

Любой реактор имеет ограниченный ресурс работы вследствие развития радиационной «усталости» конструкционных материалов. В середине 90-х годов главным инженером В.Д.Ананьевым и научным руководителем В.Л.Аксеновым была инициирована программа модернизации реактора ИБР-2 с тем, чтобы заменить большую часть его узлов, ресурс которых истекает в 2007 году. Модернизация предполагает, наряду с заменой, одновременное усовершенствование важнейших элементов, таких как корпус реактора, стационарный отражатель, исполнительные блоки аварийной защиты, внешние замедлители нейтронов — с целью повышения надежности и долговечности. Кроме того, разработанная новая концепция композиции и размещения замедлителей нейтронов вокруг модернизированного реактора ИБР-2М позволит создать наилучшие условия для эффективного использования модернизированных и новых спектрометров. На новом реакторе планируется расширить возможность использования холодных нейтронов в соответствии с возрастающим интересом к исследованиям нано- и мезоскопических структур в физике твердого тела и биологии. К существующим спектрометрам планируется добавить два новых рефлектометра и две установки малоуглового рассеяния. Поставленная задача оптимизации эффективности спектрометров решается путем разработки замедлителей сложной композиции, где спектр нейтронов существенно зависит от места вылета нейтрона и угла вылета, так называемых «комби-замедлителей». Комби-замедлитель совмещает в себе и обычные водяные замедлители, и «холодные» замедлители на основе замороженных до 20 К углеводородов.

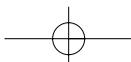
Исследовательский импульсный реактор ЛНФ ОИЯИ ИБР-2 пока остается самым эффективным в мире источником для исследований на выведенных пучках медленных нейтронов, а после модернизации он еще в течение 20 лет будет в первой пятерке мировых лидеров в этой области ядерной науки.

Таким образом, путь развития нейтронных источников в ОИЯИ был выбран, безусловно, правильно, что стало особенно актуально в период реформ в России с постоянным дефицитом средств. ОИЯИ был бы не в состоянии эксплуатировать гигантскую, дорогостоящую машину, какой является SNS. В течение 50-летнего существования ОИЯИ имел и будет иметь в дальнейшем прекрасные возможности для научных исследований с помощью нейтронов благодаря изящной идее пульсирующего реактора, рожденной в Обнинске в 1955 году и эффективно использованной в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка.

4. Нейтронно-ядерные исследования

Нейтронная спектроскопия

Исследования взаимодействий нейтронов с ядрами открывали уникальные возможности по изучению свойств ядер и получению данных о сечениях, характеризующих эти взаимодействия. Спектроскопические исследования на ИБРе развивались активно в период, когда данные о параметрах нейтронных резонансов были ограничены, поэтому усилия были направлены на изучение ядер, для которых данных не было совсем или их было мало. Развитию спектроскопических исследований способствовало и то, что в Фонде стабильных изотопов СССР был накоплен широкий ассорти-



мент разделенных изотопов, которые можно было получить на длительное время бесплатно. Большая часть исследований проводилась с использованием образцов из разделенных изотопов. Сочленение микротрона с реактором ИБР, а затем линейного электронного ускорителя с модернизированным ИБР-30, сократило длительность нейтронного импульса до 4 мкс при полном выходе $\sim 10^{15}$ нейтронов/с, что позволило расширить исследуемую энергетическую область и получать параметры для сотен резонансов. Для извлечения резонансных параметров из экспериментальных данных была разработана программа, основанная на анализе формы спектров пропускания. Особый интерес представляли изотопы редкоземельных ядер, обладающие заметной деформацией. В 70-х годах с использованием детектора из четырех кристаллов (Ким Сек Су, Х.Станчик-Файков, А.Б.Попов, Хван Чер Гу, К.Тшецяк) были определены по множественности γ -квантов спины нейтронных резонансов для группы ядер.

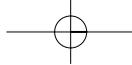
В результате выполненных многолетних исследований в мировой банк данных о параметрах нейтронных резонансов включены результаты, полученные в ЛНФ примерно для 100 изотопов. Полученная в ЛНФ информация позволила уточнить и целый ряд физических аспектов, связанных со свойствами ядер при энергиях возбуждения, вносимых нейтроном при образовании компаунд-ядра:

- Изучена систематика плотности нейтронных резонансов и установлено влияние на плотность уровней деформации ядра-мишени.
- Уточнена систематика полных радиационных ширин в зависимости от атомного веса, что позволило сопоставить ее с существующими теоретическими моделями и выделить среди них те, которые наилучшим образом описывают эту систематику.
- Получены данные о нейтронных силовых функциях $S = \langle \Gamma_n^0 \rangle / \langle D \rangle$ в широкой области атомных весов и проведено сопоставление их с модельными расчетами.

Поляризованные нейтроны и ядра

Исследование широкого круга свойств ядер, связанных с их спиновой зависимостью, наиболее плодотворно может быть реализовано при использовании поляризованных нейтронов и поляризованных ядер. При этом принципиальной проблемой являются методы поляризации. До 1960 года существовали методы поляризации нейтронов, позволявшие получать такие нейтроны в тепловой и околотепловой области. Максимальная энергия таких нейтронов составляла не более 10 эВ, причем с низкой интенсивностью. В то же время большинство исследований, в которых изучается взаимодействие нейтронов с ядрами, требует гораздо более широкой области энергий. На метод, которым можно было продвинуться в недоступную ранее область, указал в 1960 году Ф.Л.Шапиро. Он обратил внимание на большое различие вероятности взаимодействия нейтронов с протонами при параллельной и антипараллельной взаимной ориентации их спинов. Отсюда очевидно, что при пропускании пучка нейтронов через поляризованную протонную мишень получается пучок поляризованных нейтронов. Главную проблему при этом составляло создание протонной мишени достаточно большого размера и с высокой поляризацией.

Федор Львович предложил использовать метод динамической поляризации, который незадолго перед этим был реализован во Франции. Создание такой мишени он поручил молодым физикам В.И.Луцикову и Ю.В.Тарану. Их усилиями, при сотрудничестве с ФИАН им. П.Н.Лебедева и другими физиками из Дубны, в 1963 году был



изготовлен первый вариант поляризованной протонной мишени. Следует отметить, что динамически поляризованная протонная мишень — это сложная установка, в состав которой входит криогенное оборудование на температуру около 1 К, система СВЧ с излучением с длиной волны менее 1 см, электромагнит с полем 10 кГс при стабильности последнего на уровне сотой доли процента. В качестве вещества, содержащего поляризуемый водород, использовали монокристалл лантан-магниевого нитрата $\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$. Большое количество кристаллизационной воды и относительно легкое выращивание монокристаллов объемом свыше 20 см^3 делают это вещество хорошим объектом для использования в качестве поляризованной протонной мишени.

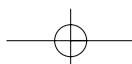
Одним из важных достоинств поляризованной протонной мишени как поляризатора нейтронов является очень широкий диапазон энергии поляризованных нейтронов — от тепловых до нескольких десятков кэВ, что связано с отмеченным выше различием взаимодействия нейтронов с протонами в синглетном и триплетном состояниях для столь широкого интервала энергий нейтронов.

В 1964 году поляризованная протонная мишень была установлена на пучке № 3 реактора ИБР, и на ней были начаты первые эксперименты. В их число входили определение спинов нейтронных резонансов, выбор правильного набора длин рассеяния нейтронов на дейтронах и некоторые другие.

Следующий шаг в развитии методики поляризации нейтронов и ядер был сделан в 1968–1970 годах. В этот период проведена существенная модернизация поляризованной протонной мишени, разработан и изготовлен рефрижератор с растворением ^3He в ^4He . Эти работы велись группой В.П.Алфименкова, в которую входили О.Н.Овчинников, Ю.Д.Мареев и другие сотрудники. Новая поляризованная протонная мишень была значительно большей площади, что давало двукратный выигрыш в интенсивности поляризованного пучка нейтронов. Был заменен магнит протонной мишени и соответственно увеличилась частота СВЧ. Это улучшило стабильность работы установки и повысило поляризацию протонов. Кроме того, были разработаны и реализованы новые методы реверса поляризации, необходимые для точных измерений малых эффектов. Увеличена пролетная база, что улучшило энергетическое разрешение нейтронных спектров.

Важным элементом установки для исследования взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами являлся рефрижератор с растворением ^3He в ^4He . Поляризация ядер существенно зависит от температуры образца и для приемлемой поляризации нужна температура ниже 100 мК. Такую температуру мог обеспечить рефрижератор с растворением ^3He в ^4He , разработанный и впервые созданный Б.С.Негановым. Для эксперимента на пучке нейтронов конструкцию пришлось изменить. В.П.Алфименков и О.Н.Овчинников создали новый рефрижератор для этой цели, получив на нем температуру около 30 мК, причем такая температура выдерживалась в непрерывном режиме измерений в течение 10–12 суток.

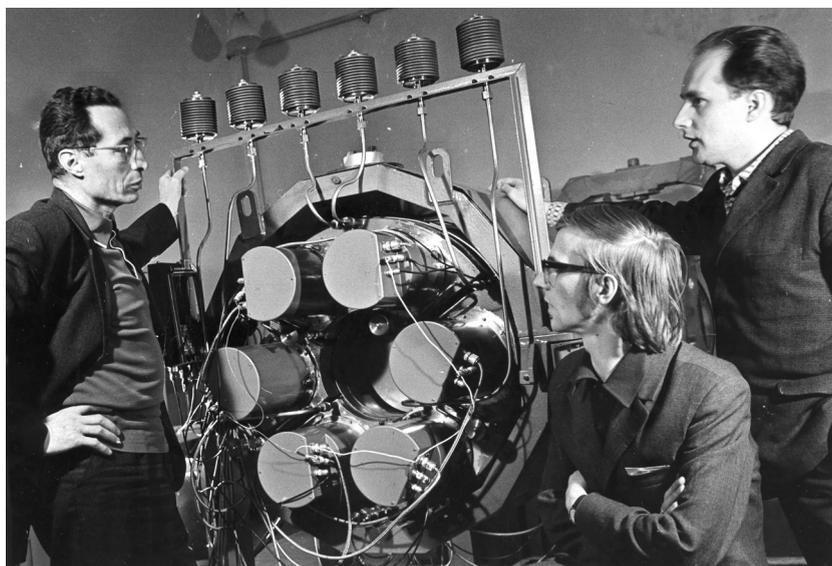
Помимо низкой температуры для поляризации ядер методом «грубой силы», то есть без применения специальных методов типа описанной выше динамической поляризации, требуются высокие магнитные поля. Удобным исключением являются ядра редкоземельных элементов. При отмеченной низкой температуре такие ядра, как тербий, гольмий, эрбий, являются ферромагнетиками и внутренние магнитные



поля на ядрах достигают сотен тесла. Эти свойства позволяют получить поляризацию ядер порядка 50% и выше. Измерения пропускания поляризованных нейтронов через поляризованные мишени были использованы для исследования спиновой зависимости взаимодействия нейтронов с ядрами. В большой серии экспериментов, проводившихся В.П.Алфименковым, Л.Б.Пикельнером, Э.И.Шараповым и другими сотрудниками ЛНФ, было определено свыше 200 спинов резонансов ядер ^{141}Pr , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{167}Er и ^{169}Tm . Широкий диапазон энергий поляризованных нейтронов позволил исследовать усредненное сечение взаимодействия поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами до энергии нейтронов около 100 кэВ. При этом изучена спиновая зависимость нейтронной силовой функции названных ядер, которая ранее была недоступна для исследования. В результате



В.П.Алфименков за наладкой рефрижератора с растворением ^3He в ^4He



Л.Б.Пикельнер, А.Ласонь и Ю.Д.Мареев около 6-секционного жидкостного сцинтилляционного детектора

показано, что силовые функции для этих ядер практически не зависят от спина. Это удалось получить благодаря усреднению сечений по области, содержащей свыше тысячи резонансов. Следует заметить, что весь этот комплекс исследований выполнен впервые в мире и долгое время оставался уникальным.

Деление ядер

Интересы ядерной нейтронной спектроскопии в 60-е годы оказались тесно переплетены с задачами реакторной физики по оценке параметров резонансов и нейтронных сечений. Исследования по физике деления проводятся вплоть до настоящего времени. Сначала исследовались параметры нейтронных резонансов делящихся ядер упомянутым выше жидкостным сцинтилляционным детектором и оценивалась для них такая важная для физики реакторов характеристика, как $\alpha = \Gamma_{\gamma} / \Gamma_f$. Эти данные обычно используются для калибровки α в области усредненных сечений. С 80-х годов измерения в резонансной области и области усредненных сечений для ^{235}U и ^{239}Pu проводились на спектрометрах множественности γ -квантов «Ромашка» (из 16 больших кристаллов NaI) и «Парус» (16-секционным жидкостным сцинтилляционным (n, γ)-детектором). При этом определялись групповые константы для величины α , исследовался эффект резонансной блокировки и влияние на него температуры образца. Выполнены также измерения спектров множественности гамма-квантов из реакции радиационного захвата для большой группы неделящихся ядер. Эти важные прикладные исследования проводились в сотрудничестве с ФЭИ и Болгарией (Ю.В.Григорьевым, Н.Б.Яневой, Г.Георгиевым, Х.Станчик-Файковым, Г.Илчевым).

На бустере ИБР-30+ЛУЭ-40 измерены сечения деления актинидов ^{234}U , ^{237}Np , ^{243}Am . На зеркальном нейтроноводе реактора ИБР-2 с механическим прерывателем проведены исследования выхода запаздывающих нейтронов при делении $^{233,235}\text{U}$, ^{237}Np тепловыми и холодными нейтронами (Ю.С.Замятнин, С.Б.Борзаков, В.Ю.Коновалов, И.Н.Русков).

Теория деления долгие годы развивалась в предположениях сохранения спина и аксиальной симметрии делящейся системы, что давало возможность описывать переходные состояния в терминах квантовых чисел $J^{\pi}K$. Парадокс деления состоит в том, что, несмотря на множество делительных каналов по массам осколков, наблюдаются сильные интерференционные эффекты в резонансной структуре сечения деления, а также большие флуктуации парциальных и полных делительных ширин. После открытия кластеризации делительных каналов, названных модами деления, картина деления выглядела так, будто ядро, приближаясь к точке разрыва, может достичь только весьма ограниченного числа предразрывных конфигураций. Я.Климаном, А.Дука-Зайоми, Й.Криштяком, Н.Гундориным и А.Богдзелем была разработана методика с применением делительных камер с высоким содержанием ^{235}U и ^{239}Pu в совпадении с германиевым детектором, которая позволила исследовать JK -вариации выходов осколков в отдельных нейтронных резонансах и установить связь волновых функций этих состояний с флуктуациями делительных мод. Полученные результаты способствовали развитию нового микроскопического подхода к описанию деления (А.Л.Барабанов, В.И.Фурман) в рамках представления спиральности и применения аппарата R -матричной теории реакций. Разработанная на его основе программа (А.Б.Поповым, Ю.Н.Копачем) позволила проанализировать данные об угловой ани-

зотропии осколков при делении выстроенных ядер ^{235}U резонансными нейтронами, полученные на пучке бустера ИБР-30+ЛУЭ-40 с применением рефрижератора с растворением ^3He в ^4He и монокристаллических образцов с содержанием ^{235}U (спины которого при температуре образца около 0,2 К выстраиваются относительно оси С кристалла). Эксперимент провела группа ФЭИ – Д.И.Тамбовцев, Л.К.Козловский, Н.Н.Гонин. В результате получены новые данные о роли JK -каналов в формировании делительных ширин нейтронных резонансов ^{235}U .

Новая информация о процессе деления ядер при взаимодействии нейтронов с изотопами ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu была получена в серии совместных экспериментов ЛНФ и ПИЯФ (г. Гатчина). Изменялись интерференционные эффекты в угловых распределениях вылета осколков деления в широкой области энергии нейтронов. Измерения проводились с поляризованными и неполяризованными нейтронами и позволили получить информацию о p -резонансах, о которых ранее ничего не было известно. Эксперименты проводились на пучках нейтронов бустера ИБР-30+ЛУЭ-40 в 1995–2001 годах. От ЛНФ в них участвовали В.П.Алфименков, Л.Ласонь, Ю.Д.Марев, Л.Б.Пикельнер и другие сотрудники лаборатории. Полученные экспериментальные данные об угловых корреляциях осколков при делении ^{235}U и ^{239}Pu резонансными нейтронами были проанализированы в рамках теоретического подхода Барабанова–Фурмана, более последовательно учитывающего интерференцию s - и p -волновых резонансов.

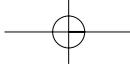
В последние годы ЛНФ включилась в международную коллаборацию, проводящую измерения сечений деления трансурановых изотопов в интервале до сотен МэВ на установке n -TOF в ЦЕРНе, потребность в которых признана актуальной МАГАТЭ.

Рассеяние нейтронов ядрами и поляризуемость нейтрона

К началу 60-х годов о коэффициенте электрической поляризуемости нейтрона α_n , то есть о его способности деформироваться в электрическом поле и возникновении у него электрического дипольного момента, было известно, что теоретически он должен быть порядка $(1-1,5) \cdot 10^{-42} \text{ см}^3$, а существовавшая его первая экспериментальная оценка составляла 20 тех же единиц. В 1964 году на 100-метровой пролетной базе реактора ИБР был поставлен эксперимент (Ю.А. Александров, Д.Дорчоман, Ж.Сэрээтэр, Г.С.Самосват, Цой Ген Сор), в котором с помощью батареи борных счетчиков измерялась асимметрия рассеяния нейтронов вперед-назад ω_1 на ядрах свинца при энергиях 0,5–7,5 кэВ. Было показано, что вышеупомянутую оценку α_n можно снизить в 2–3 раза, если провести такие измерения при более высоких энергиях. И в 1966 году та же команда опубликовала оценку в 6 единиц, которая оставалась рекордной более 20 лет, до той поры, когда такие оценки стали получать из полных сечений рассеяния. Последние, однако, так и остались только оценками на уровне 1 единицы.

Созданная на базе 250 м 6-го пучка установка с девятью детекторами из борных счетчиков в массивной защите проработала примерно 4 года. После оценки поляризуемости нейтрона она использовалась для систематического исследования зависимости асимметрии ω_1 от массы рассеивающего ядра, а обнаруженные закономерности сравнивались с предсказаниями оптической модели ядра.

Следующая, уже компьютеризированная установка, созданная в 80-е годы, представляла собой один подвижный детектор из гелиевых счетчиков и измеряла рассея-



ние на 35 , 90 и 145° . Это давало возможность получать три члена разложения дифференциального сечения по полиномам Лежандра, соответствующие квадрату s -волны, произведению s - и p -волн и квадрату p -волны. А это, в свою очередь, давало значения радиусов s - и p -рассеяния, а также нейтронные силовые функции обеих волн, причем для p -волны — отдельно для полных моментов нейтрона $1/2$ и $3/2$. В результате была получена систематическая (впервые для 36 ядер и изотопов) информация о радиусах p -рассеяния и осуществилось первое прямое наблюдение спин-орбитального расщепления несвязанного одночастичного уровня $3p_{1/2} - 3p_{3/2}$. Кроме усредненных по резонансам сечений, изучались также отдельные изолированные резонансы: для 12 p -резонансов со спином 1 определены смеси спиновых каналов (из других работ такие смеси известны только для 6 резонансов). Установка создавалась под руководством Г.С.Самосвата (при участии В.А.Вагова, Г.Н.Зими́на и др.), а работали с ней также физики А.М.Говоров, В.Г.Николенко, А.Б.Попов и др.

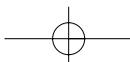
В 1995 году на том же месте сооружена новая установка УГРА (Угловые Распределения), соединившая в себе достоинства двух предыдущих — высокоэффективные гелиевые детекторы для разных углов в количестве до 16 штук на поворотной платформе. И все это — в вакуумной камере. Ее создали инженеры: Б.И.Воронов, В.А.Ермаков, В.И.Константинов, А.А.Смирнов и физики: Т.Л.Еник, Г.С.Самосват, Р.В.Харьюзов и др. Главная цель создания установки — прецизионные измерения рассеяния на нескольких тяжелых ядрах и извлечение из этого поляризуемости нейтрона α_n . Установка ждет нового источника нейтронов ИРЕН.

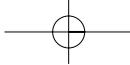
Длина рассеяния нейтрон–электрон

Важнейшей константой, характеризующей электромагнитную структуру нейтрона, является длина n, e -рассеяния b_{ne} . Известно примерно шесть различных методов ее экспериментального определения, получено более двух десятков ее значений, около десяти из которых с ошибками $\Delta b_{ne} < 0,05 \cdot 10^{-3}$ Фм заключены в пределах $(1,3-1,6) \cdot 10^{-3}$ Фм, то есть разбросаны более чем на пять стандартных ошибок. Два из таких значений, и оба вблизи верхней границы указанного интервала, получены в ЛНФ двумя разными методами усилиями Ю.А.Александрова, М.Враны и других сотрудников.

Первый оригинальный метод состоял в измерении интенсивностей дифракционных брэгговских пиков от монокристаллов вольфрама, обогащенных изотопом вольфрама-186, а второй заключался в точном измерении хода с энергией полного сечения рассеяния нейтронов образцом висмута.

Проблема n, e -взаимодействия постоянно «на контроле» в ЛНФ, и все усилия направлены на изыскание новых способов получения величины b_{ne} , свободной от систематических ошибок. Выполнены работы по анализу использованных ранее методов и полученных оценок длины (n, e) -рассеяния и моделированию новых экспериментов по измерению энергетической зависимости угловой анизотропии рассеяния медленных нейтронов на благородных газах (Г.Г.Бунатян, В.Г.Николенко, А.Б.Попов, Г.С.Самосват).





Гамма-спектроскопия

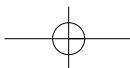
Заметное место в спектроскопических исследованиях занимает изучение особенностей гамма-распада компаунд-состояний ядер, которое было начато Я.Урбанцем и продолжено в 70-е годы Ф.Бечваржем и С.Тележниковым. Появление германиевых детекторов с высоким разрешением позволило выполнить измерения спектров γ -квантов в отдельных резонансах и исследовать флуктуации первичных γ -переходов на основной и низколежащие уровни компаунд-ядра. На некоторых ядрах различие в γ -спектрах для разных резонансов трудно было объяснить статистическими флуктуациями и возникал вопрос, какие особенности резонанса влияют на парциальные γ -ширины?

Большой цикл исследований индивидуальных каскадов в реакции $(n, 2\gamma)$ на тепловых нейтронах выполнялся с 1985 года группой: А.М.Суховой, В.А.Хитров, С.Т.Бонева и др. с использованием двух германиевых детекторов и методики спектра сумм амплитуд совпадающих импульсов. Исследованы гамма-переходы на множество промежуточных уровней, в том числе с высоким возбуждением, недоступные для изучения другими методами. Такие измерения проведены более чем для 50 ядер. Установлено наличие групп первичных переходов, ширины которых коррелируют со значениями приведенных нейтронных ширин компаунд-состояний четно-четных ядер из $4S$ -резонанса нейтронной силовой функции. Особенность каскадного распада ядер этой области объяснена определяющим влиянием одночастичных переходов между $4S$ - и $3P$ -оболочками на парциальные ширины первичных переходов. При исследовании закономерностей в интенсивностях двухквантовых каскадов в области $114 \leq A \leq 200$ с использованием современных моделей радиационных силовых функций и плотности уровней не удается описать всю накопившуюся информацию. Основной вывод состоит в том, что ниже энергии 3–4 МэВ свойства возбужденных состояний ядра, проявляющиеся при захвате тепловых нейтронов, определяются в основном его колебаниями. Качественное заключение показывает, что при больших энергиях возбуждения структура уровней определяется преимущественно квазичастичными компонентами их волновых функций.

Реакции (n, α) и (n, p)

В середине 60-х годов Ю.П.Попов и И.Квитек приступили к первым опытам на пучке реактора ИБР по наблюдению реакции (n, α) . Задача оказалась весьма сложной из-за малой величины сечения этой реакции, обусловленной кулоновским барьером, и необходимости использовать очень тонкие мишени, менее пробега α -частицы. На реакторах ИБР и ИБР-30 были впервые экспериментально исследованы α -ширины индивидуальных нейтронных резонансов для средних и тяжелых ядер. Эту задачу позволили решить высокая светосила ИБРа, как нейтронного источника, наличие в то время доступных разделенных изотопов и оригинальные разработки детекторов и спектрометров альфа-частиц с рабочей поверхностью до 1 квадратного метра, созданные многонациональным сектором редких реакций ЛНФ.

Этот сектор, созданный для исследований в новом для нейтронной физики направлении и возглавляемый Ю.П.Поповым, стал быстро расширяться за счет новых сотрудников, как молодых (Ю.М. Гледенов, В.А.Втюрин), так и опытных из других



групп (В.И.Салацкий), но в основном — за счет сотрудников из стран-участниц ОИЯИ. Здесь работали ученые из Польши, Чехословакии, Болгарии, Кубы, Вьетнама, Монголии и других стран (М.Стэмпиньски, М.Пшитула, Н.Балабанов, А.Антонов, И.Квитек, М.Флорек, И.Вильгельм, Во Ким Тхань, Г.Хуухенхуу и др.). Можно отметить, что за годы исследования реакции (n, α) более 10 сотрудников защитило кандидатские диссертации, а несколько человек и докторские.

В результате двадцатилетних экспериментов в Дубне альфа-распад нейтронных резонансов был изучен на широком круге атомных ядер от цинка до осмия, впервые получены сведения об основных закономерностях альфа-распада индивидуальных высоковозбужденных состояний ядер. В этих экспериментах удалось впервые установить основные закономерности реакции (n, α), а также определить параметры потенциала взаимодействия α -частиц с ядрами. Амплитудный анализ испускаемых α -частиц позволил проанализировать статистические закономерности парциальных α -ширин, распределения которых в основном удовлетворяют таким закономерностям. Однако в то же время были зафиксированы и отдельные аномальные резонансы (в частности, резонанс с $E_n = 184$ эВ в реакции $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)^{144}\text{Nd}$).

Разнообразие измеренных спектров альфа-частиц в индивидуальных нейтронных резонансах очень не похоже на классические спектры альфа-распада основных состояний четно-четных ядер, где вероятности альфа-распада регулярно убывают с уменьшением энергии альфа-частиц. Парциальные ширины флуктуируют в очень широких пределах, а значит, также ведут себя и многочастичные волновые функции компаунд-ядер. Ведь только реакция (n, α) дает сведения об этой компоненте волновых функций компаунд-состояний. В ряде резонансов полностью отсутствуют альфа-переходы в основное состояние, что обусловлено законом сохранения пространственной четности. Таким образом, измерение спектров альфа-частиц в нейтронных резонансах является одним из методов определения спинов. Созданная аппаратура позволила исследовать реакцию ($n, \gamma\alpha$) в нейтронных резонансах с разными спинами. Это уникальное измерение дало возможность впервые экспериментально оценить радиационные силовые функции для мягких γ -переходов между компаунд-состояниями, показать равенство радиационных силовых функций для переходов мультипольностей E1 и M1, а также потребовало ввести в формулу, описывающую радиационные силовые функции, новый член, учитывающий температуру конечного состояния ядра (С.Г.Кадменский, В.И.Фурман и др.). Это значительно улучшило возможности теоретического описания экспериментальных данных по радиационным силовым функциям, и теперь широко используется в ядерной физике.

Параметры ИБР-30 — высокая интенсивность и приемлемое разрешение — позволили в конце 80-х годов группе сотрудников (Ю.М.Гledenov, Х.Риголь, П.В.Седышев, В.И.Салацкий) начать программу измерений (n, α)- и (n, p)-реакций на радиоактивных ядрах-мишенях, для многих из которых данные о нейтронных резонансах вообще отсутствовали. Только спустя несколько лет такие измерения были поставлены в Лос-Аламосе (США) и Геле (Бельгия). В совместной работе ЛНФ—ПИЯФ (г. Гатчина) был измерен интерференционный эффект — коэффициент асимметрии вперед-назад — в реакции (n, p) на изотопе ^{35}Cl . Это позволило, с учетом полученных ранее данных на тепловых нейтронах, оценить величину матричного элемента слабого взаимодействия для ^{35}Cl .

Можно отметить, что только в последние годы в Ок-Ридже (ORNL), четверть века спустя, продолжены в более широком диапазоне энергий нейтронов измерения полных α -ширин, но пока без амплитудного анализа α -частиц. Характерно, что к постановке этих экспериментов были привлечены сотрудники ОИЯИ, участвовавшие в измерениях реакции (n, α) на ИБР-30 (Ю.М.Гледенов и Ю. Анджеевски), а к анализу результатов и Ю.П.Попов. Измерения в Ок-Ридже подтвердили аномальную природу резонанса с $E_n = 184$ эВ в реакции $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)^{144}\text{Nd}$, а также выявили еще несколько новых аномальных резонансов при более высоких энергиях. Для выяснения природы их аномалии было бы крайне важно провести амплитудный анализ альфа-частиц в этих резонансах или измерить усредненные парциальные сечения этой реакции в амплитудных окнах, соответствующих α -переходам в основное и возбужденные состояния конечного ядра (что, по-видимому, может стать одной из приоритетных задач для будущего, еще более светосильного нейтронного спектрометра ИРЕН).

Сверхтонкие эффекты в нейтронных резонансах

Под сверхтонкими эффектами понимают такие ядерные эффекты, которые обусловлены расщеплением ядерных уровней в результате взаимодействия электрического заряда ядра или его магнитного момента с электронным окружением.

Для определения магнитных моментов возбужденных состояний атомных ядер существовал ряд методов. Наибольшее распространение получили методы, основанные на эффекте Мёссбауера и на возмущенных угловых корреляциях при радиоактивном распаде ядер. Однако эти методы не позволяют определять магнитные моменты компаунд-состояний ядер, образованных при захвате резонансных нейтронов. Для этих состояний характерны высокая энергия возбуждения (6–7 МэВ) и малое время жизни ($\sim 10^{-15}$ с).

Впервые на возможность измерения магнитных моментов компаунд-состояний указал Ф.Л.Шапиро. Он показал, что при взаимодействии нейтронов с поляризованными ядрами положение нейтронных резонансов несколько смещено по сравнению со случаем неполяризованных ядер. Сложность эксперимента обусловлена очень малой величиной сдвига резонанса и необходимостью иметь ядерную мишень с высокой поляризацией. Даже в самом благоприятном случае сдвиг составляет 10^{-6} – 10^{-5} эВ, тогда как собственная ширина резонанса равна примерно 10^{-1} эВ. Несмотря на эти трудности, в период 1972–1975 годов группой в составе В.П.Алфименкова, Л.Ласоня, Л.Б.Пикельнера, Э.И.Шарапова и др. была выполнена серия экспериментов, в которых удалось измерить магнитные моменты 11 компаунд-состояний для 5 изотопов редкоземельных ядер. Было показано, что величины этих магнитных моментов в среднем близки к магнитным моментам основных состояний ядер и дисперсия их распределения согласуется с теоретически ожидаемой.

Другой цикл экспериментов был направлен на изучение изменения среднеквадратичного радиуса ядра при возбуждении, связанном с захватом резонансных нейтронов. На возможность такого эксперимента было указано в работе Ю.М.Останевича, В.К.Игнатовича и Л.Чера. Суть эксперимента заключалась в том, что взаимодействие заряда ядра с электронной оболочкой зависит от формы ядра и характеристики электронной оболочки. Поэтому, измеряя пропускание нейтронов в области резонанса

для различных химических соединений данного ядра, то есть при различном электронном окружении ядра, можно определить, изменилась ли форма ядра. В этом случае будет наблюдаться сдвиг по энергии исследуемого резонанса, который получил название химического сдвига.

В экспериментах по изучению формы ядра, как и при измерении магнитных моментов, одной из основных трудностей является малая величина ожидаемого сдвига резонансов. Но кроме этого существенно усложняет подобные измерения тот факт, что в различных химических соединениях, применяемых в качестве мишеней, заметно отличаются колебательные спектры кристаллов. При этом по-разному искажается форма изучаемых резонансов и это вносит дополнительные сложности в извлечении искомого сдвига.

Несмотря на отмеченные трудности, в 1977–1983 годах группой Л.Б.Пикельнера совместно с физиками из ГДР: К.Зайдел, А.Майстер, Д.Пабст и др. были выполнены эксперименты по измерению химических сдвигов резонансов для трех изотопов урана. Для этого пришлось провести обширную серию экспериментов по пропусканию нейтронов через мишени, состоящие из металлического урана, соединений урана с кислородом при различных валентностях, фторида урана. Больших усилий потребовал учет искажения формы резонансов. Несмотря на все эти трудности, эксперименты были успешно завершены. На основании этих экспериментов получены оценки среднеквадратичных радиусов изотопов урана при захвате нейтронов и установлена их связь с делительными ширинами резонансов. Следует отметить, что измерения магнитных моментов и среднеквадратичных радиусов ядер выполнены в ЛНФ ОИЯИ впервые в мире.

Эффект нарушения четности в нейтронных резонансах

Эффект нарушения четности в нуклон-нуклонных взаимодействиях обусловлен присутствием слабых взаимодействий в таких реакциях и как правило очень мал, составляя примерно 10^{-7} . Существенное увеличение эффекта нарушения четности в реакциях радиационного захвата нейтронов было обнаружено в ИТЭФ в экспериментах 1964–1970 годов Ю.Г.Абовым с коллегами. Асимметрия вылета гамма-квантов при захвате поляризованных тепловых нейтронов ядрами изотопа кадмия-113 составила примерно 10^{-4} .

Следующий шаг в развитии исследований нарушения четности в реакциях взаимодействия нейтронов с ядрами был сделан в ЛНФ ОИЯИ. Опираясь на теоретическую модель О.П.Сушкова и В.В.Фламбаума (ИЯФ, г. Новосибирск), предсказавших существующую связь эффекта с p -волновыми нейтронными резонансами, в 1981 году в ЛНФ были начаты поиски эффекта нарушения четности в p -волновых резонансах. Весьма важным обстоятельством, облегчившим выполнение этого исследования, было наличие в лаборатории установки для поляризации резонансных нейтронов. Группа в составе В.П.Алфименкова, Л.Б.Пикельнера, Э.И.Шарапова, Ю.Д.Мареева и др. начала измерение пропускания поляризованных нейтронов через ядерные мишени ^{117}Sn и ^{139}La . Нарушение четности проявлялось в зависимости нейтронного сечения от спиральности нейтронов. Наиболее впечатляющим оказался результат, полученный при измерении в области p -волнового резонанса ^{139}La . Эффект нарушения четности, определенный как разность сечений при положительной и отрицательной

спиральности нейтронов, отнесенный к их сумме, составлял 0,1, то есть в 10^6 раз превышал подобный эффект для нуклон-нуклонных взаимодействий.

В дальнейшем были предприняты специальные измерения для поиска низкоэнергетических p -волновых резонансов. Для некоторых из них были обнаружены эффекты нарушения четности. Особенно интересным был результат, полученный с мишенью ^{113}Cd . У этого изотопа кадмия был обнаружен p -резонанс при энергии 7 эВ и измерен эффект нарушения четности. Сопоставление этих данных с результатом эксперимента Ю.Г.Абова для тепловых нейтронов показало хорошее согласие с теорией.

Результат, полученный в ЛНФ, стимулировал начало подобных измерений в США, Японии, а также в российских исследовательских центрах.

Некоторые исследования поискового характера

Созданные в ЛНФ методики для спектроскопических исследований по времени пролета позволили провести ряд экспериментов, имеющих фундаментальный характер. Это проверка равенства гравитационной и инертной масс нейтрона, поиск относительной пространственной анизотропии в распространении нейтронов и гамма-квантов, поиск осциллирующий нейтрон-антинейтрон, поиск сверхплотных ядер. Результаты этих экспериментов имели лишь оценочный характер.

5. Ультрахолодные нейтроны

В связи с открытием в 1964 году видимого нарушения инвариантности по отношению к обращению времени (T -четности) в процессе распада K_0 -мезонов Ф.Л.Шапиро в 1968 году предложил с помощью ультрахолодных нейтронов (УХН) поставить эксперимент с целью выяснить: существует ли электрический дипольный момент (ЭДМ) у нейтрона. Наличие ЭДМ нейтрона, как у элементарной частицы, дало бы еще одно указание на существование нарушения T -четности. Специфическое свойство УХН — способность их храниться в замкнутом сосуде было отмечено Я.Б.Зельдовичем в 1959 году, однако не было подтверждено экспериментально. В 1968 году в ЛНФ на реакторе ИБР под руководством Ф.Л.Шапиро В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотилковский и А.В.Стрелков выполнили эксперимент, в котором впервые наблюдался эффект последовательного многократного отражения нейтрона от стенки сосуда, тем самым нейтрон достаточно долго сохранялся в этом сосуде. В этом первом эксперименте плотность УХН составила всего $\sim 10^{-5}$ УХН/см³, что в значительной мере определялось сравнительно малой мощностью реактора ИБР ~ 6 кВт. Поэтому эксперименты с УХН были перенесены на более мощный реактор ИРТ Института атомной энергии, где в период 1969–1974 годов сотрудниками ЛНФ ОИЯИ совместно с группой Л.В.Грошева исследовались конверторы-замедлители УХН, распространение УХН по нейтроноводам, гравитационная спектроскопия УХН, хранение и детектирование УХН. Возможность хранения УХН в сосудах была продемонстрирована уже в первых экспериментах, однако полученное время хранения оказалось намного меньше ожидаемого. За прошедшие десятилетия с момента открытия УХН выполнены обширные экспериментальные и теоретические исследования, посвященные поиску причин ограничения времени хранения УХН в сосудах.