

СОРОК ЛЕТ НЕЙТРОННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ В ГАТЧИНЕ

А.Серебров, А.Окороков

Введение

Сорок лет назад был запущен один из старейших исследовательских реакторов. Пуск реактора ВВР-М состоялся в декабре 1959 года в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) им.Б.П.Константинова РАН, в г.Гатчине. Он нормально работает по настоящее время без замены бака. Значение этого реактора для России как стационарного нейтронного источника значительно возросло с закрытием многих исследовательских пучковых реакторов после распада СССР. Все большее число институтов России и стран СНГ участвует в исследованиях на реакторе ВВР-М. В ПИЯФ ведется строительство нового высокопоточного реактора ПИК. По оценкам экспертов, уже выполнено более 70% работ, однако экономическая ситуация в России не позволяет прогнозировать срок его пуска. В связи с этим институт принял решение привести возможности реактора ВВР-М в соответствие новым нормативным требованиям безопасности и продлить его работу.

Реактор ВВР-М находится в Отделении нейтронных исследований (ОНИ) ПИЯФ. Институт располагает солидным механическим цехом для производства экспериментального оборудования и развитой инфраструктурой. В 800 м от реактора находится криогенная станция по производству жидкого азота и гелия. Институт расположен в лесном районе примерно в 3 км от г.Гатчины и в 50 км от С.-Петербурга, имеет столовую, гостиницу на 100 мест, спортивный комплекс с плавательным бассейном, автобусное и железнодорожное сообщение с С.-Петербургом. Институт приветливо относится к научным визитерам и ведет сотрудничество со многими институтами России и стран ближнего зарубежья (СНГ) и дальнего (в основном европейские нейтронные центры) зарубежья.

§ 1. Реактор ВВР-М

Уже при строительстве реактора первоначальный проект ВВР-С на 2 МВт был изменен и реализован модернизированный проект ВВР-М на 10 МВт. В 1979 г. его мощность была поднята до 18 МВт, но, как правило, он работает на 14-16 МВт. ВВР-М – это реактор бассейного типа с бериллиевым отражателем. Поток тепловых нейтронов в отражателе $0,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Первоначальный проект содержал 9 горизонтальных каналов и «тепловую графитовую колонну». Однако вскоре графитовая колонна была заменена бетонной вставкой, и в этом секторе было организовано 5 дополнительных горизонтальных каналов, обеспечивающих вывод 6 дополнительных пучков тепловых нейтронов и сквозной канал, предназначенный для экспериментов с вторичным излучением. На донышках этих каналов поток тепловых нейтронов меньше, чем в отражателе, откуда берут начало 9 штатных каналов, и составляет $(2-3) \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$. Несмотря на меньший поток нейтронов, эти каналы успешно эксплуатируются, и на них выполняется значительная часть исследований твердого тела. Реактор имеет 13 вертикальных каналов для облучения образцов и низкотемпературную гелиевую петлю для исследования материалов в процессе их облучения тепловыми (и/или быстрыми) нейтронами. В 1969 году на крышке реактора была создана надреакторная камера с дистанционными манипуляторами, позволяющая проводить визуальный осмотр и несложные операции с образцами и тепловыделяющими элементами (ТВЭ), извлеченными из активной зоны реактора. В подреакторном пространстве расположены штатные горячие камеры, соединенные с хранилищами облученных образцов и ТВЭ, имеется возможность выдачи потребителю контейнеров с облученными образцами.

В 1986 г. на реакторе был установлен универсальный канал поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов, а в 1996 г. в горизонтальном канале 10 был установлен твердодейтериевый источник ультрахолодных нейтронов.

Как правило, реактор работает двухнедельными циклами с остановками на 2-3 дня между ними, с 2-недельной остановкой через каждые 3 мес. и летней остановкой на 2 мес. для планово-предупредительного ремонта. Конкретное расписание работы реактора определяется Ученым советом ОНИ ПИЯФ.

Реактор ВВР-М безаварийно работает уже почти 40 лет. Уровень его выбросов (на 90% это ^{41}Ar) много ниже допустимых значений и приводит к дозе для жителей Гатчины 0,2 мБэр/год, что примерно в 1000 раз меньше естественного фона. За все время существования ре-

актора не было ни одного случая заболевания лучевой болезнью или переоблучения персонала. В значительной мере это заслуга высококвалифицированного персонала и его бессменного руководителя Р.Г.Пикулика.

§ 2. Научные исследования 60^х – 70^х годов по ядерной физике, фундаментальной физике и физике конденсированного состояния

Научные исследования на реакторе ВВР-М начались в 1960 году под руководством Льва Ильича Русинова, первооткрывателя изомерии атомных ядер, ученика И.В.Курчатова, который был инициатором и руководителем строительства этого исследовательского реактора. Он собрал вокруг себя молодых талантливых ученых, впоследствии возглавивших различные направления деятельности на реакторе. Направление фундаментальных исследований было развито В.М.Лобашевым, исследования по ядерной и рентгеновской спектроскопии сформировались под руководством О.И.Сумбаева, И.А.Кондурова, исследования по физике деления возглавил Г.А.Петров. Исследования по физике твердого тела были инициированы Г.М.Драбкиным. Развитием реакторной технологии и строительством реактора ПИК руководит К.А.Коноплев. Проект нового реактора был подготовлен Ю.В.Петровым и К.А.Коноплевым.

После Льва Ильича Русинова лабораторию нейтронных исследований возглавляли: профессор Д.М.Каминкер, профессор О.И.Сумбаев, профессор А.П.Серебров. С 1992 г. лаборатория нейтронных исследований имеет статус Отделения, состоящего из трех научных отделов:

- отдел нейтронной физики (профессор А.П.Серебров);
- отдел исследования конденсированного состояния (профессор А.И.Окороков);
- отдел физики и техники реакторов (к.т.н. К.А.Коноплев)

и трех научно-технических отделов:

- отдел полупроводниковых ядерных детекторов (к.ф.-м.н. А.Х.Хусаинов);
- отдел автоматизации исследований на реакторах (к.т.н. В.В.Марченков);
- отдел нейтронной оптики (к.ф.-м.н. А.Ф.Щебетов).

Директор Отделения Нейтронных Исследований – он же директор института профессор В.А.Назаренко.

В развитии научных исследований на реакторе ВВР-М можно выделить три исторических этапа, определяемых как внутренними, так и внешними обстоятельствами. Первый этап – это этап развития и формирования основных научных направлений, происходивший в течение 60-х и начала 70-х годов. Второй этап – активная подготовка к научным исследованиям на реакторе ПИК, охватывающая конец 70-х годов, 80-е годы и начало 90-х годов. И, наконец, этап спасения науки, начавшийся в 90-е годы и продолжающийся до настоящего времени.

Для физиков старшего поколения наиболее памятен начальный этап исследований на реакторе. И следует отдать должное, что именно тогда были заложены основы научной деятельности и были сформированы важнейшие духовные ценности, это, прежде всего заинтересованное и преданное отношение к науке и демократизм общения. Все это сыграло важнейшую роль в формировании Гатчинской Школы нейтронных исследований.

Ядерно-спектроскопические исследования

Первые эксперименты на реакторе были посвящены измерению времени жизни ядерных уровней (И.А.Кондуров, Д.М.Каминкер, Ю.Е.Логинов). Вскоре после пуска реактора заработал кристалл-дифракционный фокусирующий гамма-спектрометр, созданный О.И.Сумбаевым и А.И.Смирновым и модернизированный впоследствии В.Л.Алексеевым и В.Л.Румянцевым. Этот спектрометр успешно работает в настоящее время и позволяет измерять энергию γ -лучей с точностью единиц электрон-вольт в диапазоне от 10 до 1000 кэВ.

Уже в одной из первых работ на нем были получены результаты (О.И.Сумбаев, Д.М.Каминкер, А.И.Смирнов, В.А.Шабуров, 1963 г.), которые до сих пор остаются загадкой и требуют своего объяснения. Это работа по изучению гамма-спектра родия, в котором впервые была обнаружена нестатистичность в распределениях гамма-линий по энергиям. Вместо хорошо известного случайного распределения уровней с учетом их «отталкивания» было обнаружено «притяжение», т.е. группирование уровней. Кроме того, расстояния между группами оказались кратными. До сих пор ведутся дискуссии о природе и даже наличии самого явления.

Измерения спектров электронов внутренней конверсии из (n, γ) -реакции стали возможными после установки в 1968 году на канале № 10 магнитного бета спектрометра (Б.А.Емельянов, В.С.Гвоздев, Ю.Л.Хазов и С.Л.Сахаров). Впоследствии использование внутриканального транспортного соленоида позволило увеличить чувствительность в 7 раз, что приблизило характеристики спектрометра к параметрам спектрометра BILL в ILL. Наличие комплекса ядерно-спектроскопических установок на реакторе ВВР-М и возможность работать на других спектрометрах мира (в Гренобле, Гейдельберге) позволили построить схемы возбужденных состояний большого количества ядер (И.А.Кондуров, П.А.Сушков, В.В.Мартынов, В.Л.Алексеев и др.). Значительное место в деятельности ядерно-спектрометрического направления лаборатории занимала работа по созданию банка ядерных данных (Ю.В.Сергеев и др.).

Исследования слабых взаимодействий и ЭДМ нейтрона

В конце 50-х годов было только что показано, что в слабых взаимодействиях нарушается один из фундаментальных законов физики – закон сохранения пространственной четности. Гипотеза об универсальности слабого взаимодействия предсказывала эффекты нарушения Р-четности в ядерных электромагнитных переходах. Исследование таких эффектов было начато В.М.Лобашевым совместно с В.А.Назаренко в начале 60-х годов. Использование уникальной методики, сочетающей интегральный метод регистрации γ -квантов с резонансным выделением сигнала с помощью контура высокой добротности (маятник астрономических часов) позволило измерять исключительно малые эффекты циркулярной поляризации γ -квантов – порядка 10^{-5} - 10^{-7} . В результате исследований эффекты несохранения четности были обнаружены на целом ряде γ -переходов радиоактивных ядер, что впервые надежно подтверждало гипотезу об универсальности слабого взаимодействия. Принципиально важным стал эксперимент по измерению циркулярной поляризации γ -квантов в реакции $pn \rightarrow d\gamma$. Эксперимент был поставлен с использованием водной полости, сформированной в центре активной зоны реактора. Активность такого источника составляла 10^{16} γ -квантов в секунду при объеме мишени 3 литра. В этом эксперименте был установлен только верхний предел на циркулярную поляризацию, $P_\gamma \leq 5 \cdot 10^{-7}$

(В.М.Лобашев, В.А.Назаренко, Э.А.Коломенский, А.Н.Пирожков, А.И.Егоров и др.), однако он имеет большое значение для теории слабых нуклон-нуклонных взаимодействий. В ходе проводимых исследований детально изучались свойства поляриметра, используемого в измерениях. В результате было открыто новое явление – вращение плоскости линейной поляризации γ -квантов в намагниченных ферромагнетиках, аналог эффекта Фарадея в оптике (В.М.Лобашев, А.П.Серебров, Л.М.Смотрицкий и др.).

Наиболее значимым как для деятельности лаборатории, так и для фундаментальной физики стал эксперимент по поиску электрического дипольного момента нейтрона, который был реализован на реакторе ВВР-М В.М.Лобашевым с коллективом физиков, пришедших в ПИЯФ в 70-ые годы. Важнейшей особенностью эксперимента явилось использование ультрахолодных нейтронов. Подготовка к этому эксперименту началась в 1968 году. Была развита, по сути, с нуля методика работы с УХН, начиная от их получения, т.е. создания источников УХН, до создания магнитно-резонансного спектрометра с энергетическим разрешением 10^{-17} эВ (см. рис. 1).

Уже в начале 80-х годов был получен принципиально важный для теории результат – верхний предел на величину ЭДМ нейтрона $d_n \leq 3 \cdot 10^{-25}$ е-см (В.М.Лобашев, А.П.Серебров, Г.Д.Порсев, В.Ф.Ежов, С.Н.Иванов, Ю.В.Борисов и др.).

Этот эксперимент явился одним из наиболее принципиальных для физики элементарных частиц. Он связан с поиском эффекта нарушения CP или T-четности, лежащего в основе формирования Вселенной. Установление нового верхнего предела на величину ЭДМ нейтрона позволило практически полностью закрыть модель CP-нарушения Вайнберга и дать указания в пользу других моделей CP-нарушения: суперсимметричных, лево-правых и модели Кобаяши-Маскава. Метод УХН в эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона, продемонстрировавший свои преимущества, был также реализован на высокопоточном реакторе в Гренобле. В последующих измерениях в конце 80-х годов на универсальном канале точность была улучшена в 3 раза, и такая же точность была получена в эксперименте в Гренобле.

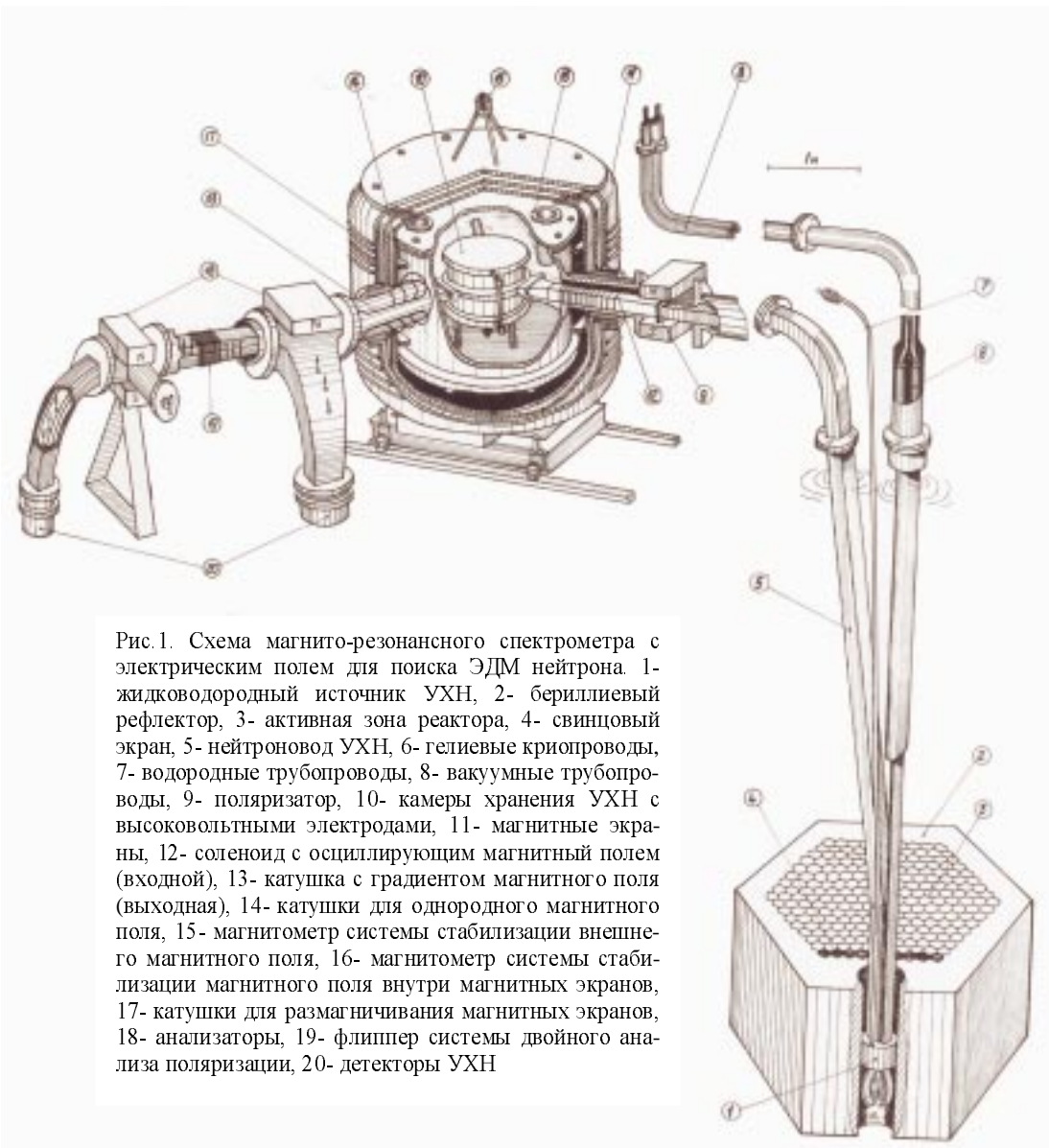


Рис.1. Схема магнито-резонансного спектрометра с электрическим полем для поиска ЭДМ нейтрона. 1- жидководородный источник УХН, 2- бериллиевый рефлектор, 3- активная зона реактора, 4- свинцовый экран, 5- нейтроновод УХН, 6- гелиевые криопроводы, 7- водородные трубопроводы, 8- вакуумные трубопроводы, 9- поляризатор, 10- камеры хранения УХН с высоковольтными электродами, 11- магнитные экраны, 12- соленоид с осциллирующим магнитным полем (входной), 13- катушка с градиентом магнитного поля (выходная), 14- катушки для однородного магнитного поля, 15- магнитометр системы стабилизации внешнего магнитного поля, 16- магнитометр системы стабилизации магнитного поля внутри магнитных экранов, 17- катушки для размагничивания магнитных экранов, 18- анализаторы, 19- флиппер системы двойного анализа поляризации, 20- детекторы УХН

Исследования по физике деления

С первых дней работы реактора была начата реализация научной программы по физике деления тяжелых ядер с основным акцентом на динамические эффекты в этой реакции (Г.А.Петров). За первые десять лет было детально исследовано новое физическое явление в реакции деления тяжелых актинидов – угловая анизотропия испускания γ -квантов при делении неориентированных компаунд-ядер, образовавшихся при захвате тепловых нейтронов. Была впервые обнаружена сильная, ярко выраженная зависимость коэффициента анизотропии от энер-

гии γ -квантов (Г.А.Петров, Г.В.Вальский, Ю.С.Плева), по предложению Г.В.Вальского измерена линейная поляризация γ -квантов ^{235}U в диапазоне 0,1-1,5 МэВ, детально исследована зависимость физического эффекта от массы и энергии осколков.

Эффект анизотропии испускания γ -квантов относительно оси разлета осколков был объяснен В.М.Струтинским и оказался связанным с возникновением у осколков значительных угловых моментов, ориентированных в плоскости, перпендикулярной оси разлета осколков. Эксперименты, выполненные в Гатчине, позволили оценить величины этих моментов ($\sim 5-7 \hbar$) и

преобладающую мультипольность γ -квантов (E_2 в области 0,1-0,7 МэВ).

Примерно в те же годы были детально исследованы выходы и основные свойства изомерного запаздывающего γ -излучения при делении (Л.А.Попеко, Г.А.Петров, Д.М.Каминкер).

По предложению А.А.Воробьева на пучке №1 реактора ВВР-М был выполнен цикл экспериментальных исследований тройного деления $^{235,235}\text{U}$, ^{239}Pu , $^{241,242\text{m}}\text{Am}$ (В.Т.Грачев, И.А.Кондуров, Д.М.Селиверстов, Н.Н.Смирнов и др.). В результате проведенных исследований были впервые прецизионно измерены выходы и энергетические спектры легких ядер от изотопов водорода до кислорода.

Глубокое понимание перспективности исследований процесса деления с резонансными нейтронами выразилось в энергичных попытках создания в Гатчине импульсного нейтронного источника, которые успешно завершились пуском в 1971 году нейтронного спектрометра ГНЕЙС на базе синхроциклотрона с энергией 1 ГэВ. Эта установка, созданная по инициативе Г.А.Петрова и его сотрудников – Г.З.Боруховича, В.И.Юрченко, Т.К.Звездкиной, Э.Н.Тетерева – успешно работает до настоящего времени. Неоценимый вклад в превращение спектрометра ГНЕЙС в современный физический прибор внес О.А.Щербаков. Именно благодаря его усилиям в конце 70-х и начале 80-х годов на этом спектрометре был выполнен прекрасный цикл работ по исследованию ($n\gamma$)-реакции при делении $^{238,235}\text{U}$ и ^{239}Pu .

К этому же периоду относятся две оригинальные экспериментальные работы. Одна, связанная с оценкой вероятности ионизации атомной оболочки делящегося атома флуктуационным электромагнитным полем делящегося ядра (Л.А.Попеко, Е.Ф.Кочубей, Г.А.Петров), а вторая – с исследованием возможности изменения сечения деления тепловыми нейтронами при помещении делящихся изотопов в различные газовые молекулы (А.В.Дербин, А.Б.Лаптев, Г.А.Петров, Ю.С.Плева, М.А.Ямщиков).

Начиная с 1976 года сектор физики деления ядра постепенно изменяет ориентацию своих научных интересов и начинает реализацию большого цикла научных исследований только что открытого в ИТЭФ эффекта нарушения пространственной четности в процессе деления тяжелых ядер тепловыми и резонансными поляризованными нейтронами. Совместно с этим эффектом детально исследуются и связанные с ним из-за определенного сходства механизмов возникновения Р-четные интерференционные эффекты в угловых распределениях осколков деления. В результате выполнения этих комплексных исследований для широкого круга делящихся

ядер от ^{229}Th до ^{245}Cm была создана экспериментальная основа современной теории Р-нечетного и Р-четных эффектов при делении тяжелых актинидов.

Физика твердого тела

Исследования по физике твердого тела начались на реакторе ВВР-М также в 60-х годах. Сразу с пуском реактора ВВР-М Г.М.Драбкиным и С.В.Малеевым были организованы экспериментальная и теоретическая группы для нейтронного исследования физики конденсированного состояния (ФКС). Этот теоретико-экспериментальный тандем коллективов сохранился до сих пор, обеспечивая высокий уровень исследований. Уже через 2-3 года были созданы поляризующие зеркала и другая техника, необходимая для постановки экспериментов по деполаризации и малоугловому рассеянию. Именно тогда определилась основная особенность твердотельских исследований в Гатчине – это работа с поляризованными нейтронами. Широко известен метод нейтронного пространственного спинового резонанса, предложенный и развитый Г.М.Драбкиным. Из сектора Г.М.Драбкина вышли активно работающие физики, возглавившие лаборатории и группы: А.И.Окорочков, В.А.Трунов, В.П.Плахий, А.Ф.Щебетов.

Исследования этого периода на пучках поляризованных нейтронов характеризуются созданием принципиально новых методик, рождаемых как на основе получаемых экспериментальных результатов, так и в результате развития теории магнитного рассеяния поляризованных нейтронов. Сечение магнитного рассеяния зависит от взаимного направления начальной поляризации \mathbf{P} , намагнитченности образца \mathbf{M} (или $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M$), вектора рассеяния \mathbf{q} (или $\mathbf{e} = \mathbf{q}/q$) и вектора скорости нейтронов (или волнового вектора \mathbf{k}). Если ранее был известен только один псевдовектор магнитного взаимодействия $\mathbf{M}_\perp = \mathbf{m} - (\mathbf{e}\mathbf{m})\mathbf{e}$ (Халперн и Джонсон), описывающий магнитно-ядерную интерференцию, то уже в 1961 г. С.В.Малеев открыл новый, для чисто магнитного рассеяния, $\mathbf{M}_\parallel = (\mathbf{e}\mathbf{m})\mathbf{e}$, а в 1978 г. было найдено (А.В.Лазута, С.В.Малеев, Б.П.Топерверг), что псевдовектор $\mathbf{n} = [\mathbf{k}', \mathbf{k}] / |\mathbf{k}', \mathbf{k}|$ открывает возможность изучать 3-х спиновые (киральные) корреляции, что и было немедленно проверено в эксперименте (А.И.Окорочков, А.Г.Гукасов, В.В.Рунов).

Все упомянутые псевдовекторы и соотношение для поляризации рассеянных нейтронов $\mathbf{P} = -\mathbf{e}(\mathbf{e}\mathbf{P}_0)$ явились основой поляризационных методик и интерпретации экспериментальных данных. Одна из основных методик – это 3-х мерный анализ поляризации. Оказалось, что для

малоуглового рассеяния зависимость $\mathbf{P} = -\epsilon(\mathbf{eP}_0)$ дает возможность измерением только вектора \mathbf{P} узнать все о процессе магнитного рассеяния, включая упругую и неупругую его составляющие. Этой методикой 3-d анализа проведен большой цикл исследований ферромагнитного фазового перехода в Fe (Огороков А.И., Рунов В.В. и др.) и PdFe (4 ат.%) (Гордеев Г.П., Аксельрод Л.А. и др.) и магнитной текстуры.

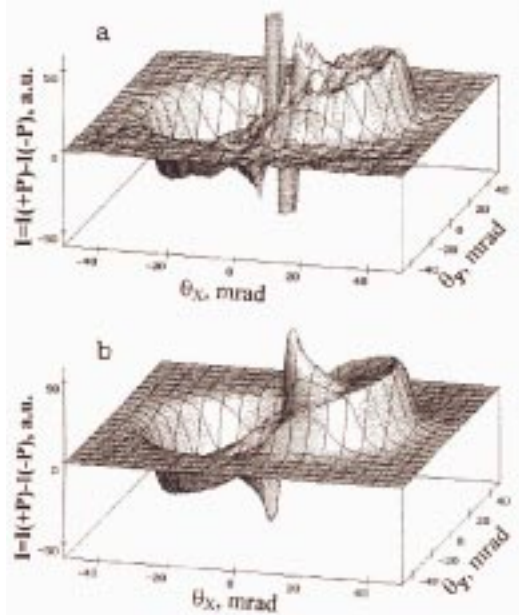


Рис.2. Спин-волновое антисимметричное рассеяние ΔI на сплаве $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{22}\text{Cr}_{10}\text{P}_{18}$ в координатах плоскости детектора: а) - эксперимент; б) – теоретический расчет с параметрами из фитирования экспериментальных данных: спин-волновая жесткость $D=52.74(5) \text{ meV } \text{ \AA}^2$, затухание $\Gamma_0(\text{kR}_c) = 25.2(5)$, дипольная константа $\omega_0 \langle S \rangle = 50(3) \text{ meV}$

Принципиально новым в исследовании фазовых переходов явилось то, что 3-d анализ позволил войти в асимптотики по переданной энергии ω и полуширине динамического формфактора Γ : $\omega \ll \Gamma$ и $\omega \gg \Gamma$, т.е. получить результаты, адекватные асимптотическим теориям фазового перехода. Например, динамические характеристики получены в области $\omega = (7-100)\Gamma$, где, кстати, найдено, что асимптотика динамического формфактора $F(\mathbf{q}, \omega)$ не лоренцевская, как это принято считать, а в пределе $\omega \gg \Gamma$ $F(\mathbf{q}, \omega) \sim$

$\omega^{13/5}$. Такого рода результаты невозможно получить другими методами. На основе псевдовектора Малеева $\mathbf{M}_//$ развита методика лево-правой асимметрии рассеяния, которое связано с динамическими корреляциями, описываемыми 3-х спиновой функцией Грина $\text{Im}G^{(3)}$ при фиксации z – проекции спинов магнитным полем. Методика позволила впервые изучить критическую динамику по тройным спиновым корреляциям в поле, ответить на ряд принципиально важных вопросов теории и с высокой точностью измерять параметры спиновых волн в ферромагнитной фазе. Двумерная картина асимметричного рассеяния на спиновых волнах показана на Рис.2.

В области нейтрографии исследования магнитной структуры и обменного взаимодействия стояли на переднем крае науки о магнитных кристаллах (В.П.Плахтий, И.В.Голосовский, О.П.Смирнов, Ю.П.Черненко). Проведенные исследования по определению спиновых конфигураций и обменных связей в сегнетомагнетиках – перовскитах, магнитного упорядочения в многоподрешеточных антиферромагнитных гранатах с 3d- ионами и выявление в них цепочек атомов, участвующих в образовании обменных связей, послужили экспериментальным материалом для разработки метода симметричного анализа магнитных структур (Ю.А.Изюмов и др.). К этому же периоду относятся исследования и более тонких особенностей обменного взаимодействия в кристаллах. Среди них обнаружение слабого антиферромагнетизма в ортоферрите иттрия, обусловленного антисимметричным обменом Дзялошинского-Мория $H_D = \sum_{ij} \mathbf{D}_{ij} [\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j]$. Отношение слабой антиферромагнитной компоненты спинов Fe^{3+} к основной было найдено равным $1.93(18) \cdot 10^{-2}$.

§3. Подготовка к исследованиям на реакторе ПИК

В 1976 году в ПИЯФ было начато строительство нового реактора (реактора ПИК). На этом этапе большая роль принадлежит О.И.Сумбаеву – тогда директору института и заведующему Лабораторией Нейтронных Исследований (ЛНИ). В конце 70-х годов на реакторе

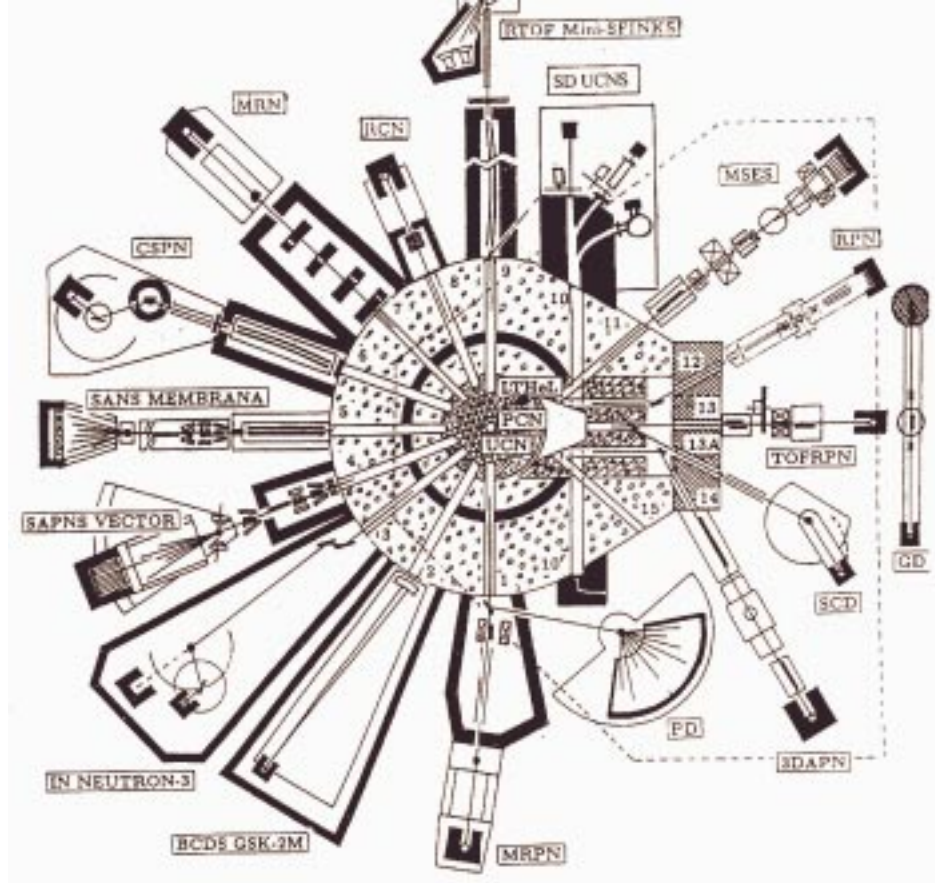


Рис.3. Схема размещения приборов на реакторе ВВР-М

Таблица 1

Instruments	Ch No	I(sample) n/cm ² s	Parameters	Purpose
UCN – ultra-cold neutron		$6 \cdot 10^3$	$\lambda = 700 \text{ \AA}$	Fundamental physics
PCN – polarized cold neutrons		$6 \cdot 10^8$	$\lambda = 4 \text{ \AA}$	Fundamental physics
PD - Powder diffractometer	1	10^6	$\lambda=1.38-2.52 \text{ \AA}; \Delta d/d=0.01$	Structure study
MRPN – Monochromator of resonance Polarized neutrons	1	$5 \cdot 10^4$	$\lambda=0.34 \text{ \AA}, \Delta\lambda/\lambda=0.1$	P,T-parity, fission physics
BSGS GSK-2M – Bend crystal γ -spectrometer(Cauchois-type)	2	$6 \cdot 10^{13}$	$E=40-1000 \text{ keV}$, $fwhm=6-120 \text{ eV}$	Precise γ -spectroscopy
IN NEUTRON-3 - Three-axis spectrometer	3	10^6	$\lambda=1-4 \text{ \AA}; \Delta\omega =0,5 \text{ meV}$	Inelastic scattering
SAPNS-VECTOR - SANS instrument of Polarized neutrons	4	$1,7 \cdot 10^4$	$\lambda=7-12 \text{ \AA}; \Delta\lambda/\lambda = 0.1-0.3$	Spin correlations
SANS-MEMBRANA - small angle diffractometer	5	10^5	$\lambda=2.2-5 \text{ \AA}; \Delta\lambda/\lambda =0.1-0.35$	Supra structure
CSPN – correlation spectrometer of polarized neutrons	6	10^5	$\lambda=2.5 \text{ \AA}; \Delta\lambda/\lambda = 0.3$	Magnetic diffraction,
MRN – Monochromator of resonance neutrons	7	$5 \cdot 10^6/eV$	$E=15 \text{ eV}, \Delta E/E = 0.1$	Physics of fission
RCN – radiation neutron capture instrument	8			
RTOF Mini-SFINKS –Time of flight powder diffractometer	9	$2 \cdot 10^7$	$\lambda= 0.9-5 \text{ \AA}; \Delta d/d = 2.5 \cdot 10^{-3}$	Atomic structure
CD UCNS – Solid deuterium UCN source	10	$5 \cdot 10^2$	$\lambda= 400 \text{ \AA}$	Fundamental physics
MSES - Modified spin-echo spectrometer	11	10^2	$\lambda= 6.5 \text{ \AA}; \Delta\omega = 10^{-7} \text{ eV}$.	L-f - dynamics
RPN - Reflectometer of polarized neutrons (under construction)	12			Surface of liquids
TOFRPN – Time of flight reflectometer of polarized neutrons	13	10^3	$\lambda=1-4 \text{ \AA}; \Delta\lambda/\lambda= 0.1-0.25$	Neutron optics
SCD – Single crystal diffractometer	13a	$2 \cdot 10^5$	$\lambda=0.7-1.73 \text{ \AA}$	Single crystals
3DAPN – 3-d analyzer of polarized neutrons	14	$3 \cdot 10^3$	$\lambda = 2.3 \text{ \AA}; P > 0.95$	Magnetic texture
LTHeL - Low-temperature He-loop		$7 \cdot 10^{13}(t)$ $1 \cdot 10^{13}(f)$	$T=20-400K$ $\Delta T= 0.1K$	Radiation physics
GD – Gamma –diffractometer		200 Cu	$\lambda = 0.03 \text{ \AA}; \Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$	Perfect crystals

ВВР-М началась активная подготовка к исследованиям на строящемся реакторе. О.И.Сумбаевым было решено подключить к разработке научной программы и физического оборудования физиков следующего поколения. Заведующим ЛНИ был назначен А.П.Серебров, в структуре ЛНИ было создано новое подразделение во главе с В.А.Труновым для разработки экспериментальных установок. Создание новой экспериментальной базы стало также задачей всех подразделений лаборатории. Требовалось разработать не только научную программу исследований, но и создать экспериментальные установки для ее реализации. Было решено оснастить пучки реактора ВВР-М новыми установками или прототипами тех, которые предназначены для реактора ПИК и одновременно использовать их в текущих измерениях. Такая тактика позволила активизировать научные исследования, готовить работающие приборы и реальную научную программу. В условиях неопределенных сроков пуска нового реактора эта тактика оказалась оптимальной. В итоге к концу 90-х годов практически все пучки были оснащены новыми экспериментальными установками (см. рис.3), а в центре активной зоны реактора был установлен жидководородный источник холодных и ультрахолодных нейтронов (см.рис.4).

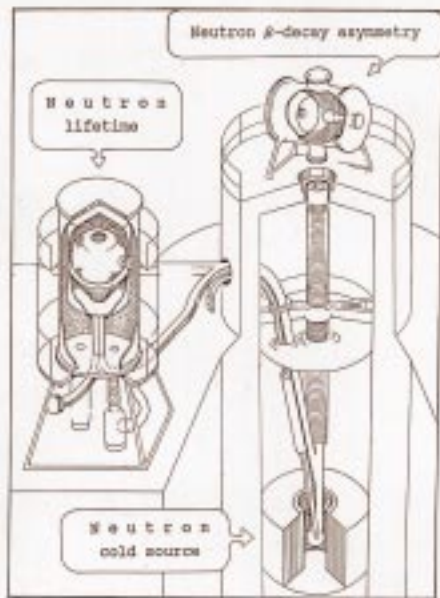


Рис.4.

Жидководородный источник холодных и ультрахолодных нейтронов и комплекс экспериментальных установок для изучения β -распада нейтрона. Асимметрия β -распада измерялась на вертикальном поляризованном холодном пучке с помощью детектора электронов и детектора протонов, расположенных по оси установки, которая ориентирована вдоль вектора поляризации нейтронного пучка. В измерениях времени жизни нейтрона была использована оригинальная методика - хранение ультрахолодных нейтронов в

ловушке с гравитационным затвором. Ультрахолодные нейтроны заполняют сферическую ловушку, когда она находится в положении отверстием вниз, после этого сфера поворачивается в положение отверстием вверх и нейтроны с малой кинетической энергией не могут выскочить из нее из-за действия гравитационного поля.

Фундаментальная и ядерная физика

Благодаря оснащению новым физическим оборудованием реактор получил новое качество. Особенно эффективным оказался запуск источника холодных и ультрахолодных нейтронов (А.П.Серебров, И.С.Алтарев, Б.Г.Ерозолимский, И.А.Кузнецов, А.Ф.Щебетов, Б.Г.Песков, Н.В.Боровикова и др.). Поток поляризованных холодных нейтронов на выходе вертикального нейтронвода составил $3 \cdot 10^{10}$ н/см²·с при плотности потока $6 \cdot 10^8$ н/см²·с, что оказалось в 5 раз больше, чем на реакторе в Гренобле. Можно сказать, что жидководородный источник холодных и ультрахолодных нейтронов изменил статус реактора ВВР-М, во всяком случае, приблизил его к числу современных реакторов. На этом источнике был получен целый ряд блестящих результатов мирового уровня. Верхний предел на электрический дипольный момент нейтрона был доведен до $1,1 \cdot 10^{-25}$ е·см (В.М.Лобашев, А.П.Серебров, И.С.Алтарев, Ю.В.Борисов, Н.В.Боровикова, А.И.Егоров, С.Н.Иванов, Э.А.Коломенский, М.С.Ласаков, В.А.Назаренко, А.Н.Пирожков, Ю.В.Соболев, Е.В.Шульгина и др.).

На этом источнике были начаты прецизионные исследования β -распада нейтрона. Бета-распад нейтрона – это одна из задач физики элементарных частиц, которая должна и может решаться на реакторах. Для теории этот процесс исключительно важен. Из β -распада нейтрона могут быть определены наиболее строго аксиальная и векторная константы слабого взаимодействия. Высокая точность знания параметров этого процесса дает проверку унитарности матрицы Кобаяши-Маскава, является очень важной для космологии и модели Солнца. Результаты по β -распаду нейтрона, полученные на реакторе ВВР-М, находятся на мировом уровне точности и успешно конкурируют с результатами, полученными на высокотоковом реакторе ИЛЛ. С наилучшей в мире точностью была измерена асимметрия вылета антинейтрино относительно спина нейтрона в его β -распаде (А.П.Серебров, И.А.Кузнецов, И.В.Степаненко, А.В.Алдущенко, М.С.Ласаков и др.). Измерена асимметрия вылета электрона по отношению к спину нейтрона с точностью 1,2% (Б.Г.Ерозолимский, И.А.Кузнецов, И.В.Степаненко, Ю.А.Мостовой, О.В.Рожнов, Н.Ф.Маслов и др.). Методом хране-

ния ультрахолодных нейтронов измерено время жизни нейтрона с точностью 0,3% (А.П.Серебров, А.Г.Харитонов, Р.Р.Тальдаев, В.В.Несвижевский, А.В.Стрелков, В.Н.Швецов, В.П.Алфименков и др.). Вероятность потерь при хранении УХН составляла всего 3% от вероятности β -распада, поэтому это было почти прямое измерение экспоненты распада для нейтрона. Комплекс установок для изучения β -распада нейтрона представлен на рис. 4.

На вертикальном пучке поляризованных холодных нейтронов с использованием специализированных установок и интегральной методики были исследованы эффекты несохранения четности с точностью, которая ранее была невозможна. Результаты этих измерений с поляризованными нейтронами и измерений циркулярной поляризации γ -квантов от мишеней, размещенных в водной полости реактора, представлены в таблице 2 (В.М.Лобашев, В.А.Весна, Э.А.Коломенский, В.А.Назаренко, А.Н.Пирожков, И.С.Окунев, Л.М.Смотрицкий, Е.В.Шульгина и др.).

Таблица 2
Результаты измерений P-нечетных и P-четных корреляций в реакциях с нейтронами на реакторе ВВР-М (P_γ - циркулярная поляризация γ -квантов, \rightarrow - асимметрия разлета продуктов реакции относительно спина нейтрона)

Реакция	Корреляция	Результат
$\text{H}(n,\gamma)\text{D}$	P_γ	$(1.8 \pm 1.8) 10^{-7}$
${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$	\rightarrow	$-(0.38 \pm 0.49) 10^{-7}$
${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$	\rightarrow	$-(0.64 \pm 5.5) 10^{-7}$
${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$	\rightarrow^0 \rightarrow^1	$(3.4 \pm 6.7) 10^{-7}$ $-(2.5 \pm 1.6) 10^{-7}$
${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$	\rightarrow \rightarrow_{lr}	$(0.07 \pm 1.12) 10^{-7}$ $(0.66 \pm 0.18) 10^{-4}$
${}^{35}\text{Cl}(n,p){}^{35}\text{S}$	\rightarrow \rightarrow_{lr}	$-(1.51 \pm 0.34) 10^{-4}$ $-(2.4 \pm 0.43) 10^{-4}$
${}^{35}\text{Cl}(n,\gamma){}^{35}\text{Cl}$	$P_{\gamma\Sigma}$ $\rightarrow_{\gamma\Sigma}$	$(6.5 \pm 0.6) 10^{-5}$ $-(27.8 \pm 4.9) 10^{-6}$
${}^{39}\text{K}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$	$(2.6 \pm 2.1) 10^{-6}$
${}^{45}\text{Sc}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$	$-(0.8 \pm 0.9) 10^{-6}$
${}^{56}\text{Fe}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$ $\rightarrow_{\gamma\Sigma}$	$(25.3 \pm 4.2) 10^{-6}$ $(4.0 \pm 0.8) 10^{-6}$
${}^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$	$(0 \pm 0.12) 10^{-6}$
$\text{Br}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$ $\rightarrow_{\gamma\Sigma}$	$(3.0 \pm 0.2) 10^{-5}$ $-(19.5 \pm 1.6) 10^{-6}$
$\text{Cd}(n,\gamma)$	$\rightarrow_{\gamma\Sigma}$	$-(1.3 \pm 1.4) 10^{-6}$
$\text{Sn}(n,\gamma)$ $E=6.42 \text{ МэВ}$	$P_{\gamma\Sigma}$ $\rightarrow_{\gamma\Sigma}$	$(1.5 \pm 0.45) 10^{-5}$ $-(37 \pm 13) 10^{-4}$
${}^{133}\text{Cs}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$	$-(2.4 \pm 0.8) 10^{-6}$
${}^{139}\text{La}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$ $\rightarrow_{\gamma\Sigma}$	$-(15.4 \pm 2.3) 10^{-5}$ $-(17.8 \pm 2.2) 10^{-6}$
${}^{165}\text{Ho}(n,\gamma)$	$P_{\gamma\Sigma}$	$-(1.5 \pm 1.2) 10^{-6}$

${}^{233}\text{U}(n,f)$	\rightarrow \rightarrow_{lr}	$(3.60 \pm 0.34) 10^{-4}$ $-(3.24 \pm 0.33) 10^{-4}$
${}^{235}\text{U}(n,f)$	\rightarrow \rightarrow_{lr}	$(0.75 \pm 0.12) 10^{-4}$ $(1.65 \pm 0.11) 10^{-4}$

Исследования эффектов несохранения четности в делении были успешно продвинуты Г.А.Петровым на горизонтальных пучках реактора. Исследовалась массовая зависимость P-нечетных эффектов (рис.5) для ряда делящихся ядер, используя пучок тепловых поляризованных нейтронов на нейтроноводе канала №6 (Г.А.Петров, А.К.Петухов, Г.В.Вальский, Ю.С.Плева).

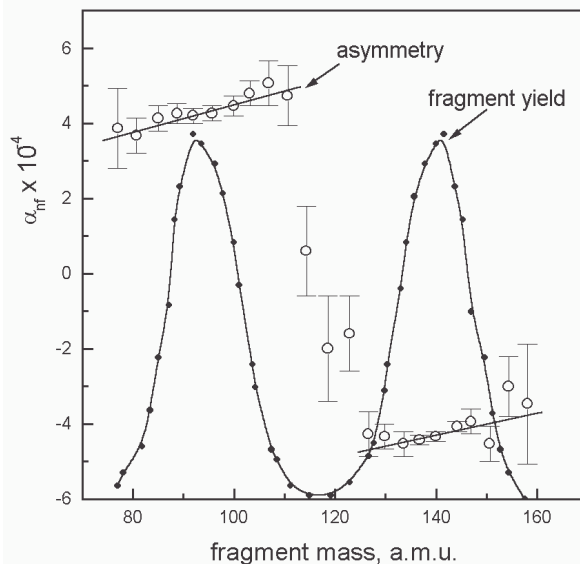


Рис. 5. Несохраниющая пространственную четность асимметрии как функция масс осколков

Для исследования энергетической зависимости был использован кристалл-дифракционный спектрометр поляризованных горячих нейтронов на канале №1. В этих измерениях было продемонстрировано, что эффект возникает от интерференции s и p-волн и изменяет знак на p-волновом резонансе (рис.6) (Г.А.Петров, Г.В.Вальский и др.). На этом же спектрометре с использованием специального поляриметра был продемонстрирован резонансный характер прецессии спина нейтрона, вызванного слабым взаимодействием (рис.7) (А.П.Серебров, А.К.Петухов, Г.А.Петров, Г.В.Вальский, Ю.С.Плева и др.).

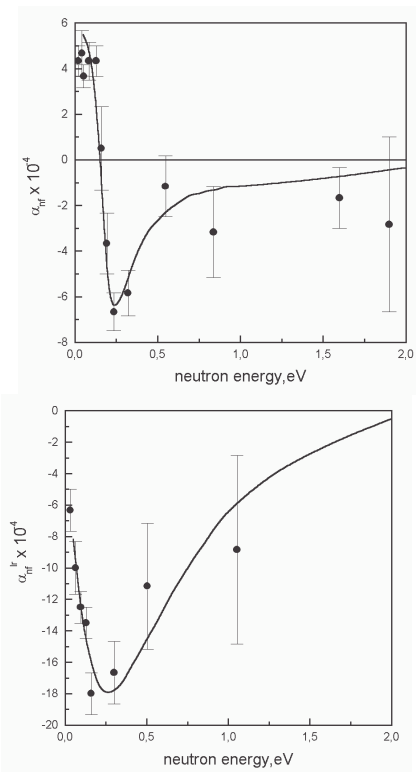


Рис. 6. Несохраниющая и сохраняющая пространственную четность асимметрии в зависимости от энергии падающих нейтронов при делении ^{233}U

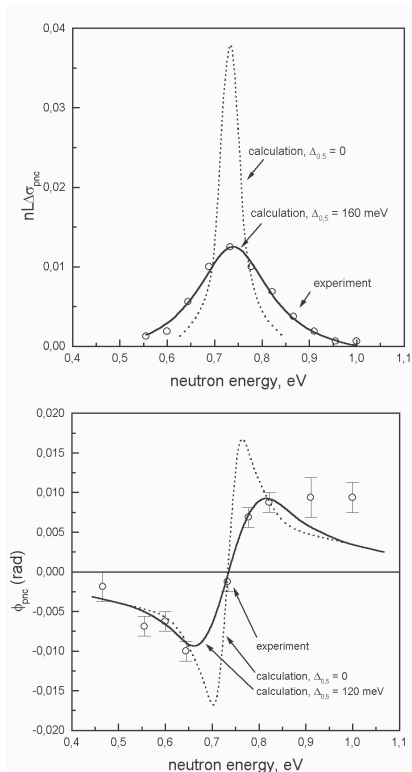


Рис.7. Несохраниющий пространственную четность нейтроннооптический дихроизм и прецессия спина нейтрона в окрестности резонанса 0,74 эВ ^{139}La . Сплошная кривая соответствует реальному энергетическому разрешению, а пунктирная – идеальному

Исходя из того, что реактор ПИК должен стать национальным центром нейтронных исследований, подготовка научных исследований и экспериментального оборудования для нового реактора велась совместно с другими институтами страны. Так, например, роторный монохроматор, установленный на канале 7, был разработан в ИГЭФ (Ю.Г.Абов, С.И.Калевин). Исследования по β -распаду нейтрона были проведены совместно с ОИЯИ (А.В.Стрелков и др.) и Курчатовским институтом (Ю.А.Мостовой).

Совсем недавно (1996-97 гг.) была проведена новая модернизация кристалл-дифракционного прибора (В.Л.Алексеев, В.Л.Румянцев) совместно с лабораторией Б.Г.Турухано. Впервые в мире спектрометр оснащен интерферометром на высокочастотных голографических решетках с целью повышения точности относительных измерений углов дифракции (энергий) гамма-лучей. На спектрометре получено угловое разрешение 1 угл.сек от полной апертуры и 0,2 угл.сек от центрального участка апертуры кристалла. Это разрешение является рекордным для фокусирующих гамма-спектрометров.

Уникальное разрешение прибора дало возможность впервые в мире провести прямые измерения γ -спектра активной зоны реактора и получить новые данные о γ -распаде нуклидов деления урана из прямых измерений спектра (около ста хорошо разрешенных γ -линий в диапазоне энергий 95-250 эВ (В.Л.Алексеев, В.Л.Румянцев, 1998 г.). Столь высокая разрешающая способность спектрометра позволила, в частности, обнаружить новое явление. Суть его в том, что многие интенсивные γ -линии являются тесными дублетами (триплетами), хорошо разрешенными в этих измерениях.

Было показано (В.Л.Алексеев, В.Л.Румянцев, В.В.Федоров, 1999 г.), что кристалл-дифракционный метод изучения γ -активности ядер-осколков деления урана (плутония) может быть использован при решении проблемы трансмутации для исследования и контроля изотопного и элементного состава в процессе выжигания ядерных отходов.

Начиная с 1986 года в лаборатории О.И.Сумбаева ведутся интенсивные исследования динамической дифракции нейтронов в совершенных изогнутых и плоских кристаллах. По изменению при повороте установки контраста маятниковой картины при дифракции нейтронов на изогнутом кристалле впервые измерен предсказанный О.И.Сумбаевым гравитационный эффект на одном кристалле (В.Л.Алексеев, Е.Г.Лапин, Е.К.Леушкин, В.Л.Румянцев, О.И.Сумбаев, В.В.Федоров, 1988 г.).

Теоретически предсказано (В.В.Федоров) наличие сильного ($\sim 10^8$ В/см) электрическо-

го поля, действующего на нейтрон при дифракции в нецентросимметричном кристалле. Это поле было обнаружено и измерено в опыте по динамической дифракции поляризованных нейтронов (В.Л.Алексеев, В.В.Воронин, Е.Г.Лапин, Е.К.Леушкин, В.Л.Румянцев, О.И.Сумбаев, В.В.Федоров, 1989 г.). Экспериментально полученная величина совпала с теоретически рассчитанной.

Предложен и детально разработан новый эксперимент (В.В.Федоров, В.В.Воронин, Е.Г.Лапин) по поиску ЭДМ нейтрона при дифракции в нецентросимметричном кристалле на уровне точности $\sim 10^{-25}$ е·см.

На созданном макете установки, размещенной на горизонтальном канале реактора ВВР-М, была экспериментально обнаружена предсказанная существенная временная задержка дифрагирующего нейтрона внутри кристалла при углах Брэгга, близких к 90° .

Физика конденсированного состояния

Для физики твердого тела было создано 12 приборов, 7 из которых оснащены поляризующей техникой. Некоторые установки и их фрагменты являются прототипами инструментальной базы реактора ПИК. Схема размещения приборов в реакторном зале показана на рис.3, а некоторые характеристики приборов приведены в таблице 1.

Эксперименты по малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов (SAPNS) проводились и (проводятся) на установке **SAPNS-VECTOR** (А.И.Окороков, В.В.Рунов, С.В.Григорьев, Г.П.Копица, С.А.Климко), оборудованной 3-х мерным (векторным) анализом поляризации. Пучок формируется зеркальным фильтром в канале реактора, поляризуется отражением от малогабаритной сборки пластин Si с напылением Fe/Al суперзеркалом (А.Ф.Щебетов и др.) и монохроматизируется пространственным спиновым резонатором с возможностью плавно изменять длину волны нейтронов от 7 до 12 Å и изменять ширину спектральной линии от 10 до 30 %. Диапазон переданных импульсов $5 \cdot 10^{-3} < q < 10^{-1} \text{Å}^{-1}$. Используются два адиабатических радиочастотных флиппера. Установка имеет 20-канальный детектор с зеркалом-анализатором перед каждым счетчиком.

Значительная часть экспериментов на установке **SAPNS VECTOR** связана с изучением магнитных фазовых переходов. Интерес к ним возник сначала с целью проверки гипотезы подобия, но по мере развития метода поляризованных нейтронов критическое рассеяние стало объектом исследования

уникальных аспектов физики магнетизма. Было исследовано критическое рассеяние в Ni, Fe, Pd Fe (4 ат. %), аморфных сплавах, спиновых стеклах, инварных сплавах и т.д. В сжатых рамках данного обзора отметим вклад поляризованных нейтронов только в получение уникальных результатов с использованием 3-х мерного анализа поляризации:

1. Точка Кюри T_c для Fe зафиксирована с точностью $\tau = (T - T_c) / T_c = 10^{-5}$, что позволило исследовать область $\tau < 10^{-4}$.
2. Изучено Т-поведение магнитострикции в Pd Fe (4 ат.%) в области $\tau = (3 \div 30) \cdot 10^{-3}$.
3. С высокой точностью получены критические индексы для Fe: $\nu = 0.67(1)$, $z = 2.627(4)$.
4. В инварных сплавах Fe₇₀Ni₃₀ (0,1 ат.%С) установлено сосуществование двух масштабов критических флуктуаций и гауссовское распределение локальных T_c с дисперсией $\approx 3\text{K}$ (С.В.Григорьев и др.).

Эти результаты получены при исследовании парных спиновых корреляций, которые обычно и изучаются в нейтронном рассеянии. В 1979 г. экспериментально (Окороков А.И., Гукасов А.Г., Рунов В.В. и теоретически (Лазута А.В., Малеев С.В., Топерверг Б.П.) был обнаружен эффект лево-правой асимметрии рассеяния поляризованных нейтронов в намагниченном образце. Эффект связан с антисимметричной частью сечения рассеяния, описываемой 3-х спиновой функцией Грина $G^{(3)}$, и в определенной (наклонной) геометрии опыта позволяет изучать 3-х спиновые динамические корреляции. Этим методом по критическому рассеянию выше T_c исследована спиновая динамика в Fe в магнитном поле:

1. Определен коэффициент спиновой диффузии в парамагнитной области $D = 80 \pm 6 \text{ meV Å}^{5/2}$.
2. Найдено «замораживание» критической динамики на дипольном импульсе q_0 в виде $\Omega_d \sim q_0^{3/2} q$, где Ω_d – энергия критических флуктуаций, а $q_0(\text{Fe}) = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Å}^{-1}$.
3. Для ферромагнитной области $T < T_c$ развит метод прецизионного измерения спиноволновых (SW) параметров. Картина рассеяния на спиновых волнах показана на Рис. 2 для аморфного сплава Fe(50)Ni(22)Cr(10)P(18) (В.В.Дериглазов, А.И.Окороков, Б.П.Топерверг), а в таблице 3 приведены полученные параметры SW для аморфного сплава Fe(40)Ni(40)B(20) и их изменение под действием нагрузки (растяжение) в 270 МПа и отжига при $T = 300^\circ\text{C}$. Параметры: D – жесткость SW, Γ_0 – SW затухание, ω_0 – дипольная константа.

Состояние образца	П а р а м е т р		
	D, meV Å ²	Γ ₀ (kR _c)	ω ₀ ⟨S _z ⟩*, μeV
Исходное	182.7±0.2	65±3	110.3±0.9
С нагрузкой	191.0±0.4	58±4	121.0±1.4
Отжиг 3 ч	195±0.3	55±4	107.7±1.2
Отжиг 3 ч.	206.5±0.2	61±3	121.4±0.9

* ⟨S_z⟩ – усредненный спин атома

В настоящее время особый интерес физиков в области магнетизма вызывает проблема киральности. Так уж исторически случилось, что PNPI является монополистом в области экспериментального исследования киральных (3-х спиновых) корреляций. Впервые киральные корреляции были теоретически (А.В.Лазута, С.В.Малеев, Б.П.Топерверг) и экспериментально (А.И.Окороков, А.Г.Гукасов и др.) обнаружены и исследованы в 1977 году в критическом рассеянии на Fe в нулевом магнитном поле при T-T_c=4±55K. Измерялась лево-правая асимметрия рассеяния, следующая из упомянутого выше псевдовектора $\mathbf{n}=[\mathbf{k}^1, \mathbf{k}]/|\mathbf{k}^1, \mathbf{k}|$. Максимальный эффект асимметрии наблюдался на уровне P_A=1,5·10⁻⁴, что затрудняло его дальнейшее исследование. В 1992 г. проблема киральности получила новое, более фундаментальное продолжение после идеи Кавамуры о существовании нового универсального класса фазовых переходов с киральным параметром порядка. В результате экспериментальных (В.П.Плахтий и др.) и теоретических (С.В.Малеев) исследований было, во-первых, обнаружено взаимодействие деформации кручения со спиновой киральностью в Ho, а, во-вторых, при исследовании треугольных антиферромагнетиков (CsMnB₃) был впервые экспериментально определен киральный критический индекс, который находится в согласии с расчетами Кавамуры.

Установка **3DAPN** (Г.П.Гордеев, Л.А.Аксельрод, В.И.Забенкин, А.А.Воробьев) оборудована трехмерным анализом поляризации в прошедшем пучке и позволяет определить направление вектора **P** в пространстве с точностью 1% по компонентам P_i. На ней ведутся исследования магнитной текстуры магнетиков, феррожидкостей. По прецессии вектора поляризации изучается распределение наведенного и захваченного магнитного потока в ВТСП образцах. Из данных сканирования образцов узким (~0,1–0,5 мм) пучком (рис.8) получается информация об экранирующих токах внутри образца и таким образом визуализируются продольные и поперечные критические токи.

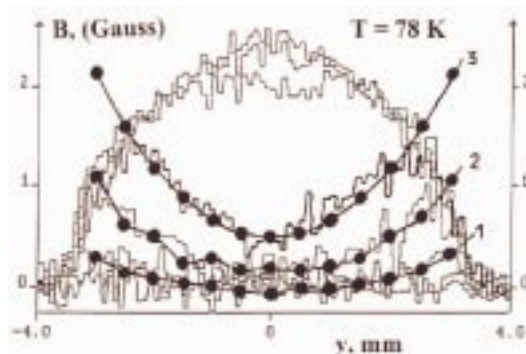


Рис.8. Визуализация магнитного потока в Y-Ba-Cu-O керамике при включенном внешнем поле (кривые 1,2,3 для H = 2,2; 3,1 и 4 Э, соответственно) и выключенном (захваченный поток) при ряде значений поля H от 0,45 до 7,2 Э

Малоугловой нейтронный дифрактометр **SANS-MEMBRANA** (Г.А.Евмененко, В.Л.Алексеев) предназначен для изучения надатомной структуры конденсированных сред масштаба 20-1000 Å (полимеры, коллоидные системы, материаловедение). Аналогично установке **SANS-VECTOR** пучок формируется поляризующей системой с магнитным монохроматором на основе ПСР и детектируется многосчетчиковой системой из 41 нейтронного счетчика СМН-50 диаметром 12 мм и рабочей высотой 80 мм. Перед детектором имеется защитная маска из Cd с вертикальными щелями, регулируемые по ширине. Использование маски и сканирования ею в пределах 12 мм позволяют изменять угловое разрешение детекторной части установки от 1,5·10⁻³ до 1,5·10⁻⁴ рад. На этом дифрактометре была окончательно установлена структура фаза Т7 (М.М.Агамалян). В последние годы проведены структурные исследования полиакрилатных супернабухающих гидрогелей при различных степенях набухания и проанализирована роль полиэлектролитных воздействий на конформацию полимерных цепей в районе узлов сшивки.

Низкочастотная динамика магнитных (и нематнитных) систем, таких как феррожидкости, сверхпроводники и т.д. изучается на модернизированном спин-эхо спектрометре **MSES** (В.Т.Лебедев), который является спектрометром квазиупругого рассеяния поляризованных нейтронов с модуляцией спектра фазой прецессии спина нейтрона. В спектрометре используются нейтроны со средней длиной волны $\lambda = 6.5 \text{ \AA}$ и поляризацией $P > 95\%$, диапазон упругих переданных импульсов $0.01 < q < 0.3 \text{ \AA}^{-1}$, разрешение по энергии 10^{-7} эВ, размер пучка на месте образца $10 \times 60 \text{ мм}^2$, поток нейтронов на образце $10^2 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$. Прибор может работать в режимах «рассеяния» и «томографии» – Фурье-анализа прошедшего пучка.

На канале 12 планируется создание рефлектометра поляризованных нейтронов **RPN** с отражением в вертикальной плоскости для изучения свободной поверхности жидкостей. В частности, планируются эксперименты с изучением структуры и динамики феррожидкости при приложении внешнего магнитного поля, изменяющего устойчивость поверхности. Для рефлектометра планируется PG-монокроматор, зеркальный поляризатор, 20-канальная детекторная система с апертурой 16° и угловым разрешением $0,01^\circ$.

Приборы **PD**, **CSPN** и **SCD** составляют комплекс для изучения магнитного упорядочения и спиновой динамики с анализом поляризации (лаборатория В.П.Плахтия).

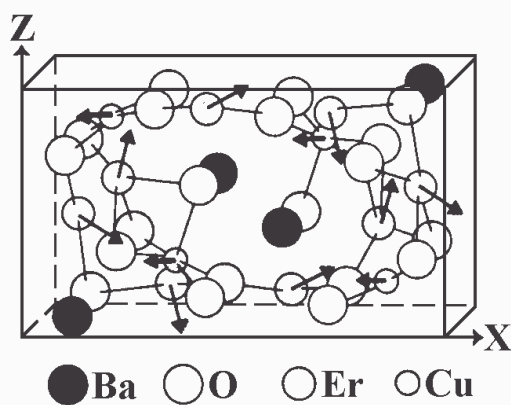


Рис.9. Магнитная структура $\text{Er}_2\text{BaCuO}_5$

Высокосветосильный порошковый дифрактометр **PD** (И.В.Голосовский), на котором выполняется большинство нейтронографических исследований имеет 48 счетчиков с соллеровскими пленочными коллиматорами перед ними. Он обладает хорошим разрешением в области малых и средних переданных импульсов, т.е. там, где магнитное рассеяние максимально. В последние годы на дифрактометре выполнен

большой цикл работ по определению магнитных структур в двухподрешеточных купратах, известных как «зеленая» R_2BaCuO_5 , «голубая» $\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$ и «коричневая» $\text{Nd}_2\text{BaCu}_2\text{O}_5$ фазы, где R-редкоземельные элементы. На рис.9 показана магнитная структура соединения $\text{Er}_2\text{BaCuO}_5$, полученная из нейтронографического эксперимента.

Корреляционный спектрометр поляризованных нейтронов **CSPN** (О.П.Смирнов) создан для исследования спиновой динамики и для дифракционных экспериментов с анализом поляризации. Использование поляризованного нейтронного пучка (А.Ф.Щебетов, А.И.Окороков), времяпролетной методики с псевдослучайной модуляцией поляризации нейтронного пучка и схемы обратной геометрии, при которой анализ спектра происходит после рассеяния на образце, позволили получить параметры прибора, сравнимые с лучшими аналогами на высокопоточных реакторах: интенсивность нейтронов в случае кристалла Гейслера в качестве анализатора $10^5 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ ($\lambda = 2.5 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda = 0.04$), в варианте TOF анализа $\Delta\omega = 0,5 \text{ мэВ}$. В экспериментах используется методика полного поляризационного анализа с измерением рассеяния с переворотом спина (SF) и без переворота (NSF) для трех направлений поляризации падающих нейтронов $P_{x,y,z}$.

Для исследования магнитной кристаллической структуры используется обычного типа 4-х круглый дифрактометр **SCD** (Ю.П.Черненко) с монокроматорами Cu, Ge, PG. Детектор движется в вертикальной плоскости в угловом диапазоне $5-30^\circ$.

В комплексе с нейтронными приборами создана рентгенографическая техника. С конца 80-годов исследования проводятся в тесном контакте с Институтом Лауэ-Ланжевена. Основная тематика исследований на этом комплексе приборов связана с изучением магнитной структуры и обменного взаимодействия, двухподрешеточных антиферромагнитных систем, купратов редких земель, кислородного упорядочения в ВТСП системах.

Основные результаты, полученные на этом комплексе приборов (В.П.Плахтия, С.В.Гаврилов, И.В.Голосовский, А.Г.Гукасов, И.А.Зобкало, Е.В.Москвин, О.П.Смирнов, В.И.Федоров, Ю.П.Черненко и др.):

1. На системе $(\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12})$ в спектре спиновых волн обнаружена щель, обусловленная динамическим взаимодействием подрешеток (нулевые колебания), не взаимодействующих друг с другом в приближении молекулярного поля. Величина щели составля-

- ет 0.003(4) ТГц. Аналогичная квантовая щель была измерена и на изоморфном гранате $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$.
- Исследованы магнитные свойства редкоземельных купратов R_2CuO_4 ($\text{R} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Sr}, \text{Ce}$) с целью выяснения роли плоскостей CuO_2 в эффекте ВТСП. Изучены переориентационные переходы и показано, что допирование церием приводит к подавлению перехода.
 - Обнаружен кроссовер в критическом поведении ориентации подрешеток антиферромагнетика Pr_2CuO_4 во внешнем магнитном поле вблизи spin-flip перехода. Это является следствием (и первым экспериментальным подтверждением) Бозе-конденсации спиновых волн в слоях CuO_2 , предсказанной С.В.Малеевым.
 - Нейтронным и рентгеновским структурным анализом были определены границы существования фаз орто-II и орто-III в соединении $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$, которые, как было показано, совпадают с характерными участками на зависимости T_c от содержания кислорода x .

Структурные особенности и их связь с физическими свойствами различных соединений исследуются с использованием времяпролетного дифрактометра **RTOF Mini-SFINKS** (В.А.Трунов, В.А.Кудряшев, Д.Ю.Чернышев) и гамма-дифрактометра **GD** (А.И.Курбаков, А.Е.Соколов, Э.Э.Рубинова). Порошковый дифрактометр **RTOF Mini-SFINKS** создан в 1984 г. совместно с Центром Технических Исследований VTT Финляндии. В нем используется обратный времяпролетный метод (RTOF) с Фурье-прерывателем, позволяющем получать разрешение $\Delta d/d = 0,25\%$. Детектор обратного рассеяния имеет апертуру 0,1 стерад. и состоит из 4-х тонких пластин сцинтилляционного стекла (с фотомножителями диаметром 110 мм), расположенных на поверхности с временной фокусировкой. Оптимизированный тракт источник-коллиматор-нейтроноводы позволяет получить на образце поток $1,5 \cdot 10^7$ н/см² для спектра $\lambda=0,9-5$ Å.

На этом дифрактометре:

- По проблеме ВТСП выполнено 18 экспериментов. Среди них одна из первых в мире расшифровка структуры 1-2-3 ВТСП соединения и исследование фазового перехода в системах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.
- С использованием изотопного контрастирования установлена позиция атома Ca, который располагается на месте Y при его замещении в соединении $\text{Y}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ и исследована температурная зависимость параметра решетки «в» в этом соединении с об-

наружением структурного фазового перехода при $T = 150$ К (рис.10).

- В 1-2-3 ВТСП системах, допированных Fe, получены данные о распределении атомов Fe в кристаллической решетке.
- Высокие возможности RTOF дифрактометра в определении температурных параметров – Дебай-Валлеровских факторов продемонстрированы при структурных исследованиях гексаборидов редких земель ReB_6 ($\text{Re} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Y}$). Здесь установлено наличие вакансий в борной подрешетке, уменьшение характеристической Эйнштейновской частоты с увеличением атомного номера редкоземельного элемента, эффекты промежуточной валентности и ряд других явлений.

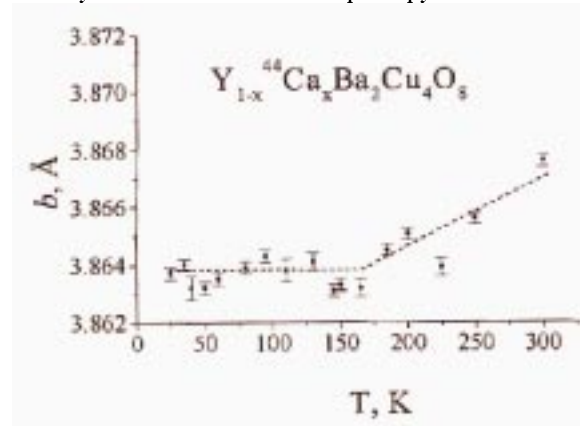


Рис.10. Температурная зависимость решеточного параметра «b» в $\text{Y}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Ba}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$

Изучение реального состояния совершенных монокристаллов, естественной и наведенной дефектности проводится на гамма-дифрактометре **CD**. В качестве источника гамма-излучения (200 Cu) используется активированная тепловыми нейтронами золотая пластинка размером $0,1 \times 5 \times 18$ мм³. Высокая монохроматичность пучка $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$ при $\lambda=0,03$ Å и угловое разрешение в 4 угловых секунды обеспечивают прецизионные дифрактометрические измерения, например, при исследовании монокристаллов кварца с плотностью дислокаций от 0 до 200 дисл./см оказалось возможным определять их плотность с точностью до нескольких штук.

Неупругое рассеяния в классическом понимании исследуется на трехосном спектрометре **IN NEUTRON-3** (лаборатория Н.М.Окуновой, Физико-Технический институт им.А.Ф.Иоффе, С-Петербург). Спектрометр имеет двоярный монохроматор и анализатор из монокристаллов $\text{Cu}(220)$ с $2d = 2,556$ Å, $\text{Cu}(200)$ с $2d = 3,608$ Å и пирогрфита (002) с $2d = 6,71$ Å. Длина волны падающих нейтронов от 1 до 4 Å, максимальный поток на образце 10^6 н/см², разрешение по энергии больше 0,5 мэВ. Спектрометр используется

§ 4. Исследования без использования реактора ВВР-М

для исследования неупругого и квазиупругого рассеяния нейтронов в разупорядоченных структурно неустойчивых кристаллах. В последнее время исследовались особенности фазовых переходов в сегнетоэлектриках релаксорах (relaxor ferroelectrics – RF) $\text{Na}_5\text{Bi}_5\text{TiO}_3$, $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, (PMN) и др.

Времяпролетный рефлектометр **TOFRPN** (А.Ф.Щебетов, В.А.Ульянов, В.Г.Сыромятников, Н.К.Плешаков, В.М.Пусенков и др.) используется для тестирования нейтронно-оптической техники, произведенной силами Отдела нейтронной оптики (ОНО) ПИЯФ. Основные элементы рефлектометра: поляризатор – зеркало с CoFe покрытием и TiGd-подслоем, прерыватель – Cd-диск со щелями, флиппер, образец, анализатор, детектор. Используется диапазон длин волн $\lambda = 1\text{--}4 \text{ \AA}$, разрешение времяпролетного спектрометра по длине волны $\Delta\lambda/\lambda - 0,1\text{--}0,025$, угловая ширина падающего на образец пучка 0,1 мрад, поток на образце $10^5 \text{ н/см}^2\text{с}$, поляризация $P > 0,98$. В ОНО разрабатываются и производятся поляризующие и неполяризующие зеркала и суперзеркала, одно- и многослойные нейтронотводы на их основе, коллиматоры, зеркальные монохроматоры и пр. для нужд исследователей на реакторе ВВР-М и для других нейтронных центров.

Кроме тестирования нейтронных элементов, на установке проводятся исследования магнитных и немагнитных многослойных структур с целью определения реальных параметров структуры и ее совершенства.

Реактор ВВР-М оборудован низкотемпературной гелиевой петлей LTHeL (Р.Ф.Коноплева, И.В.Назаркин, В.А.Чеканов), позволяющей изучать квазистационарные неупорядоченные состояния, дает возможность изучать различные этапы дефектообразования и изучать влияние нейтронного облучения на низкотемпературные процессы и фазовые переходы, изучать низкотемпературную радиационную стойкость материалов. При исследовании изменений электрофизических свойств ВТСП-материалов (YBCuO-керамики и пленок) в процессе низкотемпературного (20К) нейтронного облучения в области флюенсов быстрых ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) нейтронов $F = 10^{17}\text{--}10^{18} \text{ см}^{-2}$ обнаружен «эффект малых доз», связанный с повышением критической температуры T_c от 92,3 К до 95,3 К. При исследовании критического тока в Y-Ba-Cu-O-пленках получены его температурные и дозовые зависимости, которые объясняются механизмом пиннинга плоской границей зерен.

Каким бы это не показалось странным, но в ходе подготовки к исследованиям на реакторе ПИК сформировались и выделились впоследствии как самостоятельные исследования, фактически не связанные с нейтронами. Это нейтринная физика (Л.А.Попеко) и физика молекулярных пучков (В.Ф.Ежов). Намерение развивать нейтринные исследования были связаны с возможностью приготовления мощных нейтринных источников на реакторе ПИК и возможности создания уникального кремниевого детектора нейтрино, используя технологии производства детекторов ПИЯФ. Такой нейтринный детектор был успешно создан (Л.А.Попеко, Г.А.Шишкина, А.В.Дербин, С.В.Бахланов, А.В.Черный) и использован в исследованиях в подземной лаборатории Солотвино, а также в нейтринной лаборатории на Ровенской АЭС.

В этих исследованиях был получен замечательный результат – верхний предел на магнитный момент нейтрино $\mu_\nu \leq 1,8 \cdot 10^{-10} \mu_B$ (Л.А.Попеко, А.В.Дербин). Этот результат имеет исключительно важное значение для нейтринной физики.

Направление исследований с молекулярными пучками было стимулировано интересом к эффектам CP-нарушения, которые могли бы быть значительно усилены в атомах и молекулах. В.Ф.Ежовым с сотрудниками создана уникальная экспериментальная база, позволяющая проводить широкий круг исследований с атомами и молекулами. Представляется, что результаты этих исследований приведут к возможности наблюдения эффектов слабого взаимодействия в атомной и молекулярной физике и станут инструментом проверки Стандартной Модели.

К числу нереакторных исследований относится направление рентгеновской спектроскопии, развитое О.И.Сумбасвым одновременно с γ -спектроскопическими исследованиями на реакторе ВВР-М. Используя метод смещения рентгеновских линий были проведены уникальные исследования электронной структуры редкоземельных элементов и актинидов в химических соединениях, кристаллах и ВТСП-керамиках (О.И.Сумбаев, Е.В.Петрович, В.А.Шабуров, А.С.Рыльников, Ю.П.Смирнов, А.Е.Совестнов, А.В.Тюнис), исследование зарядовых радиусов ядер и измерения мультипольных моментов ядер (О.И.Сумбаев, А.Ф.Мезенцев, А.С.Рыльников, А.А.Родионов, В.А.Шабуров). В стенах лаборатории О.И.Сумбаева были заложены: направление исследования рентгеновских спектров адронных атомов, развитые А.И.Смирновым; на-

правление исследования каналирования элементарных частиц в изогнутых монокристаллах, развитые В.М.Самсоновым и А.И.Смирновым.

Наконец, следует отметить достижения группы физики и химии изотопов, возглавляемой А.И.Егоровым, которая способствовала успешному проведению многих физических исследований, беря на себя химическое обеспечение работ. Источники, чистейшие мишенные вещества, аналитические стандарты, методики химической технологии создавались быстро и качественно. Только один пример: во время сверхпроводящего бума было синтезировано около 300 образцов различных ВТСП. Однако главное достижение группы физики и химии изотопов – это научные разработки: радиохимический цикл нейтринного детектора типа Gallex, аммиачная детритизация легкой воды, азеотропная детритизация тяжелой воды, процессы разделения циркония и гафния, парометаллургическая переработка ториевого горючего, процессы разделения изотопов лития и бора, регенерация ядерного циркония и т.д. Главное научное достижение (вместе с О.И.Сумбаевым) – исследование аномальных валентностей редкоземельных элементов. Этот важнейший вопрос до сих пор не имеет удовлетворительного научного объяснения.

В исследованиях физики конденсированного состояния кроме установок на нейтронных пучках эффективно используются комплиментарные методы исследования: радиочастотные измерения линейной и нелинейной динамической индукции в диапазоне $10^2 - 10^6$ Гц с чувствительностью не хуже 10^{-5} Э (И.Д.Лузянин, В.П.Хавронин) и флуктуационная спектроскопия с чувствительностью не хуже 10^{-17} В²/Гц на частотах до 100 кГц. Изучаются критические явления в ферромагнетиках, скейлинговое поведение восприимчивости в ферромагнитной фазе, явление фазового разделения в манганитах, обладающих эффектом колоссального магнитосопротивления, и проникновение слабого магнитного поля в гранулированные и поликристаллические сверхпроводники (низкополевая электродинамика многосвязных сверхпроводников). Работы ведутся совместно с теоретическим отделом (С.В.Малеев, С.Л.Гинзбург, А.Г.Яшенкин).

Методом флуктуационной спектроскопии изучаются шумы в гранулированных сверхпроводниках (О.В.Герашенко, А.И.Сибилев), явление "сверхчувствительности" (О.В.Герашенко, М.А.Пустовойт, С.Л.Гинзбург), а также стохастический резонанс в биологических мембранах (С.М.Безруков). М.А.Пустовойтом совместно с С.Л.Гинзбургом и Н.Е.Савицкой (ОТФ) методом машинного моделирования успешно исследуется самоорганизованная критичность в джозефсоновской среде. Этим же методом поль-

зуется и В.И.Сбитнев при теоретическом изучении детерминированного хаоса в биологических объектах (нейронные сети и др.). Общими закономерностями электрического низкочастотного шума в материалах с низкой проводимостью успешно занимается Б.И.Якубович. Рентгеновскими методами исследуется текстура и магнитные свойства пленок в сопоставлении с их кристаллической структурой (А.В.Ковалев).

Лаборатория химии и спектроскопии материалов одной из первых в России синтезировала, изолировала и начала изучение фуллеренов (Ю.С.Грушко, М.Ф.Ковалев, С.Н.Колесник). Препаративные возможности лаборатории стали основой региональной исследовательской программы северо-запада России «Фуллерены и Атомные кластеры». В настоящее время лаборатория может получать фуллерен C₆₀ чистоты 99,9% в количестве сотен граммов и C₇₀ (98%) – десятков граммов (В.П.Седов, О.Н.Вавилова, В.В.Кукоренко).

В рамках методов Мёссбауэровской спектроскопии создана гибкая современная спектрометрическая система, позволяющая проводить исследования разного класса объектов (М.Ф.Ковалев, В.С.Козлов, Л.И.Молканов). Большой диапазон доплеровских скоростей спектрометра +/- 300 мм/сек позволяет работать с любым из известных мессбауэровских изотопов и дает возможность варьировать независимо температуру источника и поглотителя в диапазоне от 1,5 до 300 К.

Достижения последних лет связаны с исследованием органических сверхпроводников, суперионных стекол и интеркалационных соединений фуллеренов. Впервые наблюдались мёссбауэровские спектры на ядрах локализованных внутри углеродного кэйджа молекул металлофуллеренов (Ю.С.Грушко, В.С.Козлов, Л.И.Молканов). Изучены Dy@C₈₀ и Dy@C₈₂, обнаружено явление парамагнитной релаксации, перенос трех электронов с металла на углеродный кэйдж и сильная температурная зависимость фактора Дебая-Валлера.

И, наконец, следует отметить одно из важных для экспериментаторов достижений – изобретение и производство в нужных количествах эластичного и пастообразного защитных материалов (И.М.Лазебник, 2 патента). Это почти безводородные (менее 2% H) на основе пластической синтетической массы материалы с широким спектром возможных поглощающих наполнителей со степенью наполнения от 60 до 96 массовых процентов для защиты объектов сложной геометрической формы. Наполнители из тяжелых металлов (Pb, U, Bi и др.) используются для защиты от γ -излучения, из элементов и изотопов с большим сечением захвата нейтронов – для ней-

тронной защиты. Особым спросом пользуется материал с ${}^6\text{Li}$ с большим сечением захвата нейтронов, практически не дающий вторичного γ -излучения.

§ 5. Особенности исследований последнего десятилетия

Наконец, следует остановиться на этапе исследований последнего десятилетия, отмеченного значительными трудностями в связи с резким уменьшением финансирования науки в России и, как следствие, частичный отток научных кадров.

Основной задачей этого периода явилось обеспечение возможности проведения исследований и сохранение творческого потенциала лабораторий. В этой борьбе за существование науки основными слагающими успеха явились следующие. Во-первых, систематические усилия по поддержанию бюджетного финансирования на приемлемом уровне, обеспечению теплом и электроэнергией, обеспечению работы института со своей инфраструктурой. Важнейшая роль в этом принадлежит директору института члену-корреспонденту РАН В.А.Назаренко. Во-вторых, большое значение имеет в настоящее время международное сотрудничество, интеграция российской науки в мировую. Наличие различных фондов (ISF, INTAS и др.) оказывает заметное влияние на сохранение творческого потенциала науки.

Исключительно большое значение для нейтронных исследований имело вступление России в международный центр (Институт Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция) и финансовая поддержка Министерством науки России и Министерством РФ этого международного сотрудничества. Достаточно высокий уровень исследований, достигнутый в ПИЯФ, позволяет успешно конкурировать и достойно представлять Гатчинскую школу в этом международном центре. В 90-х годах сотрудниками ПИЯФ на реакторе ИЛЛ были выполнены исследования по β -распаду нейтрона и исследования с ультрахолодными нейтронами (А.П.Серебров, А.Г.Харитонов, И.А.Кузнецов, И.В.Степаненко, А.В.Алдушенков, М.С.Ласаков, А.В.Васильев и др.), исследования по физике деления (Г.А.Петров, А.М.Гагарский и др.), исследования нейтронно-оптических эффектов, вызванных слабым взаимодействием (А.П.Серебров, А.К.Петухов, Г.В.Вальский, Г.А.Петров и др.), исследования по магнито-кристаллической структуре вещества (В.П.Плахтий, С.В.Малеев и др.). ПИЯФ имеет широкое сотрудничество с Ган-Мейтнер институтом в Берлине, институтом Макса Планка, с Мюнхенским университетом и

рядом других международных исследовательских центров.

Третьим важнейшим фактором, позволяющим сохранять научную активность, является деятельность, связанная с разработкой и изготовлением экспериментального физического оборудования для зарубежных научных центров. Значительный потенциал интеллектуального и технологического характера, накопленный в связи с разработкой экспериментального оборудования для реактора ПИК, оказался исключительно важным в современных условиях. В Гатчине разработаны и изготовлены полярирующие нейтронные системы для ЛНФ ОИЯИ (Дубна), ИФМ (Екатеринбург), ИРИ ТУ Делфт (Голландия), ГКСС (Геестхахт, Германия), для реактора КАЕРИ (Южная Корея) и др., (А.Ф.Щебетов, В.А.Трунов и др.); дифрактометры для ЛНФ ОИЯИ (Дубна), ЛЛБ (Сакле, Франция), ГКСС (Германия), реактора ETRR-2 (Каир), КФКИ (Венгрия) и др., (В.А.Трунов, В.А.Кудряшев, А.П.Булкин и др.).

Источник холодных нейтронов был разработан, изготовлен и устанавливается на реакторе института КФКИ - Будапешт, Венгрия (А.П.Серебров, В.А.Митюхляев, А.А.Захаров и др.). Разрабатываются и изготавливаются полупроводниковые детекторы для Европы и Америки (А.Х.Хусаинов и др.).

В настоящее время ведется разработка ряда проектов для источников холодных нейтронов, нейтронных систем и физического оборудования для реактора HANARO (Южная Корея), реактора ETRR-2 в Каире (Египет), реактора в Делфте (Голландия) (А.П.Серебров, А.Ф.Щебетов, В.А.Митюхляев и др.).

Летом 1999 года в PSI была установлена поляризирующая нейтронная система и система анализа поляризации, которые были созданы и установлены сотрудниками ПИЯФ (А.Ф.Щебетов, А.П.Серебров, Б.Г.Песков, М.С.Ласаков, В.М.Пусенков, А.В.Васильев, Е.Н.Медведев и др.). В результате был получен пучок поляризованных холодных нейтронов с плотностью потока $2 \cdot 10^8$ н/с·см² и полным потоком выше 10^{10} н/с, который предназначен для проведения исследований β -распада нейтрона. Эта интенсивность равна интенсивности поляризованных холодных нейтронов пучка PF1 на высокопоточном реакторе LL. Данный результат был получен за счет высокого коэффициента вывода нейтронной системы.

В последние годы на реакторе ВВР-М были проведены исследования твердодейтериевого источника ультрахолодных нейтронов и источника УХН на основе тяжелого льда при 5 К (А.П.Серебров, В.А.Митюхляев, А.А.Захаров, М.С.Ласаков, А.В.Васильев, А.Г.Харитонов,

В.Е.Варламов, Р.Р.Тальдаев и др.). Эти исследования проведены в рамках международного сотрудничества с целью разработки так называемой фабрики УХН на базе высокоэнергетических ускорителей в Лос Аламосской национальной лаборатории (США) и PSI (Швейцария). Целью этих разработок в конечном счете является проведение эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона с точностью 10^{-27} е·см.

Отделением нейтронных исследований проводятся российские и международные конференции.

Таким образом, несмотря на сложности настоящего периода, научные исследования продолжаются, и хотелось бы надеяться, что их уровень будет, по крайней мере, сохраняться в дальнейшем.

От авторов

Здесь мы попытались кратко осветить основные вехи нашего 40-летнего пути и отметить некоторые избранные результаты.

Мы просим извинения у тех, кто “не попал в кадр” и чьи успехи несомненно являются вкладом в научные достижения Отделения нейтронных исследований.

Гатчинская Школа нейтронных исследований не могла бы состояться без добросовестного и порой самоотверженного труда инженерно-технического и производственного персонала реактора и исследовательских лабораторий. От лица всего научного коллектива ОНИ мы приносим им свою искреннюю благодарность.