&G ORTRC. Схема позволяет практически полностью разделять импульсы от нейтронов и гамма квантов по длительности заднего фронта. При этом теряется не более 15% нейтронов.

Обработка полных нейтронных сечений для Sm и In проводилась в KAERI (Korean Atomic Energy Research Institute). Данные для Ag и Sm сначала обрабатывались в PAL программой SAMMY-M2 и затем были переданы в KAERI для последующей возможной обработки и включения в библиотеку нейтронных сечений.



Рис. 9. Механизм смены образцов со снятым герметическим кожухом.

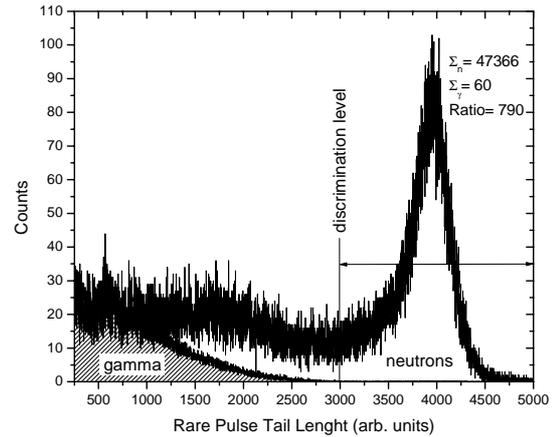


Рис. 10. Разделение импульсов от нейтронов и гамма – квантов по форме (длительности) заднего фронта. Стрелкой указан интервал длин заднего фронта импульсов, которые пропускались схемой для накопления временных спектров.

1.7. Фундаментальные свойства нейтрона

1.7.1 Исследования зарядового радиуса нейтрона

Из традиционных для НЭОФЯ ЛНФ исследований электрической поляризуемости нейтрона и его среднеквадратичного зарядового радиуса большее внимание в 2002 году было уделено зарядовому радиусу, определяемому величиной длины n, e -рассеяния b_{ne} . Поскольку ситуация с экспериментальными значениями b_{ne} весьма неоднозначна (имеется более десятка значений с ошибками $(0,03 \div 0,05) \cdot 10^{-3}$ Фм, которые группируются около $\sim -1,3 \cdot 10^{-3}$ Фм и $\sim -1,6 \cdot 10^{-3}$ Фм), очень важно совершенствовать методы измерения и искать возможные ошибки в использовавшихся методиках.

Было предложено измерять b_{ne} с использованием асимметрии рассеяния нейтронов вперед – назад в аргоне, определяемой для разных энергий нейтронов методом времени пролета. Было измерено полное сечение аргона в интервале энергий нейтронов от ~ 5 эВ до 30 кэВ, и проведен анализ всех известных сечений для Ar и ^{36}Ar , начиная от тепловых энергий, что дало возможность получить рекордную точность отношения когерентной длины ядерного рассеяния к полному сечению ядерного рассеяния

$$a_{coh}^N / \sigma_s^N = (0,0287 \pm 0,0001) \text{ Фм}^{-1}$$

для естественного аргона. Это необходимо для надежного извлечения b_{ne} из результатов будущих экспериментов.

При тщательном анализе результатов ставшей уже классической работы Крона и Ринго по рассеянию нейтронов благородными газами была обнаружена существенная зависимость наблюдаемой асимметрии рассеяния от давления криптона и ксенона, которое изменялось авторами [3] от 0,4 до 1,2 атм. С большой вероятностью причина этого состоит в неучтенном эффекте дифракции нейтронов на одноатомном газе. Полученное Кроном и Ринго значение $b_{ne} = -(1,34 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$ Фм при исправлении на обнаруженный эффект следует заменить на

$b_{ne} = -(1,24 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$ Фм. Таким образом, вопрос о дифракции нейтронов на газе имеет весьма важное значение и подлежит тщательному изучению.

1.7.2 Эксперимент по прямому измерению длины рассеяния нейтрона на нейтроне на импульсном реакторе ЯГУАР (Снежинск)

В рамках подготовки эксперимента, продолжалось математическое моделирование процессов нейтрон-нейтронных столкновений в центральном канале реактора, процессов рассеяния нейтронов на калибровочном газе и прохождения нейтронного излучения по нейтронному каналу.

Экспериментальные данные по выходу тепловых нейтронов из замедлителей различной толщины находятся в согласии с результатами моделирования. Из моделирования следует, что параметры углового распределения соответствует изотропному источнику, используемому в аналитических расчетах числа соударений и скорости счета детектора.

Пространственное распределение тепловых нейтронов вдоль оси Z канала чувствительно к распределению конструкционных материалов реактора. Это распределение также чувствительно, хотя и слабо, к положению замедлителя относительно центра жидкой активной зоны и меняется при изменении уровня зоны. Моделирование обеих ситуаций показывает асимметрию распределения, сходную с асимметрией, наблюдавшейся в активационных измерениях.

Расчётный энергетический спектр тепловых и эпитепловых нейтронов находится в согласии с выполненными измерениями. Модельное распределение плотности потока имеет участок эпитепловых нейтронов, пропорциональный $1/E$, и Максвелловское распределение тепловых нейтронов с наиболее вероятной энергией 26 мэВ. Соотношение этих двух частей спектра соответствует активационным измерениям.

Выполнен аналитический расчет нейтронного поля внутри сквозного канала реактора. Результаты для плотности нейтронов согласуются с моделированием методом Монте-Карло пространственного распределения плотности нейтронов в реакторе. Рассчитано число nn -столкновений в канале и угловое распределение рассеянных нейтронов в лабораторной системе координат. Рассчитано число событий рассеяния нейтрона на нейтроне и на калибровочных газах. Вычисления выполнены для максвелловского распределения нейтронов по скоростям, и не учитывают возможного вклада эпитепловых нейтронов и возможного влияния нестационарной стадии процесса замедления нейтронов.

Начаты работы по подготовке физического окружения реактора, необходимого для проведения эксперимента. Изготовлена закладная труба длиной 10 метров, в которой будет располагаться нейтронный канал и детектор.

1.7.3 Исследования, относящиеся к проблеме изучения распада нейтрона (время жизни и коэффициенты корреляции)

Исследовано несколько безводородных фторполимеров с низкой температурой плавления с точки зрения их возможного использования в качестве материалов стенок ловушек ультрахолодных нейтронов с низкими потерями. Была измерена вязкость в диапазоне температур 150-300 К и нейтронные сечения в диапазоне температур 10-300 К для длин волн нейтронов 1-20 А. Сделаны заключения об их возможных параметрах для ловушек ультрахолодных нейтронов. Рассмотрено квазиупругое отражение нейтронов от поверхности вязкой жидкости в рамках модели Максвелла и на основе опубликованных результатов экспериментов ПИЯФ по квазиупругому рассеянию УХН сделаны количественные выводы о динамических параметрах жидкости: модуле сдвига и времени релаксации. Это исследование послужило базой для совместных экспериментов с Univ. of Rhode Island, Harvard Univ., ПИЯФ, ILL, Kyushu Univ., по исследованию квазиупругого рассеяния УХН на таких жидкостях при низких температурах. Получены обнадеживающие данные позволяющие

надеяться на улучшенное измерение времени жизни нейтрона при хранении нейтронов в камерах.

Рассмотрены механизмы деполяризации ультрахолодных нейтронов в ловушках при их отражении от стенок. По первому из них имеет место спин-флип при упругом или квазиупругом рассеянии на протонах водородсодержащих поверхностных примесей. Согласно второму заметная деполяризация нейтронов может происходить даже при высоких параметрах адиабатичности при движении нейтронов в неоднородном магнитном поле из-за резких изменений траектории при отражении нейтронов от стенок.

1.8 Физика ультрахолодных нейтронов, нейтронная оптика

1.8.1 Исследование процессов сверхмалых передач энергии при взаимодействии ультрахолодных нейтронов (УХН) с поверхностью твердых тел

Продолжалось изучение процессов малой передачи энергии УХН в Большом Гравитационном Спектрометре (БГС). БГС позволяет одновременно наблюдать за хранящимися УХН и образующимися «возбужденными» нейтронами (ВУХН), обеспечивает регистрацию ВУХН в диапазоне энергий (50-150 нэВ) с эффективностью (~50%).

В текущем году на новой установке были получены дифференциальные спектры ВУХН, а так же зависимость этих спектров от спектра УХН для образцов нержавеющей стали. Получена температурная зависимость вероятности малого нагрева на образцах нержавеющей стали, меди, алмазном нанопорошке в диапазоне от 300К до 100К. Получена характерная зависимость вероятности малого нагрева на поверхности образца нержавеющей стали А304 от температуры предварительного обезгаживания.

Обнаружен ярко выраженный процесс малого нагрева УХН на образце ультрадисперсных алмазов со средним размером 50\AA , не обнаружено малого нагрева на поверхности монокристаллического сапфира на уровне чувствительности установки.

Проведенные дополнительные исследования на микроскопе атомных сил показали изменение наноструктуры поверхности образца нержавеющей стали А304 в зависимости от температуры обезгаживания и отсутствие поверхностных нанообразований на монокристаллическом сапфире.

Полученные в рамках проекта результаты указывают на то, что природа процесса малого нагрева УХН на поверхности твердых тел связана с взаимодействием УХН с поверхностными нанообразованиями. Полученные результаты являются экспериментальным указанием на возможность построения принципиально нового источника УХН высокой плотности, основанного на термолизации холодных нейтронов наноструктурами. Впервые в построенной установке продемонстрирована принципиальная возможность изучения динамики наноструктур с помощью УХН.

1.8.2 Разработка дифференциальной спектрометрии УХН высокого разрешения

Были подготовлены и проведены эксперименты по развитию дифференциальной спектрометрии нейтронов сверхнизких энергий по времени пролета с применением механической и магнитной модуляции потока нейтронов в псевдослучайной моде.

Предложена геометрия и метод измерения спектров квазиупруго отраженных ультрахолодных нейтронов при передачах энергии в диапазоне до 200 нэВ и при низких вероятностях рассеяния. Метод состоит в использовании перемещаемого в гравитационном поле порогового детектора. Достижимое разрешение по энергии 3-5 нэВ. Проведено Монте-Карловское моделирование работы спектрометра.

2. Теоретические исследования

2.1 Теоретические исследования по рефлектометрии от многослойных систем

Предложен совместно новый метод приготовления суперзеркал, увеличивающий угол полного отражения нейтронов. Суперзеркало предлагается как комбинация нескольких периодических систем бислоев с перекрывающимися брэгговскими пиками. Проведен аналитический анализ такой системы найдены количество цепочек толщины слоев и количество периодов в каждой цепочке. Проведен расчет для случая когда критический угол увеличивается в 3.2 раза. Расчет произведен для идеальной системы без учета потерь в слоях и с учетом последних. Показано, что для увеличения критического угла в 2 раза достаточно 12 цепочек и всего 46 бислоев.

Разработан аналитический подход для обработки экспериментальных данных по рефлектометрии тонких пленок, учитывающий плавные переходы на границах раздела.

2.2 Проблемы несохранения барионного заряда и поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций с помощью ультрахолодных нейтронов

Рассмотрено влияние столкновений нейтронов со стенками на процесс перехода нейтрона в антинейтрон и проведено сравнение эффективностей по поиску осцилляций нейтрон-антинейтрон в пучковых экспериментах и в экспериментах с ультрахолодными нейтронами. Указаны условия, при которых эффективность экспериментов с ультрахолодными нейтронами может быть на 2 порядка выше чем в пучковых.

2.3 Исследование вклада слабого однонуклонного взаимодействия в P -нечетные нуклон-ядерные потенциалы и спиновых эффектов в ядерных реакциях

Продолжены теоретические исследования слабого однонуклонного хартри-фоковского потенциала V_W^{HF} , построенного на базе слабого P -нечетного NN -взаимодействия. Показано, что соответствующие хартриевские члены и фоковские члены нулевого порядка имеют ярко выраженный поверхностный характер. Выполнены расчеты указанных поверхностных членов потенциала V_W^{HF} для ядер ^{208}Pb и ^{40}Ca на базе характерного набора слабых NN -сил.

Исследовано соотношение между дифференциальным сечением зарядово-обменного развала быстрого дейтрона $d + a \rightarrow (pp) + b$ и дифференциальным сечением реакции нуклонной перезарядки $n + a \rightarrow p + b$. Исследована зависимость дифференциального сечения процесса $d + p \rightarrow (pp) + n$ в направлении "вперед" от поляризационных параметров дейтрона и протона. Проанализировано влияние D -волнового состояния дейтрона на поляризационные эффекты и спектр относительных импульсов двух протонов для процесса $d + p \rightarrow (pp) + n$ в направлении "вперед".

С учетом эффекта релятивистского поворота спина, исследованы преобразования компонент корреляционного тензора для системы двух частиц со спином $1/2$ при переходе из системы центра масс пары частиц в лабораторную систему отсчета.

2.4 Теоретические исследования β -распада нейтрона

В рамках Стандартной модели вычислены радиационные поправки к β -распаду нейтрона. Электрослабые взаимодействия последовательно учитываются согласно теории Вайнберга - Салама. Эффект сильных взаимодействий параметризуется введением величин $g_A, g_V, g_{WM} \dots$, как и в теории β -распада Ферми. Радиационные поправки к полной вероятности распада W и к коэффициенту асимметрии распределения электронов A составляют $\delta W = 8\%$ и $\delta W \approx -2\%$, что существенно для извлечения характеристик

электрослабой теории, в частности элемента V_{nd} матрицы СКМ, из экспериментальных данных.

2.5 Расчеты сечений образования гиперядер

Продолжены расчеты сечений образования гиперядер с нейтронным избытком $^{12}_{\Lambda}\text{Be}$, $^{16}_{\Lambda}\text{C}$, и $^{10}_{\Lambda}\text{Li}$ в реакциях (π^-, K^+) и (K^-, π^+) на лету с учетом двух возможных механизмов образования таких систем. В первую очередь это двухступенчатый процесс с перезарядкой (например, $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$, $\pi^0 p \rightarrow K^+ \Lambda$). Во-вторых это одноступенчатая реакция образования Σ^- примеси ($\pi^- p \rightarrow K^+ \Sigma^-$), существующей в Λ -гиперядрах благодаря ΛN - ΣN смешиванию. В большинстве случаев двухступенчатый процесс более продуктивен. Дифференциальное сечение на нулевой угол в реакции $^{10}\text{B}(\pi^-, K^+)^{10}_{\Lambda}\text{Li}(2^-)$ около 70 nb/sr для импульса пионов 1.05 GeV/c. Данная оценка была сделана в связи с постановкой в октябре 2002 года соответствующего эксперимента в КЕК (Цукуба, Япония). В предварительном анализе экспериментальных данных пока получена оценка 10 nb/sr.

3. Аналитические исследования на реакторе ИБР-2

3.1 Экология

В 2002 году были продолжены работы по изучению атмосферных выпадений тяжелых металлов с применением техники биомониторинга, НАА и ГИС технологий (проект РЕГАТА) для территории Центральной России (Тульской, Тверской, Ярославской и Севера Московской области), а также в ряде европейских стран (Болгария, Словакия, Румыния, Украина, Польша, Сербия, Босния). Результаты этих исследований переданы в Европейский Атлас, издающийся под эгидой ООН. Аналогичные работы ведутся с Южной Кореей, Китаем, Македонией и Турцией. В ноябре 2002 года завершен проект МАГАТЭ по Южному Уралу, цель которого состояла в оценке загрязнений Челябинской области тяжелыми металлами и радионуклидами (проанализировано более 1500 образцов)

Завершена работа по исследованию загрязнений почв тяжелыми металлами и другими токсичными элементами под воздействием автотранспортного транспорта (Миннесота, США) (200 образцов). Проведен анализ 250 воздушных фильтров с целью изучения качества воздуха в Лондонском метро. Впервые на ИБР-2 опробована методика определения фтора в воздушных фильтрах. Совместно с Геологическим институтом РАН проведен сравнительный анализ элементного состава ряда продуктов питания, выращенных в условиях сильного антропогенного воздействия в дельтах рек Волги и Нила (Египет) (300 образцов).

В 2002 году выполнен первый этап работ по проекту «Мониторинг на рабочих местах и здоровье персонала, занятого в производстве фосфорных удобрений на ряде заводов России, Узбекистана, Польши и Румынии» (Европейская Программа 5 Коперникус). Результаты анализа экологических образцов (сырья, почв, донных отложений, воды и фильтров) и биосубстратов человека (волосы, ногти, моча и зубы) обсуждались участниками проекта на двух рабочих совещаниях в Дубне и Гданьске.

3.2 Материаловедение

Изучался примесный состав искусственно выращенных алмазов, изготовленных в Институте физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии (Минск) (300 образцов), а также облучались экспериментальные образцы из сверхчистого кремния, разработанные в Институте кристаллографии (Москва). Проведен анализ 20 археологических образцов керамики из музеев Румынии, на основе которого будет определено их происхождение.

3.3 Биотехнологии

Продолжены совместные работы с группой биофизиков Института физики АН Грузии по разработке новых медицинских препаратов на основе сине-зеленой водоросли *Spirulina platensis*. Методом НАА исследован состав препаратов, выделенных из биомассы спирулины (ДНК и С-фикоцианин). Изучены особенности взаимодействия микроводоросли с Cr(III) и Cr(VI), а также комбинированного воздействия хрома и селена на спирулину.

В 2002 году начаты исследования состава и поведения другого интересного микроорганизма – *Arthrobacter oxidans* – с целью изучения его возможного применения в биотехнологиях.

Совместно с Тбилисским Техническим университетом завершен цикл работ по обоснованию возможности использования торфяной суспензии для бактериального выщелачивания некоторых металлов из горных пород, руд и отходов производств, а также использования природных сорбентов (чай, мох и др.) для выделения металлов из выщелаченных растворов.